



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
DE COMPUTAÇÃO



Otimização do sistema de supervisão e controle de uma planta de tratamento de resíduos utilizando plasma térmico

José Alberto Diaz Amado

Orientador: Prof. Dr. Andrés Ortiz Salazar

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN (área de concentração: Automação e Sistemas) como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Número de ordem PPgEE: D107
Natal, RN, 20 de Dezembro de 2013

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede

Catlogação da publicação na fonte.

Amado, José Alberto Diaz.

Otimização do sistema de supervisão e controle de uma planta de tratamento de resíduos utilizando plasma / José Alberto Diaz Amado. - Natal, 2013.
157 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Andrés Ortiz Salazar.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Planta inertização - Tese. 2. ICP - Tese. 3. Realidade mista - Tese. 4. Controle fuzzy - Tese. I. Salazar, Andrés Ortiz. II. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. III. Título.

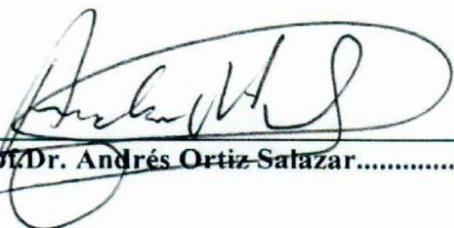
RN/UF/BCZM

CDU 621.3

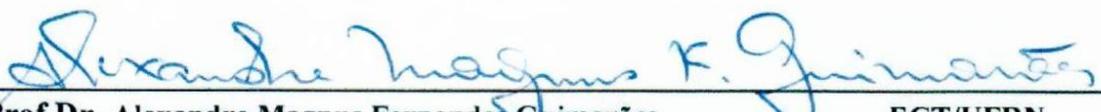
Otimização do sistema de supervisão e controle de uma planta de tratamento de resíduos utilizando plasma

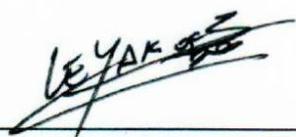
José Alberto Díaz Amado

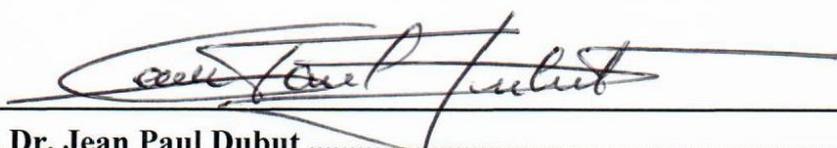
Tese de Doutorado aprovada em 20 de dezembro de 2013 pela banca examinadora
composta pelos seguintes membros:


Prof.Dr. Andrés Ortiz Salazar..... DCA/UFRN


Prof.Dr. Andre Laurindo Maitelli.....DCA/UFRN


Prof.Dr. Alexandre Magnus Fernandes Guimarães..... ECT/UFRN


Prof.Dr. Alberto Soto Lock.....UFPB


Prof. Dr. Jean Paul DubutINPE

*Va firme na direção das suas metas.
Porque o pensamento cria, o desejo
atrai e a fé realiza....*

Agradecimentos

Agradecer a Deus, pela vida e oportunidades que me tem dado, cheia de erros e vitórias, para assim um dia perceber que foi duro chegar até aqui e que sempre foi importante manter a fé.

Agradecer a minha família no Perú, que sempre esteve a meu lado durante todo este tempo, como também a minha mulher (Duda), que com seus conselhos, amor e apoio incondicional, me empurro a terminar este desafio.

Ao meu orientador Andrés Ortiz Salazar, o qual me mostrou o caminho a ser percorrido neste árduo trabalho, como também me brindo sua amizade e respeito.

Aos professores que fazem parte do grupo do DCA da UFRN.

A meus amigos e irmãos de trabalho e diversão: Diego e família, Glauco, Bernardino, Jacimario, e todos os demais colegas do LAMP, que fizeram parte desta experiência maravilhosa.

Ao Brasil, pela acolhida, apoio e oportunidades encontradas neste país.

Resumo

Um dos grandes e crescentes problemas enfrentados pela sociedade moderna é a alta produção de resíduos e os efeitos correlatos que eles produzem, tais como a degradação do meio ambiente e a poluição dos diversos ecossistemas, com reflexos diretos na qualidade de vida da população. As tecnologias de tratamento térmico têm sido largamente empregadas no tratamento destes resíduos e o plasma térmico vem ganhando importância no seu processamento de inertização

O objetivo deste trabalho está focado no desenvolvimento de um sistema otimizado de supervisão e controle aplicado a uma planta de processamento de resíduos e efluentes petroquímicos utilizando plasma térmico. O sistema é basicamente composto por uma tocha indutiva plasmática, reatores, sistema de lavagem/exaustão de gases e uma fonte de RF utilizada na geração de plasma.

O processo de supervisão e controle da planta é de suma importância no desenvolvimento do objetivo final. Por este motivo, foram criadas diferentes subsídios na procura de uma eficiência maior no processo, com geração de eventos, gráficos/distribuição e armazenamento de dados para cada subsistema da planta, processos de execução, controle e visualização 3D de cada subsistema da planta, entre outros.

Foi criada uma plataforma de comunicação entre a arquitetura virtual da planta 3D e uma estrutura de controle real (*hardware*). O objetivo é utilizar os conceitos de realidade mista e desenvolver estratégias de diferentes tipos de controle que permitam manipular a planta 3D sem restrições e horários, além de otimizar o processo real.

Os estudos mostraram que uma das melhores formas de implementar o controle de geração de plasma indutivo é utilizar técnicas de controle inteligente, seja pela sua eficiência nos resultados seja pela sua acessível implementação, sem precisar de um modelo específico. A estratégia de controle utilizando lógica Fuzzy (PI-Fuzzy) foi desenvolvida e implementada, e os resultados mostraram condições satisfatórias em tempo de resposta e viabilidade.

Palavras chaves: Planta Inertização, ICP, Realidade mista e Controle Fuzzy.

Abstract

A major and growing problems faced by modern society is the high production of waste and related effects they produce, such as environmental degradation and pollution of various ecosystems, with direct effects on quality of life. The thermal treatment technologies have been widely used in the treatment of these wastes and thermal plasma is gaining importance in processing blanketing.

This work is focused on developing an optimized system of supervision and control applied to a processing plant and petrochemical waste effluents using thermal plasma. The system is basically composed of a inductive plasma torch reactors washing system / exhaust gases and RF power used to generate plasma.

The process of supervision and control of the plant is of paramount importance in the development of the ultimate goal. For this reason, various subsidies were created in the search for greater efficiency in the process, generating events, graphics / distribution and storage of data for each subsystem of the plant, process execution, control and 3D visualization of each subsystem of the plant between others.

A communication platform between the virtual 3D plant architecture and a real control structure (hardware) was created. The goal is to use the concepts of mixed reality and develop strategies for different types of controls that allow manipulating 3D plant without restrictions and schedules, optimize the actual process.

Studies have shown that one of the best ways to implement the control of generation inductively coupled plasma techniques is to use intelligent control, both for their efficiency in the results is low for its implementation, without requiring a specific model. The control strategy using Fuzzy Logic (Fuzzy-PI) was developed and implemented, and the results showed satisfactory condition on response time and viability.

keywords: Inertization Plant , ICP, Mixed Reality and Fuzzy Control.

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	ii
Lista de Tabelas	iii
1 Introdução	1
1.1 Motivação da pesquisa	1
1.2 A proposta.....	2
1.2.1 Objetivo.....	2
1.2.2 Contribuições para o estado da arte (publicações)	3
1.2.3 Aplicações	4
1.3 Organização do trabalho	4
2 Processo de Inertização de resíduos	6
2.1 Matérias tóxicas	7
2.2 Decomposição Térmica	7
2.3 Tecnologias de tratamento térmico	8
2.4 Plasma.....	11
2.5 Tocha de Plasma	13
2.6 Empresas que trabalham na inertização de resíduos por plasma	17
2.7 Conclusões:.....	19
3 Planta de Inertização de resíduos	20
3.1 Arquitetura do sistema de controle e automação	20
3.2 Descrição do processo de inertização de resíduos	23
3.2.1 Princípio de funcionamento	23
3.3 Descrições dos subsistemas da planta.....	26
3.3.1 Ingresso de resíduos	26
3.3.2 Fonte RF.....	27
3.3.3 Sistemas plasmáticos.....	31
3.3.4 Sistemas de Refrigeração	33
3.3.5 Sistema de Lavagem.....	34
3.4 Conclusões	35

Sumário

4	Controle na geração de plasma	36
4.1	Estado da arte.....	36
4.2	Estratégia de controle na geração de plasma indutivo.....	43
4.3	Análise das variáveis de controle utilizadas no processo de geração ICP .	46
4.3.1	Controladores lógicos programáveis.....	46
4.3.2	Fontes RF.....	48
4.3.3	Sistemas de refrigeração.....	52
4.3.4	Sistema plasmático.....	53
4.3.5	Sensor de temperatura.....	54
4.4	Controle Fuzzy.....	56
4.5	Controle Emulado.....	62
4.6	Desenvolvimento do controle.....	66
4.7	Conclusões.....	70
5	Otimização do processo de Inertização	71
5.1	Arquitetura virtual da planta de eliminação de resíduos utilizando realidade mista.....	71
5.1.1	Desenvolvimento da arquitetura de realidade mista.....	75
5.1.2	Implementação da arquitetura de realidade mista.....	80
5.1.3	Realidade Mista.....	85
5.2	Sistemas de supervisão e aquisição de dados da planta de tratamento de resíduos.....	89
5.2.1	Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados.....	90
5.2.2	Ingresso de resíduos.....	94
5.2.3	Sistema de refrigeração.....	95
5.2.4	Sistema de lavagem.....	97
5.2.5	Fonte de rádio frequência.....	97
5.2.6	Controle na geração de plasma.....	100
5.2.7	Emulador virtual.....	100
5.3	Conclusões.....	101
6	Resultados Obtidos	102
6.1	Otimização do processo de inertização.....	102
6.1.1	Realidade mista aplicada na planta virtual.....	102
6.1.2	Sistema supervisor da planta de eliminação de resíduos.....	107
6.2	Fontes de rádio frequência.....	108
6.2.1	Conversor CA/CC.....	108

Sumário

6.2.2	Conversor CC/CA ressonante	111
6.2.3	Simulação da fonte de rádio frequência	111
6.3	Otimização na implementação do controle fuzzy na geração de plasma.....	113
7	Conclusões gerais e perspectivas	119
7.1	Conclusões gerais	119
7.2	Trabalhos futuros	120
	Referências bibliográficas	121
A	Planta de eliminação de resíduos por plasmas	132
B	Estrutura utilizada para o controle do processo de geração de plasma	138
C	Aquisição de dados no controle de geração de plasma	140
D	Sensor PT- 100	141

Lista de Figuras

2.1	Evolução do processo de inertização de resíduos, [Felipini 2005].	9
2.2	Tocha de plasma de acoplamento indutivo, [Wang 1999].	14
2.3	Diagrama de uma tocha de ICP e a bobina de RF mostrando a formação do plasma, [Wang 1999]. a) O argônio gasoso (Ar) é introduzido na tocha na forma de redemoínho. b) A aplicação de uma corrente de alta frequência sobre a bobina de indução gera um campo magnético oscilante. c) A faísca produz alguns elétrons livres no argônio. d) Os elétrons livres são acelerados pelo campo magnético produzido pela bobina de indução, provocando a ionização do gás, produzindo mais elétrons e iniciando um processo em cascata. e) A amostra, na forma de aerossol, é introduzida diretamente no plasma por meio do capilar	15
2.4	Dimensões da tocha de acoplamento indutivo de plasma (milímetros)	16
3.1	Arquitetura da planta de inertização de resíduos utilizando plasma	22
3.2	Descrição da planta de inertização de resíduos.	23
3.3	Estrutura do subsistema "Ingresso de resíduos".	26
3.4	Conversor CA/CC	28
3.5	Conversor CC/CA.	30
3.6	Simulação da fonte RF.	31
3.7	Esquema básico de controlador de fluxo mássico, [Guimarães 2009].	32
3.8	Simulação do circuito gerador de alta tensão usando um transformador <i>flyback</i> .	32
3.9	Sistema plasmático na tocha ICP	33
3.10	Sistema de refrigeração de água.	33
3.11	Sistema de lavagem de gases.	34
4.1	Arquitetura do sistema ICP, [Chaung Lin - 2009].	38
4.2	Arquitetura do sistema de controle de lógica Fuzzy	38
4.3	Modelo ANFIS de densidade, vazão de íons e temperatura.	40
4.4	Diagrama esquemático da sonda flutuante.	41

4.5	Diagrama esquemático do aparelho experimental.	42
4.6	Tocha ICP - variáveis de controle.	43
4.7	Controle Fuzzy com múltiplas entradas e uma saída.	44
4.8	Estratégia de controle Fuzzy aplicado na geração de plasma indutivo.	45
4.9	Arquitetura de controle: Supervisor - CLP - variáveis de controle.	47
4.10	Monitoramento e controle na fonte RF.	48
4.11	Circuito condicionador CLP - Conversor Boost.	49
4.12	Circuito de referência de tensão de saída.	50
4.13	Circuito de sensoriamento de tensão cc do conversor Boost.	51
4.14	Diagrama esquemático do circuito de detecção de cruzamento por zero, [Dubut 2010].	52
4.15	Esquemático do sistema de refrigeração e o sistema plasmático.	53
4.16	Esquemático de ligação do sistema de ignição.	54
4.17	Aquisição de temperatura utilizando um pirômetro infravermelho.	55
4.18	Diagrama de blocos do sistema de controle PI-Fuzzy.	57
4.19	Inferência.	59
4.20	Circuito serie ressonante.	63
4.21	Sistema emulado na geração de plasma.	63
4.22	Estratégia de controle Fuzzy aplicado no sistema emulado de geração de plasma indutivo.	64
4.23	Circuito condicionador para o sensor PT100.	65
4.24	Funções de pertinência da entrada de erro do bloco PI-Fuzzy do conversor trifásico Boost.	66
4.25	Funções de pertinência da entrada de erro do bloco PI-Fuzzy do conver- sor trifásico Boost.	67
4.26	Funções de pertinência de saída do bloco PI-Fuzzy do conversor trifásico Boost.	67
4.27	Funções de pertinência da entrada de erro do bloco PI-Fuzzy do sistema de refrigeração de água.	68
4.28	Funções de pertinência da entrada de erro do bloco PI-Fuzzy do sistema de refrigeração de água.	68
4.29	Funções de pertinência de saída do bloco PI-Fuzzy do sistema de refrige- ração de água.	69
5.1	Realidade mista - exemplo de interconexão de processos reais e virtuais, [Schaf 2011].	73

5.2	Placa de desenvolvimento Spartan-3E.....	78
5.3	Diagrama elétrico da conexão entre o FPGA - LCD.	79
5.4	Diagrama elétrico dos 8 leds e as 4 chaves de comutação da placa de desenvolvimento Spartan-3E.	79
5.5	Vista lateral esquerda da planta de eliminação de resíduos em 3D.....	81
5.6	Vista lateral inclinada esquerda da planta de eliminação de resíduos em 3D.	81
5.7	Sistema de refrigeração de água em 3D.....	81
5.8	Queimador a gás em 3D.....	82
5.9	Fonte de alimentação de rádio frequência em 3D.....	82
5.10	Desenho 3D do exaustor, tocha ICP e esteira rolante.	83
5.11	Desenho 3D do reator principal.	83
5.12	Lógica de comunicação entre o LabVIEW- Placa desenvolvimento FPGA Spartan-3E.	85
5.13	Implementação da arquitetura de realidade mista.....	86
5.14	Fluxograma da arquitetura de realidade mista.	86
5.15	Sistema de supervisão principal do emulador virtual.	87
5.16	Sistema de supervisão principal do emulador virtual.	88
5.17	Fluxograma do processo de controle.	88
5.18	Sistemas de supervisão e aquisição de dados da planta de tratamento de resíduos.	91
5.19	Fluxograma do funcionamento lógico do Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados da planta de tratamento de resíduos.....	93
5.20	Tela principal do subsistema Ingresso de resíduos.	94
5.21	Fluxograma do funcionamento lógico do subsistema Ingresso de resíduos.	95
5.22	Tela principal do subsistema Sistema de refrigeração.	96
5.23	Fluxograma do funcionamento lógico do subsistema Sistema de refrigeração	96
5.24	Tela principal do subsistema Sistema de lavagem.	98
5.25	Fluxograma do funcionamento lógico do subsistema Sistema de lavagem.	98
5.26	Tela principal do subsistema Fonte de rádio frequência.	99
5.27	Fluxograma do funcionamento lógico do subsistema Fonte de rádio frequência.....	99
5.28	Tela principal do subsistema Controle de plasma.	101
6.1	Esteira rolante 3D transportando o resíduo.	103
6.2	Simulando a esteira rolante 3D.	103
6.3	Interação de controle entre o sistema supervisor (gerenciador) e a porta de alimentação (virtual) em modo manual.	104
6.4	Interação de controle entre o sistema supervisor (gerenciador) e a porta de alimentação / porta corta fogo (virtual) em modo manual.	105

6.5	Interação de controle entre o sistema supervisor (gerenciador) e porta de escoria (virtual) em modo manual.	105
6.6	Implementação do processo de realidade mista na planta de inertização de resíduos por plasma.	106
6.7	Sistema supervisor da planta de eliminação de resíduos por plasma.	107
6.8	Sincronismo entre os pulsos PWM para cada Fase.	108
6.9	Sincronismo entre os pulsos PWM e o circuito detector de polaridade: a) Rede trifásica - Fase A, b) Rede trifásica - Fase B, C) Rede trifásica - Fase C.	109
6.10	Sincronismo entre o pulso PWM-A com a tensão da Rede trifásica - Fase A.	109
6.11	Sincronismo entre o pulso PWM-A com a corrente da Rede trifásica - Fase A.	110
6.12	Tensão e corrente da Rede trifásica -Fase A.	110
6.13	(a) Frequência de ressonância e (b) Pulso de saída da Unidade Geradora de Sincronismo e Controle (UGSC).	111
6.14	Medições no circuito ressonante: (a) Tensão do capacitor ressonante e pulso do UGSC; (b) Tensão primário e secundário do transformador de acoplamento; e tensão no capacitor ressonante.	112
6.15	Resultados de simulação da fonte de rádio frequência.	112
6.16	Curva de temperatura no controle de geração de plasma de subida (35_C , 43_C , 50_C , 58_C).	113
6.17	Curva de temperatura no controle de geração de plasma de descida (58_C , 50_C , 43_C).	114
6.18	Controle na temperatura do sistema emulado, a) Incremento de temperatura e b) Incremento/ decrémento de temperatura.	115
6.19	Gráfico do erro de controle.	115
6.20	Gráficos de controle do conversor trifásico Boost.	116
6.21	Gráficos de controle no sistema de refrigeração de ar.	116
6.22	Gráficos de controle no sistema de refrigeração de água.	116
6.23	Supervisor de controle de temperatura (40_C, 47_C, 56_C, 60_C, 53_C, 45_C).	117
6.24	Gráficos das variáveis de controle: a) Controle temperatura, b) Tensão e potência da fonte RF, c) Erro de controle, d) Vazão de água, e) Vazão do ar.	118
A.1	Conversor Booster trifásico	132
A.2	Estrutura da planta de eliminação de resíduos por plasma	133
A.3	Sistema de refrigeração por água da tocha ICP	134
A.4	Gaveta de controle do CLP	134
A.5	Fonte de rádio frequência	135
A.6	Queimador a gás	136
A.7	Tocha de plasma de acoplamento indutivo - ICPT	136
A.8	Dispositivos de controle de vazão de gás e ar e do acionamento pneumático das portas do reator principal	137
A.9	Exaustor de gases para o meio ambiente	137
B.1	Circuito ressonante implementado para o controle de geração de plasma (a) vista de cima, (b) vista por trás (c) vista frontal	138
B.2	Sistema completo utilizado para o processo de geração de plasma	139

B.3	Sistema emulador do processo de geração de plasma	139
C.1	Aquisição de dados do controle, mostrados em um arquivo .txt	140
D.1	Tabela fornecida pelo fabricante que relaciona a resistência da PT100 com 5.1 a temperatura	141

Lista de Tabelas

3.1 Parâmetros de Projeto.	29
4.1 Valores obtidos no sensoriamento da tensão CC.	51
4.2 Matriz de associação Fuzzy.	58
4.3 Principais t-normas e t-conormas duais.	60
4.4 Regras de saída do controle PI-Fuzzy do conversor trifásico Boost.	67
4.5 Regras de saída do controle PI-Fuzzy do sistema de refrigeração de água.	68

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo, serão definidos os principais objetivos a serem alcançados neste trabalho e a sua distribuição de conteúdo.

1.1 Motivação da pesquisa

Na definição desta proposta e com o aprimoramento desta pesquisa, foram identificados os seguintes pontos de motivação:

- É possível dar uma solução mais eficiente ao processo de inertização de resíduos, os quais são, muitas vezes, descartados inadequadamente, trazendo danos a seres vivos, solo férreo, mares e outros.
- É possível aplicar meios de otimização no processo de supervisão e controle na inertização de diversos resíduos, procurando extrair o melhor rendimento.
- É possível implementar técnicas de controle inteligente no processo de geração de plasma indutivo.
- É possível projetar uma plataforma virtual que disponibilize a planta real em 3D e permita a interação entre ambientes virtuais e reais. Por meio dela é possível, também, melhorar a estrutura mecânica real e seus princípios de funcionamento.
- É possível mostrar que, atualmente, não existem empresas no mercado laboral que utilizem como processo de geração de plasma o método de acoplamento indutivo (ICP) para inertizar os resíduos. Vale salientar que esta é a principal motivação deste trabalho.

1.2 A proposta

O foco deste trabalho está na otimização dos processos já elaborados parcialmente e na sua continuidade. Para isto, foram estudadas diferentes ferramentas que ajudaram a ter um desempenho mais promissor e eficiente.

1.2.1 Objetivo

O objetivo é aperfeiçoar o processo de funcionamento de uma planta piloto, capaz de inertizar resíduos diversos, sem gerar poluentes ao meio ambiente, e contar com o auxílio eficiente de um sistema automatizado. Para atingir o objetivo principal do trabalho, foram definidos e cumpridos os seguintes objetivos específicos (ou metas):

- O supervisor da planta real foi otimizado, utilizando os seguintes recursos:
 - Escolha personalizada do resíduo a ser tratado.
 - Login de segurança para começar a efetuar as operações.
 - Escolha do tipo de processo a ser executado.
 - Status das condições iniciais dos subsistemas.
 - Status dos contadores, bombas e motores.
 - Gráficos de acompanhamento das variáveis de processo.
 - Sinalização visual e sonora de alarme.
 - Visualização das variáveis de controle manual e controle PI-Fuzzy.
 - Parada de emergência do processo.
 - Armazenamento dos dados fornecidos pelas variáveis do sistema.
 - Visualização e controle individual de cada subsistema do processo.
 - Supervisão da emulação do processo por meio de um controle virtual e do desenho da planta em 3D, utilizando uma arquitetura de realidade mista.
- Utilizando os recursos de otimização encontrados na realidade mista, foi implementada a planta de inertização de resíduos em uma arquitetura virtual 3D, que é controlada por meios externos (*hardware*). Com este processo, foi possível ter uma visão da interação entre as partes envolvidas. O objetivo é poder ter acesso aos recursos da planta, sem estar fisicamente presente, além de ter uma plataforma que nos permita implementar técnicas de controle e monitoramento no processo da planta.
- Outro ponto importante de otimização nesta pesquisa está focado no aprimoramento do sistema de controle na parte de geração de plasma. Utilizando a lógica Fuzzy, foi

implementada uma estratégia de controle com cinco variáveis, colocando em evidência a estrutura de cada variável envolvida, bem como a justificativa no processo de emulação.

- A integração de diferentes trabalhos desenvolvidos separadamente (dois doutorados e dois mestrados) foi um dos desafios a ser superado, sendo necessário ter conhecimento de cada um deles para poder, finalmente, integrar tudo de forma coerente.

1.2.2 Contribuições para o estado da arte (publicações)

Durante o desenvolvimento das pesquisas desta tese, houve, efetivamente, contribuição para a comunidade, com publicações significativas em eventos científicos com visibilidade nacional e internacional a saber:

Revista:

- Diaz-Amado, J. A. ; Salazar A. O. ; Dubut J. ; Souto, A. ; Cipriano, G. ; Pinheiro, R. "Conversor Cc-Ca De Alta Frequência Utilizando Inversores Ressonantes Com Comutação Sequencial". *Eletrônica de Potência (Impresso)*, v. 17, p. 744-752, 2012.

Conferências:

- Diaz-Amado, J. A. ;Dubut J. ; Salazar, A. O. "Experimental analysis of a series resonant converter for a Plasma Inertization Plant". *IECON-2010, 36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, CFP10IEC-CDR, Phoenix, AZ, USA, 20 dez. 2010.*
- Diaz-Amado, J. A. ; Barbosa, G. ; Dubut J. ; Salazar A. O. "Modeling and Simulation of High Voltage and Frequency Planar Transformer to a Plasma Inertization Plant". *11th Joint MMM/Intermag Conference, Washington D.C. USA, 2010.*

Congressos:

- Diaz-Amado, J. A. ; Salazar A. O. ; Cipriano, G. ; Bernardino, J. ; Dubut J. ; Souto, A. ; Quinates, F. "Estudo e simulação de uma tocha de plasma térmico com acoplamento indutivo". *VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2012, São Luis. CONEM - VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2012.*
- Diaz-Amado, J. A.; Moreira, A. ; Soares, J. "O ensino da engenharia por meio de laboratórios virtuais:softwares de automação industrial". *XI Congresso brasileiro de educação em engenharia - COBENGE, 2012, Belém. XICongresso brasileiro de educação em engenharia, 2012.*

- Diaz-Amado, J. A. ; Moreira, A. "O Ensino da Engenharia Por Meio de Laboratórios de Simulação Computacional: PSPICE, Uma Reflexão Sobre a Importância do Uso da Simulação na Análise de Circuitos Elétricos e Eletrônicos". Congresso Norte Nordeste de pesquisa e inovação, 2012, Tocantins. VII CONNEPI 2012, 2012.
- Diaz-Amado, J. A. ; Salazar, A. O. ; Barbosa, G. ; Dubut J. "Simulation and Project of higt frequency transformer applied to plasma plant". XI Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, 2011, Natal. XI Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, 2011.
- Diaz-Amado, J. A. ; Barbosa, G. ; Salazar A. O. ; Dubut J. "Projeto e Simulação de um Transformador Planar de Alta Tensão e Frequência em uma Planta de Inertização a Plasma". Intercon 2010 - Peru, 2010, Puno. Intercon 2010. Puno, 2010. v. 1.

Em andamento:

- "Automation System Applied to a Plasma Inertization Plant", I2MTC IEEE International instrumentation and Measurement Technology Conference, Montevideo, Uruguay, 2014.

1.2.3 Aplicações

Utilizando a estrutura desenvolvida neste trabalho, é possível aproveitá-la para outras aplicações:

- Na arquitetura de controle implementada na planta, que poderia dar suporte a outras estratégias de controle inteligente, como por exemplo ANFIS.
- Nos conceitos utilizados de realidade mista, como também na plataforma desenvolvida, que poderiam ser usados em outras áreas, como a educação, em que a interação entre um processo real e um virtual ajudaria a complementar o desenvolvimento prático laboratorial no ensino, já que este é, muitas vezes, de custo elevado.

1.3 Organização do trabalho

O presente documento está dividido em sete capítulos. Após a introdução apresentada neste primeiro capítulo, exploram-se, no capítulo dois, o processo de inertização de resíduos por plasmas bem como as empresas que trabalham neste ramo. No capítulo três,

é feita uma descrição geral da topologia atual da planta, descrevendo seus subsistemas e seu funcionamento ideal. O capítulo quatro mostra a implementação da nova estratégia de controle PI-Fuzzy na geração do plasma indutivo. No capítulo cinco, descrevem-se os processos de otimização de controle e monitoramento da planta real e da virtual por meio da realidade mista. Os resultados obtidos no processo de otimização são analisados no capítulo seis. No capítulo sete, são esboçadas as conclusões e perspectivas desta tese. Os apêndices e anexos contêm informações complementares para o melhor entendimento do trabalho.

Capítulo 2

Processo de Inertização de resíduos

A quantidade de resíduos sólidos gerados no Brasil em 2011 totalizou 61,9 milhões de toneladas, 1,8% a mais do que no ano anterior. Os dados são do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2011, lançados pela Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais [Abrelpe 2010]. Do total coletado, 42% acabam em local inadequado. O resultado são danos ao meio ambiente, prejuízos à saúde da população e violação de outros direitos básicos assegurados na constituição federal [Albuquerque 2012].

A visão dos resíduos como problema a ser enfrentado só se firmou no século XIX, quando a revolução industrial instituiu um novo patamar de tecnologia de conforto nos produtos e, como consequência, um novo volume de resíduos. Os resíduos, a partir de então, passaram a ser vistos como causadores de várias doenças e também como um desafio para a humanidade. A industrialização incorporou ao cotidiano das pessoas uma série de novos produtos, dentre eles o plástico. O impulso industrial também contribuiu para o surgimento das metrópoles e, com mais pessoas ocupando determinado espaço, mais detritos se acumulam [Buss & Pellegrini 2008].

Por dia, cada ser humano joga fora quase um quilo de resíduos. Por ano, uma pessoa consome: com papel, em média, duas árvores; noventa latas de bebida; quarenta e cinco quilos de plástico; cento e sete garrafas ou frascos de vidros; e setenta mil litros em água [Buss & Pellegrini 2008].

Em todo o planeta, só de resíduos domiciliares, são produzidos mais de dois milhões de toneladas por dia, mais de seiscentos milhões de toneladas por ano. Os produtos descartáveis, por exemplo, invadiram o dia a dia das pessoas. Foram trazidos pela conveniência. No entanto, apesar de mais práticos, constituem um grande problema na hora de serem descartados. Os depósitos transbordam de embalagens plásticas (que levam até quinhentos anos para se decompor); de papéis (que levam de três a seis meses); e de vidro (que levam mais de quatro mil anos). Os resíduos depositados de forma inadequada

contaminam o solo, os lençóis freáticos, os rios e facilitam a exposição humana a agentes patogênicos, causadores de doenças [Carlos 2007].

Neste contexto, várias soluções vêm sendo pensadas para lidar com este problema, e ele próprio vem se transformando em um grande negócio. Em geral, 90% do que é descartado pode ser reciclado, reaproveitado, transformado em outros produtos [Ferreira 2007].

Dessa forma, contribui-se não só para reduzir o desperdício, mas, também, o impacto ambiental. Um dos compromissos firmados na Conferência Mundial do Meio Ambiente (Rio 92), realizada em 1992, no Rio de Janeiro, é que os resíduos passassem a ser tratados, tendo em vista está hierarquia: reduzir produção; reutilizar; reciclar. Na União Europeia, o segmento de coleta, tratamento e reciclagem movimenta o equivalente a quarenta e oito bilhões de dólares e, no Japão, quarenta e um bilhões. No Brasil, são apenas dez bilhões [Padovani 2007].

2.1 Matérias tóxicas

A vida humana sempre foi ameaçada por materiais tóxicos, existentes naturalmente no meio ambiente, como arsênio, metais pesados e outros compostos tóxicos emitidos na combustão de lenhas. Porém estes perigos aumentaram nas sociedades industrializadas, devido à extração de minérios e combustíveis fósseis em enormes quantidades e ao uso em larga escala de compostos tóxicos que permanecem no meio ambiente por longo período de tempo, tais como agrotóxicos, reagentes industriais e diversos materiais utilizados na vida diária de pessoas. A agência de substâncias tóxicas e registro de doenças [ATSDR 2006] lista duzentas e setenta e cinco substâncias ou classes de substâncias perigosas com as respectivas descrições de características e efeitos à saúde humana por parte de cada um. Materiais classificados como perigosos incluem alguns bem familiares e de uso diário, tais como baterias, óleo de carros, inseticidas e tintas. Os vinte mais perigosos incluem materiais familiares como arsênio, chumbo, mercúrio, cádmio, cloreto de vinil, benzeno, clorofórmio e outros [IEAv 2006].

2.2 Decomposição Térmica

Há comprovação de impactos tanto no meio ambiente quanto na saúde humana. Muitas vezes, eles são causados por incineradores, fornos de cimento e outros sistemas de combustão, o que tem provocado forte oposição à incineração. Esses fatores, bem como as

crescentes necessidades associadas ao gerenciamento das emissões atmosféricas e de outros resíduos, têm estimulado o desenvolvimento de novas tecnologias [Mujjebur 2000], [Cunha 2009].

Como alternativa à incineração tradicional, diversos processos baseados na decomposição térmica vêm sendo desenvolvidos, para emprego no tratamento de resíduos perigosos. Os métodos de decomposição térmica mais importantes são:

- Reator elétrico de alta temperatura.
- Plasma gerado por arco elétrico.
- Plasma gerado por indução magnética.
- Oxidação em água em estado supercrítico.
- Oxidação em metais fundidos.
- Oxidação em escórias fundidas.
- Oxidação em sais fundidos.

2.3 Tecnologias de tratamento térmico

As tecnologias de tratamento térmico têm sido largamente empregadas no tratamento de resíduos. O plasma térmico vem ganhando importância no processamento de resíduos perigosos, incluindo resíduos organoclorados, lamas de eletrodeposição, borras de produção de alumínio, resíduos de petróleo [Costa 2007], sucatas metálicas, cinzas de incineração e resíduos hospitalares [Menezes 1991]. O plasma completa ou substitui com vantagens as tecnologias tradicionais, já que é uma opção limpa, definitiva, segura e competitiva, e ainda mais importante, não gera outros resíduos [Cubas 2004], [Felipini 2005].

Até alguns anos atrás, o processamento de calor era tipicamente limitado pelo uso de combustíveis, mas um grande avanço nas tecnologias de aquecimento, atualmente, oferece opções muito mais eficientes (Ver figura 2.1).

A partir de 1973, com a Crise de Energia, a pirólise por plasma passou a ser exaustivamente estudada, pois, como processo, é um dos mais reversíveis. A palavra pirólise vem do grego *pyrós* (fogo) + *lysis* (dissolução). Ela permite a recuperação de energia por meio da decomposição térmica dos detritos em atmosfera controlada [Felipini 2005].

A Pirólise por plasma é uma tecnologia que associa as altas temperaturas geradas pelo plasma com a pirólise dos resíduos. Variantes do processo vêm sendo estudadas há mais de 15 anos. O processo de pirólise pode ser definido como a ruptura de uma estrutura molecular original, a decomposição ou a alteração de um composto pela ação do calor em um ambiente com pouco ou nenhum oxigênio [Cubas 2003]. Os processos

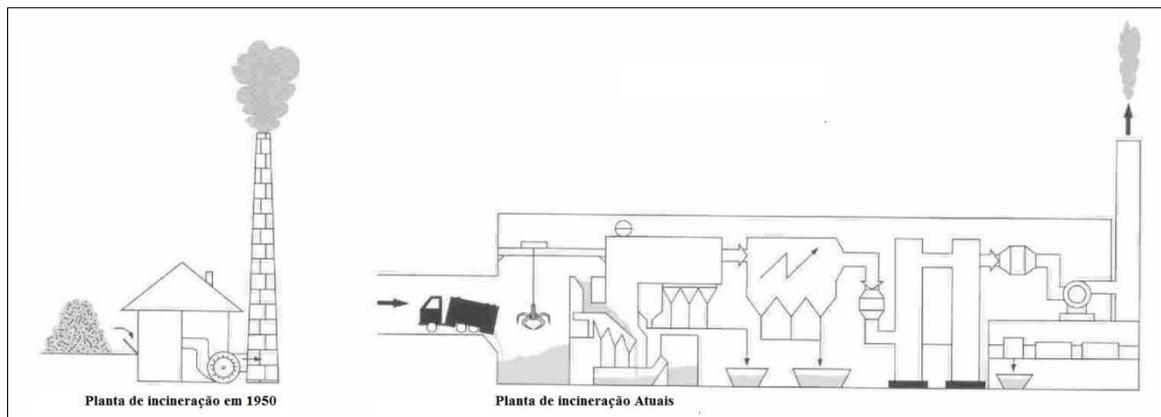


Figura 2.1: Evolução do processo de inertização de resíduos, [Felipini 2005].

pirolíticos são endotérmicos, ao contrário do processo de gaseificação ou de incineração, sendo necessário fornecer externamente calor ao sistema para que a reação de pirólise seja concretizada.

Um sistema de plasma térmico oferece um controle maior na temperatura, tempo de reação mais rápido, melhor controle de processamento, menores custos, maior processamento e uso mais eficiente da energia, se comparado com os métodos convencionais [Prieto & Prieto 2003].

Transformar resíduos perigosos em resíduos inofensivos ao meio ambiente, que podem ser inclusive reaproveitados em outros processos, é o enorme atrativo das tecnologias de tratamento com plasma térmico. A tendência mundial em se utilizarem, cada vez mais, tecnologias de destruição térmica dos componentes ativos nos resíduos a elevadas temperaturas promove grande redução do volume, inertização e vitrificação dos resíduos, [Boulos 1991].

Os processos conhecidos de plasma térmico que estão em uso ou desenvolvidos em vias de comercialização são: recobrimento físico e químico à plasma; síntese de pós finos; decomposição à plasma; metalurgia à plasma; densificação de refratários e outros materiais, além das conhecidas máquinas de corte à plasma [Boulos 1991].

Os principais atrativos do uso de plasma na decomposição térmica de substâncias são:

- Elevadas temperaturas que causam rápida e completa pirólise da substância orgânica e que fundem e podem vitrificar certos resíduos inorgânicos.
- Alta densidade de energia que possibilita a construção de reatores com menores dimensões para as mesmas capacidades e que também favorece a construção de equipamento móvel.
- Uso de energia elétrica, que reduz a vazão total de gás e, dessa forma, resulta em

menores instalações para processamento dos gases exaustos. Grande número de opções de gases para geração do plasma torna flexível o controle sobre os fatores químicos do processo.

- Uso de menores instalações e de alta densidade de energia, para que tempos de partida e paradas sejam reduzidos.
- Favorecimento da pirólise de substâncias sensíveis à radiação ultravioleta, como os organoclorados.
- Ocorrência de aplicações de eliminação de resíduos tóxicos, gerados por plantas nucleares e plantas de processamento.
- Finalmente, o processo de produção de "*spinoffs*" ou produtos estáveis, ambientalmente falando, que podem ser re-utilizados como material agregado [Morrow & Crain 1998].

O plasma térmico pode ser produzido por meio do fornecimento de energia térmica ou elétrica a certa quantidade de gás, tendo como mecanismo básico o aquecimento e a ionização de gás, o que provoca a liberação de elétrons dos átomos ou moléculas [Fauchais & Vardelle 1991]. Diversas técnicas são empregadas para promover tais mecanismos. Uma das mais utilizadas é baseada na interação entre o gás a ser ionizado e o arco elétrico de elevada intensidade, onde os elétrons da corrente colidem com os constituintes do gás e o processo gera um número adequado de portadores de carga elétrica, tornando o gás condutor [Felipini 2005], [Boulos 1999]. Outro método é o de passagem de ondas eletromagnéticas (plasma de microondas) e, finalmente, o método de descarga de rádio frequência [D. Gomeza & Boccaccinia 2009], que está sendo desenvolvido neste trabalho.

Aplicações de tochas industriais baseadas em plasma térmico requerem elevada eficiência da conversão de energia da rede elétrica para o plasma, com ignição e descargas estáveis, estrutura da tocha confiável, entre outros [Roth 2001]. Os recentes dispositivos semicondutores de chaveamento em potência, junto com os microprocessadores, permitem o uso de fontes de alimentação em altas frequências e altas potências para produção de plasma [Liao 2002]. A eficiência de uma fonte RF fica em torno de 90%, o que é consideravelmente alto, se comparado com as fontes convencionais lineares [Adachi 2000].

Os tipos de material que o plasma pode inertizar são os seguintes [UNUIAS 1998]:

- Cinzas Tóxicas (cinza leve e cinza pesada).
- Pneus.
- Solo Contaminado.
- Borra de Tinta.

- Papel contaminado.
- Borra de Óleo.
- Resíduo urbano.
- Resíduo hospitalar.
- Gases tóxicos.
- Resíduo tóxico industrial.
- Resíduo radioativo.
- Resíduos de petróleo.

O plasma pode gerar gases de síntese (gaseificação), a partir do material, e gerar energia elétrica também [Council 1995].

2.4 Plasma

O termo **plasma** foi pioneiramente empregado na física, para um gás parcialmente ionizado, pelo cientista americano Irving Langmuir, em 1929 [Mitchner & Kruger 1873]. Estado de plasma, porém, é frequentemente designado como "o quarto estado da matéria" (sólido, líquido, gás e plasma), pois estima-se que mais de 99% da matéria conhecida do universo encontra-se em tal estado [KeittaniI & Hoyaux 1973], [Dendy 1995].

Para transformar um gás em plasma, é necessário fornecer energia para produzir íons. O mecanismo de ionização pode ser térmico, por radiação ou por descarga elétrica. A energia de ionização do átomo depende da sua estrutura, sendo superior à energia de ligação do elétron mais externo. Os elementos mais facilmente ionizáveis são os alcalinos monovalentes, e os mais difíceis são os gases nobres. A forma mais comum de formar um plasma, em laboratório, é por meio de descargas elétricas. A ionização em uma descarga depende da produção de uma avalanche de elétrons, com a energia transferida por diferentes mecanismos [M. Boulos & Pfender. 1994].

Os plasmas são categorizados como naturais ou de laboratório. Como exemplos de plasmas naturais, citam-se: corona solar, nebulosas, vento solar, aurora boreal, descarga elétrica atmosférica, centro do Sol, chamas, ionosfera terrestre. Com relação aos plasmas de laboratório, "ou plasmas gerados pelo homem", basicamente, podem ser estabelecidas três subcategorias: plasmas físicos relacionados à fusão termonuclear, plasmas térmicos e plasmas frios.

Conforme Eckert e Pfender (1967), a expressão "plasma térmico" é empregada para descrever os gases que se apresentam parcialmente ionizados quando aquecidos a altas temperaturas (entre 5.000 e 50.000 K), em pressões próximas à atmosférica.

Em geral, são produzidos por descargas elétricas e caracterizam-se pela alta densidade e pela proximidade entre as temperaturas dos elétrons e das partículas pesadas, isto é, o estado termodinâmico do plasma aproxima-se do equilíbrio, ou, mais precisamente, do equilíbrio termodinâmico local (ETL) [T. Watanabe & Kanzawa 1991].

Certas características típicas dos plasmas térmicos diferenciam-no de um gás comum [Eckert & Pfemder 1967]:

- A condutividade elétrica, que praticamente inexiste em um gás comum, apresenta-se no plasma como uma função da temperatura.
- A composição do plasma térmico (elétrons, íons e partículas neutras) é também função da temperatura, assim como suas propriedades térmicas e de transporte.
- A condutividade térmica do plasma é também função da temperatura, podendo apresentar valores bastante superiores ao do mesmo gás na temperatura ambiente.

Quando todas as propriedades referentes ao plasma são funções unívocas da temperatura e, quando essa for a mesma para todos os seus constituintes e reações possíveis, o plasma é considerado em Equilíbrio Termodinâmico Completo (ETC). As condições necessárias para que um plasma térmico esteja em ETL são [Chen. 1984]:

- As diferentes espécies que constituem o plasma obedecem a uma distribuição maxwelliana de energia.
- As colisões formam o mecanismo dominante na excitação das espécies (distribuição de *Boltzmann*) e a ionização segue a equação de *Saha*.
- As variações espaciais das propriedades do plasma são suficientemente pequenas, de maneira que as partículas migratórias entre regiões têm tempo suficiente para obter o equilíbrio.

Exemplos típicos de plasmas térmicos são aqueles gerados por arcos voltaicos transferidos, por tochas de plasma ou por descargas induzidas por rádio frequência (RF). A maioria dos gases industriais pode ser utilizada na geração de plasma térmico: argônio, nitrogênio, ar, hidrogênio, amônia, cloro, oxigênio, monóxido de carbono e muitos outros, tornando esta tecnologia bastante flexível. [Szente 2000].

2.5 Tocha de Plasma

As tochas podem operar de uma maneira não transferida ou transferida. No modo transferido, só um lado do arco é confinado dentro da tocha, e o outro fecha na peça de trabalho, assim a corrente é transferida da tocha para a peça de trabalho. Na forma não transferida, ambas as terminações do arco estão dentro da tocha, então a peça de trabalho não provê mais caminho para a corrente de retorno do circuito. A consequência desta diferença de fechar o circuito é que uma tocha não transferida exige uma alta taxa de resfriamento e, portanto, tem uma eficiência mais baixa, visto que parte do arco está dentro da tocha e ambos os finais aquecem os seus componentes, exigindo resfriamento. A escolha da tecnologia depende da aplicação e do desenvolvimento tecnológico da empresa. Em termos de segurança de operação, a vantagem do modelo de arco não transferido é a redução do perigo de acidente elétrico [choque] com o operador, visto que a parte externa do equipamento não faz parte do circuito, o que não é verdade no caso transferido [UERJ 2011].

O plasma de acoplamento indutivo também chamado de ICP trabalha de forma não transferida e é produzido por corrente de radiofrequência, utilizado principalmente com finalidades analíticas. Sua formação ocorre em função de um fluxo de gás, normalmente argônio, que atravessa uma região onde se encontra uma bobina de indução alimentada por um sistema gerador de radiofrequência. A bobina de indução é constituída de 2 a 4 espirais refrigeradas internamente por um fluxo de água [Cienfuegos & Vaitsman 2000]. As primeiras investigações sobre propriedades das descargas produzidas sem eletrodos foram apresentadas por Babat [Cienfuegos & Vaitsman 2000] em 1942. Posteriormente, em 1947, este autor distinguiu entre as descargas capacitivas sem eletrodos, formadas por campos elétricos, e as descargas produzidas pela ação de campos magnéticos alternados.

Em 1961, Reed [Reed 1961] descreveu a construção de um sistema de plasma, formado por uma tocha constituída por três tubos concêntricos, onde as espécies químicas eram introduzidas por arraste no canal central da tocha. Ele utilizou este sistema para efetuar crescimento de cristais. Posteriormente, Greenfield [S. Greenfield & Berry 1964], em 1964, e Went e Fassel [Went & Fassel 1964], em 1965, publicaram os primeiros resultados analíticos, utilizando plasma com acoplamento indutivo. Ambos os grupos de pesquisa concluíram que o plasma era uma fonte espectroscópica que apresenta alta sensibilidade e que não é afetado por interferências químicas.

Ao circular a corrente elétrica, pela bobina é criado um campo magnético oscilante, com linhas de campo orientadas axialmente, formando elipses fechadas. O fluxo de gás atravessa esse campo magnético. Para iniciar o processo do plasma, uma bobina de Tesla

(faísca) proporciona os primeiros elétrons. Estes elétrons livres são acelerados pelo campo magnético e rapidamente alcançam a energia necessária para ionizar o gás por meio de colisões, produzindo mais elétrons e iniciando um processo em cascata. O equilíbrio é alcançado quando a energia liberada pelo plasma for igual à energia cedida pela fonte de rádio frequência. O gerador de radiofrequência opera na faixa entre 27KHz e 56MHz, dependendo do projeto. Um esquema da tocha ICP é mostrado na Figura 2.2.

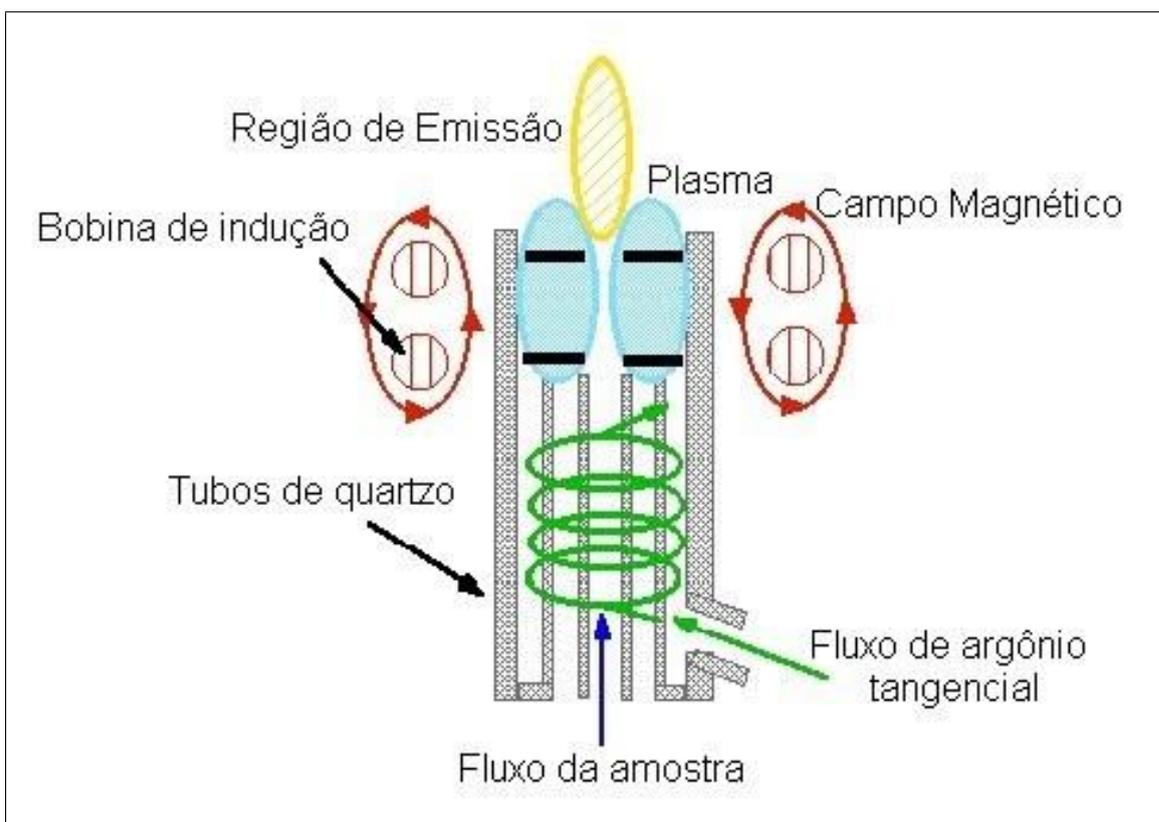


Figura 2.2: Tocha de plasma de acoplamento indutivo, [Wang 1999].

O plasma forma-se na tocha, que é constituída por três tubos concêntricos de quartzo com entradas independentes em cada seção anular. Na seção anular externa, o gás é introduzido tangencialmente, produzindo o chamado *vórtex de Reed*, que serve como isolante térmico dos tubos de quartzo e centraliza o plasma. Na seção anular intermediária, entra gás auxiliar, necessário para estabilizar o plasma; e na seção interna, entra o aerossol formado pela nebulização da amostra líquida com gás. As bobinas de radiofrequência provocam a excitação do gás e o plasma é gerado. Argônio é o gás comumente usado para arraste da amostra e para a produção de plasma [Y. A. Wang & Hsieh 1999]. Na Figura 2.3, observa-se a tocha de ICP, a bobina de indução e a formação do *vórtex de Reed*.

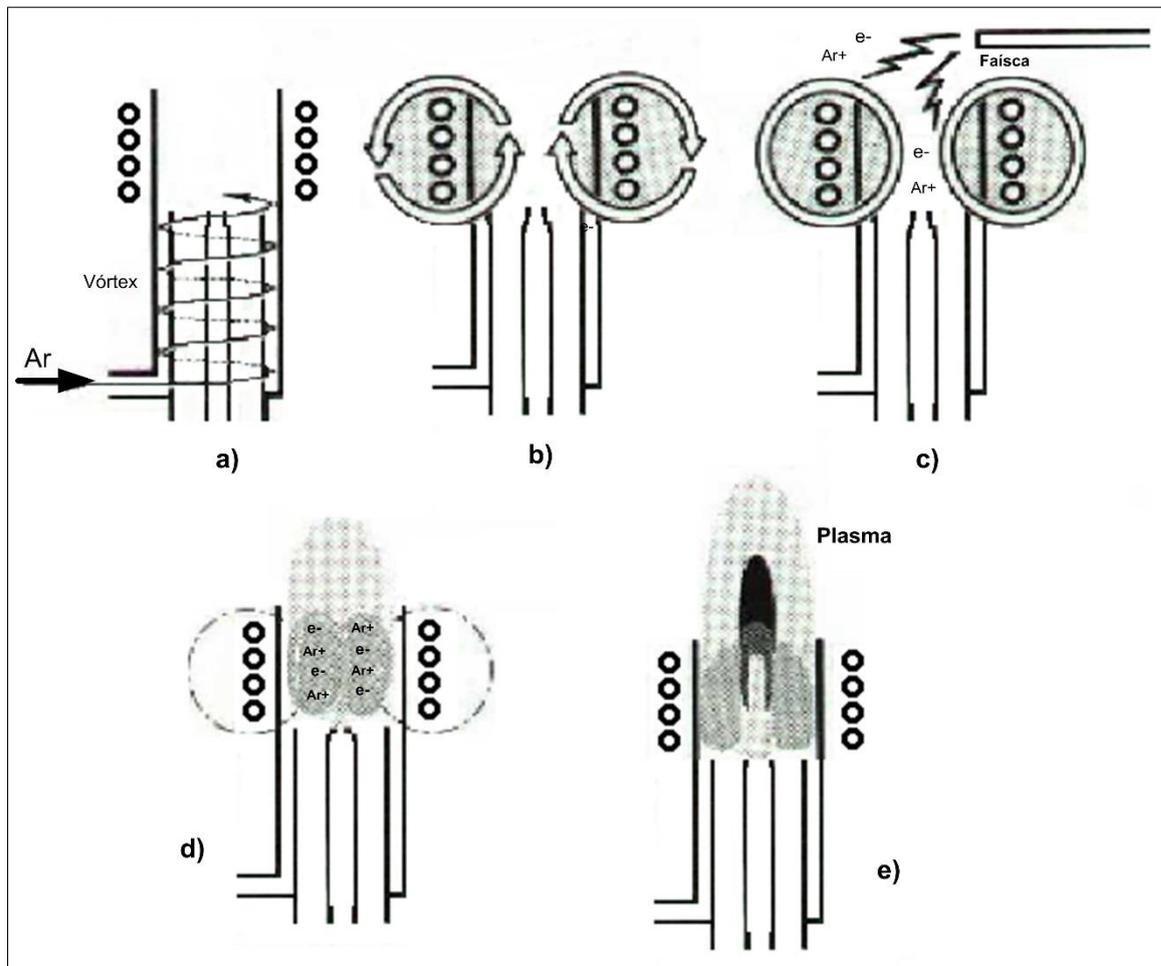


Figura 2.3: Diagrama de uma tocha de ICP e a bobina de RF mostrando a formação do plasma, [Wang 1999]. a) O argônio gasoso (Ar) é introduzido na tocha na forma de redemoínho. b) A aplicação de uma corrente de alta frequência sobre a bobina de indução gera um campo magnético oscilante. c) A faísca produz alguns elétrons livres no argônio. d) Os elétrons livres são acelerados pelo campo magnético produzido pela bobina de indução, provocando a ionização do gás, produzindo mais elétrons e iniciando um processo em cascata. e) A amostra, na forma de aerossol, é introduzida diretamente no plasma por meio do capilar.

A temperatura produzida pela tocha pode atingir $10.000K$, garantindo a completa atomização de elementos presentes na amostra injetada e gerando um espectro atômico extremamente rico em comprimentos de onda de interesse analítico. O plasma é instantaneamente formado e mantido, na forma toroidal, enquanto o fluxo de gás e a alimentação da bobina de indução permanecem constantes [Cienfuegos & Vaitsman 2000].

Este tipo de plasma também é utilizado para a eliminação de resíduos líquidos [Y. A. Wang & Hsieh 1999], [T. Watanabe & Kanzawa 1991]. O resíduo é injetado no centro da tocha, onde as temperaturas são mais elevadas, o que colabora para sua completa destruição, porém apresenta como desvantagem o alto custo da fonte de radiofrequência.

Para o desenvolvimento da tocha ICP no projeto de inertização de resíduos, foi utilizado como base o modelo proposto por Reed [Reed 1961]. O desenvolvimento analítico e dimensional desta tocha pode ser visto na tese de doutorado de Jean P. D. [Dubut 2010].

Na Figura 2.4, podemos ver as dimensões reais da tocha de acoplamento indutivo de plasma utilizado no processo.

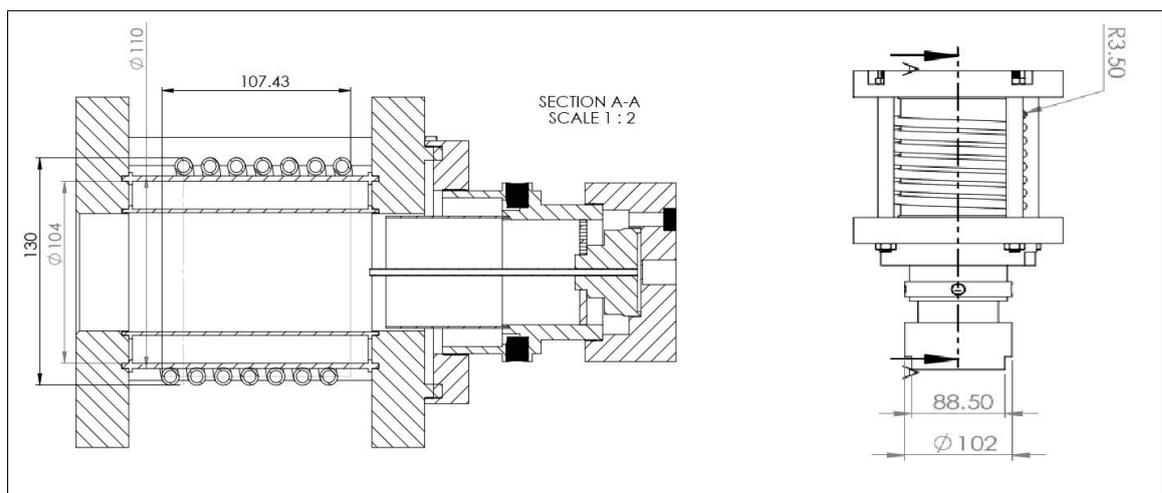


Figura 2.4: Dimensões da tocha de acoplamento indutivo de plasma (milímetros)

2.6 Empresas que trabalham na inertização de resíduos por plasma

Foi feita uma pesquisa em relação às principais empresas no mundo e no Brasil, que se especializaram no processo de inertização de diversos materiais utilizando plasma térmico, oferecendo soluções ambientais para o correto processo de descarte de material urbano e tóxico.

- National Cheng Kung University - cidade de Tainan, Taiwan (PEAT International) - a empresa é capaz de lidar com de 3 até 5 toneladas métricas de resíduos por dia, a partir de uma variedade diversa de materiais, como resíduos hospitalares, resíduos orgânicos de processos industriais, lamas orgânicas, baterias e outros. O princípio utilizado para poder eliminar o material tóxico é o arco de plasma. Esta empresa surgiu graças à parceria entre a universidade Cheng Kung e o governo de Taiwan, sendo o foco principal a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico nesta área [University 2008].
- Yoshii, Utashinai, and Mihama-Mikata, Japão (Hitachi Metals Ltd.) - atualmente, existem 3 plantas funcionando no Japão, sendo capazes de lidar com 166, 165 e 28 toneladas métricas por dia, respectivamente. O princípio utilizado para poder eliminar o material tóxico é o arco de plasma [Cheneurope 2004].
- Ottawa, Ontário, Canadá (Plasco Energy Group Inc.) - a capacidade de eliminação desta planta chega a 94 toneladas por dia de resíduos urbanos. Ao contrário de outras instalações de processamento de resíduos de plasma, nesta empresa não é utilizado o plasma para destruir os resíduos, mas, sim, para refinar os gases produzidos durante a conversão de resíduos, a fim de permitir que eles sejam utilizados para um motor de gás de combustão interna. Em 24 de outubro de 2007, a instalação Road Trail Plasco começou a entregar energia à rede. Estudos internos da Plasco afirmam que suas emissões também são muito mais baixas do que qualquer outro sistema de processamento de resíduos térmico. Por meio da conversão de resíduos de CO₂ e de água, em vez de metano, os gases de emissão do processo podem ser muito menores do que os das tecnologias concorrentes, tais como aterros sanitários [Group 2010].
- Faringdon, Oxfordshire, Inglaterra (Advanced Plasma Power) - tem desenvolvido um módulo de teste de Gás-plasma que utiliza como matéria prima o combustível derivado dos resíduos utilizados, para assim produzir hidrogênio e energia. Tem planos de crescimento até chegar a 100 mil toneladas métricas por ano [Power

2008].

- PLASMA Environmental Technologies Inc (Toronto Canada) - fornece sistemas baseados em plasma e serviços para a destruição limpa e rentável dos resíduos perigosos e não perigosos [Ewire 1986].
- Grupo KOMPAC - Brasil - tem experiência em equipamentos de destruição térmica e geração de energia, segundo os mais avançados conceitos e tecnologias. Projeta plantas baseadas em vários princípios tecnológicos, incluindo plasma térmico. A experiência em sistemas de tratamento térmicos é voltada para a geração por arco de plasma [Kompac 2011].
- PLASCON® Brasil - utiliza tecnologia de arco de plasma, incinerando até 3 toneladas por dia. A eficiência de destruição é 99%, as emissões à atmosfera são consideravelmente inferiores aos padrões internacionais e não gera resíduos tóxicos, sendo um fornecedor mundial em processos utilizando plasma térmico [Pereira & Junior 2012].
- Apesar de não ter encontrado empresas de inertização de resíduos que trabalhem com plasma gerado indutivamente, foi constatada a existência de linhas de pesquisa utilizando este método aplicado em diferentes tipos de resíduos. Na Universidade de Degli Studi di Bologna, na Itália, é utilizada uma tocha ICP para inertizar resíduos plásticos [Colombo 2008]; e o centro de tecnologia industrial, do instituto de pesquisa de plasma, na Índia, tem uma proposta bem semelhante à anterior [Nema 2002].

2.7 Conclusões:

- De acordo com a revisão feita neste capítulo, é de grande preocupação a quantidade de material tóxico (resíduo urbano e industrial) gerado pelo crescimento populacional, como também pela diversa gama de produtos fornecidos pela indústria. Um dos principais vilões neste problema é o plástico, que tem um tempo de decomposição elevado e é produzido em uma quantidade bastante significativa.
- É importante saber que existem compromissos mundiais que têm como objetivo preservar a natureza e os seres vivos, fora do alcance da contaminação provocada pelo material tóxico. Com esse propósito, foram estipulados diferentes métodos para tratar os materiais tóxicos, utilizando a seguinte hierarquia (3Rs): reduzir a produção; reutilizar; reciclar.
- Também é possível afirmar que um dos métodos mais seguros e eficientes no tratamento deste resíduo é o uso de tecnologia térmica gerado por plasma.
- A geração de plasma indutivo tem a vantagem de ser o processo mais limpo na geração do plasma, garantido, assim, menor contaminação ao meio ambiente quando for aplicado.
- A implementação da tocha de plasma utilizada neste trabalho teve como referência base o modelo de Reed, o mais utilizado para a implementação de tochas de acoplamento indutivo ICP.
- As dimensões da tocha de plasma utilizada no processo foram estipuladas em função da potência de $50kW$ e da frequência de $450kHz$.
- Não foi encontrada nenhuma empresa que trabalhasse no processo de inertização de resíduos utilizando plasma de acoplamento indutivo. Um dos motivos estaria no processo de geração deste processo, que é complexo e pouco explorado para esta aplicação específica.
- Este tipo de processo de geração de plasma (ICP) poderia ser estendido vantajosamente no futuro, podendo ser utilizada no processo de geração de gases, o qual pode estar associado a um esquema de cogeração elétrica.

Capítulo 3

Planta de Inertização de resíduos

Neste capítulo, será abordada a arquitetura empregada no sistema de controle e automação da planta e será descrito o processo utilizado na inertização dos resíduos. No final, será descrito, também, cada subsistema que faz parte da planta.

3.1 Arquitetura do sistema de controle e automação

Um dos motivos pelo qual não existem empresas que trabalhem com plasma indutivo na área de tratamento de resíduos está relacionado ao processo de geração, que é complexo e pouco explorado para esta aplicação específica. Os métodos de geração à plasma mais explorados nesta área são conhecidos como plasma CC não transferido, que tem uma estrutura mais simples e cujo processo de geração de plasma é mais fácil [Kompac 2011].

O interesse específico ligado ao desenvolvimento deste tipo de tecnologia se prende ao fato de que tal tecnologia poderá ser estendida vantajosamente no futuro, podendo ser utilizada no processo de geração de gases, o que pode estar associado a um esquema de cogeração elétrica. Isto notadamente se justifica para a produção de hidrogênio, que poderá ser utilizado em motores de combustão interna, acionando grupos geradores, ou em células a combustível [de Jesus Azevedo Barja 2006]. Assim, é sob este enfoque particular que deve ser entendida esta escolha.

A arquitetura do sistema de controle e automação utilizada na planta de eliminação de resíduos por plasma foi projetada para oferecer uma sequência automatizada no controle e monitoramento dos diferentes subsistemas que a formam, dando, assim, segurança ao usuário, além de provendo as informações necessárias.

A Figura 3.1 mostra uma visão geral da arquitetura do sistema de controle e automação aplicado a esta planta. O sistema descrito é alimentado pela rede elétrica trifásica (380V/60Hz). Um conversor Boost CA/CC retifica e, simultaneamente, prevê o controle de correção de fator de potência na tensão desejada no barramento CC. A saída deste

CAPÍTULO 3. PLANTA DE INERTIZAÇÃO DE RESÍDUOS

conversor é conectada na entrada do conversor CC/CA para que seja obtida uma tensão alternada quadrada cujo valor de pico varia conforme a saída do conversor anterior, e para que haja frequência em torno de $450kHz$. A tensão alternada é então aplicada a um transformador adaptador de impedância para, em seguida, alimentar um circuito ressonante, onde está inserida a tocha plasmática.

O ingresso dos resíduos no sistema é feito pelo alimentador, para, assim, ser direcionado ao reator principal, onde está sendo gerado o plasma. Após alcançar altas temperaturas e gerar o processo de pirólise no material tóxico, podem ser separados dois grupos: a parte inorgânica dos resíduos resultante do processamento no reator principal se transforma em um subproduto em fase semilíquida, chamada obsidiana, que segue para um reservatório para posterior reaproveitamento. Já a parte orgânica se transforma em gases que serão queimados no reator secundário e seguem para serem lavados e exauridos para a atmosfera.

Para adquirir os dados do sistema e monitorá-los, foi utilizado um controlador de lógica programável (CLP), que contém todas as ferramentas de software e hardware necessárias para o trabalho. Aqui também são implementadas as estratégias de controle na geração do plasma [Moeller 1999]. O sistema supervisor implementado para a planta foi desenvolvido no ambiente gráfico LabVIEW, que permite monitorar e comandar de forma segura e eficiente o proceder de todas as funcionalidades da planta de eliminação de resíduos por plasma.

CAPÍTULO 3. PLANTA DE INERTIZAÇÃO DE RESÍDUOS

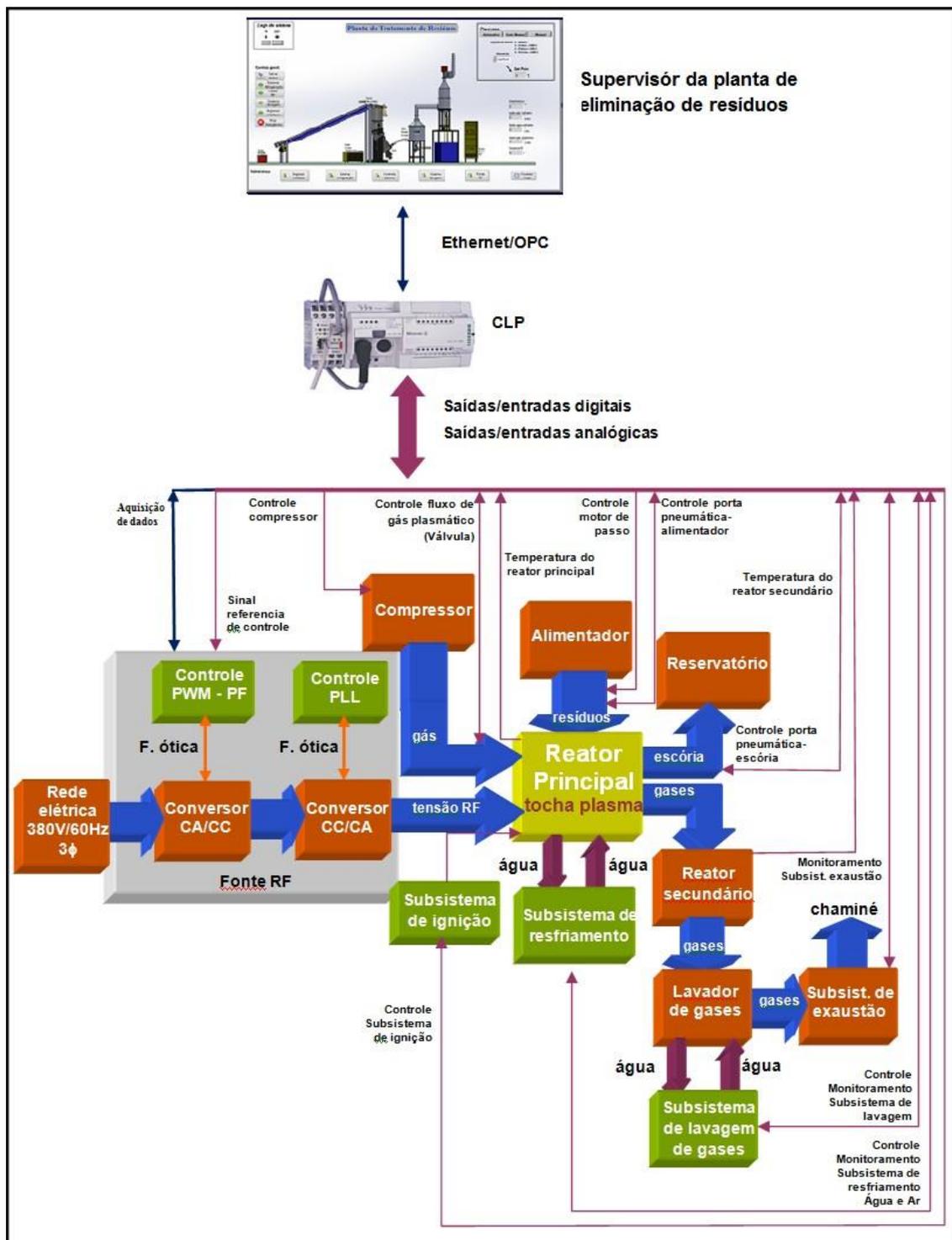


Figura 3.1: Arquitetura da planta de inertização de resíduos utilizando plasma

3.2 Descrição do processo de inertização de resíduos

3.2.1 Princípio de funcionamento

A planta de inertização aqui desenvolvida apresenta uma série de requisitos que foram inicialmente obtidos por meio de estudos primários para que se possa operá-la dentro de uma faixa e de acordo com o resíduo a ser tratado. O sistema foi inicialmente dimensionado para o processamento integral de 250kg de resíduos plásticos ou de 750kg de efluentes petroquímicos, com poder calorífico em torno de 30kJ/kg e 10kJ/kg, respectivamente, o que equivale a uma potência requisitada da fonte RF de cerca de 50kW. A meta inicial de tratamento foi fixada em dez horas diárias, [Guimarães 2009].

Devido aos altos custos de processamento, acondicionamento e descarte decorrentes dessas novas exigências, os resíduos passaram, então, a receber um novo enfoque, podendo ser reciclados ou ainda dissociados para produzir energia térmica e/ou elétrica. Nesse esquema de cogeração [de Jesus Azevedo Barja 2006], nesta primeira etapa do trabalho não está previsto o reaproveitamento energético associado aos gases produzidos que, futuramente, irão alimentar um grupo motor-gerador. A planta está subdividida tal como é mostrado na figura

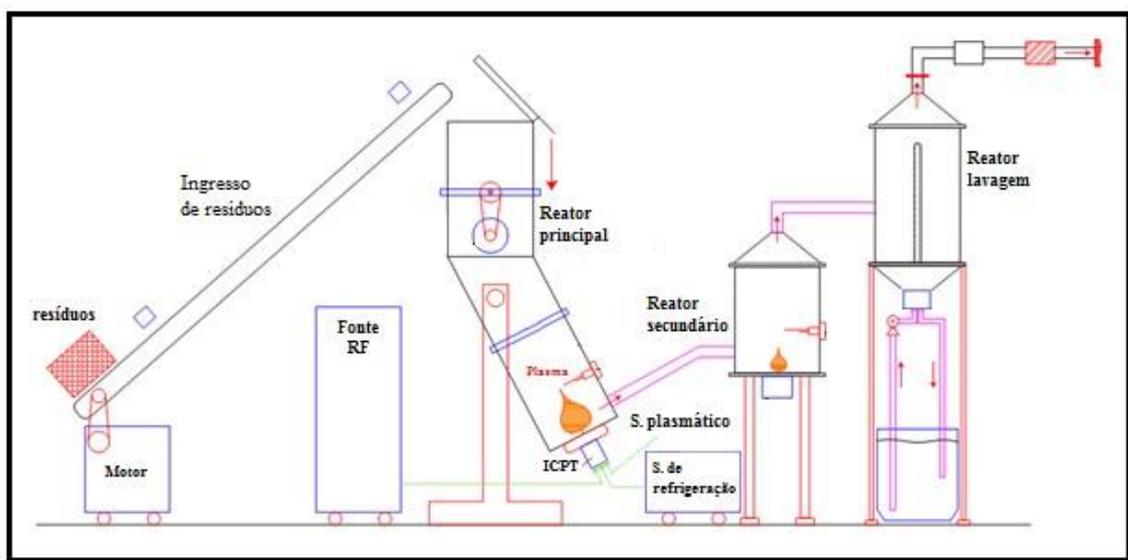


Figura 3.2: Descrição da planta de inertização de resíduos.

Descrição da planta de eliminação de resíduos por plasma:

- por meio de um sistema de transporte rolante, levamos os resíduos para a planta.
- um reator principal, especialmente construído para suportar altas temperaturas, é utilizado para o ingresso dos resíduos e posterior eliminação por meio do plasma.

CAPÍTULO 3. PLANTA DE INERTIZAÇÃO DE RESÍDUOS

- o processo de geração de plasma é obtido por meio da combinação apropriada do sistema plasmático, do sistema de refrigeração e da fonte RF.
- o sistema plasmático está formado pelo controle de gás argônio e pelo sistema de ignição.
- o controle de água e ar são variáveis utilizadas no sistema de refrigeração.
- a fonte RF fornece uma potência de $50kW$ a $450kHz$.
- o reator secundário tem internamente incorporado um queimador à combustão, que incinera os gases resultantes do processo no reator principal.
- resíduos da combustão dos gases serão tratados (fragmentos e outros) no reator de lavagem, que está composto por um chuveirinho e um circuito de resfriamento de água que evitará que partículas venham a ser expelidas para a atmosfera. O exaustor direcionará os gases para a chaminé e evitará uma eventual contaminação do ambiente.

A seguir será descrito o funcionamento da planta:

- Inicialmente, o sistema deverá ser preparado, estruturado, dimensionado e revisado para atingir o objetivo de incineração, sem problemas. Para isso, será implementado um sistema de monitoramento individual para cada parte do processo, que será dividido em: ingresso de resíduos, fonte RF, sistema plasmático, sistema de resfriamento e sistema de lavagem.
- Deverá ser definido o tipo de material que será incinerado. Este é um requisito indispensável para determinar o *Set Point* de temperatura no controle do processo, já que, dependendo do tipo de resíduo incinerado, a temperatura desejada mudará.
- Em seguida será definido o tipo de processo a ser executado: automático, semi-manual e manual. Após selecionado o tipo de processo, é necessária uma senha de acesso para dar continuidade ao processo.
- O processo automático é um estado em que a planta trabalha sem necessidade de controle externo, por meio dos diferentes sensores instalados nela e pode ser comandada de forma segura.
- No processo semi-manual, a interação entre o processo e o controle externo é mais limitada, mas ela obedece à mesma sequência de funcionamento do processo automático. Ela foi criada para poder verificar passo a passo o acionamento dos subsistemas da planta.
- O processo manual é totalmente dependente do controle externo e é empregado no processo de manutenção dos subsistemas da planta.
- Cada processo está devidamente explicado no capítulo 5.

CAPÍTULO 3. PLANTA DE INERTIZAÇÃO DE RESÍDUOS

- Após os resíduos estarem inertizados, a parte inorgânica será depositada em um recipiente apropriado para o seu reaproveitamento. A parte orgânica transformada em gases será sugada em direção ao meio ambiente.

3.3 Descrições dos subsistemas da planta

Abaixo foram classificados os subsistemas que fazem parte da planta, no total de cinco: ingresso resíduos, fonte RF, sistema plasmático, sistema de refrigeração e sistema de lavagem.

3.3.1 Ingresso de resíduos

A finalidade deste modulo é fornecer toda estrutura necessária para que o resíduo a ser eliminado possa chegar com segurança e eficiência no local de inertização por plasma. Ele está formado por uma esteira rolante movimentada por um motor, que tem o objetivo de transportar os resíduos até o reator principal. No transcorrer da esteira, temos dois sensores de presença, um no seu começo e outro no seu final, com o objetivo de detectar a passagem dos resíduos. O reator principal tem internamente três portas de acesso. A primeira chamamos de porta de alimentação, que receberá os resíduos da esteira rolante e tem controle pneumático; a seguinte é chamada de porta corta fogo e é comanda por um motor CC; e a terceira é chamada de porta escoria, que tem um controle pneumático e é por onde sai a parte inorgânica do resíduo. Na Figura 3.3 pode ser visto o desenho desta estrutura.

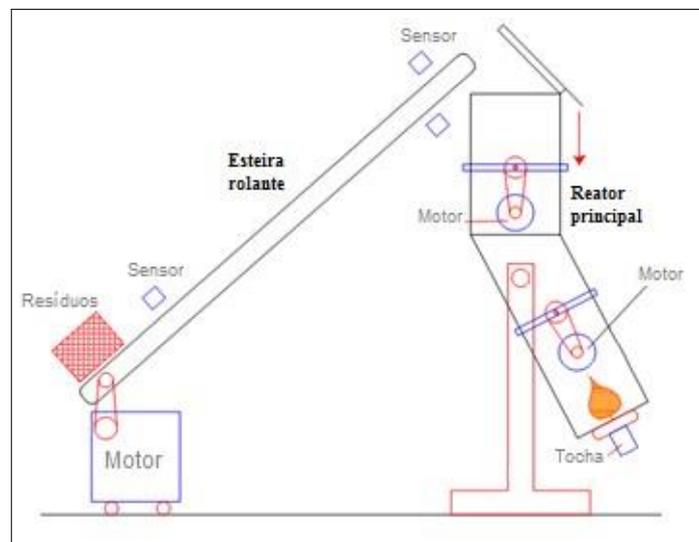


Figura 3.3: Estrutura do subsistema "Ingresso de resíduos".

Na estrutura real da planta, ainda não foi implementada a esteira rolante e o motor deste subsistema.

CAPÍTULO 3. PLANTA DE INERTIZAÇÃO DE RESÍDUOS

3.3.2 Fonte RF

A finalidade da fonte RF é garantir uma potência constante e sem perdas de $50kW/450kHz$, (verificar formatação do texto), que servirá como variável de controle na geração do plasma de forma indutiva. Ela está composta por dois conversores estáticos de potência. O primeiro deles se constitui em um retificador Boost trifásico, operando como pré-regulador do fator de potência, distribuindo uma tensão contínua de $650V_{cc} - 850V_{cc}$ no barramento de corrente contínua. O segundo conversor é do tipo inversor série-ressonante, operando a aproximadamente $450kHz$ sob potência nominal de $50kW$, que fornece uma tensão quadrada, mas pela propriedade de um circuito de série ressonante, capaz de determinar a circulação de uma corrente senoidal na tocha ICP.

Conversor CA/CC

Na Figura 3.4 pode ser visto o conversor Boost trifásico CA/CC, alimentado por uma rede elétrica trifásica de $380V/60Hz$ na configuração estrela. Para reduzir a ondulação de corrente injetada na linha de alimentação sem aumentar excessivamente o valor e o tamanho dos indutores "boost" ou elevar a frequência de comutação das chaves, foi utilizado um filtro LC ou filtro de harmônicos.

Na configuração da estrutura conversor B

oost trifásico, observa-se que cada fase é conectada a um braço de chaves por intermédio de um indutor. Cada braço constitui então dois conversores "boost" complementares, sendo que L3, D1 e S2 formam o "boost" positivo e L3, D2 e S1, o "boost" negativo do braço 1. De forma análoga, L2, D3 e S4 formam o "boost" positivo do braço 2 e L2, D4 e S3 o "boost" negativo. No braço 3, observa-se L1, D5 e S6 formando o "boost" positivo e L1, D6 e S5 o "boost" negativo. Os circuitos "boost" do retificador operam no modo de condução contínua (CCM). Desta forma, não existe interrupção do fluxo de corrente no indutor durante o ciclo completo da rede. Uma condição imprescindível para o correto funcionamento desta estrutura é que as duas chaves de um mesmo braço jamais possam ser acionadas simultaneamente. A filtragem e o armazenamento da tensão retificada na saída do conversor são feitos pelo capacitor C1. Para garantir a proteção de cada chave de comutação (IGBTs), foram implementados circuitos Snubbers RCD. O dispositivo utilizado como chave de comutação foi o IGBT "SKM150GB128D" [Semikron 2005], e o seu driver de controle foi "SKHI26F" [Semikron 2003].

O controle analógico de PWM e fator de potência foi implementado utilizando três dispositivos dedicados (UC3854b [Incorporated 2008]), que operam de forma separada, já que foram desenvolvidos para trabalhar em estruturas monofásicas. Utilizando um cir-

CAPÍTULO 3. PLANTA DE INERTIZAÇÃO DE RESÍDUOS

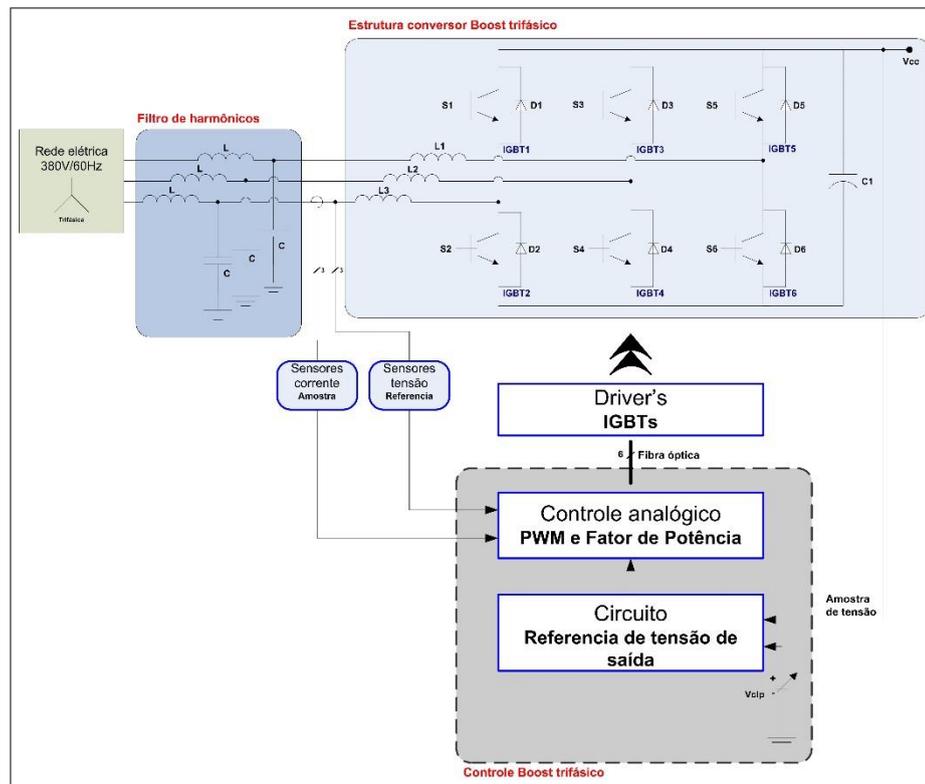


Figura 3.4: Conversor CA/CC

cuito de detecção de polaridade para cada fase, junto com uma lógica digital na saída de PWM, foi possível desenvolver a estratégia de funcionamento do conversor Boost trifásico [Dubut 2001].

A técnica de controle empregada por este dispositivo baseia-se no controle da corrente média instantânea de entrada em um período, na frequência de chaveamento. O retificador, como foi justificado anteriormente, opera no modo de condução contínua (CCM), com frequência de chaveamento fixa. O princípio de funcionamento do controle por corrente média consiste em monitorar a corrente de entrada (sensores de corrente e sensores de tensão) do retificador e compará-la a uma referência de corrente, que foi gerada pelo circuito de referência de tensão de saída. O resultado desta comparação comanda um modulador PWM que ajusta a largura dos pulsos acionando as chaves IGBTs, de forma que a corrente de entrada monitorada acompanhe uma referência de corrente definida. Com isto, foi possível chegar a um fator de potência próximo à unidade. A tensão CC de saída se dá na faixa de $650V_{cc}$ a $850V_{cc}$.

Este conversor foi implementado fisicamente, tendo como base estrutural o trabalho [Dubut 2001], em que a aplicação do trabalho em questão é diferente do analisado, mas o desenvolvimento e arquitetura do conversor foram aproveitados e adaptados à aplicação

CAPÍTULO 3. PLANTA DE INERTIZAÇÃO DE RESÍDUOS

atual. Eis o motivo pelo qual não serão detalhadas a projeção e a implementação do conversor CA/CC.

O conversor tem um papel importante no controle de temperatura da tocha à plasma, uma vez que a variação de potência fornecida é diretamente proporcional à variação da tensão CC de saída deste conversor. Ele recebe um sinal proveniente de um circuito de referência de tensão CC, comandado pelo CLP e proporcional à de sua saída. Essa referência é uma das variáveis presentes no controle de temperatura da tocha indutiva, que será explicada com mais detalhes no capítulo seguinte. Na Tabela 3.1, vemos os principais parâmetros do conversor.

Tabela 3.1: Parâmetros de Projeto.

Parâmetros	Valores
Tensão eficaz de entrada (Fase)	220Vca
Tensão de linha nominal	380Vca
Tensão do barramento CC	650Vcc a 850Vcc
Potência nominal de saída	50kW
Fator de potência no primário	$\geq 0,95$
Frequência da rede	60Hz
Frequência de comutação	10kHz
Controle do fator de potência	Independente, nas 3 fases
Capacitor C1	4,7nH
Indutores (L1,L2,L3)	1mH
C (F. harmônico)	8uF
L (F. harmônico)	0.5mH

Conversor CC/CA ressonante

A Figura 3.5 apresenta um diagrama de blocos simplificado do inversor ressonante junto às unidades de sincronismo do sistema. O conversor CA/CC tipo "Boost" foi analisado no tópico anterior. O barramento CC alimenta quatro módulos em ponte H, ligados em paralelo, operando no modo ZVS. Os módulos excitam a carga por meio de um transformador de alta frequência TRF, em série com o capacitor de acoplamento CP. Cada módulo foi projetado para operar individualmente a uma frequência superior a 100kHz, permitindo, com a aplicação da técnica de comutação sequencial, a obtenção de uma frequência de saída de 450kHz. Cada braço do inversor é formado por dois IGBTs SKM200GB125D [Semikron 2005] do tipo ultra-rápido. Cada IGBT suporta uma tensão de 1200V e uma corrente de pico de aproximadamente 350A, por curtos períodos de tempo.

CAPÍTULO 3. PLANTA DE INERTIZAÇÃO DE RESÍDUOS

A Unidade Geradora de Sincronismo e Controle (UGSC) mantém estáveis as condições de operações, rastreando as variações de carga. Ela consiste, basicamente, do circuito PLL, alguns sensores de corrente (detectores de cruzamento por zero) e um compensador avanço-atraso. O capacitor e a indutância ressonante junto com a resistência refletida da carga formam o circuito ressonantes série. A frequência de comutação f_s dos IGBTs é determinada em função da frequência de ressonância natural f_o da carga [J. Diaz-Amado & Pinheiro 2012], [Salazar & da Silva 2011], [Dubut 2010].

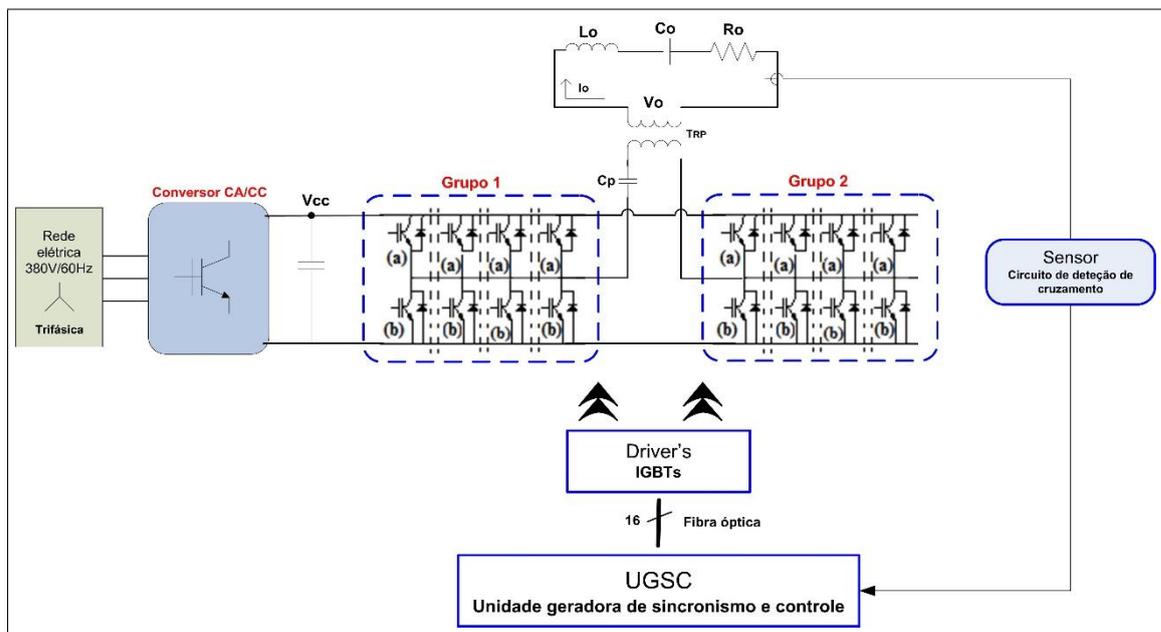


Figura 3.5: Conversor CC/CA.

Simulação da fonte RF

A fonte de RF foi simulada com o objetivo de poder entender melhor o acoplamento dos dois conversores envolvidos, antes de ser utilizada no controle de geração de plasma. A simulação simplificou o processo utilizado nos dois conversores, mantendo todas as condições de trabalho a partir das quais foram projetados. Foi utilizado, no processo, o programa de simulação de circuitos elétricos Multisim [Braga 2011]. Na Figura 3.6 vemos o circuito em questão, em que o conversor CA/CC foi simplificado por uma fonte variável de tensão CC, de $650V_{cc}$ a $850V_{cc}$. Já no outro conversor, foi emulada a unidade geradora de sincronismo e controle, que definia o chaveamento dos dispositivos para gerar o sinal de saída, por meio de uma fonte pulsante, onde definimos os ciclos de trabalho e as tensões de controle, mantendo sempre o que foi projetado originalmente. Os resultados das simulações serão mostrados no capítulo 6.

CAPÍTULO 3. PLANTA DE INERTIZAÇÃO DE RESÍDUOS

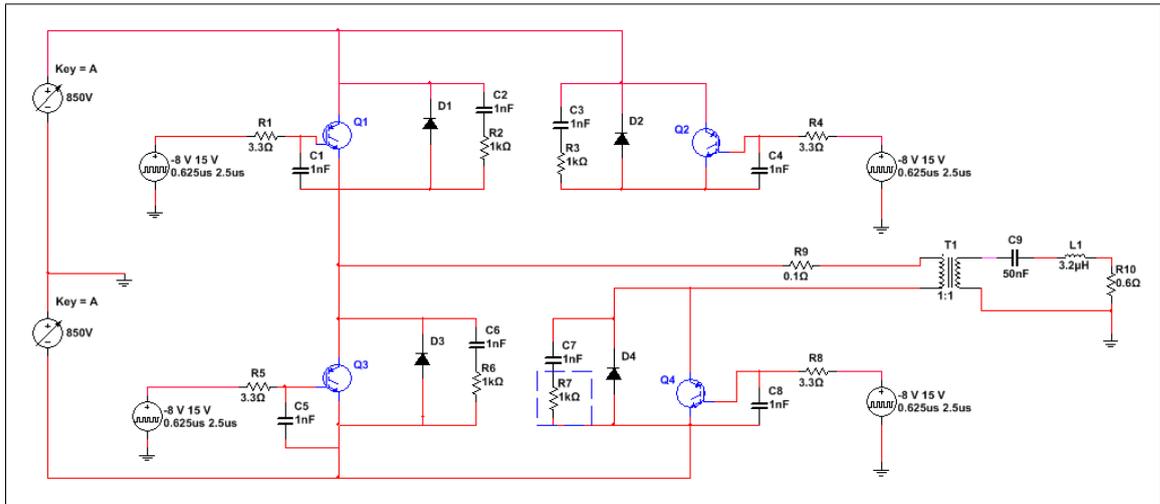


Figura 3.6: Simulação da fonte RF.

3.3.3 Sistemas plasmáticos

Este subsistema da planta está formado pelo controle de vazão do gás plasmático (gás utilizado na geração de plasma) e do sistema de ignição.

Para controlar a vazão do gás no processo de geração de plasma, foi utilizada uma válvula de controle (controlador mássico de vazão). Essa válvula tem a capacidade de controlar o fluxo de gases, que variam de 0 a 200litros/min. Ela utiliza como mecanismo de controle de vazão um motor-de-passo [Aalborg 2013].

A Figura 3.7 mostra o funcionamento do controlador de fluxo mássico, onde um circuito eletrônico compara o valor amplificado da taxa de fluxo mássico (medida pelo sensor térmico) com a referência (setpoint). Esta comparação gera um erro que é introduzido em um controlador PID interno que, por sua vez, envia à válvula reguladora um sinal para que seja feita a correção de sua abertura [Industries 2005], [Guimarães 2009].

O sistema de ignição gera uma descarga de pulsos de alta tensão, ocasionando assim uma centelha elétrica, dando o ponto de partida ao processo de geração de plasma. O sistema é formado por um gerador de alta tensão (circuito com flyback), que excita uma vela automotiva que gera a faísca elétrica. Na Figura 3.8 está o circuito de geração de altas tensões, utilizando um transformador flyback. Um CI – 555 (timer) é utilizado para gerar pulsos de ondas quadradas sobre o transistor 2N2222. Para definir o ajuste de frequência nele, empregamos um capacitor C1, junto com um resistor R2 e um potenciômetro P2. O 2N2222 comanda a porta do MOSFET e este, por sua vez, controla os pulsos mandados para o flyback. Após amplificar 100 vezes a tensão do enrolamento primário, temos, na saída do transformado, uma tensão de 10 - 20kV. Seguidamente, conectamos a vela auto-

CAPÍTULO 3. PLANTA DE INERTIZAÇÃO DE RESÍDUOS

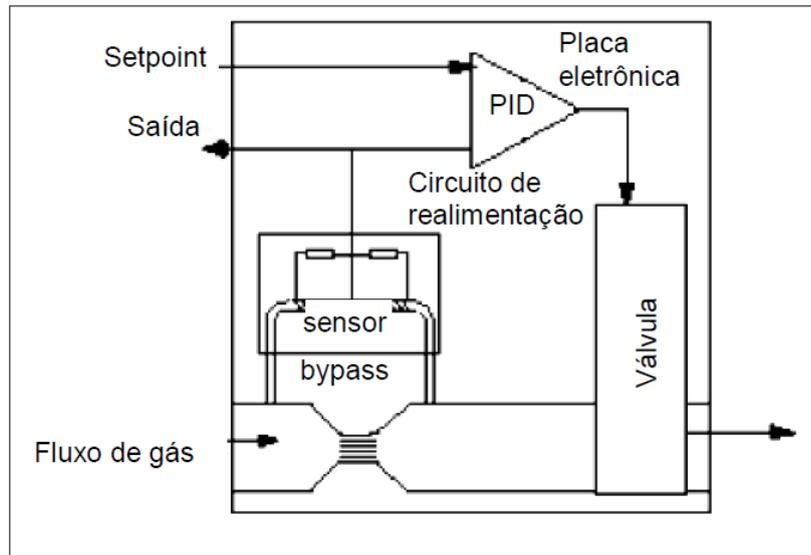


Figura 3.7: Esquema básico de controlador de fluxo mássico, [Guimarães 2009].

motiva no secundário do *flyback*, para assim obter a faísca elétrica. O acionamento deste sistema ocorre por meio de uma chave de comutação *On/Off* (S1).

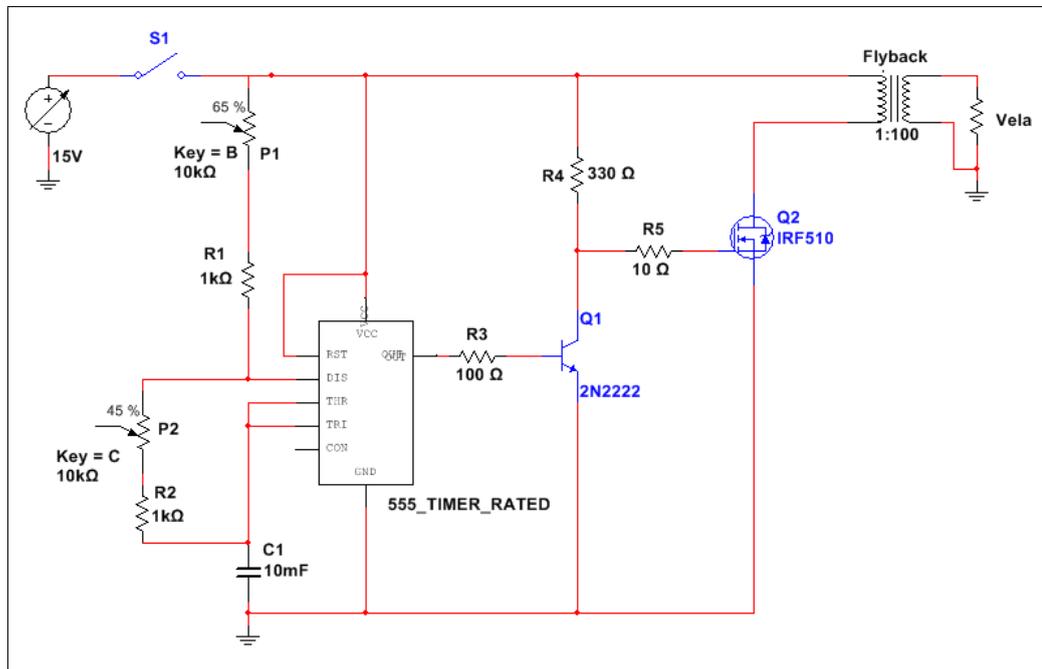


Figura 3.8: Simulação do circuito gerador de alta tensão usando um transformador *flyback*

Na figura 3.9 está em evidência a posição do sistema de ignição e o ingresso do gás na tocha. Eles ficam um próximo do outro para ter mais eficiência no processo de geração do plasma.

CAPÍTULO 3. PLANTA DE INERTIZAÇÃO DE RESÍDUOS

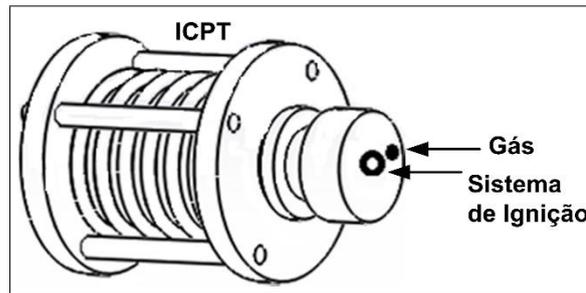


Figura 3.9: Sistema plasmático na tocha ICP.

3.3.4 Sistemas de Refrigeração

O sistema de resfriamento é formado por dois subsistemas. O primeiro subsistema de refrigeração da tocha está composto por um radiador, um ventilador, um inversor de frequência associado a uma bomba e sensores (termostato e sensor de pressão), que dará cobertura no controle de vazão de água. O inversor tem a função de manipular a vazão de água por meio de uma bomba centrífuga. O acionamento do ventilador é feito por um termostato, para uma temperatura acima de 70°C . O sensor de pressão tem um acionamento *On/Off* (pressão acionamento = 0.5 bar e frequência de acionamento 27.8Hz). Podemos encontrar mais informação sobre este subsistema no trabalho [Maniçoba 2013]. A Figura 3.10 mostra o subsistema de refrigeração usando água.

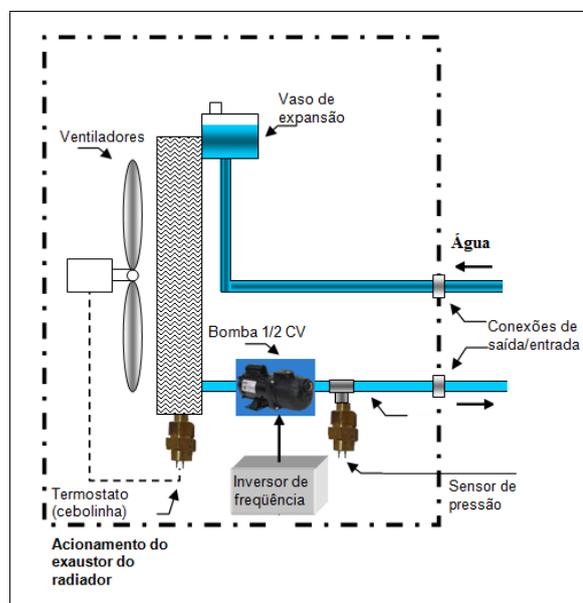


Figura 3.10: Sistema de refrigeração de água.

O segundo subsistema é uma válvula de controle de vazão de ar, que tem como objetivo esfriar e dar isolamento/proteção à tocha, no momento da geração do plasma. Para este

CAPÍTULO 3. PLANTA DE INERTIZAÇÃO DE RESÍDUOS

subsistema, foi utilizada uma válvula de controle (controlador mássico de vazão). Esta válvula tem a capacidade de controlar o fluxo de gases que variam de 0 a 50 litros/min, e utiliza como mecanismo de controle de vazão um solenóide [Aalborg 2013].

3.3.5 Sistema de Lavagem

Este sistema é formado pelo reator secundário e pelo sistema de lavagem com água. O reator secundário tem um queimador à combustão [Riello 2007], que eliminará os resíduos inorgânicos (gases) restantes do reator principal. O sistema de lavagem com água dá continuidade ao processo de purificação do gás, garantindo, assim, a eliminação de alguns poluentes, antes de sua liberação para a atmosfera.

O subsistema de lavagem está composto por uma estrutura que utiliza uma bomba de irrigação e um sensor de pressão. O Objetivo é manter os gases provenientes do reator secundário sob intenso banho de água no estilo chuveiro, para que sejam precipitadas pequenas partículas que contaminem os gases finais que serão enviados para a atmosfera. Os gases serão liberados para o meio ambiente por meio do exaustor. Um sensor de pressão está colocado na saída do sistema com a finalidade de verificar a expulsão dos gases purificados ao meio ambiente. (Ver Figura 3.11).

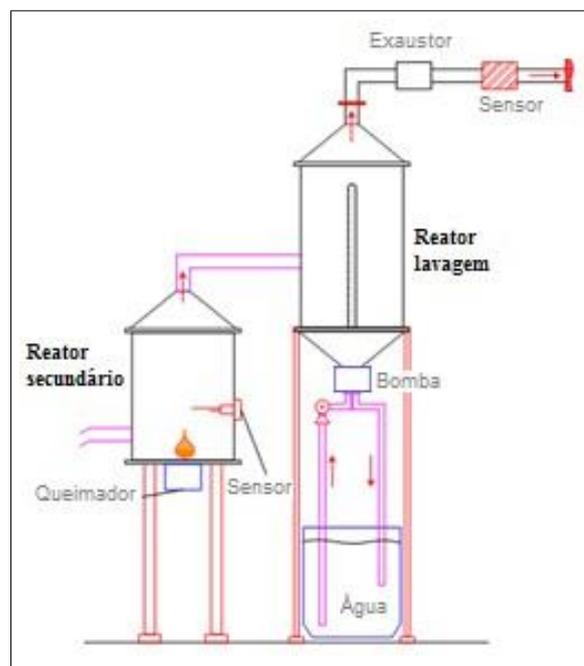


Figura 3.11: Sistema de lavagem de gases.

No apêndice A, estão diversas fotos dos principais subsistemas da planta real.

3.4 Conclusões

- A arquitetura do sistema de controle e automação da planta teve algumas alterações em função do que foi desenvolvido anteriormente, por exemplo, o monitoramento dos dados da fonte de RF e do sistema de refrigeração de água.
- A planta foi dividida em cinco subsistemas para sua melhor integração e compressão: Ingresso de resíduos, fonte RF, sistema de refrigeração, sistema plasmático e sistema de lavagem.
- Foi incorporado no projeto de otimização uma esteira rolante, que terá a função de levar os resíduos até o reator principal, e assim, por fim, eliminá-los-á por meio do plasma.
- O conversor CA/CC foi implementado utilizando os conceitos desenvolvidos por Jean Dubut, o que ajudou no seu aprimoramento.
- A simulação do comportamento real da fonte RF ajudou a entender melhor como ela funciona, de uma forma simples e prática.
- O sistema plasmático tem a missão de gerar sincronismo de trabalho entre o sistema de ignição e o gás plasmático, já que estes são indispensáveis para o processo de geração de plasma.

Capítulo 4

Controle na geração de plasma

Neste capítulo, serão analisados diferentes artigos focados no controle de geração de plasma indutivo e será desenvolvida a estratégia de controle utilizada neste trabalho.

4.1 Estado da arte

Como parte da pesquisa no controle da geração de plasma indutivo, foram descritos alguns dos principais trabalhos nesta área, em que foram destacadas as técnicas de controle utilizadas, e também os meios de aquisição de dados (sensores) para implementá-las.

O controle de realimentação em plasma de acoplamento indutivo têm muitas vantagens. Eles podem ajudar no mecanismo de processamento para obter uma boa confiabilidade repetitiva, o que diminui o erro de medição e aumenta o rendimento no processo. Muitos parâmetros podem ser utilizados no sistema de controle de realimentação, como: densidade de plasma, temperatura eletrônica, fluxo de íons, pressão do gás, entre outros. O controle da densidade do plasma é particularmente eficaz em condicionamento e processamento das taxas de deposição, as quais são mantidas e influenciam a densidade de outros parâmetros do processamento, tais como o número de radicais, a uniformidade e o tempo de processamento. Além disso, as variações da densidade do plasma podem oferecer informações sobre as suas instabilidades, causadas por perturbação, potência de entrada instável, pressão ou problemas com outros atuadores. [D. Greve & Vac 1996] [P. Klimecky & Terry 2003].

No entanto, é difícil aplicar o controle de malha fechada de densidade no processamento sem ter perdas. Isso acontece porque os métodos de medição não podem perturbar o plasma e devem ser resistentes a contaminações causadas pelo processamento de gás ou de subprodutos [M.A. Liebermann 2005], [Hershkowitz & Auciello 1989].

Chang tem investigado o controle de realimentação de densidade elétrica na ICP com um interferômetro heteródino [C. Chang & Lin 2001]. Este método não invasivo pode

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

medir a densidade eletrônica em tempo real. A densidade de elétrons é obtida medindo o deslocamento de fase das micro-ondas, por meio de plasma. No entanto, o interferômetro heteródino tem algumas limitações, uma vez que só mede a densidade média de linha, o que, por conseguinte, faz com que sejam insensíveis às variações locais de densidade.

[L. Chung & Cheng-Hung 2009] Neste trabalho, os autores relatam o desenvolvimento do controle Fuzzy na realimentação, utilizando a densidade de elétrons e energia de íons, aplicada ao processo de corrosão por plasma de alta densidade. A densidade de elétrons do plasma foi medida usando a transmissão de linha por micro-ondas interferômetro, princípio de *microstrip*, montado na parede da câmara. Para a medição de tensão RF, foi usado um medidor de impedância comercial. Os atuadores são dois geradores de energia RF de 13,56MHz, que fornecem energia no sistema. O sistema de controle tem o objetivo de reduzir a ação dos atuadores em determinadas situações, em que frequentemente geram ruído na medição. Os resultados experimentais mostram que o controle de malha fechada, tanto para a gravura (*wafers*) "poli-Si", quanto para a gravura "HfO₂", foi satisfatório. No entanto o efeito de perturbação da pressão não pode ser reduzido pela realimentação da densidade de elétrons. É possível citar também [R. Patrick & Williams 2000] onde foi usado um sensor de pico de tensão montado abaixo da gravura na qual a tensão medida foi adotada como variável controlada. Assim, a energia de ionização pode ser mantida, apesar das perdas de potência no circuito de RF. Os resultados mostram, neste trabalho, que a reprodutibilidade conseguida foi a melhor opção. No caso de [P. Klimecky & Terry 2003], foi medida a densidade de plasma transitória utilizando uma técnica chamada de "cavidade" (*cavity*) ressonante de banda larga RF. A variável controlada foi compensada com um algoritmo de controle proporcional-integral (PI) na realimentação e aplicado no atuador do sistema. Os resultados mostram que a variação da profundidade de corrosão foi reduzida. Na Figura 4.1 é possível ver a arquitetura do sistema utilizado nestes trabalhos.

A Figura 4.2 mostra a arquitetura do sistema de controle de lógica Fuzzy [L. Chung & Cheng-Hung 2009]. Os sinais para o controlador de lógica Fuzzy (FLC) são: " e_n " (erro) e " Δe_n " (variação do erro), definidos respectivamente como:

$$e_{nk} = SF_1 e(k) = SF_1 [r(k) - y(k)] \quad (4.1)$$

$$\Delta e_{nk} = SF_2 [e(k) - e(k-1)] \quad (4.2)$$

Onde " r " é o *Set point*, " y " é a saída do sistema, " e " é o erro de sistema, SF_1 e SF_2 são correspondente a fatores de escala, e k é o índice de tempo

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

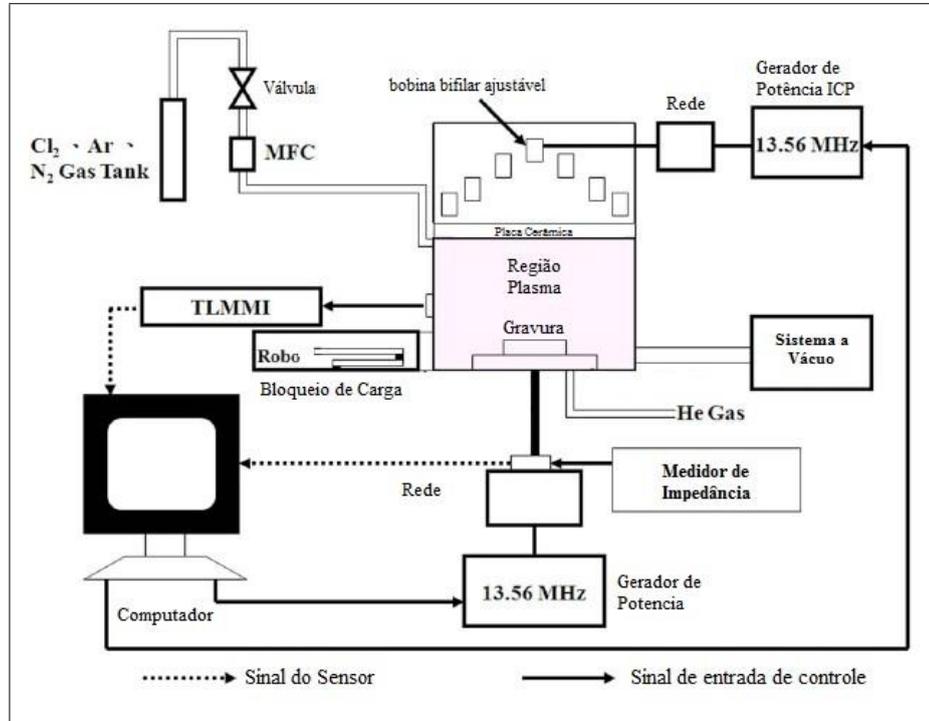


Figura 4.1: Arquitetura do sistema ICP, [Chaug Lin - 2009].

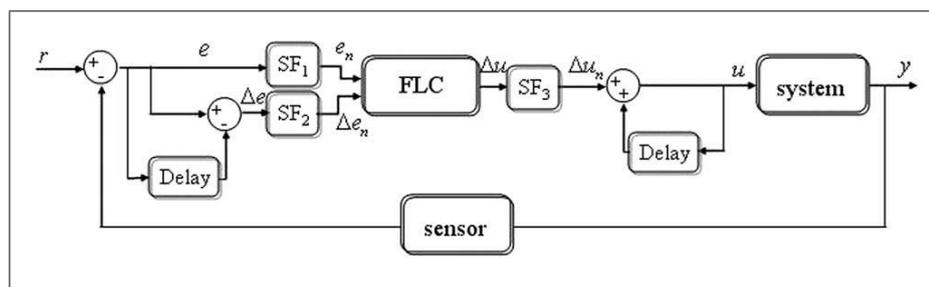


Figura 4.2: Arquitetura do sistema de controle de lógica Fuzzy.

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

A FLC é composta de três partes: fuzificação, inferência fuzzy e defuzificação [Yen & Langari 1999]. A inferência fuzzy contém regras de controle que fornecem a ação de controle com base nos sinais de entrada. O retorno do sinal de controle é definido como:

A FLC é composta de três partes: fuzificação, inferência fuzzy, e defuzificação [Yen & Langari 1999]. A inferência fuzzy contém regras de controle que fornecem a ação de controle com base nos sinais de entrada. O retorno do sinal de controle é definido como:

$$u(k) = u(k - 1) + \Delta u_n = u(k - 1) + SF_3 \Delta u \quad (4.3)$$

Em que " Δu " é a mudança no sinal de controle fornecido pela FLC, e SF_3 é o fator de escala. A função de pertinência (MF) de erro " e_n " e variação de erro " Δe_n " são utilizados para fuzificação da densidade de elétrons do plasma e tensão de RF, respectivamente. O método " $max - min$ " de Mandani foi adotado como método de inferência, e o método centro de gravidade foi utilizado na defuzificação. A FLC foi implementada utilizando o LabVIEW controle PID toolset [Instruments 2001].

[C. H. Chang & Leou 2000] As reações químicas e físicas do plasma são complexas e não lineares. A concepção do controlador é limitada em alguns pontos de operação se for utilizando um método tradicional de controle. Para um projeto de controle não linear, a construção de um modelo matemático não é muito benéfica [Boulos 1991]. Este trabalho relata um modelo que simula o comportamento de modo indutivo e/ou modo capacitivo em plasmas acoplado indutivamente por meio de um sistema adaptativo Neuro-Fuzzy (ANFIS). No estudo, as variáveis de entrada são a fonte de potência RF a $13,56MHz$ e a pressão do gás no sistema. A densidade de elétrons é a variável de saída. A densidade eletrônica foi medida por um interferômetro heteródino de $36GHz$. Foram coletados os dados de treinamento para ANFIS pela variação de potência RF em diferentes níveis de pressão. A pesquisa tem demonstrado um método simplificado para sintetizar um sistema não linear que pode cobrir as características do modo capacitivo e indutivo. É importante testar o desempenho na simulação antes de ser aplicada a um sistema real.

Segundo [Byungwhan & Choi 2012], uma nova estratégia para regular a descarga de plasma é apresentada. Isto é conseguido usando um sistema adaptativo Neuro-Fuzzy (ANFIS) no modelo de plasma e um sensor " $in - situ$ " não invasivo. Este sensor é projetado para medir os parâmetros do processo na geração do plasma em tempo real (*WiseProbe*). Utilizando o sensor, as características fundamentais de plasma foram colhidas. Estas incluem densidade do plasma, vazão de íons e temperatura dos elétrons. Para os dados recolhidos, um controlador Fuzzy foi utilizado para identificar a relação entre os parâmetros de processo e as características do plasma. Os parâmetros de interesse do processo

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

incluem uma potência de rádio frequência da fonte (SP), a vazão do gás Silano (SiH_4) e a vazão do gás Nitrogênio (N_2). Para cada uma das características do plasma, um modelo de ANFIS foi desenvolvido. Finalmente foram aplicadas as previsões e regulações obtidas pelas ANFIS para cada característica obtida no plasma e assim modificados os parâmetros controlados. A avaliação do modelo de controle apresentado neste trabalho mostrou um erro inferior de 3% na maioria dos parâmetros do plasma. O desempenho do regulador de plasma em ambientes ruidosos forneceu informações úteis para o projeto do regulador, tais como a existência de um nível mínimo de ruído e de alta sensibilidade do modelo de controle. Na Figura 4.3, é possível ver o sistema de controle Fuzzy para predição e regulação da densidade elétrica, bem como vazão de íons e temperatura.

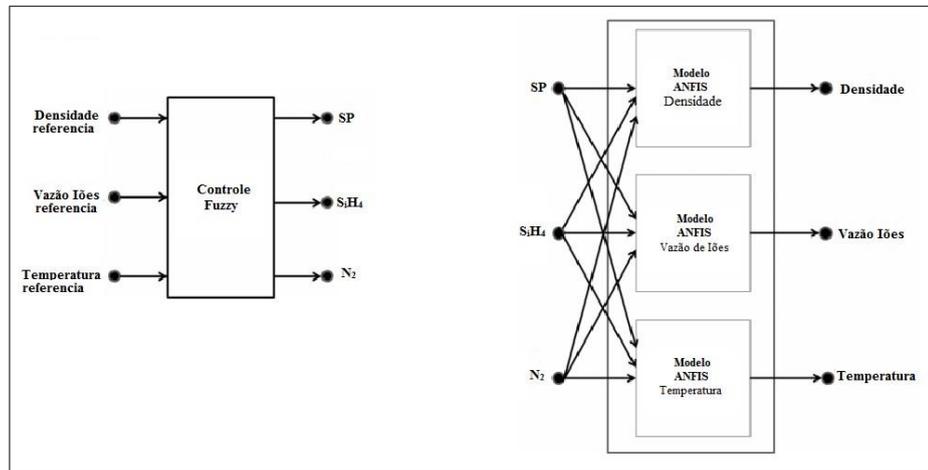


Figura 4.3: Modelo ANFIS de densidade, vazão de íons e temperatura.

[J. Sung-Ho & Chin-Wook 2013] Em outro trabalho que utiliza controle de realimentação PID em aplicações com ICP, foi destacada a implementação de uma sonda de controle flutuante por meio de um sensor que pode medir a densidade do plasma em tempo real, sem modificação da estrutura real dos reatores plasmáticos e sem perturbar a geração de plasma. O diagrama esquemático da sonda flutuante é mostrado na Figura 4.4 Quando a corrente flui através do circuito de sonda, apenas a corrente alternada é medida pelo sensor de resistência, enquanto que a corrente contínua é bloqueada pelo capacitor. A tensão de saída através da resistência de detecção foi amplificada, utilizando um amplificador diferencial, e separada em componentes harmônicas, utilizando um método de transformação rápida de Fourier (FFT). No circuito analisado, a compensação para ruído RF e corrente parasita foi realizada para melhorar a proporção de sinal para ruído. A corrente total que passa no circuito de sonda pode ser dada pela soma da corrente de elétrons e de íons.

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

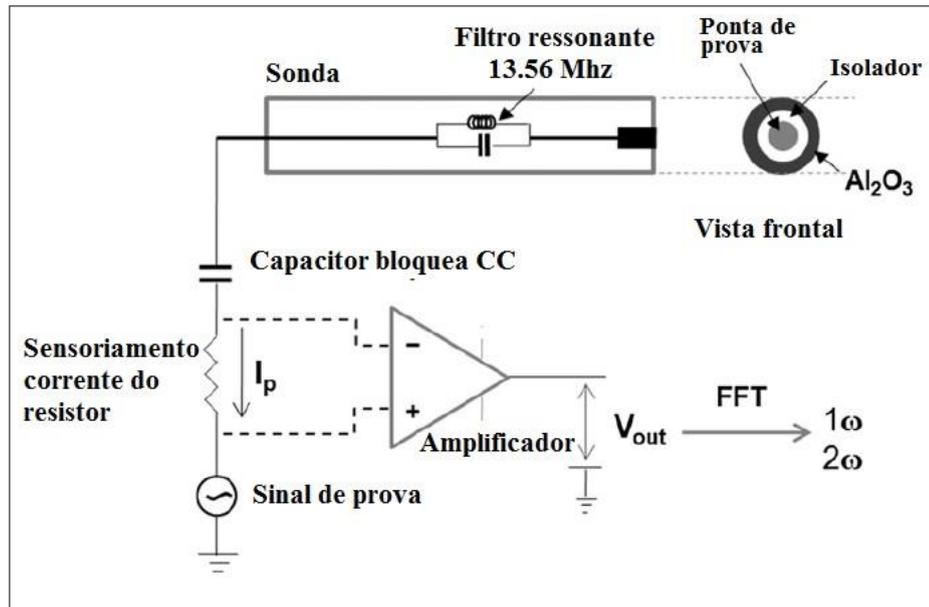


Figura 4.4: Diagrama esquemático da sonda flutuante.

A Figura 4.5 descreve um diagrama esquemático do processo experimental [J. Sung-Ho & Chin-Wook 2013]. O reator de plasma é constituído por uma câmara, uma fonte de energia de RF (13,56MHz), uma rede de harmonização e uma antena. A rede de harmônicos opera automaticamente para minimizar a potência de RF refletida. Uma tensão de barramento de 50kHz foi aplicada à ponta da sonda.

O sistema de controle de densidade do plasma está organizado em três partes: um sensor, um controlador realimentado e um atuador. O sensor é a sonda flutuante, que mede a densidade de plasma na parede da câmara em tempo real. A densidade do plasma é comparada com um valor ajustado (densidade desejada de plasma), e um sinal para o atuador de controle, que é gerado pelo controle PID. A medição, a comparação e a aplicação do algoritmo de controle para os atuadores foram realizados utilizando o software LabVIEW [C. George & Hieftje 2005].

Uma estrutura de controle variável Fuzzy foi usada para controlar o circuito do módulo PWM combinando o controle Fuzzy e o algoritmo de controle PID tradicional. O controle foi aplicado a uma fonte CA/CC/CA/CC para gerar plasma CC [Xin-wei & Xiang-min 2013], [A. Salazar & de Azevedo 2002].

Outras aplicações de controle inteligente no campo de geração de plasma indutivo podem mencionar a utilização de Redes Neurais e Logica Fuzzy na previsão de possíveis danos nas estruturas que fazem parte do reator "Tokamak" [Morabito & Versaci 1999], [Morabito & Versaci 1997].

Como podemos ver, as técnicas de medição aplicadas aos parâmetros de plasma são

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

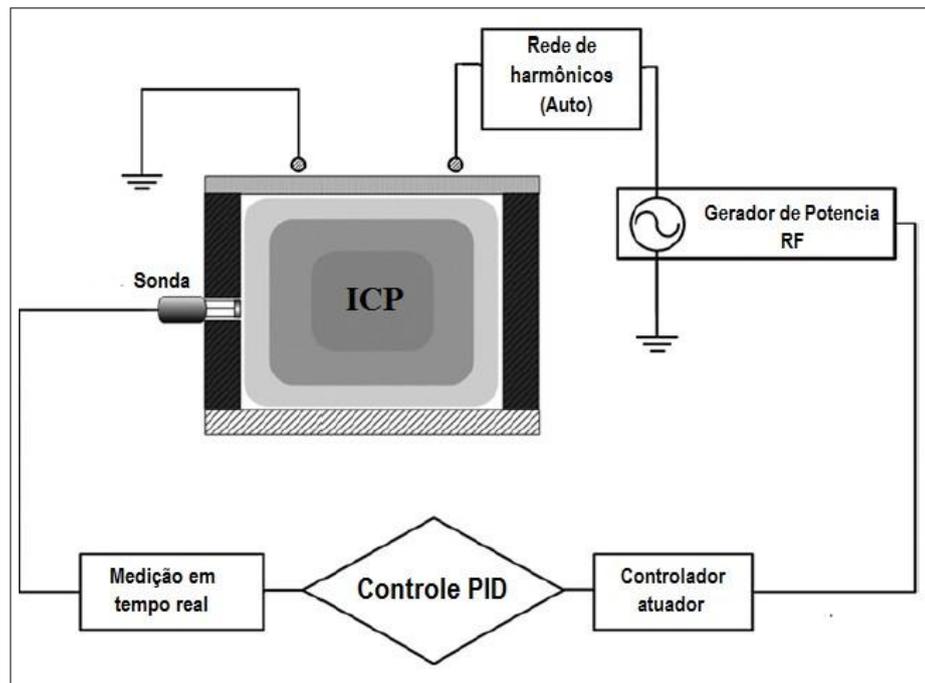


Figura 4.5: Diagrama esquemático do aparelho experimental.

diversas e entendemos que influenciam diretamente no comportamento do controle na geração plasmática. Também está em evidência a importância de utilizar sistemas de controle inteligentes (Redes Neurais, Fuzzy e ANFIS) que ajudam na predição e calibração dos resultados almejados, além de suprir a utilização de um modelo matemático impreciso e complexo.

4.2 Estratégia de controle na geração de plasma indutivo

Depois de ter revisado as principais referências de controle na geração de plasma ICP, podemos determinar a estratégia a ser utilizada neste trabalho, mas antes é importante definir os parâmetros de controle que serão utilizados nela. Na Figura 4.6 está o desenho da tocha ICP utilizada neste trabalho, em que foram colocadas em evidência as variáveis a serem controladas. Como foi explicado no capítulo anterior, o sistema de refrigeração tem a função de controlar as variáveis: água refrigerada e ar refrigerado. O sistema plasmático controla o gás plasmático e o sistema de ignição. Finalmente, a fonte RF determina a potência de rádio frequência no processo de geração de plasma.

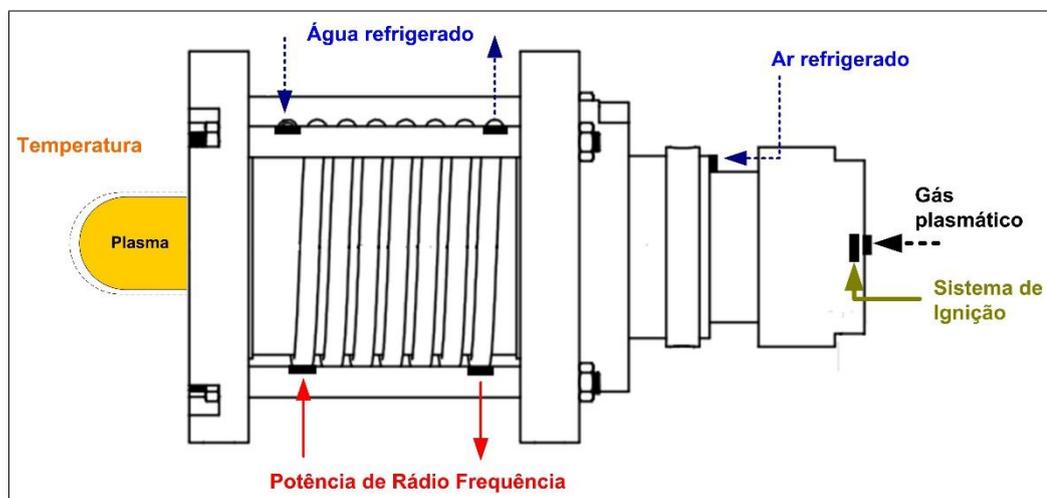


Figura 4.6: Tocha ICP - variáveis de controle.

Entende-se que, para ter resultados positivos no processo de geração de plasma, é de vital importância implantar uma técnica de controle, utilizando estas 5 variáveis de forma sincronizada e eficiente.

O sistema de controle pretendido tem uma configuração de múltiplas entradas e uma única saída (MISO), muito usadas no controle de temperatura [Lian & Lin 2005]. Também foi visto que a literatura mostra as vantagens de se utilizarem algoritmos baseados em controle inteligente (redes neurais, lógica Fuzzy e ANFIS) para este tipo de sistema, seja por sua eficiência na calibração seja na fácil implementação sem necessidade de um modelo matemático.

A estratégia de controle mais adequada para esta situação seria uma que possa trabalhar com mais de duas variáveis de entrada ao mesmo tempo e ter só uma saída (MISO) e que consiga, também, ser aprimorado em função da experiência do operador no processo (sistema inteligente) [Savran 2013], [G. Wang & Shuguang 2007], [S. Bououden

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

& Filali 2012]. Por este motivo, foi definido utilizar um controlador Fuzzy de múltiplas entradas e uma saída. Na figura 4.7 é mostrado um esquemático simplificado deste controlador Fuzzy, em que:

V_1F_1 : variável 1 Fuzzy 1;

V_2F_2 : variável 2 Fuzzy 2;

V_nF_n : variável n Fuzzy n;

SF_n : Saída Fuzzy n;

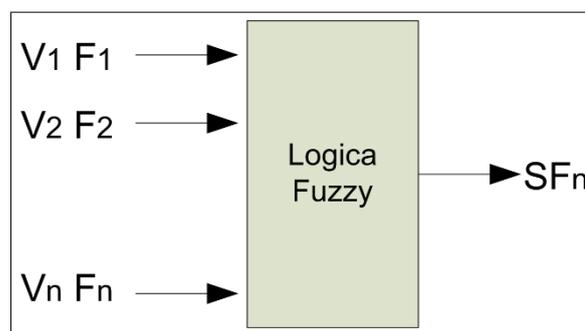


Figura 4.7: Controle Fuzzy com múltiplas entradas e uma saída.

O comportamento do grau de dificuldade de ajuste dos parâmetros Fuzzy em relação ao número de entradas do bloco Fuzzy é melhor representado pela equação 4.4 [Shaw & Simões 1999]. Diante da mesma equação, fica óbvio que, quando aumentar o número de entradas do bloco Fuzzy, o número de escolhas aumentará significativamente.

$$n = k k_1 r r_1 r_2 m p d \quad (4.4)$$

Acima: " n " é o número de escolhas ou quantidade de graus de liberdade; " m " é o número de variáveis de entrada; " p " é o número de variáveis de saída; " k " o número de funções de pertinência para cada variável; " k_1 " é a forma das funções de pertinência para cada variável; " r " o número de regras fuzzy; " r_1 " opções de inferência usadas na estrutura de regras Fuzzy; " r_2 " o grau de suporte associado a cada regra; " d " opções de métodos de fuzzificação [Shaw & Simões 1999]. A grande maioria dessas escolhas é baseada em dados empíricos e na experiência do especialista.

A figura 4.8 mostra o desenvolvimento da estratégia de controle utilizada na geração de plasma, empregando as cinco variáveis de controle do sistema. Para implementar o controle no sistema de Água e no sistema de Ar (C. PI-Fuzzy Água/Ar) foi utilizada a mesma lógica de funcionamento, já que foi constatado que eles têm a mesma função

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

no sistema. Para o controle da fonte de RF e do sistema de vazão do gás plasmático, foram utilizadas lógicas de funcionamento diferentes. Um controlador *On/Off* é utilizado para o acionamento do sistema de ignição, que será ativado sempre e quando houver erro de medição na temperatura. As faixas de trabalho de cada variável controlada no sistema são definidas em função das limitações de cada subsistema envolvido. O sensor de temperatura é posicionado a uma distância de um metro do ponto de medição.

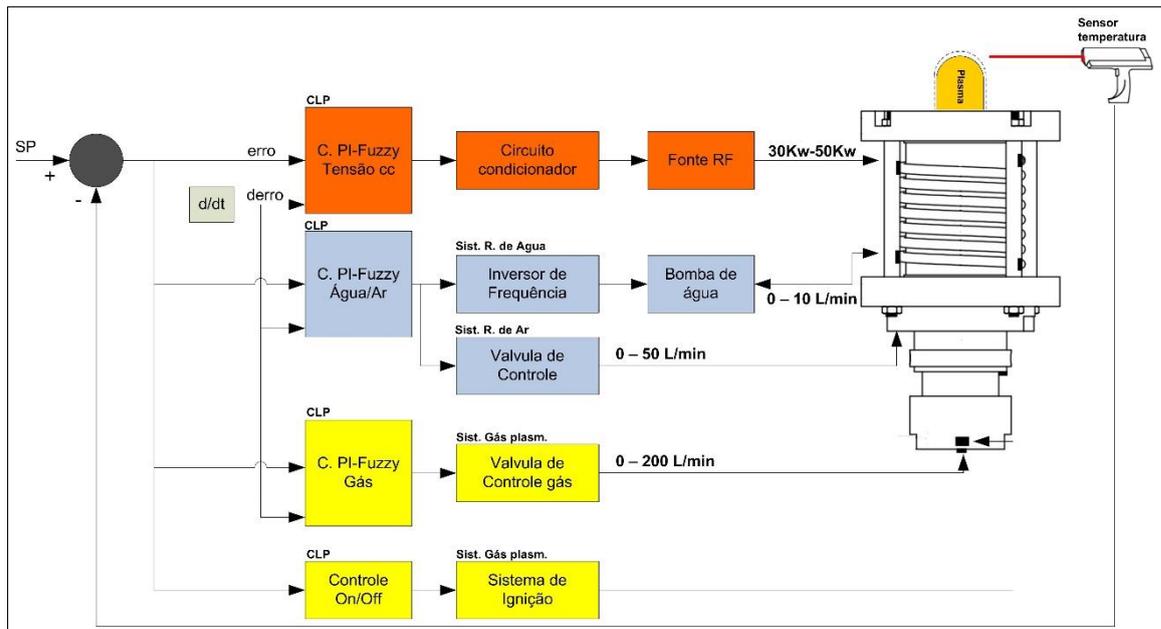


Figura 4.8: Estratégia de controle Fuzzy aplicado na geração de plasma indutivo.

4.3 Análise das variáveis de controle utilizadas no processo de geração ICP

Posteriormente, será descrito o sistema que foi utilizado para o processo de aquisição de dados no controle, como também a implementação do seus algoritmos (CLP). É importante analisar como foi feito o processo de aquisição e distribuição das variáveis de controle envolvidas no processo, para assim poder entender a estratégia definida anteriormente.

4.3.1 Controladores lógicos programáveis

Para manipular e monitorar as variáveis de controle, foi utilizado um controlador lógico programável, seja por sua robustez seja pelas ferramentas incorporadas nele. O CLP **PS4-341-MM1** é um controlador compacto, que reúne vários dispositivos em um, equipado com um conjunto abrangente de funções de hardware e software e, portanto, adequado para uso em várias aplicações em controle, regulação e medição. Nos casos em que as funções integradas não forem suficientes, os dispositivos podem ser simplesmente expandidos, tanto localmente quanto via rede. O software de programação de toda a linha de CLPs compactos da Moeller é o *Sucosoft S40* e obedece a norma IEC61131-3. O CLP possui como características principais [Moeller 1999]:

- 16 entradas digitais;
- 14 saídas digitais;
- 2 entradas analógicas (+10V);
- 2 saídas analógicas (+10V);
- memória de programação de 512kB;
- possibilidade de expansão de entradas e saídas analógicas e digitais;
- capacidade de comunicação em rede Ethernet e Profibus;
- toolboxes de controles em malha fechada, contendo mais de 100 blocos de função disponíveis: controle PID, controle Fuzzy e controle de posicionamento;
- servidor OPC;
- módulo de expansão LE4-206-AA1, que foi adicionado e que possui 4 entradas e 2 saídas analógicas ($\pm 10V$).

A arquitetura de controle mostrada na Figura 4.9 descreve como está sendo implementada a comunicação entre o CLP e as variáveis de controle utilizadas neste trabalho: potência RF, ar refrigerante, água refrigerante, gás plasmático e sistema de ignição. Estas

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

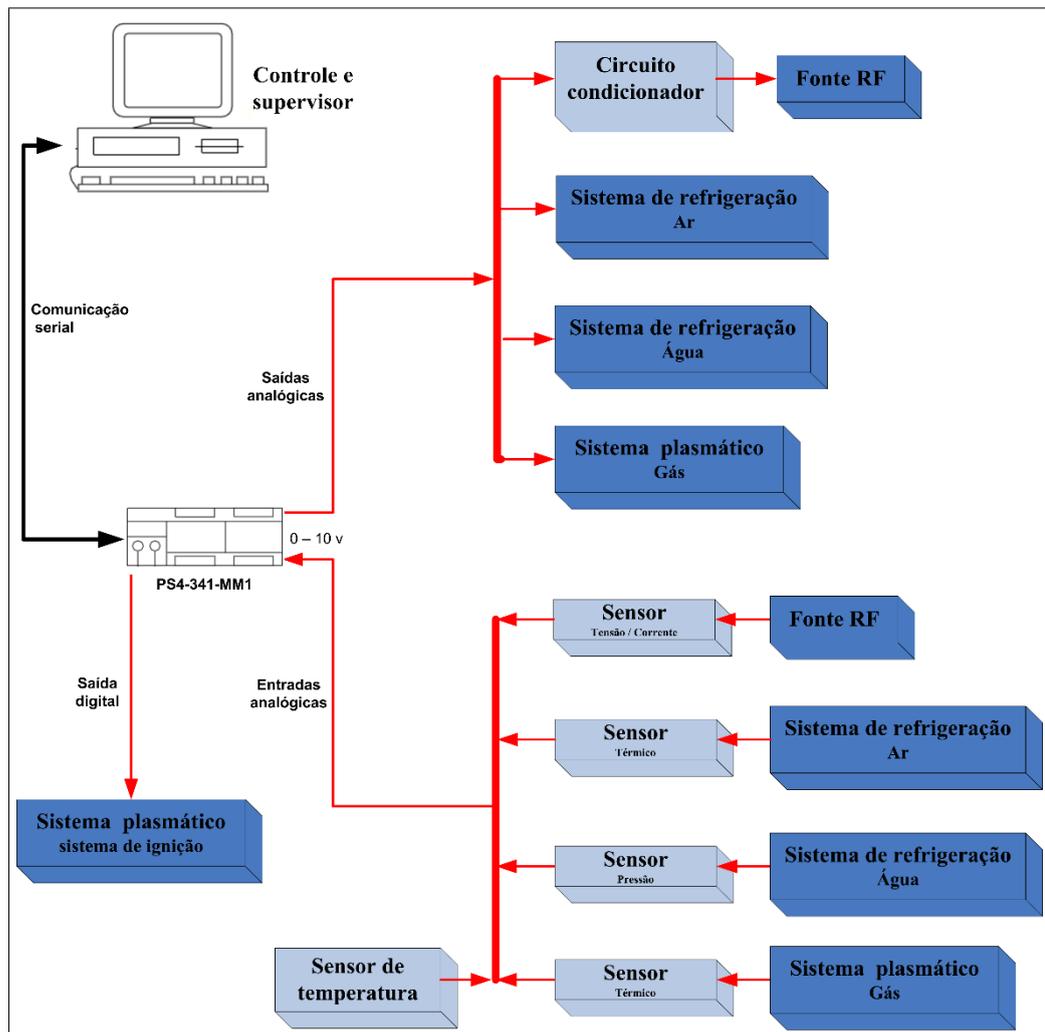


Figura 4.9: Arquitetura de controle: Supervisor - CLP - variáveis de controle.

variáveis de controle são geradas pelos sistemas: fonte RF, sistema de refrigeração e sistema plasmático, respectivamente. Também mostra como é feito o retorno destas variáveis ao CLP, utilizando sensores implementados para este fim. O sinal de referência de temperatura no controle é adquirido por meio de um sensor. O processo é controlado e monitorado pelo sistema supervisor implementado para este fim, que será descrito no próximo capítulo.

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

4.3.2 Fontes RF

Na Figura 4.10 é observado o esquemático da fonte de RF, em que destacamos os circuitos mais importantes no monitoramento e no condicionamento que foram utilizados. Para o conversor trifásico Boost, podemos destacar o "Circuito de CLP - conversor Boost", "Circuitos de referência de tensão de saída" e "Sensoriamento de tensão CC". No inversor ressonante, temos o "Circuito detecção de cruzamento". Em seguida, será explicado cada um deles.

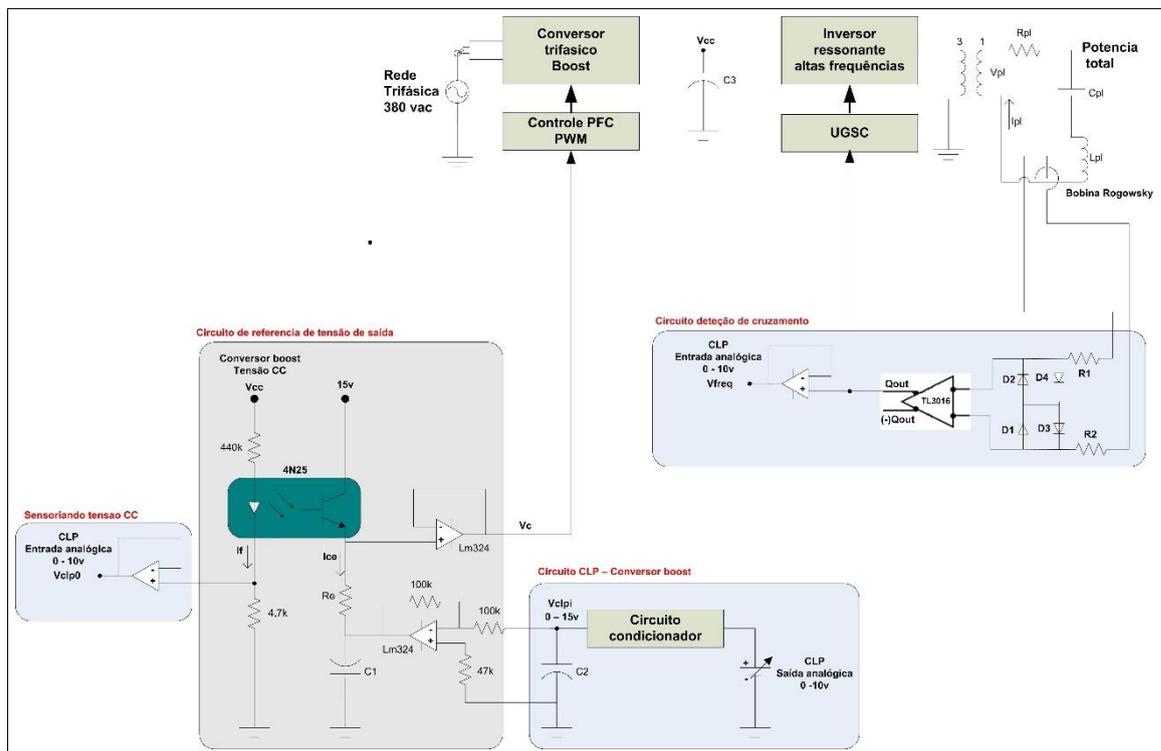


Figura 4.10: Monitoramento e controle na fonte RF.

Circuito CLP - Conversor Boost

Para controlar a fonte RF por meio do CLP, foi implementado um circuito condicionador de sinal, formado por dois amplificadores de tensão. Ele tem o objetivo de amplificar o sinal analógico de forma proporcional e linear. A tensão de referência necessária para o controle do conversor Boost é de $15V_{cc}$, sendo que o CLP proporciona uma saída de $10V_{cc}$. (Ver figura 4.11)

Para determinar V_{clpi} no circuito da figura 4.11, utilizamos um amplificador operacio-

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

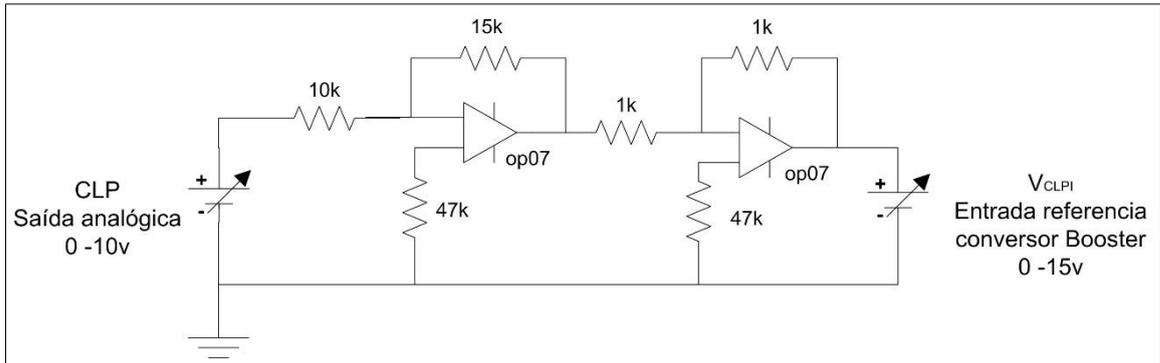


Figura 4.11: Circuito condicionador CLP - Conversor Boost.

nal inversor com ganho de 1.5, em que:

$$V_{clpi} = \frac{-15k}{10k} \cdot 10v = -15v \quad (4.5)$$

Logo, utilizamos outro amplificador inversor com ganho unitário para poder ter uma tensão positiva de (+15V) na entrada do conversor Boost. Após amplificar o sinal do CLP, poderemos controlar, a partir dele, a saída de tensão do conversor em questão.

Circuito de referência de tensão de saída

Este circuito tem o objetivo de gerar uma referência de tensão CC para o controle do sinal PWM, que comanda as chaves de comutação do conversor boost. Por meio do monitoramento do barramento CC da saída do conversor, é possível obter essa referência. O circuito integrado "UC3854b" é capaz de gerar o sinal PWM por meio desta referência, como também de fazer a correção de fator de potência para o correto funcionamento do conversor.

N

a Figura 4.12 está o circuito em questão, em que a amostra da tensão de saída é obtida por meio de um opto acoplador, associado a um circuito de condicionamento eletrônico arquitetado com amplificadores operacionais. A corrente circulando no diodo do optoacoplador (I_f), para as condições de tensão de saída do conversor $V_{CCmin} = 650V$ e $V_{CCmax} = 850V$, foi definida no projeto do conversor:

$$I_{fmin} = \frac{650}{447.7 \cdot 10^3} = 1,45mA \quad (4.6)$$

$$I_{fmax} = \frac{850}{447.7 \cdot 10^3} = 1,90mA \quad (4.7)$$

Utilizando a curva característica do componente 4N25, é possível determinar a cor-

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

rente utilizada do coletor-emissor do transistor. Para $I_{f\ min} = I_{cemin} = 1,2mA$ e para $I_{f\ max} = I_{cemax} = 1,90mA$. As tensões de referência de tensão CC para gerar o PWM dos dois pontos seriam, respectivamente, $V_{cmin} = 3V$, para a tensão de saída de 650V, e $V_{cmax} = 14V$, para a tensão de saída de 850V. Estabelecendo-se a equação da malha do circuito e aplicando-se a esta malha os valores de correntes e tensão, considera-se que o ganho dos amplificadores operacionais $G1 = -1$ e $G2 = 1$ e que os valores de controle do CLP são $V_{clpimin} = 0V$ e $V_{clpimax} = 15V$. Determinamos R_e para as duas situações:

$$R_{e\ min} = \frac{V_{cmin} + V_{clpimin}}{I_{cemin}} = 11,74K\Omega \quad (4.8)$$

$$R_{e\ max} = \frac{V_{cmax} + V_{clpimax}}{I_{cemax}} = 12K\Omega \quad (4.9)$$

Nestas condições definimos a resistência " R_e " com o valor de $12k\Omega$.

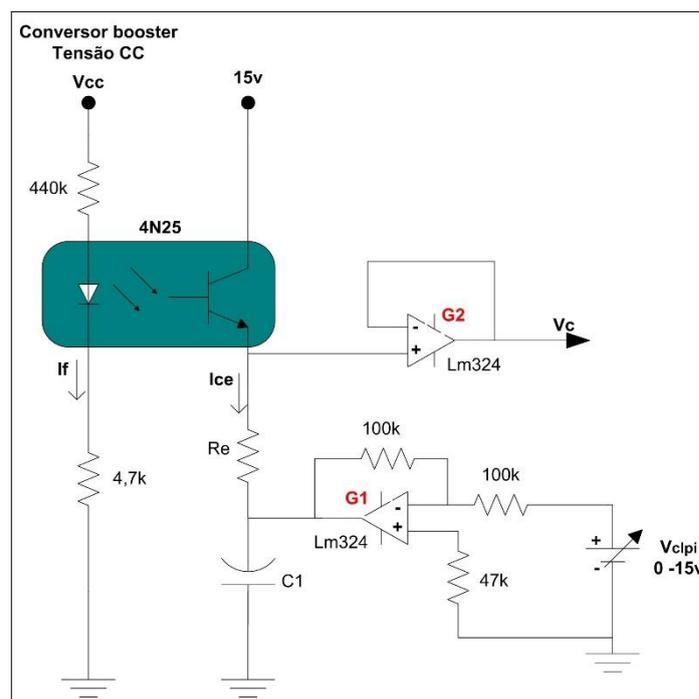


Figura 4.12: Circuito de referência de tensão de saída.

Sensoriamento do barramento CC:

com base no circuito empregado no caso anterior, foi utilizado o ramo que monitora a tensão do conversor Boost. Na figura 4.13 é exibida a tensão que cai no resistor de $4,7K\Omega$ e é monitorado e isolado por meio de um circuito seguidor de tensão. A resultante

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

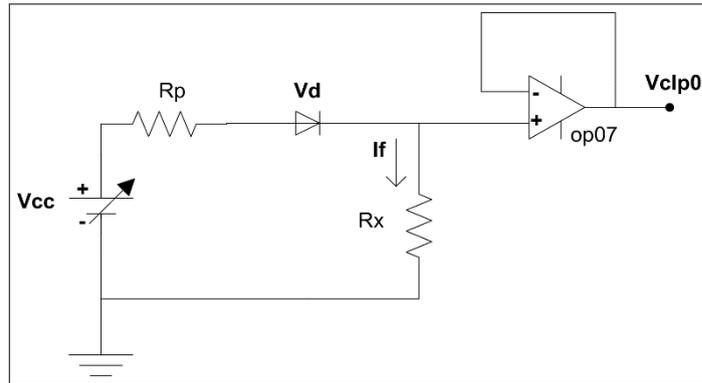


Figura 4.13: Circuito de sensoriamento de tensão cc do conversor Boost.

Tabela 4.1: Valores obtidos no sensoriamento da tensão CC.

Vcc (V)	650	850
Vd (V)	1,4	1,4
If (mA)	1,45	1.89
Rp (kΩ)	443	443
Rx (kΩ)	4,7	4,7
VRx (V)	6.8	8,9
Vclp0 (V)	6.8	8,9
PRx (mW)	9.8	16,8

é levada ao CLP, onde é tratada e interpretada. Por meio da tensão deste resistor, foi determinada a tensão de saída do conversor Boost.

Na tabela 4.1 estão os valores de tensões e corrente obtidos na análise do circuito em que o maior valor possível de saída do V_{CLP0} é $8.9V_{CC}$, sendo que o CLP suporta até 10V.

Após a chegada dos valores de tensão ao CLP, eles foram devidamente interpretados. A entrada analógica corresponde a 10V e tem uma resolução de 10bits, equivalente a 1024 decimal. Para poder fazer uma relação entre estas variáveis e determinar o valor correspondente ao fornecido pelo conversor Boost, foi definido:

$$V_d = \frac{1024V_{CLP0}}{10} \quad (4.10)$$

$$V_m = V_d \cdot 1.071 \quad (4.11)$$

Acima: V_d é a tensão equivalente decimal e V_m é a tensão medida, que corresponde à tensão de saída do conversor Boost.

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

Circuito detecção de cruzamento:

para sincronizar o ponto de operação do PLL no inversor ressonante, é preciso monitorar a frequência natural do circuito ressonante, sendo necessário utilizar um circuito detector de transição por zero, apresentado na figura 4.14 e desenvolvido na [Dubut 2010]. A corrente da carga ressonante é monitorada através de uma bobina de Rogowsky, um dispositivo magnético que mede pulsos de corrente de alta frequência, seguido por um circuito comparador de alta velocidade que detecta as transições por zero da corrente de saída. Essas transições são utilizadas como amostras da frequência ressonante e servem de referência para o circuito de sincronismo do PLL. Os dados obtidos no circuito de detecção de cruzamento por zero serão levados para o CLP por meio de um seguidor de tensão.

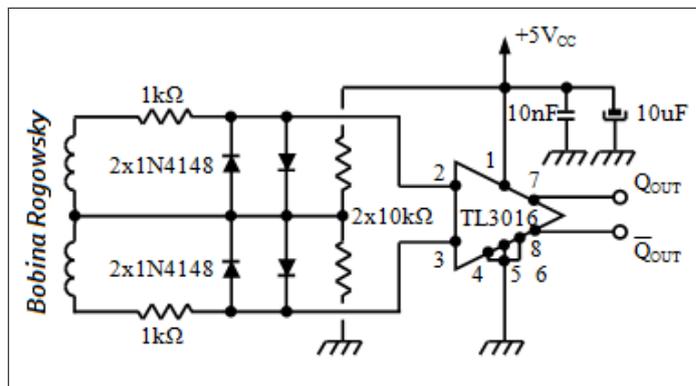


Figura 4.14: Diagrama esquemático do circuito de detecção de cruzamento por zero, [Dubut 2010].

4.3.3. Sistemas de refrigeração

Na figura 4.15 é visto o desenho do sistema de refrigeração por água, onde estão em evidência as principais variáveis de controle. O acionamento do ventilador foi mudado do estado original dele (termostato) para ser ativado por um contato ligado diretamente a uma saída digital do CLP (0 - 220V). Esta alteração foi feita com o objetivo de melhorar a eficiência do sistema. O sensor de pressão é outra variável importante também, já que o status dele indica se o sistema está funcionando ou não. Uma das saídas analógicas do CLP define a vazão de água que terá o sistema, por meio de um inversor de frequência devidamente configurado para tal. A faixa de controle varia de 0 a 10V, que corresponde a uma vazão de 0 - 10L/min.

Também é visto na figura 4.15 que a vazão de ar está diretamente controlada por meio

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

de uma saída analógica do CLP. Isto é possível, graças ao controlador de fluxo de massa, onde a entrada de controle (0 - 10V) é proporcional à saída de vazão de ar (0 - 50L/min).

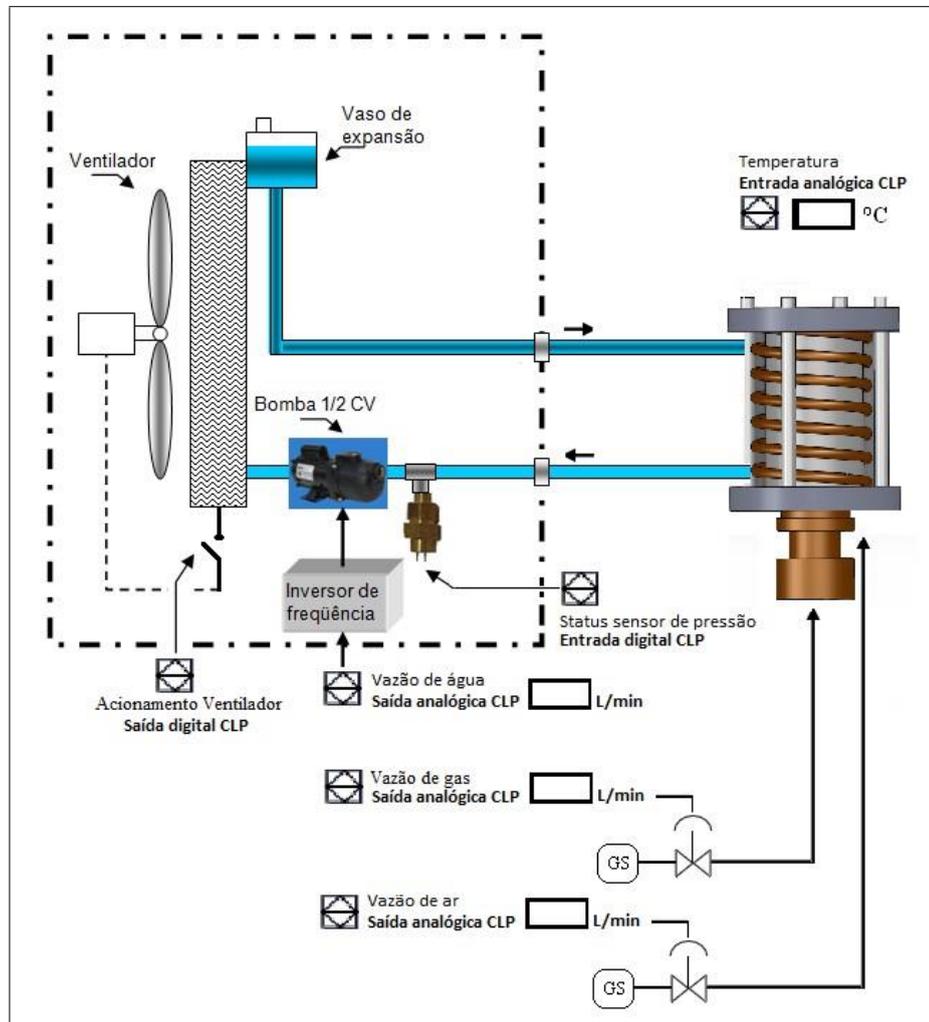


Figura 4.15: Esquemático do sistema de refrigeração e o sistema plasmático.

4.3.4 Sistema plasmático

Na figura 4.15 podemos observar também como é feito o controle da vazão de gás, que está diretamente comandado por meio de uma saída analógica do CLP. O controlador mássico utilizado para o controle permite uma saída proporcional à entrada de 0 - 200L/min. O sistema de ignição é ligado por meio de uma saída digital do CLP (ver Figura 4.16).

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

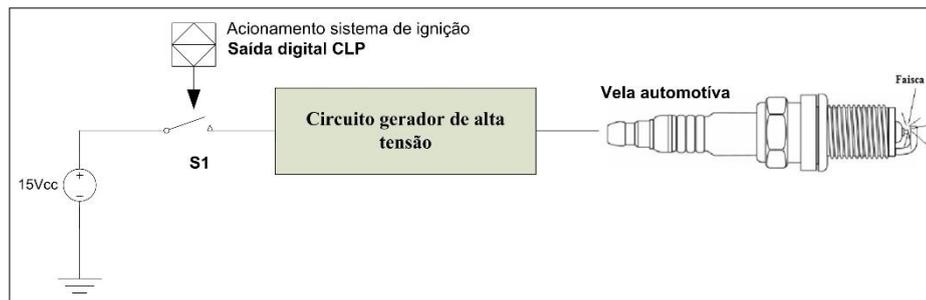


Figura 4.16: Esquemático de ligação do sistema de ignição

2.1.2 Sensor de temperatura

Para poder medir a temperatura gerada no plasma, procura-se um sensor "*in-situ*" não invasivo, para assim garantir o processo de controle sem ser afetado por possíveis interferências de medição. Como foi visto também na revisão bibliográfica, os sensores utilizados para adquirir os dados são devidamente projetados e verificados para não gerar possíveis erros no controle.

O sensor de temperatura escolhido foi um pirômetro infravermelho portátil, que mede temperatura sem contato, na faixa de 600 a 3000°C (modelo *Raynger 3i IMSCB*) [Raytek 1997].

Além da exibição da temperatura em tempo real, o *Raynger 3i* calcula as temperaturas máxima, mínima, diferenças e média, enquanto a função Recall permite que o usuário acesse a última leitura de temperatura. O 3i também compensa a energia de fundo refletida do objeto que está sendo medida, de forma que ela não afete a sua leitura. O display retroiluminado é de fácil leitura em locais de pouca luminosidade. O travamento do gatilho permite uma medição contínua, enquanto os sinais de alarmes *HI/LO*, ajustáveis, alertam sobre condições de temperatura acima e abaixo da faixa.

Principais características:

- Mede temperaturas na faixa de 600 a 3000°C.
- Apresenta resolução Ótica 180:1.
- Calcula as temperaturas MÁX / MÍN / DIF / MÉDIA.
- Apresenta saída analógica: 1mV/°C ou 0.5mV/°F.
- Apresenta saída Digital RS232, 9600 *baud*, intervalo de saída ajustável de 1 a 9999 *seg*.

Os dados de temperatura são transferidos para o CLP por uma saída analógica do próprio sensor, que tem a relação de 1mV/°C. A tensão máxima de medição é de 3V, correspondente aos 3000°C. O circuito seguidor de tensão é implementado por um am-

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

plificador de instrumentação de precisão [Instruments 2005], garantindo a transferência de dados ao CLP (Ver figura 4.17)

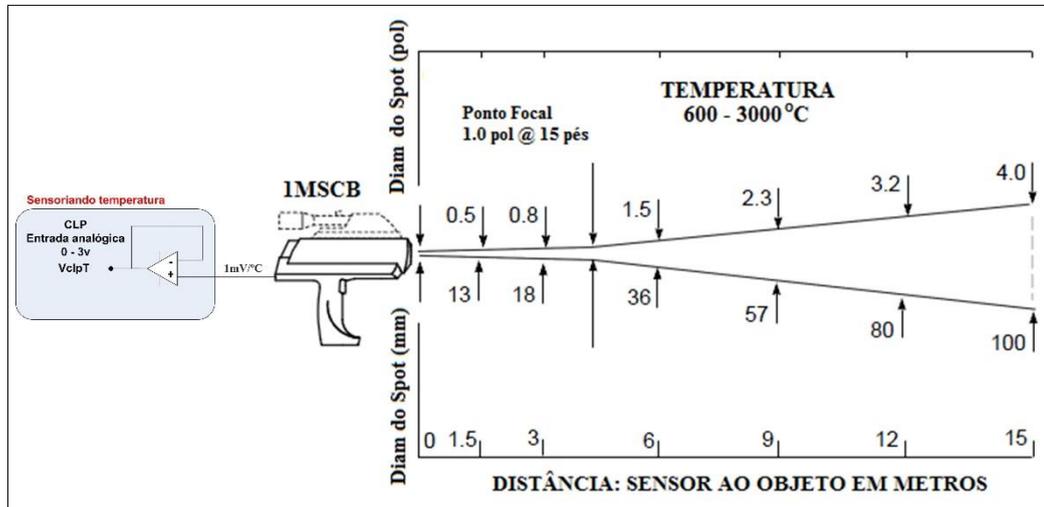


Figura 4.17: Aquisição de temperatura utilizando um pirômetro infravermelho.

4.4 Controle Fuzzy

O controle implementado neste trabalho foi totalmente desenvolvido no CLP, que fornece diferentes ferramentas computacionais, como é o caso do *Closed-Loop Control Toolbox*, que permitiu implementar de forma eficiente o controlador PI-Fuzzy para cada variável. Mas, apesar dessas vantagens, foi de suma importância interpretar e conhecer o correto funcionamento de tais ferramentas, para, assim, chegar a nosso objetivo principal [Tenhagen 2002].

O **controlador PI-Fuzzy**, implementado para cada variável neste trabalho, é baseado no mesmo princípio estrutural de um PI convencional, cuja ação de controle tende a eliminar o erro em regime permanente. A estrutura de controle possui duas entradas e uma saída, sendo uma entrada o sinal de erro de controle e a outra a variação do mesmo erro, cuja ação de controle aplicado tende a anulá-lo.

No controlador PI-Fuzzy, são as regras que avaliam o sinal de erro, a diferença entre o valor medido e a referência, de modo a incrementar ou decrementar o sinal de controle. Assim, com base nas regras, o controlador pode incorporar estratégias de controle não-linear. Este é seu grande mérito, pois ele não tem um ponto de operação específico [A. Guimarães & Maitelli 2006].

Na Figura 4.18 pode-se ver a estrutura do controlador e o fluxo de sinais. Note que o esquema de controle é composto de três passos principais e bastante simples. No primeiro passo, um sinal de referência (r) é comparado com a saída da planta ou processo (y), gerando um erro (e); esse sinal e sua taxa de variação são injetados no controlador via interface de **fuzzificação**; a partir desse ponto, as variáveis passam para o domínio Fuzzy. No segundo, as **regras** são avaliadas para gerar uma correção incremental no sinal de controle (du). No terceiro, essa variável é passada para o domínio real via interface de **defuzzificação**, gerando o sinal de controle (u) para a planta [Rêgo 2002].

Fuzzificação é o processo de mapeamento de determinada variável do domínio dos números reais para o domínio Fuzzy. Cada variável de entrada recebe uma atribuição linguística qualitativa, definida por funções de pertinência do universo de discurso correspondente [Shaw & Simões 1999].

Nesse estágio, as grandezas físicas medidas por transdutores e digitalizadas via conversores analógico-digitais podem sofrer um ajuste de escala para serem transportados a universos de discurso definidos. Em seguida, a interface de fuzzificação usa funções de pertinência contidas na base de dados, associando, a cada variável, graus de pertinência relativos aos conjuntos Fuzzy.

Portanto esse processo pode ser entendido como um pré-processamento de categorias

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

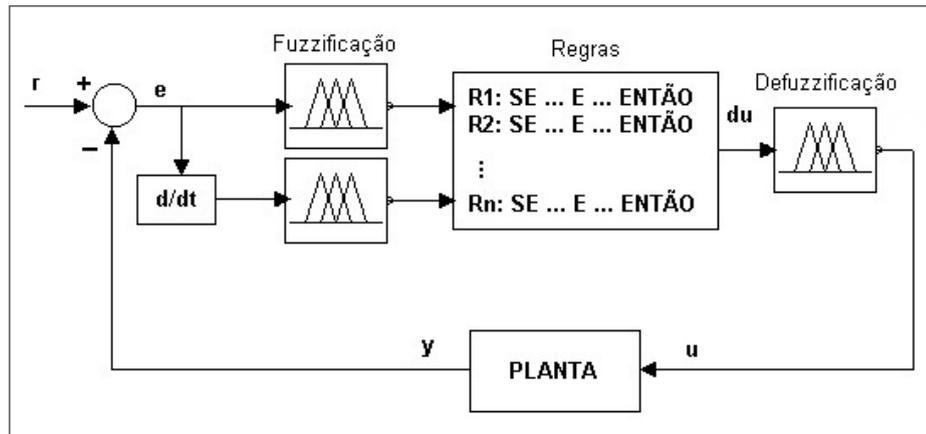


Figura 4.18: Diagrama de blocos do sistema de controle PI-Fuzzy.

ou classes dos sinais de entrada.

Na etapa, também, devem ser definidas pelo projetista as variáveis linguísticas e a quantidade necessária para atender ao sistema. De uma forma sucinta, para se concluir a fuzzificação, deve-se obedecer aos seguintes passos:

- analisar quais são as variáveis usadas no projeto para tornar possível seu controle automático. Neste projeto utilizou-se o erro e a variação do erro dentre as variáveis a serem controladas;
- após escolher as variáveis controladas e manipuladas, deve-se estabelecer o universo de discurso de cada uma destas variáveis;
- escolher a forma das funções de pertinências (triangular, trapezoidal, etc). No projeto, trabalhou-se com formas triangulares;
- e, finalmente, nomear cada variável linguística e obter as funções (pertinência x universo discurso).

O processo de **Inferência** utiliza a base de dados e de regras segundo uma lógica de tomada de decisões para computar a ação de controle. É interessante notar que a base de conhecimento (base de dados e de regras) contém as definições numéricas necessárias às funções de pertinência e a estratégia de controle usada por um operador experiente.

A lógica de tomada de decisões, incorporada à estrutura de inferência, utiliza implicações Fuzzy para simular o raciocínio do operador e gerar a ação de controle conveniente, a partir de uma combinação de condições de entrada. A avaliação das regras por meio das implicações pode ser resolvida por processamento paralelo, por meio de hardware, ou por processamento sequencial.

Em um controlador Fuzzy, baseado em regras, o processo de inferência pode ser dividido nas três etapas seguintes:

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

- determinação do grau de pertinência global da premissa de cada regra;
- determinação da conclusão, para cada regra, em função do grau de pertinência e em função de seu peso;
- união das contribuições das regras, a fim de determinar a ação de controle global.

O processo de inferência é bastante simples; basta seguir os passos já mencionados. Por exemplo, considerando um controlador de duas entradas (e e de) e uma saída (du) constituídos de apenas duas regras:

$$\begin{aligned} \text{SE } (e = ZE) \text{ E } (de = ZE) \text{ ENTÃO } du = ZE. \\ \text{SE } (e = PP) \text{ E } (de = ZE) \text{ ENTÃO } du = PP; \end{aligned}$$

Onde: $ZE =$ Zero e $PP =$ Positivo pequeno, são variáveis linguísticas

É importante observar que toda a análise é feita em relação às variáveis controladas (entradas do controlador Fuzzy) e que essas variáveis são quantificadas com valores Fuzzy, o que caracteriza a lógica Fuzzy. A saída será a ação a ser tomada pelo controlador Fuzzy em todas as vezes que se observar uma determinada combinação dos valores de entrada.

Essa saída Fuzzy, que ainda não é a saída para a planta e sim uma saída para fins de cálculos na lógica Fuzzy, é dada de acordo com a base de conhecimento do especialista. Após realizar as análises pertinentes, já se tem todas as possíveis saídas do sistema de acordo com cada situação. A partir desses resultados, torna-se possível a montagem da Matriz de Associação Fuzzy (FAM).

Essa matriz é formada de todos os resultados provenientes das análises feitas pelo especialista, baseadas na sua experiência, e possui o formato da Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Matriz de associação Fuzzy.

Saída		Vc1= Erro				
		NM	NP	ZE	PP	PM
Vc2= DErro	NM	PM	PM	PM	PP	ZE
	NP	PM	PP	PP	ZE	NP
	ZE	PM	PP	ZE	NP	NP
	PP	PP	ZE	NP	NP	NM
	PM	ZE	NP	NP	NM	NM

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

Onde:

- V_{c1} : Variável de controle 1.
- V_{c2} : Variável de controle 2.
- NM: Negativo Médio;
- NP: Negativo Pequeno;
- ZE: Zero;
- PP: Positivo Pequeno;
- PM: Positivo Médio.

Finalmente, depois de ter a Matriz de Associação Fuzzy (FAM), deve-se usar um mecanismo de inferência para realizar associações que possam resultar em interpretações para expressões do tipo "SE (condição) ENTÃO (ação)". O modelo clássico mais usado é conhecido por "mínimo de *Mamdani*", que se baseia na regra:

$$U_{A,A \rightarrow B} = \min[u_A(x), u_B(x)] \quad (4.12)$$

Esse mecanismo auxiliará na determinação do valor de saída do controlador fuzzy, ou seja, a saída pronta para a próxima etapa, que é de Defuzzificação. Para isso, precisam-se relacionar as regras de inferência e as funções de pertinências. Para melhor compreensão, considerem-se as regras de inferência abaixo e as funções de pertinências que estão representadas na Figura 4.19.

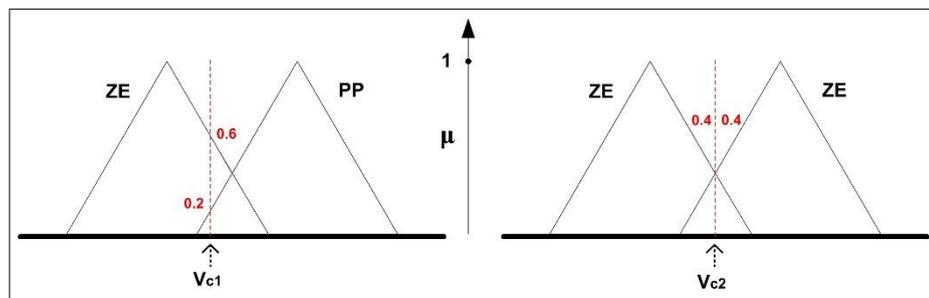


Figura 4.19: Inferência

Composta pelas seguintes **regras**:

REGRA 1: SE ($V_{c1} = PP$) E ($V_{c2} = ZE$) ENTÃO $V_m = NP$

REGRA 2: SE ($V_{c1} = ZE$) E ($V_{c2} = ZE$) ENTÃO $V_m = ZE$

Observe que, dado um valor para a variável controlada 1 (V_{c1}), ela irá interceptar as funções de pertinências *ZE* e *PP* em pontos diferentes em relação ao eixo vertical (u).

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

O ponto onde cada função de pertinência for cortada representa um grau de pertinência. Este grau será dado de acordo com o valor correspondente ao eixo vertical (u). O mesmo acontece com a variável controlada 2 (V_{c2}). Estes mesmos graus são importantes para poder achar a saída que irá ser defuzzificada.

Após determinar o grau de pertinência das variáveis controladas 1 e 2 nas respectivas funções de pertinência, devem-se aplicar as *t-normas* e *t-conormas* que se baseiam nos operadores clássicos de união e intersecção quando os conjuntos são *crisp*. As *t-normas* e *t-conormas* mais utilizadas podem ser vistas na Tabela 4.3 [Sandra & Correa 1999].

Tabela 4.3: Principais t-normas e t-conormas duais.

t-normas	t-conormas	nome
$\min(a,b)$	$\max(a,b)$	Zadeh
$a.b$	$a+b-ab$	Probabilística
$\max(a+b-1,0)$	$\min(a+b,1)$	Lukasiewicz
$\left\{ \begin{array}{l} a, \text{ se } b = 1 \\ b, \text{ se } a = 1 \\ 0, \text{ seno} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} a, \text{ se } b = 0 \\ b, \text{ se } a = 0 \\ 0, \text{ seno} \end{array} \right.$	Weber

Neste trabalho, o método de inferência implementado no CLP foi o do produto nas *t-normas* (Probabilística).

Quando é preciso apenas uma saída fuzzy a ser interpretada de modo qualitativo, a **Defuzzificação** é desnecessária, mas, na maioria dos casos, precisa-se de um valor discreto utilizável como sinal de controle no mundo real; então a conversão do sinal de saída fuzzy para um valor *crisp* é o objetivo desse estágio.

Os métodos de defuzzificação mais usados são:

- Centro da Área (COA).
- Centro dos Máximos (COM).
- Média do Máximo (MOM).

O método utilizado no CLP, para defuzzificar o sinal, é o **Centro da Área**, que é também conhecido como método do centróide, pois calcula o centro da área que representa o termo de saída Fuzzy composto pela união de todas as regras.

O cálculo do centróide é determinado pela equação 4.13

$$du = \frac{\sum_{i=1}^n du_i \bar{u}(du_i)}{\sum_{i=1}^n \bar{u}(du_i)} \quad (4.13)$$

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

onde " m " é o número de funções de pertinência, " $u(du_i)$ " é a área da função de pertinência " i " modificada pelo resultado da inferência, " du_i " é a posição do centróide da função de pertinência " i " e " du " é o valor defuzzificado.

4.5 Controle Emulado

Durante os testes realizados no controle, houve problemas com o conversor CC/CA ressonante, que deixou de fornecer tensão de forma contínua. O motivo foi o mau funcionamento de dois drivers de controle utilizados no comando dos IGBTs, o que gerou um curto circuito no dispositivo controlado e posteriormente uma interrupção do funcionamento sequencial do conversor. Após o incidente, viu-se a possibilidade de adquirir os dispositivos com problemas, mas, infelizmente, estes são vendidos no exterior e seria impossível a aquisição a tempo para possibilitar a conclusão dos testes e do trabalho na data estipulada.

Ciente da situação, foi necessário procurar uma nova alternativa que nos permitisse emular o processo de geração de plasma e testar o controle desenvolvido. Para isto, primeiro é necessário entender como funciona o conversor ressonante no sistema de geração de plasma e assim obter uma conclusão.

Como foi visto no capítulo 3, o conversor série ressonante de altas frequência CC-CA trabalha a uma frequência de 450kHz próxima à frequência natural de ressonância do circuito. O objetivo do conversor é garantir a transferência de energia de forma controlada a altas frequências e a altas potências para a tocha de plasma indutiva.

No circuito ressonante série da Figura 4.20, podemos entender a resultante deste conversor, considerando que $V_s = V_m \cdot \text{sen} \omega t$, $L_{tocha} = 3,2 \mu H$, $C_s = 50 nF$ e $R_{plasma} = 0,6 \Omega$, são valores definidos no trabalho. Quando o conversor estiver funcionando de forma correta, como foi demonstrado na tese [Dubut 2010], o circuito estará ressonando, ou seja, a reatância do capacitor e a reatância do indutor se cancelam, fazendo com que a impedância Z assumo o valor da componente ôhmica da impedância, ou seja, $Z = R_{plasma}$. Então, neste momento, é considerado o comportamento do circuito como resistivo, apesar de saber que ele tem uma pequena influência indutiva, por causa da comutação por zero de tensão (ZVS) dos IGBTs. Neste ponto de ressonância, junto ao gás argônio, é gerado o plasma indutivo, e toda a energia fornecida será dissipada na resistência do plasma (R_{plasma}).

Assumindo este comportamento, foi decidido emular a resultante na geração do plasma, utilizando uma resistência. O valor da resistência emulada teria que ser $0,6 \Omega$, mas não foi possível encontrar um material resistivo com as características apropriadas para este fim, por causa da corrente e da potência necessária. Então foi utilizado um resistor de 52Ω , que tinha as características necessárias para a realização dos testes (até $2,5 kW$).

A Figura 4.21 mostra como foi montado o sistema que emula o processo de geração de plasma. Nele foi definido a ação de cada subsistema que participa deste processo. Na

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

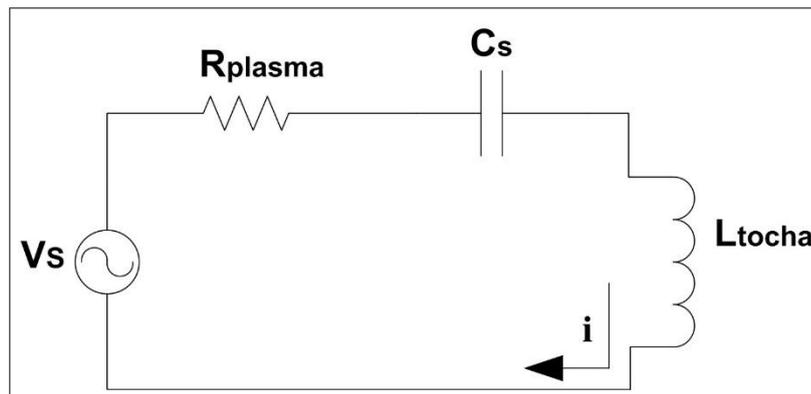


Figura 4.20: Circuito serie ressonante.

parte superior da resistência (marrom), há um duto azul, por onde sairá o ar, graças ao sistema de refrigeração de ar. Pelo espiral verde, passará a água, com o objetivo de contribuir com o resfriamento da resistência. Esta água será controlada pelo sistema de refrigeração de água. A resistência será ligada diretamente à saída do conversor trifásico Boost, fornecendo tensão de corrente contínua. A câmara de direcionamento tem o objetivo de concentrar os efeitos térmicos gerados no sistema.

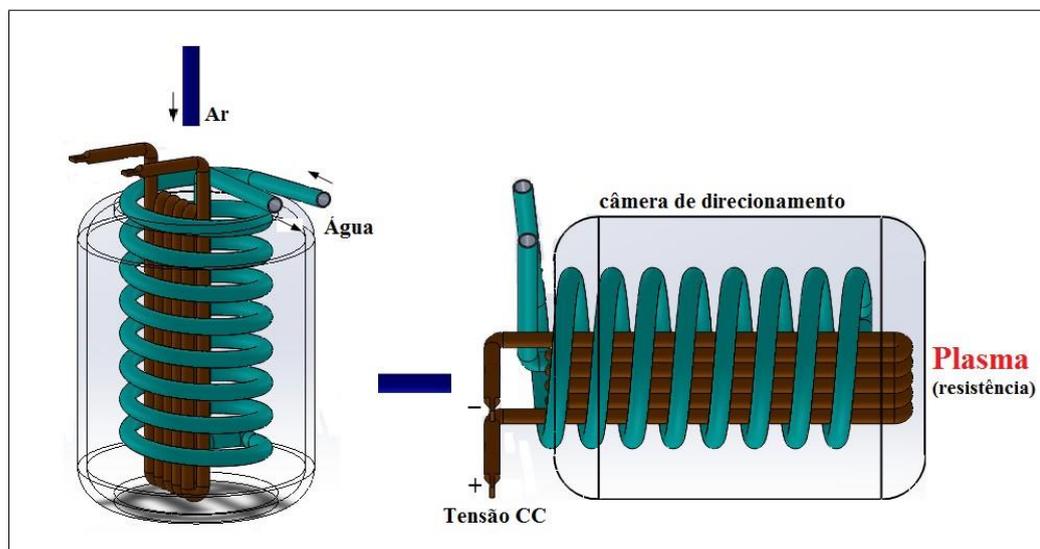


Figura 4.21: Sistema emulado na geração de plasma.

Na Figura 4.22 é possível identificar que a estrutura de controle original foi mantida, mas a tocha ICP foi substituída pelo sistema emulado. Outra mudança se dá no sensor de temperatura, que deixa de ser o pirômetro infravermelho portátil, já que ele trabalha com temperatura acima de $60^{\circ}C$, sendo superior ao que é almejado no sistema emulado, que trabalha com temperatura de $30^{\circ}C$ a $90^{\circ}C$. Para este fim, foi utilizado um sensor PT100.

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

É bom destacar que a faixa de controle de tensão foi de 190V_{cc} para 250V_{cc}. Isso se dá por causa de limitações do resistor utilizado e pelo comportamento natural do conversor Boost desenvolvido.

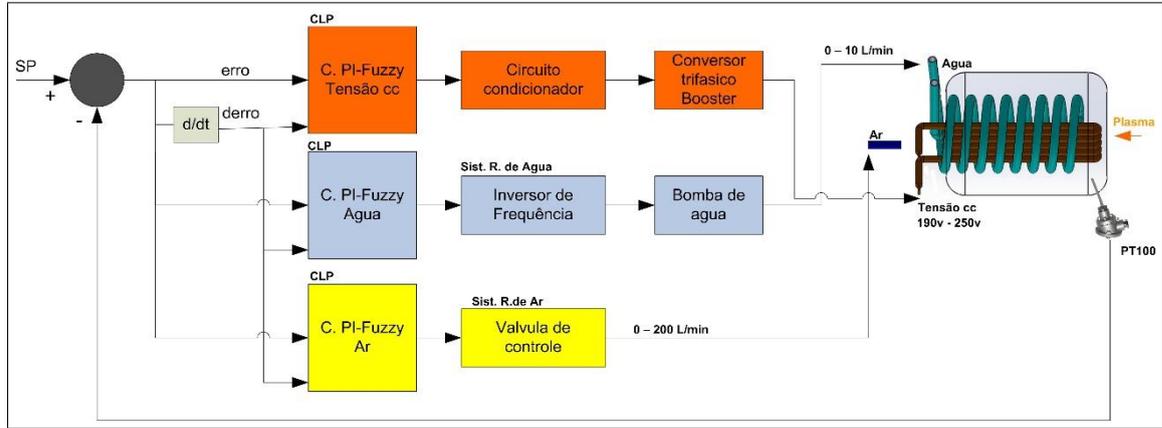


Figura 4.22: Estratégia de controle Fuzzy aplicado no sistema emulado de geração de plasma indutivo.

O sensor de temperatura PT100 foi linearizado antes de poder ser utilizado no processo de controle. Para isto foi utilizado o circuito da figura 4.23, mediante o qual definiram-se os valores de tensão proporcionais ao que está sendo medido. O resistor R tem o valor de 220Ω, e os valores da resistência do sensor PT100 (R_{PT100}) estão definidos no anexo 1, que estão em função da temperatura. Esses valores foram conferidos também por meio de outro sensor digitalizado. O valor de tensão V_{CLPT} está dado pela equação 4.14.

$$V_{CLPT} = \frac{R_{PT100}6V}{R + R_{PT100}} \quad (4.14)$$

A equação 4.14 pode ser escrita também como:

$$R_{PT100} = \frac{R * V_{CLPT}}{6V - V_{CLPT}} \quad (4.15)$$

Utilizando a função transferência dada pelo fabricante, foi definido que [Antônio & Silva 2010]:

$$R_{PT100} = R_0 + ATR_0 \quad (4.16)$$

Onde $R_0 = 100\Omega$, $A = 3.908 \text{ E}^{-3}/^\circ\text{C}$

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

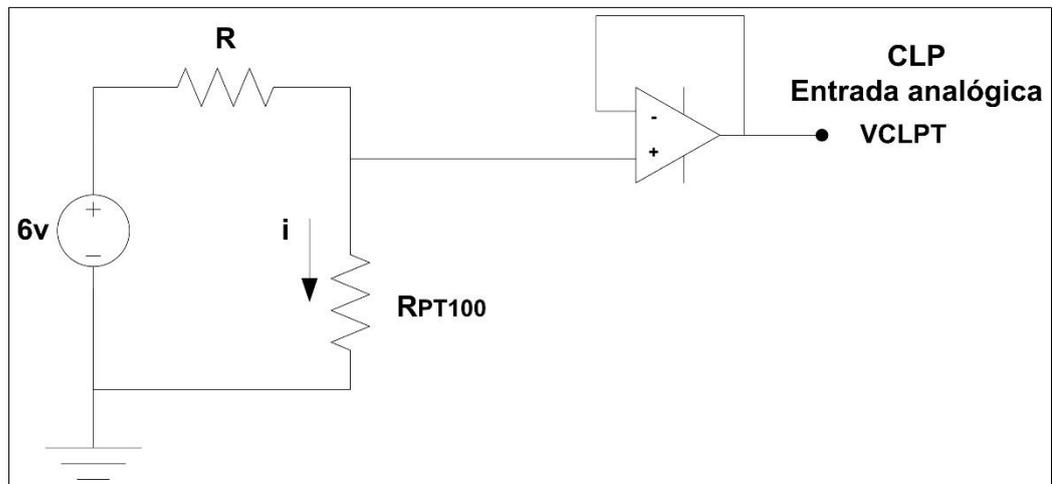


Figura 4.23: Circuito condicionador para o sensor PT100

Igualando as equações, temos o valor da temperatura já linearizada:

$$T = \frac{R * V_{CLPT}}{AR_0(6V - V_{CLPT})} - \frac{1}{A} \quad (4.17)$$

4.6 Desenvolvimento do controle

Geralmente, não existe um método para determinar o número mínimo de regras Fuzzy necessárias ao controle do processo. A solução depende do número de valores linguísticos desejados e de outros aspectos qualitativos do problema a ser resolvido [Campos 2004]. Nesse caso específico, foram escolhidas cinco funções de pertinência (erro e derro), em todos os controles PI-Fuzzy implementados, dando um total de 25 regras aplicadas a cada um deles [Einwag 1999]. Para poder definir as funções de pertinência e suas regras, foi necessária uma árdua busca para entender em que condições o controle se comportava da melhor forma, apresentando, a seguir, o resultado após esta procura.

A Figura 4.24 apresenta as funções de pertinência do erro de temperatura PI-Fuzzy do conversor trifásico Boost. A primeira e última função de pertinência é tipo trapézio, as demais funções de pertinência são triangulares. A variação do erro de temperatura admitida foi de -30°C a 30°C . A figura 4.25 apresenta as funções de pertinência do derro (derivada do erro), em que a variação de derro na temperatura é de -3°C a 3°C . A saída do bloco PI-Fuzzy é mostrada na figura 2.26, na qual a faixa de controle de tensão é dada entre 0 e 10V. As regras para a saída do controle de tensão estão definidas na Tabela 4.4.

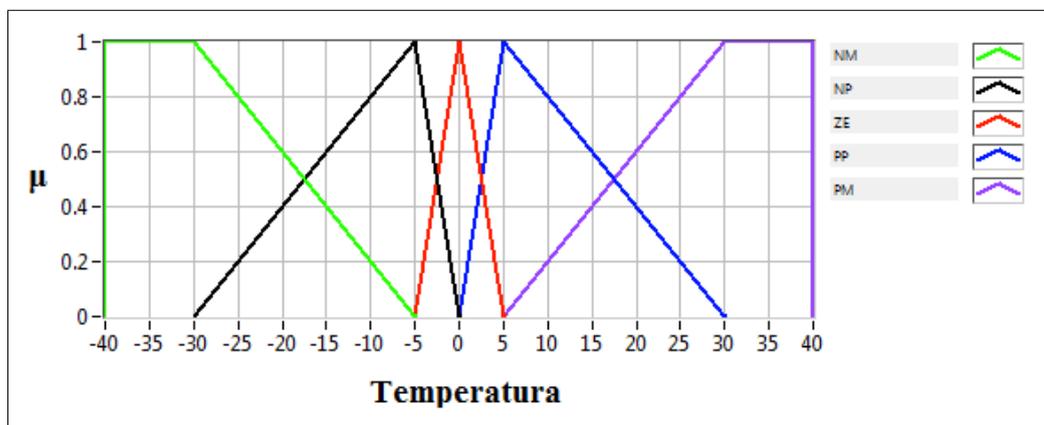


Figura 4.24: Funções de pertinência da entrada de erro do bloco PI-Fuzzy do conversor trifásico Boost.

A Figura 4.27 apresenta as funções de pertinência do erro de temperatura PI-Fuzzy do sistema de refrigeração de água. A primeira e última funções de pertinência são do tipo trapézio, as demais funções de pertinência são triangulares. A variação do erro de temperatura admitida foi de -30°C a 30°C . A Figura 2.28 apresenta as funções de pertinência do derro (derivada do erro), em que a variação de derro na temperatura é de -3°C a 3°C . A saída do bloco PI-fuzzy é mostrada na figura 4.29 na qual a faixa de controle de tensão é dada entre 0 e 10V. As regras para a saída do controle de tensão estão definidas

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

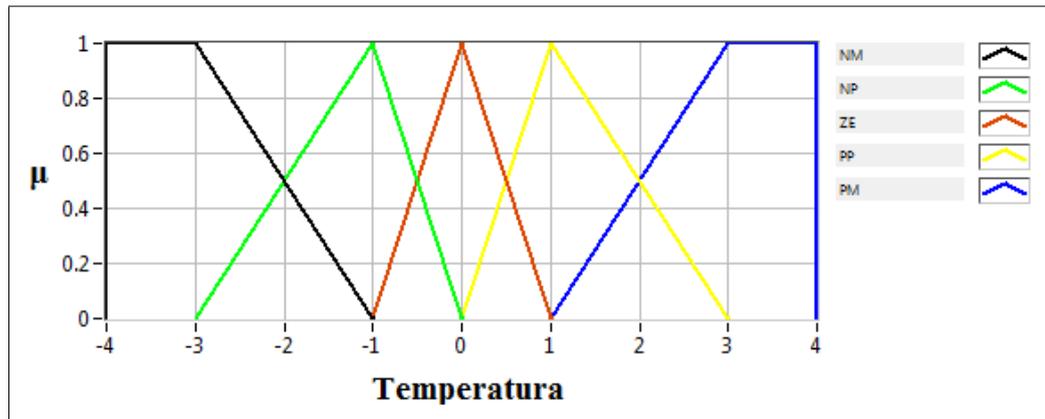


Figura 4.25: Funções de pertinência da entrada de derro do bloco PI-Fuzzy do conversor trifásico Boost.

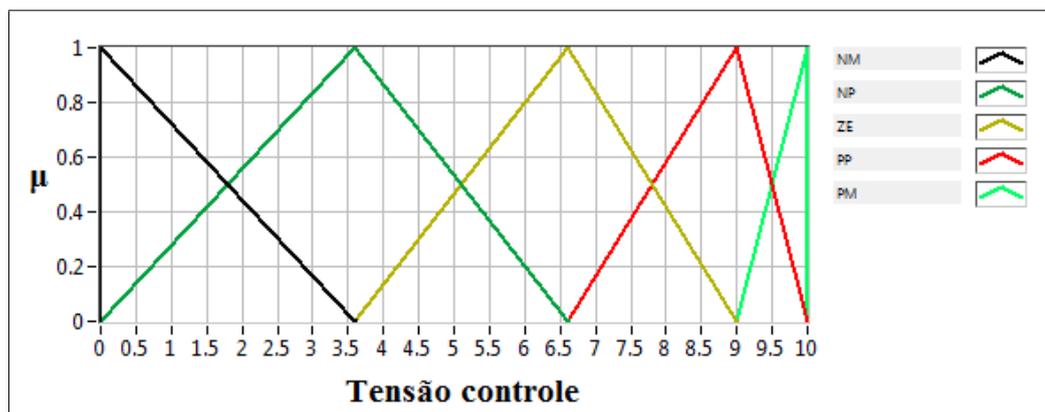


Figura 4.26: Funções de pertinência de saída do bloco PI-Fuzzy do conversor trifásico Boost.

		Derro				
Saída		NM	NP	ZE	PP	PM
Erro	NM	NM	NM	NM	NM	NM
	NP	NM	NM	NM	NM	NM
	ZE	NM	NM	NM	NP	NP
	PP	ZE	ZE	PP	PP	PM
	PM	PM	PM	PM	PM	PM

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

na Tabela 4.5.

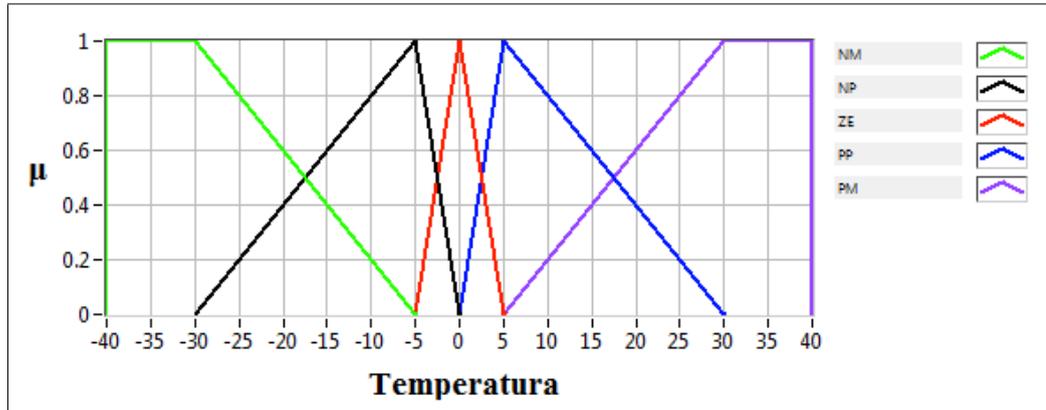


Figura 4.27: Funções de pertinência da entrada de erro do bloco PI-Fuzzy do sistema de refrigeração de água.

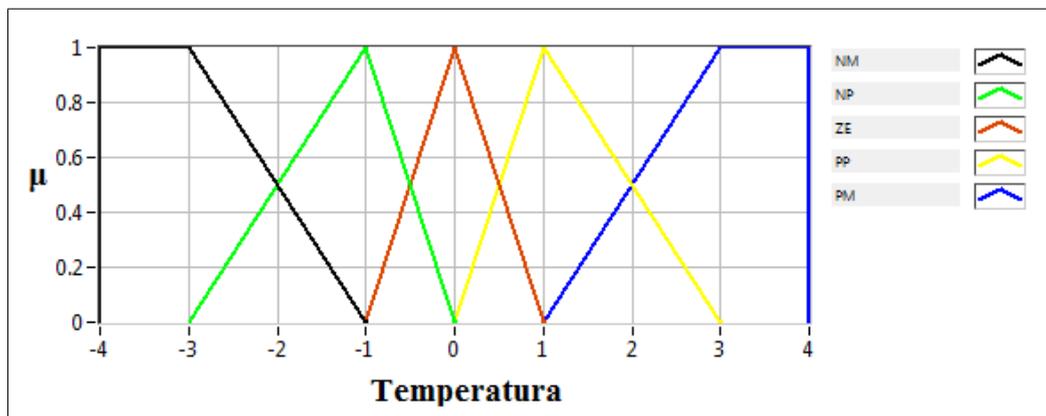


Figura 4.28: Funções de pertinência da entrada de erro do bloco PI-Fuzzy do sistema de refrigeração de água.

Tabela 4.5: Regras de saída do controle PI-Fuzzy do sistema de refrigeração de água.

		Derro					
		Saída	NM	NP	ZE	PP	PM
Erro	NM	PM	PM	PM	PM	PM	PM
	NP	PP	PP	PP	ZE	ZE	ZE
	ZE	NM	NM	NP	NP	NP	NP
	PP	NM	NM	NM	NM	NM	NM
	PM	NM	NM	NM	NM	NM	NM

CAPÍTULO 4. CONTROLE NA GERAÇÃO DE PLASMA

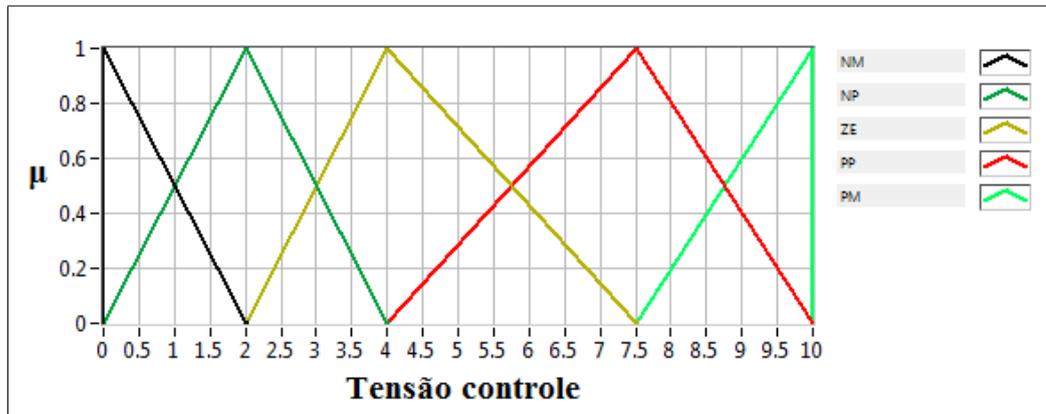


Figura 4.29: Funções de pertinência de saída do bloco PI-Fuzzy do sistema de refrigeração de água.

As funções de pertinência e as regras aplicadas no sistema de refrigeração de água são as mesmas aplicadas no sistema de refrigeração de ar

4.7 Conclusões

- Para que seja possível uma melhor compreensão do processo de geração do plasma por acoplamento indutivo, foi feita uma revisão bibliográfica do assunto, em que foram analisadas diversas técnicas de medição aplicadas aos parâmetros de plasma. Entende-se que estas influenciam diretamente no comportamento do controle. Também está em evidência a importância de utilizar sistemas de controle inteligentes (redes neurais, fuzzy e ANFIS) que ajudam na previsão e calibração dos resultados almejados, além de suprirem a utilização de um modelo matemático, que é impreciso e complexo.
- Para o processo de geração de acoplamento indutivo, foi definida a utilização de cinco variáveis de controle: água refrigerada, ar refrigerado, gás plasmático, potência RF e sistema de ignição.
- Como se sabe, a estratégia de controle desenvolvida tem que ser capaz de lidar com cinco variáveis de forma sincronizada e eficiente.
- Para definir a estratégia de controle, o melhor método encontrado nestas condições é usar um sistema MISO junto com um controlador inteligente, que darão cobertura no sincronismo e na eficiência, em função da experiência adquirida pelo operador, além de não necessitar de um modelo matemático.
- Foram implementados diversos circuitos condicionadores, dando suporte ao processo de aquisição e interpretação dos dados fornecidos pelos subsistemas da planta. Estes dados foram utilizados para desenvolver o controle de geração de plasma.
- Foi montada uma estratégia de controle utilizando cinco variáveis, as quais dariam suporte ao processo de geração de plasma.
- A estratégia de controle foi implementada utilizando um controlador PI-Fuzzy tipo MISO, que cumpre com as condições impostas necessárias para este trabalho.
- O sistema emulado foi devidamente justificado para poder suprir as necessidades vistas no processo real de geração de plasma.
- Para definir os parâmetros do controle PI-Fuzzy, foi utilizada principalmente a experiência obtida no processo.

Capítulo 5

Otimização do processo de Inertização

Neste capítulo, serão abordados meios que permitam otimizar o processo de monitoramento e automação da planta de eliminação de resíduos por plasma. A otimização é conhecida por melhorar e gerar resultados diferenciados no processo em questão, por isso foi preciso buscar uma ferramenta que permita interagir de forma segura e eficaz com a planta real sem necessidade de manipulá-la. Para isto, foram utilizados os conceitos de realidade mista, que mistura processos reais com processos virtuais. Atualmente, esta técnica vem sendo desenvolvida na produção de grandes indústrias e em pesquisas acadêmicas. Para suprir o sistema de monitoramento e controle da planta real, foram otimizados diferentes processos na procura de ter uma eficiência maior no resultado final.

5.1 Arquitetura virtual da planta de eliminação de resíduos utilizando realidade mista.

Atualmente, as grandes empresas industriais precisam gerenciar e executar com sucesso projetos que envolvam a participação simultânea de múltiplos centros ao redor do mundo, mantendo um ótimo controle no custo e no prazo do projeto. Elas também têm a necessidade de preservar as suas melhores práticas para a reutilização de informações em projetos futuros, aumentando a produtividade e preservando os seus conhecimentos empresariais. Para suprir esta demanda no projeto, controle e execução no processo, são utilizadas ferramentas computacionais como o SmartPlant 3D [Cengage 2012], que é uma solução abrangente, que fornece todas as ferramentas necessárias para a concepção de uma planta virtual, assim como para a manutenção de seu modelo durante todo o seu ciclo, além de interagir com outros softwares de controle [Jenkins 2013].

Complexas tarefas de manutenção, montagem e desmontagens de máquinas e seus sistemas de automação representam um excelente domínio para as aplicações de reali-

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

dade virtual (*Virtual Reality* - VR), mista (*Mixed Reality* - MR) e aumentada (*Augmented Reality* - AR) [Baratoff & Regenbrecht 2004]. A visualização de sistemas com suporte da Realidade Mista representa uma potencial solução para o fornecimento de instruções contínuas e autônomas apresentadas no local certo e na hora certa. Neste sentido, ferramentas de apoio aos sistemas de automação industrial tais como: ferramentas CAD/CAE/CAM com prototipagem virtual de produtos, manufatura digital, sensoriamento e sistemas embarcados inteligentes começam a ser citadas nas aplicações industriais [Moore 2006]. Nota-se, ainda, a multidisciplinariedade dos temas envolvidos e os significantes e contínuos investimentos da indústria.

A explosão evolutiva computacional atual tem impacto nas metodologias de ensino e na indústria, já que, com a popularização dos computadores, podem ser empregadas em diversos níveis aplicativos. Entre as ferramentas mais utilizadas na organização e no gerenciamento de materiais de ensino e controle, estão os ambientes virtuais, que permitem a flexibilização de meios de comunicação entre usuário e provedores e a disponibilização de material de apoio independente de local e de horário [A. Carlos & Fernando 2011].

O desenvolvimento de aplicações de interfaceamento, com experimentos remotos em laboratórios híbridos e plantas indústrias híbridas, emprega geralmente os termos de realidade mista, seja para completar seja para complementar equipamentos e componentes de laboratório/plantas reais. Desta forma, a prática, antes restrita pela presença tanto dos usuários quanto das plantas reais, pode ser acessada remotamente por usuários distribuídos tanto localmente quanto temporalmente (fora de horários tradicionais de funcionamento). Isto requer, obviamente, o desenvolvimento de um sistema virtual automatizado para controlar não só acesso, manipulação e visualização como também a segurança dos equipamentos envolvidos [Schaf 2011], [Schaf & Pereira 2009].

Realidade mista, como o próprio nome sugere, é a mescla ou mistura de simulações (elementos virtuais) com a realidade (elementos físicos). O termo foi definido por [Schaf & Pereira 2011] como "a mescla de mundos reais e virtuais que conecta completamente a realidade com a virtualidade". O conceito de realidade mista engloba: virtualidade, virtualidade aumentada, realidade aumentada, realidade [P. Milgram & Zhou 1995]. Segundo [Billingham & Kato 1999], realidade mista é comumente entendida como uma integração transparente ao usuário entre os mundos real e virtual.

É crescente o número de pesquisas e experimentos de realidade mista que são encontrados na literatura, em aplicações nas áreas de educação [Bruns & Erbe 2004], entretenimento (Jogos eletrônicos, filmes, etc.) [Faust & Bruns 2006], indústria (projetos arquitetônicos, simuladores, e outros) [Cengage 2012], cultura (turismo) [Kretshmer 2001] e medicina [Bockholt 2003], entre diversas outras.

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

A implementação de um sistema utilizando realidade mista se dá da mesma forma que os experimentos reais remotos com funcionalidades virtuais (por exemplo, instrumentos de medição virtuais). Uma vez que experimentos de realidade mista exigem a integração entre dispositivos reais e virtuais, propostas de integração entre sinais físicos reais e sinais virtuais (informação) são necessárias. Uma proposta de interface para integração entre sistemas reais e virtuais é o conceito de *hyper-bonds*.

Os *hyper-bonds* combinam representações abstratas de sistemas unificados, usando gráficos de *Bond*, com a implementação do conceito de *hyper-connection* (super conexões). Essas conexões unem fenômenos físicos de representações externas ao ambiente computacional com estruturas lógicas de representações internas ao ambiente computacional, isto é, uma combinação de sistemas físicos com seus componentes virtuais [Bruns & Erbe 2004]. Em outras palavras, esta ferramenta possibilita sinais físicos (fenômenos reais) interagirem com sinais digitais (ambiente virtual) [Muller 2006].

A Figura 5.1 ilustra como podem ser interligados os processos reais com os virtuais por meio da interligação de sinais elétricos com informações (sinais) digitais. Esta não é a única forma de interligação, mas é largamente a mais usual. O gerenciador do(s) processo(s) é a peça chave desta interligação, pois é o elemento responsável pelo direcionamento e pela conexão entre os sinais. O sistema de aquisição de dados (DAS - *Data Acquisition System*), que fará a interface D/A/D, é fundamental para a extração de informações necessárias do processo real [Schaf 2011].

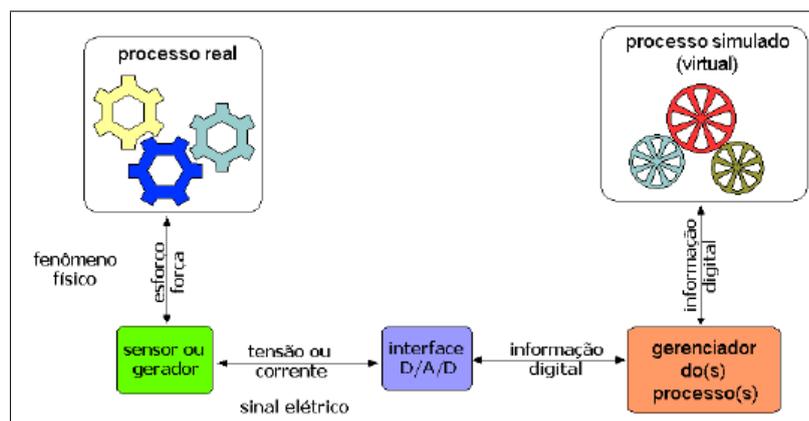


Figura 5.1: Realidade mista - exemplo de interconexão de processos reais e virtuais, [Schaf 2011].

Existem diversos trabalhos, sobre esse assunto, nas mais variadas áreas, como foi mencionado anteriormente, mas será abordado um que teve participação de pesquisadores brasileiros. O deriveSERVER, ou também chamado de *Distributed Real and Virtual Learning Environment for Mechatronics and Teleservice*, foi desenvolvido pelo grupo de

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

pesquisa ArtecLab da Universidade de Bremen, Alemanha, e também fez parte do projeto europeu MARVEL [D. Muller & Marvel 2004]. Trata-se de uma bancada de realidade mista onde equipamentos eletropneumáticos são utilizados tanto em simulações quanto em experimentos reais. O *link* entre a bancada virtual e a real é alcançado usando o conceito de *hyper-bonds* [Bruns 2005], [Faust & Bruns 2003], que permite que sinais digitais virtuais e reais (tensão e pressão de ar) sejam bidirecionalmente trocados. O conceito de *hyper-bond* usa hiperconexões entre o *hardware* e o *software* para converter os sinais para representações lógicas digitais e a teoria de *Bond Graphs* [Paynter 1960], [Karnopp & Rosenberg 1990], para possibilitar a modelagem matemática da ligação. O projeto original foi expandido usando-se técnicas de ambientes virtuais colaborativos (AVC), entre um trabalho em conjunto da Universidade de Bremen, a Universidade Federal de Rio Grande do Sul e o SENAI - Mecatrônica de Caxias do Sul, sendo esta última entidade beneficiada com a remodelagem do sistema em questão, para melhorar o ensino de sistemas eletro-pneumáticos e de automação em seus laboratórios [F. Schaf & Krahkeche 2007].

Os modelos 3D são caracterizados por buscarem reproduzir em software características ou comportamentos de um sistema real. O objetivo da modelagem é estudar e avaliar o sistema com seu modelo virtual, sem a necessidade de trabalhar diretamente no modelo físico. Entre as vantagens de trabalhar com um modelo virtual destacam-se: [Salazar & Macías 2009]

- A economia financeira produzida quando os testes (e conseqüentemente falhas) são realizados em um modelo virtual. As falhas em uma planta física podem causar acidentes e/ou danificar peças de difícil reposição, prejudicando assim o estudo do modelo.
- O modelo virtual economiza espaço físico e construção física da planta, o que pode ser uma solução para instituições que desejam estudar determinado modelo, mas não dispõem de recursos para sua aquisição.
- O modelo pode ser reproduzido facilmente e estudado paralelamente por pesquisadores em qualquer lugar no mundo. Esse paralelismo no estudo do modelo leva ao alcance mais rápido dos resultados.
- O modelo fica disponível para ser trabalhado em qualquer momento, sem a dependência do acesso físico.

Pela pesquisa revisada nesta abordagem teórica, pode-se concluir que, quanto maior o número de variáveis a ser controladas (atuadores, sensores, etc), o modelo a ser desenvolvido terá uma maior aproximação com o processo real. Também é importante ressaltar

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

a importância do gerenciador de processos, que permitirá implementar a interação de comunicação dos dados virtuais e reais, como também desenvolver diversas estratégias de controle na planta.

5.1.1 Desenvolvimento da arquitetura de realidade mista

Posteriormente, serão descritas as principais ferramentas utilizadas no processo de automação virtual da planta, levando em conta os conceitos vistos na revisão bibliográfica.

National Instruments LabVIEW:

LabVIEW é uma linguagem de programação gráfica que utiliza ícones, em vez de linhas de texto, para criar aplicações, em contraste com as linguagens de programação baseadas em texto, em que instruções determinam a execução do programa. Ele utiliza programação baseada em fluxo de dados, em que tais fluxos determinam a execução.

É possível construir uma interface de usuário, utilizando um conjunto de ferramentas. A interface de usuário é conhecida como "painel frontal". Então adiciona-se o código, utilizando-se representações gráficas de funções para controlar os objetos do painel frontal. O "diagrama de bloco" contém esse código. Sob certos aspectos, o diagrama de bloco assemelha-se a um fluxograma.

Este *software* está totalmente integrado para a comunicação com diversos *hardwares*, como PXI, RS-232, RS-485 e dispositivos DAQ plug-in. Ele também possui recursos internos para conectar sua aplicação à Internet, utilizando o "LabVIEW Web Server" e aplicativos como "ActiveX" e redes TCP/IP. A facilidade de integração com diferentes softwares de programação é um ponto importante na escolha desta ferramenta computacional, ajudando, assim, na integração, cooperação e otimização de processos na simulação.

Utilizando o LabVIEW, é possível criar aplicações que permitam monitorar medições, controlar dispositivos virtuais/reais, registrar/armazenar dados, analisar e gerar relatórios, entre outros. Podem-se também obter programas executáveis, em que não precisaríamos utilizar mais a plataforma em questão [Instruments 2001].

Solidworks corp.:

O SolidWorks é uma ferramenta de projeto que utiliza a modelação paramétrica de sólidos, baseada nas características e propriedades de cada elemento e ação, sendo possível alterá-las em qualquer altura do processo de modelação [Souza 2001].

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

Este *software* de CAD, que modela peças em 3D parametricamente, permite, a partir do modelo 3D, gerar as vistas ortográficas automaticamente e também a montagem de conjuntos e dispositivos mecânicos. Portanto trabalha com três ambientes gráficos distintos: o *ambiente part* (ambiente de modelagem), o *ambiente drawing* (ambiente de representação bidimensional) e o *ambiente assembly* (ambiente de montagem) [Souza 2001].

Nele é possível encontrar um conjunto de comandos básicos que permitem que se faça a modelagem do sólido. Estes comandos podem ser divididos em dois grupos:

- comandos básicos de construção: *Extrude*, *Revolve*, *Sweep*, *Loft* e *Rib*. Com exceção do *Rib*, que apenas acrescenta material, cada um destes comandos pode ser utilizado tanto para acrescentar material quanto para retirar material. Os comandos necessitam de um desenho auxiliar ou esquema bidimensional (*sketch*);
- comandos básicos de edição: *Fillet*, *Chanfer*, *Shell*, *Draf*, e *Hole* que, por sua vez, modificam o modelo sem a necessidade de um desenho auxiliar (*sketch*) e atuam diretamente no objeto.

Segundo RenderWorks [Souza 2001], o SolidWorks possibilita aos projetistas e engenheiros transformarem suas ideias em projetos completos, valendo-se de ferramentas de fácil aprendizado, destinadas a áreas como:

- máquinas: construção de máquinas e das peças que a compõem;
- chapas: o módulo para dobra e desenvolvimento de chapas vem integrado ao SolidWorks como ferramenta nativa;
- moldes: o SolidWorks possui ferramentas específicas para a geração de cavidades de moldes;
- móveis: a indústria moveleira está se aproximando cada vez mais da mecânica em termos de precisão de montagens de componentes;
- elétrica: o *Software EmbassyWorks* é um produto para projeto de cabeamentos e fiações;
- design: um poderoso modelador de sólidos com superfícies integradas e recursos de renderização e animação.

Como conclusão, pode-se observar que este software é muito utilizado em pesquisas industriais e acadêmicas, contemplando uma vasta gama de opções na interação com outros softwares de diferente natureza, como é o caso do LabVIEW.

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

Placa desenvolvimento FPGA Spartan-3E:

Um arranjo de portas programáveis no campo ou FPGA (*Field Programmable Gate Array*) é um dispositivo lógico que contém um arranjo bidimensional de células lógicas genéricas e interruptoras. Os FPGAs podem ser incluídos em uma classe de dispositivos chamados lógicos programáveis em campo, ou *Field-Programmable Logic* (FPL). Os FPL são definidos como dispositivos programáveis que contêm, de maneira repetida, campos de pequenos blocos e elementos, chamados, no caso da Xilinx, blocos lógicos configuráveis (*Configurable Logic Block* - CLB) [Meyer 2001].

Quando os FPGAs apareceram pela primeira vez, nos anos 80, foram amplamente utilizados para implementar lógica básica, máquinas de estado de complexidade média e um limitado processamento de dados. Durante os anos 90, o tamanho e a complexidade dos FPGAs começaram a aumentar e sua aplicação fundamental se deu nas telecomunicações. Para finais dos anos 90, os FPGAs eram também utilizados em automóveis e aplicações industriais.

Os FPGAs são utilizados regularmente para emular uma plataforma de hardware onde são verificadas as implementações físicas de novos algoritmos. Por outro lado, seu baixo custo de desenvolvimento e curto tempo para estar no mercado fazem com que os FPGAs gradualmente sejam mais usados. FPGAs de alto rendimento, que contêm milhões de portas lógicas, podem ser encontrados no mercado. Alguns destes dispositivos incluem microprocessadores, entradas e saídas de alta velocidade e algumas outras características. Como resultados, os FPGAs são usados em várias tarefas, que incluem comunicações, processamento de imagens e outras aplicações de processamento de sinais. [Meyer 2001].

A placa de desenvolvimento Spartan-3E oferece uma poderosa plataforma de desenvolvimento altamente avançado. A placa possui uma plataforma Flash Xilinx, USB e interfaces de programação JTAG com várias opções de configuração do FPGA por meio da *onboard Intel StrataFlash* e da *ST Microelectronics Flash Serial*. A placa é totalmente compatível com todas as versões das ferramentas Xilinx e *National Instruments*. A Spartan-3E também é compatível com o *MicroBlaze Embedded Development Kit* (EDK) e *PicoBlaze* da Xilinx [Xilinx 2008].

Especificações técnicas:

- Xilinx FPGA XC3S500E;
- Xilinx XCF04 plataforma Flash para armazenar configurações;
- 32MB de SDRAM DDR Micron;
- StrataFlash Numonyx 16MB;
- 2MB ST Microelectronics Flash Serial;

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

- Fontes de Alimentação Texas Instruments TPS75003 Gestão de Alimentação;
- Triple-IC;
- SMSC Ethernet PHY LAN83C18.

Dentro de todas as funcionalidades que o kit de desenvolvimento oferece, podem-se definir as que foram utilizadas neste processo: IC-FPGA, USB, LCD, chaves de comutação e leds discretos. (Ver a Figura 5.2)

O diagrama elétrico de comunicação entre o FPGA e o LCD é mostrado na Figura 5.3 Na Figura 5.4 é visto o diagrama elétrico das chaves de comutação e dos leds discretos da placa de desenvolvimento.

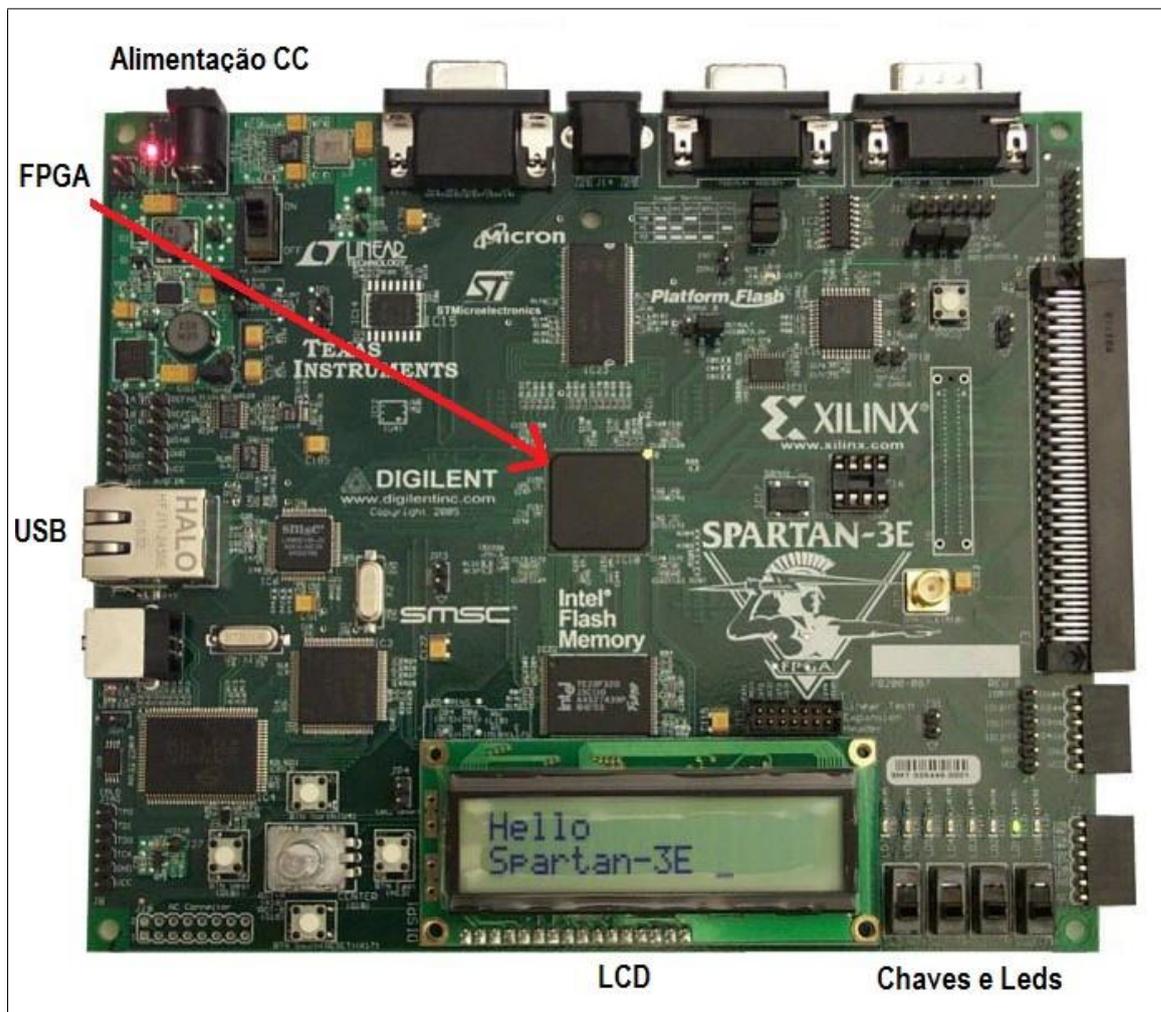


Figura 5.2: Placa de desenvolvimento Spartan-3E.

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

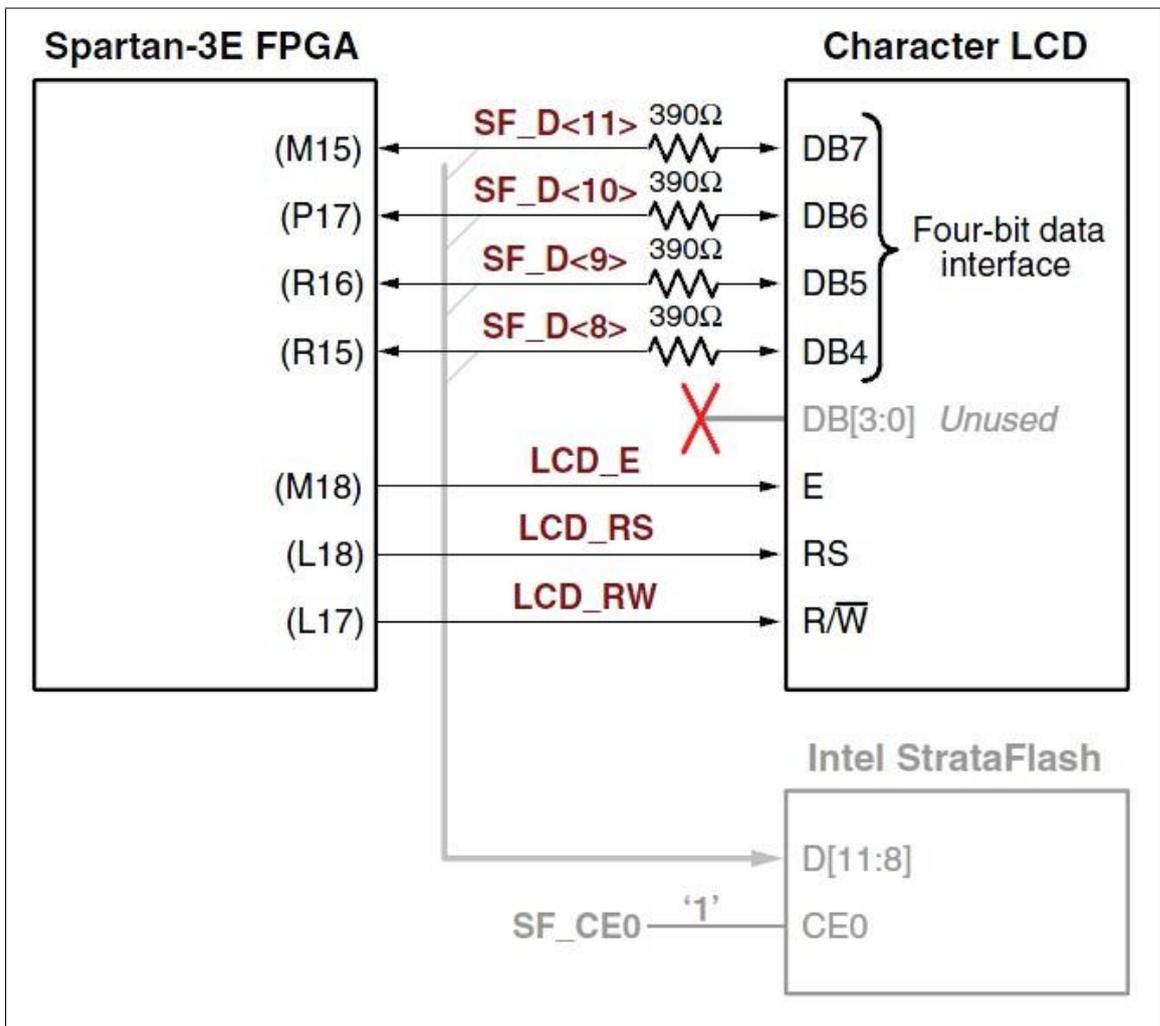


Figura 5.3: Diagrama elétrico da conexão entre o FPGA - LCD.

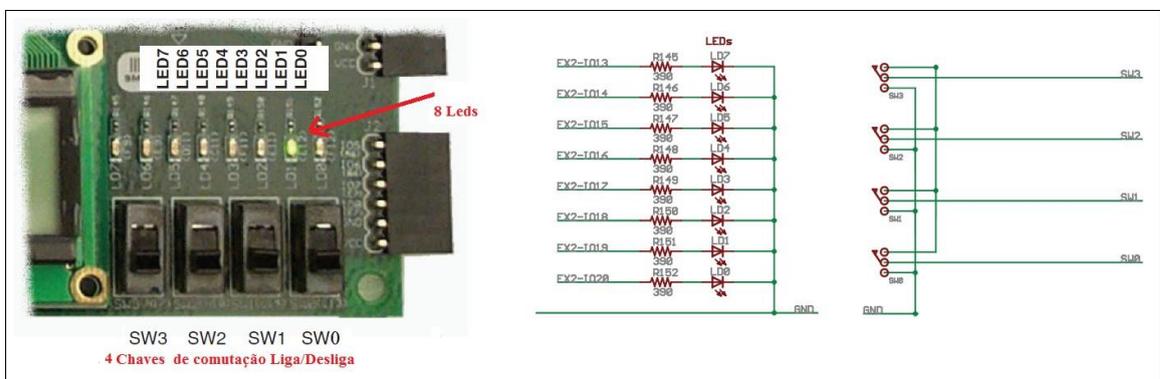


Figura 5.4: Diagrama elétrico dos 8 leds e as 4 chaves de comutação da placa de desenvolvimento Spartan-3E.

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

5.1.2 Implementação da arquitetura de realidade mista

Construção da planta 3D:

A Planta 3D desenhada para este trabalho pode ser vista na Figura 5.5, desenvolvida totalmente no *software* SolidWorks.

O objetivo da simulação da planta em 3D é realizar uma simulação precisa de cada parte da planta, considerando dimensões, cores e posições nas quais se encontra atualmente, criando, assim, uma situação mais próxima da planta real.

Como pode ser observado na Figura 5.6, todas as etapas que fazem parte da planta real foram modeladas, incluindo uma etapa que ainda não foi implementada na estrutura física atual (esteira rolante), mas faz parte da otimização que se procura neste trabalho. No desenho, é vista uma caixinha de cor vermelha, que está representando os resíduos que serão eliminados no processo. Existe ainda uma esteira rolante que tem a função de transportar os resíduos até o reator principal, que tem associado três portas de acesso controladas pneumaticamente e uma tocha ICP. Do lado esquerdo do reator principal, está localizado no sistema de refrigeração de água e do lado direito do reator secundário, que tem incorporado um queimador a gás. Na sequência, pode-se visualizar o reator de lavagem, que tem incluído um sistema de realimentação de água, formado por uma bomba, uma rede de condutores e um reservatório de água (azul). Na parte superior do reator de lavagem, estão localizados o exaustor (vermelho) e um sensor (verde). Finalmente, à direita do reator lavagem, está localizada a fonte RF (amarelo). Além disso, foi delimitada uma área de trabalho de cor verde, determinada para o posicionamento adequado da planta.

Após uma visão geral das partes integrantes da planta e de como ela está dividida, algumas dessas partes serão destacadas para um maior grau de detalhamento. O sistema de refrigeração por água apresentado na Figura 5.7 mantém as mesmas características encontradas no sistema real, como a caixa de comando, o inversor de frequência e os conectores onde serão ligadas as mangueiras de água, que refrigerarão a tocha plasmática.

Na Figura 5.8, é visualizado o queimador a gás em 3D, formado por um grupo de três válvulas de controle manual de gás e um sistema próprio para gerar a ignição. Na Figura 5.9, é mostrado o desenho 3D da fonte de alimentação de rádio frequência, onde estão localizados os botões de comando (verde - liga e vermelho - desliga) responsáveis pelo acionamento manual, tanto do conversor Boost CA/CC, quanto do inversor ressonante CC/CA. Pode-se visualizar uma chave seletora, que define se a fonte de alimentação RF vai ser ligada ou não.

O exaustor 3D, que fica na parte superior do reator lavagem, é mostrado na Figura

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

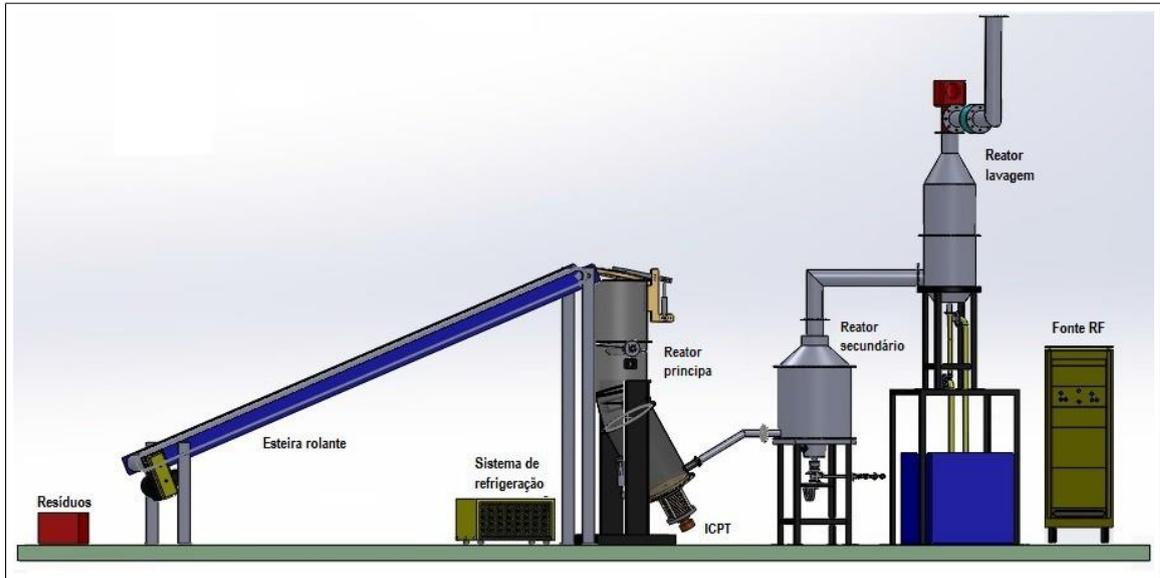


Figura 5.5: Vista lateral esquerda da planta de eliminação de resíduos em 3D.

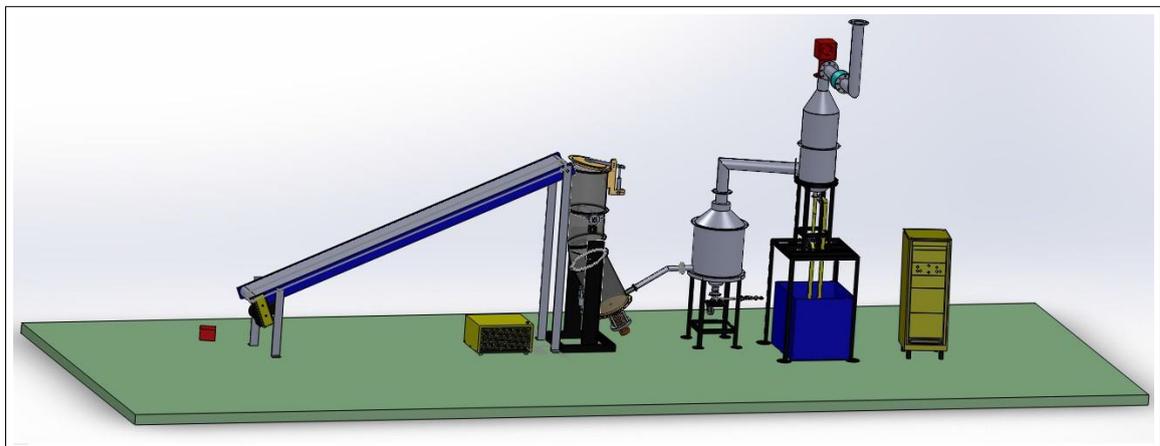


Figura 5.6: Vista lateral inclinada esquerda da planta de eliminação de resíduos em 3D.

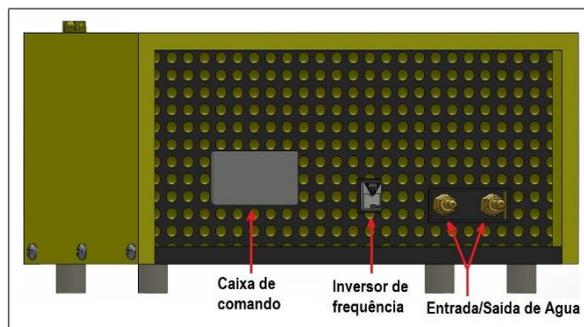


Figura 5.7: Sistema de refrigeração de água em 3D.

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

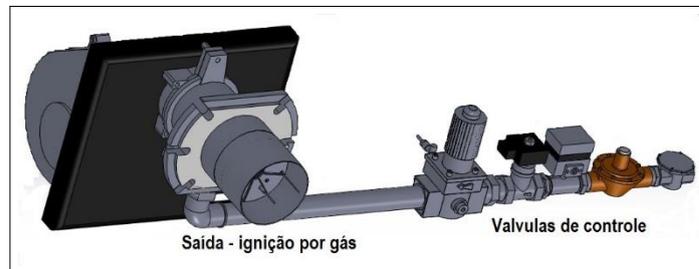


Figura 5.8: Queimador a gás em 3D.

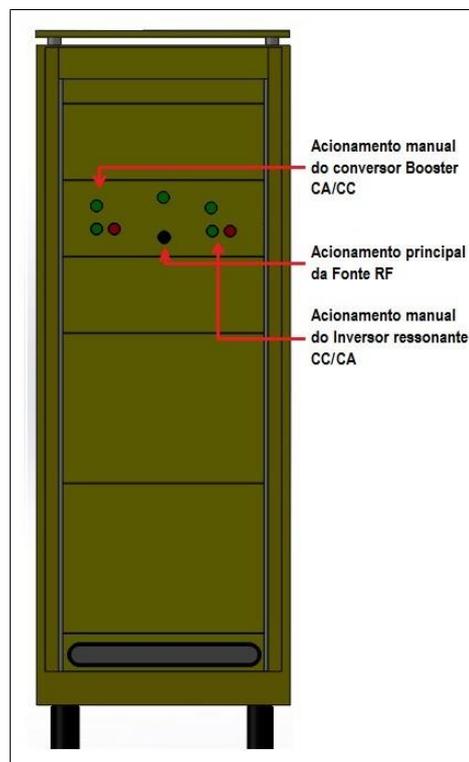


Figura 5.9: Fonte de alimentação de rádio frequência em 3D.

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

5.10, junto com o desenho da tocha plasmática ICP e da esteira rolante utilizada na planta. Na Figura 5.11, é apresentado o desenho 3D do reator principal, onde é possível visualizar a porta de acesso aos resíduos, e no meio uma porta corta-fogo, que define a continuidade do processo de eliminação. Por fim, na parte inferior, vê-se a porta que libera a escória do material que foi incinerado pela tocha. No Apêndice 1, podemos ver as peças reais da planta.

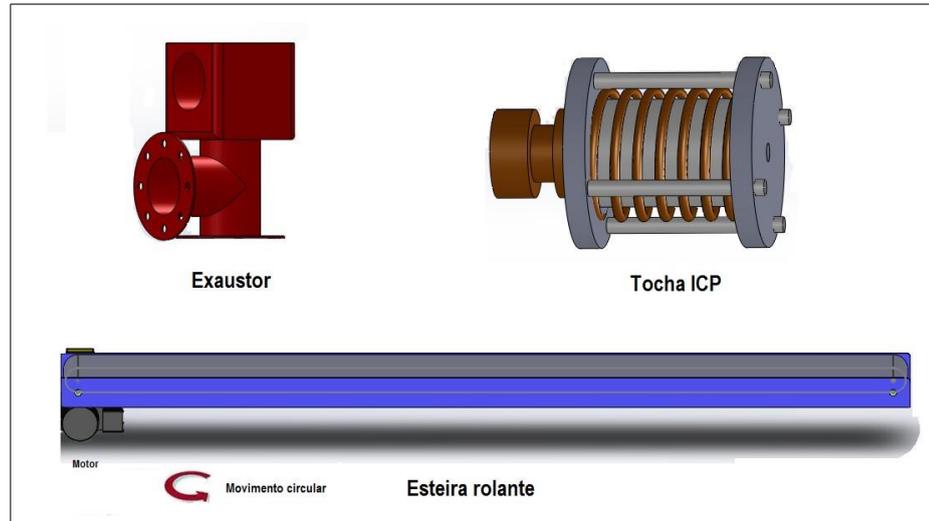


Figura 5.10: Desenho 3D do exaustor, tocha ICP e esteira rolante.

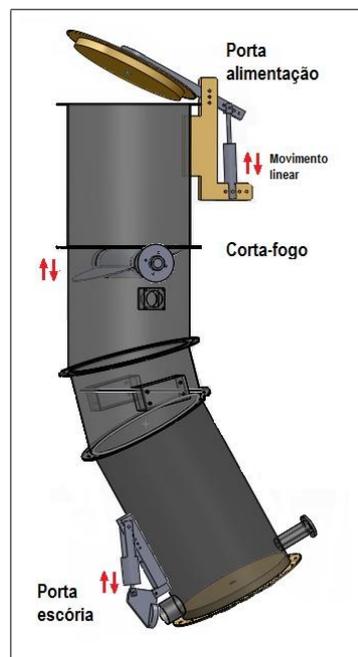


Figura 5.11: Desenho 3D do reator principal.

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

Comunicação LabVIEW- SolidWorks:

Como primeiro desafio encontrado no processo de automação virtual, ocorreu a interação entre o *softwares* LabVIEW e SolidWorks. Para ter acesso aos dados, reciprocamente, entre os *softwares* em questão, foi preciso um meio em comum para os dois. O módulo "SoftMotion" foi o indicado a ser incorporado nos *softwares*, pois é módulo indispensável no processo de interação, fazendo o trabalho de *hyper-bonds* ou superconexões.

A interação entre LabVIEW e SolidWorks pode acontecer em ambos os sentidos. Isso implica que dados podem ser enviados do LabVIEW para serem recebidos no SolidWorks, assim como dados podem ser direcionados de forma inversa. Estas informações podem ser tratadas no algoritmo de controle da planta. Os dados trocados entre esses softwares podem ser de natureza analógica ou digital.

Com base no tutorial [SolidWorks-National 2009], foi implementado um projeto no LabVIEW para se conectar a um estudo de movimento tridimensional no SolidWorks, que está previamente configurado. Em seguida, foram definidos os movimentos dos motores, atuadores e sensores de posições. Após isto, os movimentos foram relacionados com o projeto do LabVIEW e assim foi criada uma sequência entre eles por meio da simulação. Podem ser desenvolvidas também aplicações de controles de movimentos sofisticadas, envolvendo inclusive lógica baseada na resposta dos sensores. Utilizando esta interação, é possível determinar o comportamento dinâmico de uma máquina, incluindo massa, atrito e torque.

Comunicação LabVIEW - Placa desenvolvimento FPGA Spartan-3E:

O kit de desenvolvimento FPGA Spartan 3E da Xilinx foi escolhido por ter uma particularidade no desenvolvimento da programação. Além de ser programado em VHDL e Verilog, ele também aceita a programação tipo "G", desenvolvida pela National Instruments por meio do LabVIEW. A Figura 5.12 mostra a lógica de comunicação utilizada nesta situação.

Para a integração de comunicação entre o LabVIEW e a placa desenvolvimento FPGA Spartan-3E é requerida a instalação de alguns *drivers* e um módulo específico. Sequencialmente, listamos os drivers e módulos requeridos para o *hyper-bonds* ou superconexões:

- LabVIEW FPGA ;
- LabVIEW FPGA *support for* Spartan 3E;
- Xilinx ISE webPACK *software*.

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

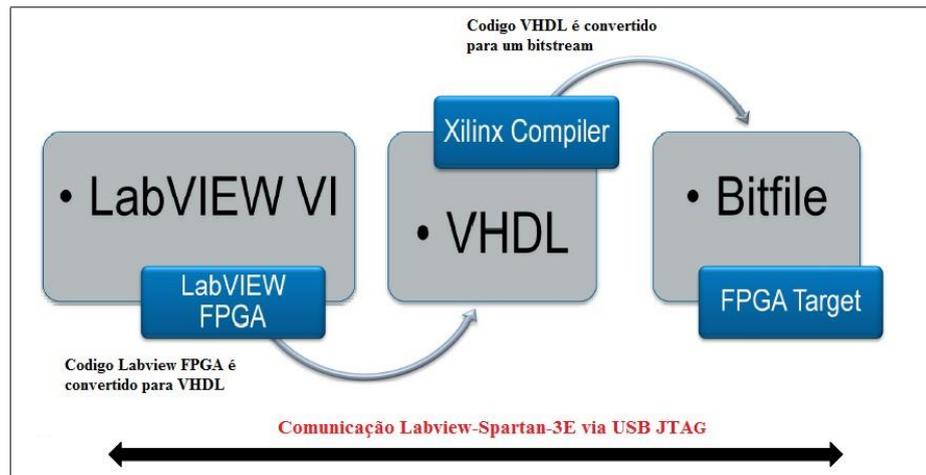


Figura 5.12: Lógica de comunicação entre o LabVIEW- Placa desenvolvimento FPGA Spartan-3E.

5.1.3 Realidade Mista

O objetivo neste processo de otimização é gerar uma arquitetura ou plataforma de desenvolvimento que permita utilizar os conceitos de realidade mista, utilizando as ferramentas mencionadas anteriormente.

Após ter acesso aos dados entre LabVIEW-SolidWorks e LabVIEW-FPGA, foi deduzido que o LabVIEW é o software que trabalha em comum para as duas situações. Na procura de implementar a arquitetura que impõe a realidade mista, foi utilizado o LabVIEW como o gerenciador do processo e desenvolvidas as estratégias de controle utilizadas na interação virtual-real ou realidade mista. O FPGA é definido como o circuito de interface no processo, já que por ele pode-se interagir com o hardware montado na placa de desenvolvimento e, também, com o gerenciador do processo. Na placa de desenvolvimento, encontram-se várias ferramentas à disposição, mas para este trabalho será utilizada uma chave de comutação (SW0), um led (LED0) e o LCD. A planta 3D completa o processo de realidade mista (ver Figura 5.13).

O andamento do processo pode ser visto na Figura 5.14, por meio de um fluxograma, em que o acionamento da chave de comutação "SW0" da placa de desenvolvimento dá início ao processo de interação. Em seguida, o FPGA manda uma mensagem "planta de Inertização" ao LCD e também manda-o acionar o "LED0", dando sinal de início de comunicação. Por meio da comunicação "serial-USB", o FPGA acionará uma variável no gerenciador, que executará o processo "automático".

Na Figura 5.15, está o gerenciado do processo chamado de emulador virtual. Ele interage com a parte virtual (planta 3D) e a parte real (placa de desenvolvimento) por meio

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

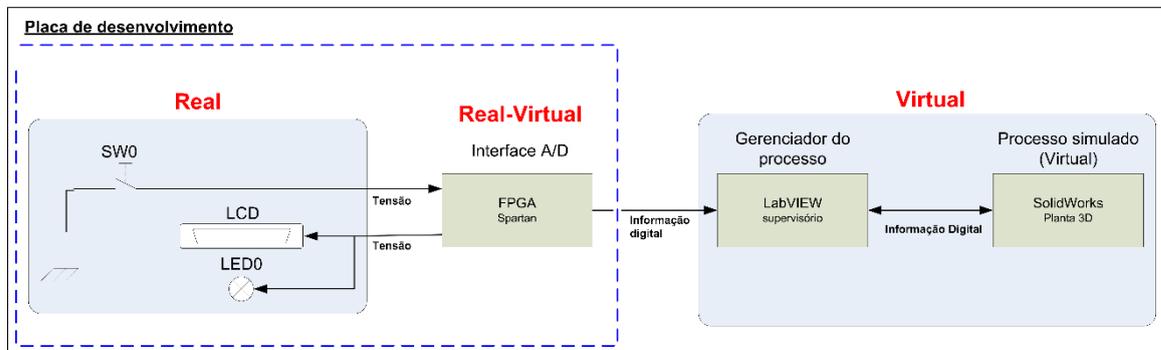


Figura 5.13: Implementação da arquitetura de realidade mista.

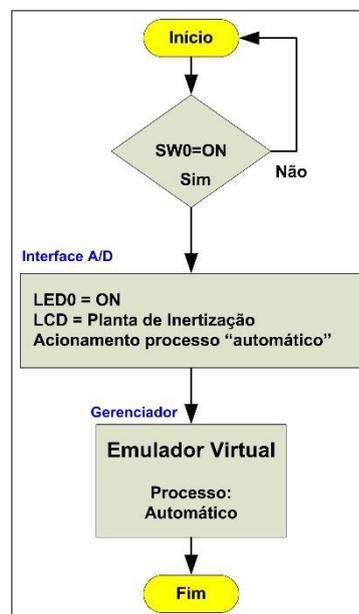


Figura 5.14: Fluxograma da arquitetura de realidade mista.

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

da interface (FPGA). Nele são visualizadas as constantes da planta que estão sendo controladas, no total de quatro: esteira rolante, porta de alimentação, porta corta-fogo e porta escoria, onde é definida a posição desejada na caixinha "posição" e o acionamento da animação é feito por meio do botão "execute". Também podemos avistar o "Status" em que se encontram. Os parâmetros da variável de "posição" trabalham na faixa de 0 -100%, sendo "0" a posição menor e "100%" a maior. Quando o processo de interação é ativado, um indicador luminoso com o nome FPGA é aceso. Finalmente, um botão de "Executar" dá início ao processo de comunicação e outro botão de "Parar" define o fim do processo.



Figura 5.15: Sistema de supervisão principal do emulador virtual.

A Figura 5.16 mostra o "Status de erro" em cada constante controlada, que avisa se houver algum tipo de problema de comunicação entre o gerenciador e a planta 3D. Também são visualizadas as variáveis de "aceleração" e "velocidade" de cada constante. Os parâmetros das duas variáveis mencionadas variam de 0 a 1000, sendo "0" a menor variação e "1000" a maior variação. Os movimentos de cada constante da planta são pré-definidos, com o movimento circular para a esteira rolante (ver Figura 5.10) e o movimento linear para as outras constantes (ver Figura 5.11).

O processo de execução no controle da planta está formado por duas partes: (ver Figura 5.16))

- **Automático** - habilitado pelo acionamento da chave de comutação "SW0" da placa

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

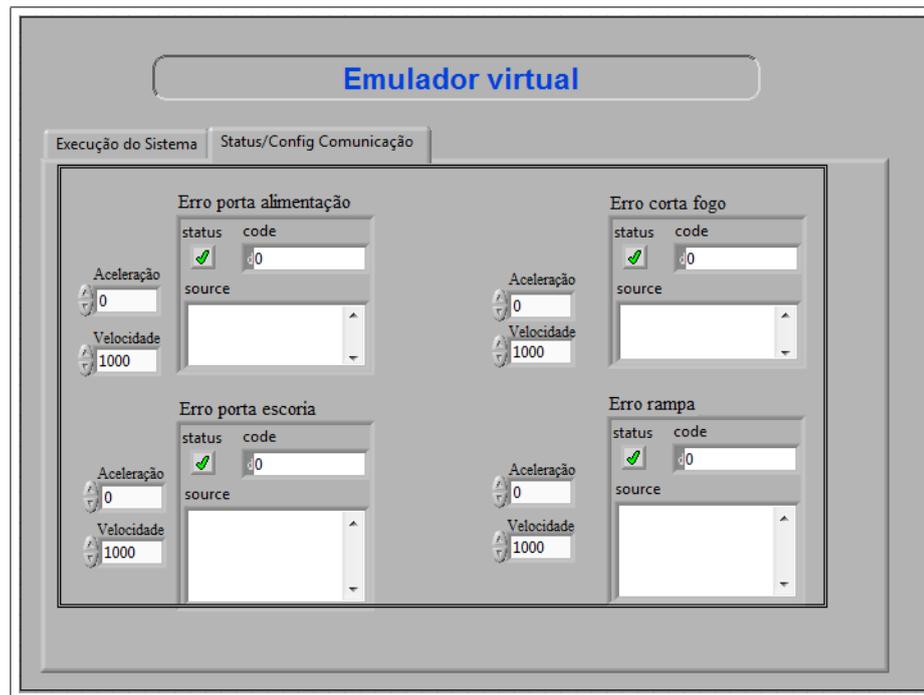


Figura 5.16: Sistema de supervisão principal do emulador virtual.

de desenvolvimento. Os parâmetros de controle de movimento da planta 3D são previamente definidos.

- **Manual** - selecionado, podem ser definidos manualmente os parâmetros de controle de movimento na planta 3D. A Figura 5.17 mostra o fluxograma de controle da planta 3D.

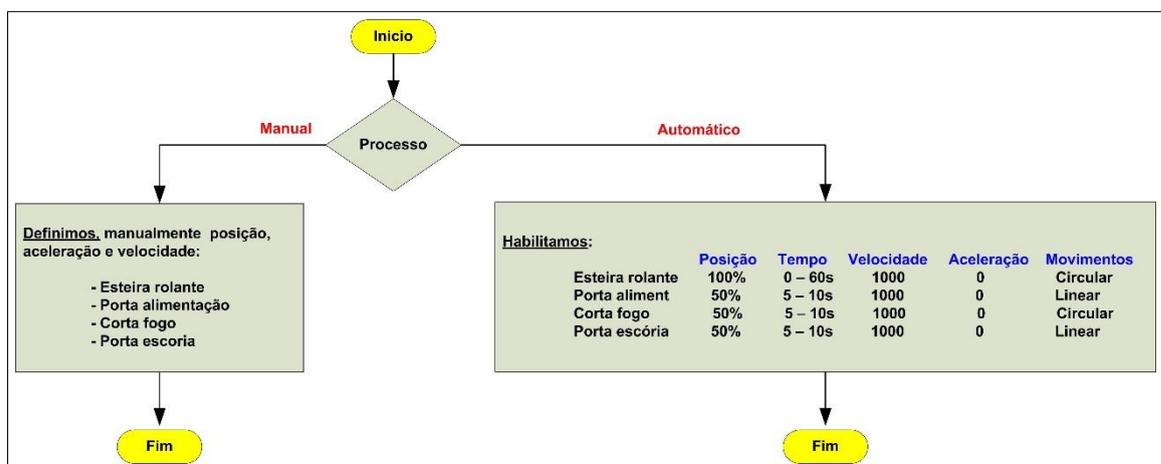


Figura 5.17: Fluxograma do processo de controle.

Os resultados obtidos neste processo serão discutidos no próximo capítulo.

5.2 Sistemas de supervisão e aquisição de dados da planta de tratamento de resíduos

Os sistemas de supervisão de processos industriais são também conhecidos como sistemas SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) [J. Melendez & Rosa 2008]. Um sistema do tipo SCADA deve ser capaz de processar as informações do ciclo e torná-las disponíveis para o operador ou qualquer outro usuário do software supervisor [Pereira & Junior 2006]. Pode também realizar atividades de controle em nível de supervisão e, automaticamente, com o auxílio de algum mecanismo específico aplicado a um sistema computacional, tomar decisões e executar ações sobre o processo [Ozdemir & Karacor 2002].

Um sistema de supervisores têm se mostrado de fundamental importância na estrutura de gestão das empresas, fato pelo qual deixaram de ser vistos como meras ferramentas operacionais ou de engenharia e passaram a ser vistos como uma relevante fonte de informação. Um sistema de supervisão em um ambiente industrial automatizado é essencialmente composto por quatro elementos [Daneels & Salter 1999]:

- **Processo Físico:** representa o objeto da automação, sendo supervisionado e monitorado, fornecendo informações que são utilizadas tanto no controle dos processos quanto na gerência dos dados [L. Buss Becker & . 1999]. Neste trabalho, o processo físico é focado na eliminação de diferentes tipos de resíduos, utilizando a estrutura de uma planta desenvolvida para este fim, subsistemas e processo de geração de plasma indutivo.
- **Hardware de Controle:** o *hardware* responsável pelo controle do processo é composto basicamente por sensores, atuadores e controladores. Os sensores utilizados nos subsistemas estão divididos em analógicos e digitais, cumprindo diferentes funções, como foi especificado no capítulo anterior. Para o controle do processo, foi utilizado um controlador lógico programável (CLP) [Moeller 1999], que tem a importante função de manter o sistema estável e em funcionamento. Além disso, existem diferentes ferramentas que facilitam a comunicação, o monitoramento de dados (OPC) e o desenvolvimento do controle no processo (Fuzzy), alguns dos principais de seus motivos.
- **Software de Supervisão:** o *software* de supervisão, muitas vezes chamado simplesmente de supervisores, deve acessar os dispositivos de campo a fim de obter acesso aos dados do processo. Esses dados devem ser tratados, transformando-se, assim, em informações úteis. A distribuição das informações pode ser feita através

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

de uma exibição gráfica, por sinalização ou por números [Pereira & Junior 2003]. O *software* utilizado para cumprir esta função foi o LabVIEW [Halvorsen 2012].

- **Rede de Comunicação:** é responsável pelo tráfego de informações e é utilizada pelo *software* de supervisão durante aquisição dos dados do processo. Geralmente, constitui-se de duas sub-redes denominadas rede de campo e rede local de supervisão. A fim de conseguir uma comunicação determinística, as redes de campo, em sua maioria, utilizam uma arquitetura mestre/escravo. Neste tipo de rede, os controladores que desempenham a função das estações escravas jamais iniciam a comunicação, respondendo somente às solicitações feitas pelo controlador mestre [Bucci & Lnadi 2003], [L. Zhi & Hao 2000]. Neste caso, foi utilizada uma rede de campo.

5.2.1 Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados

Tem a função de supervisionar e controlar todas as principais ações de processo do sistema de tratamento de resíduos por plasma, além de oferecer uma interface o mais amigável possível para que o usuário tenha todas as informações de funcionamento do processo. O usuário tem à sua disposição os seguintes dados:

- Escolha personalizada do resíduo a ser tratado;
- Implementação de um *Login* de acesso no sistema de supervisão SCADA para iniciar as operações na planta;
- Escolha do tipo de processo a ser executado;
- Status das condições iniciais dos subsistemas;
- Status dos contadores, bombas e motores;
- Gráficos de acompanhamento das variáveis de processo;
- Sinalização visual e sonora de alarme;
- Visualização das variáveis de controle manual e controle Fuzzy;
- Parada de emergência do processo;
- Armazenamento dos dados fornecidos pelas variáveis do sistema;
- Visualização e controle individual de cada subsistema do processo;
- Emulação do processo por meio de um controle virtual e do desenho da planta em 3D, utilizando uma arquitetura de realidade mista.

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

O sistema SCADA possui uma tela principal que comanda todas as operações no processo de eliminação de resíduos e onde é possível visualizar as principais variáveis do processo. Existem outras 6 telas que foram definidas para melhor visualização e funcionamento manual e automático de cada subsistema do processo e do emulador virtual.

Na Figura 5.18, é mostrada a tela principal da planta de tratamento de resíduos utilizando plasma.

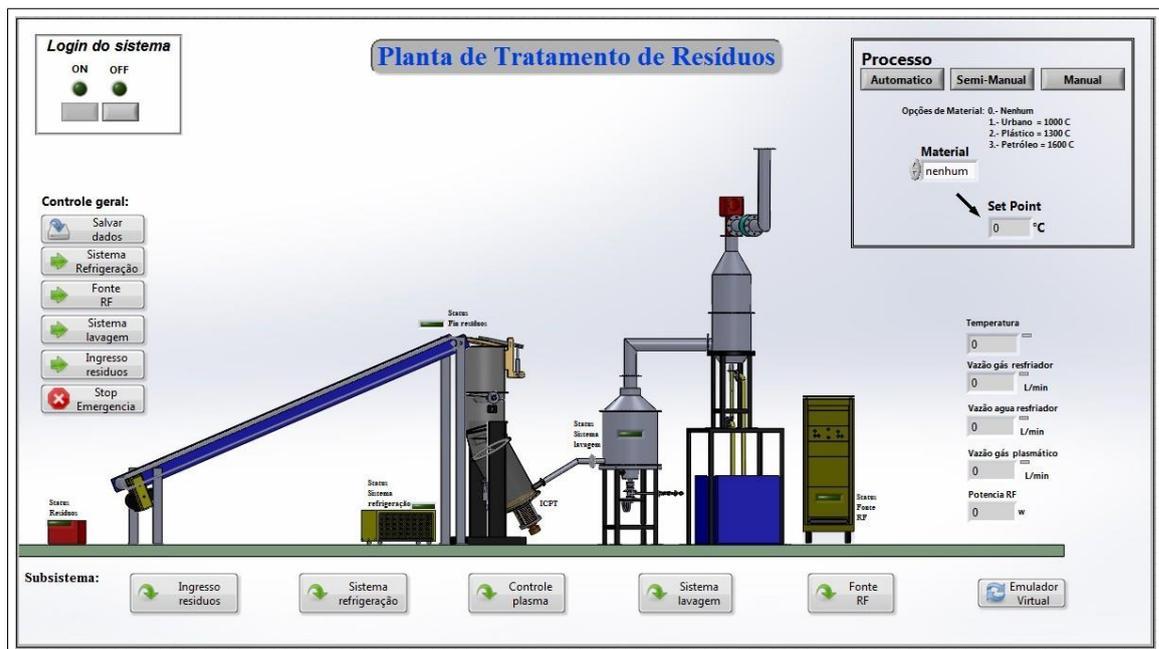


Figura 5.18: Sistemas de supervisão e aquisição de dados da planta de tratamento de resíduos.

A descrição é a seguinte:

- Definição de umas das 3 opções de resíduos a ser eliminadas e, dependendo disto, será definida a temperatura necessária para alcançar o alvo (*Setpoint*).
- "Login do sistema", que habilitará o uso geral das aplicações do SCADA, uma vez colocada a senha correta. Não é possível ingressar ao monitoramento e controle do processo, se não for cumprido este requisito, um meio de segurança para a planta.
- "Controle geral", que permite o acionamento direto de cada subsistema que integra a planta: sistema de refrigeração, fonte RF, sistema lavagem e ingresso de resíduos. Além de ter um botão de parada de emergência (Stop emergência) que desabilitará os subsistemas da planta e outro botão que permitirá salvar os dados das variáveis do processo (Salvar dados).
- Possibilidade, no desenho, de visualizar a planta virtual, dando detalhes reais de

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

cada subsistema que faz parte da planta e tornando possível acompanhar por meio dos status e variáveis o andamento do processo.

- "Subsistemas", que são formados por 5 telas personalizadas para cada subsistema e pelo processo emulado da planta. Uma vez pressionado um dos botões, é possível ter acesso à informação detalhada daquele processo em andamento.
- Possibilidade de definir o tipo de processo a ser utilizado. Este é dividido em 3 partes: **Automático**, que terá um comportamento ideal do funcionamento do sistema, como descrito no capítulo anterior. O processo **Semi-manual** descreve uma hierarquia em que a principal diferença com o automático é que o usuário define o acionamento principal dos subsistemas de forma manual, mas sempre acompanhando a sequência imposta pelo processo automático. O processo **Manual** foi criado para favorecer a manutenção ou calibração de cada sensor, atuador e/ou controle que integrem os subsistemas do processo.
- Por meio do fluxograma da Figura 5.19, é explicado com mais detalhes como foi implementado o funcionamento dos processos.

Os subsistemas da planta estão divididos em seis processos com diferentes funcionalidades, como será descrito em seguida.

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

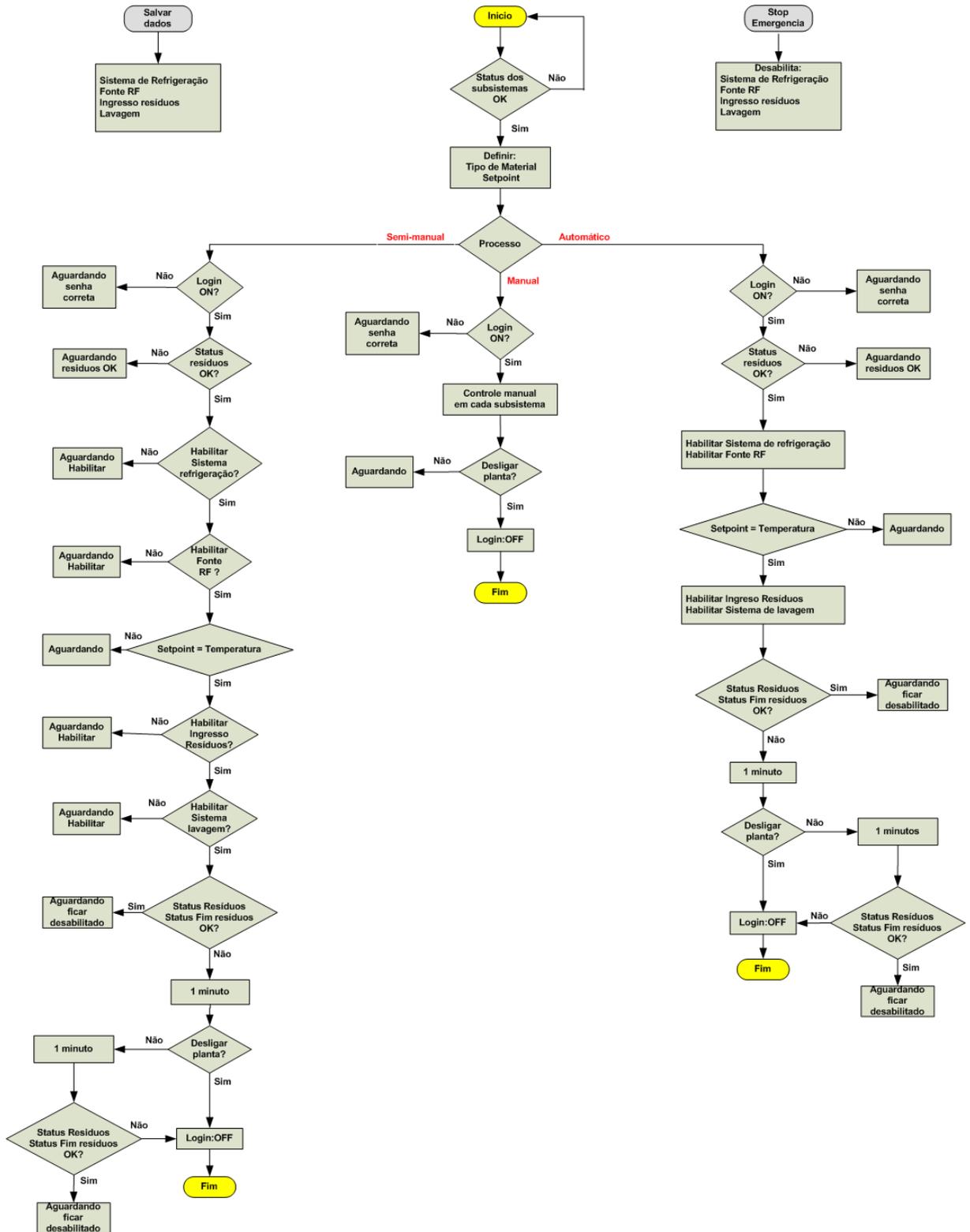


Figura 5.19: Fluxograma do funcionamento lógico do Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados da planta de tratamento de resíduos.

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

5.2.2 Ingresso de resíduos

A tela principal de controle deste subsistema é vista na Figura 5.20, onde, posteriormente, será feita uma descrição das principais funções desenvolvidas nela.

- Botão "Sistema OK" define se o status inicial dos principais componentes do sistema (Esteira rolante e Reator principal) está apto para ser utilizado.
- Botão "Stop Emergência" torna possível com o seu acionamento parar o funcionamento de forma rápida dos 4 elementos de controle (Motor, porta alimentação, corta-fogo, porta escoria).
- "Controle manual" define manualmente o acionamento dos 4 elementos de controle deste subsistema.
- A rampa (mostrada no desenho virtual) serve para o transporte dos resíduos até o reator principal. Nela é possível visualizar o status dos dois sensores de presença, que nos indicam se há resíduos ou não. No reator principal, é possível visualizar o status da porta de alimentação, do corta fogo e da porta escoria.
- Fluxograma (mostrado na figura 5.21) é usado para compreender melhor o funcionamento deste subsistema

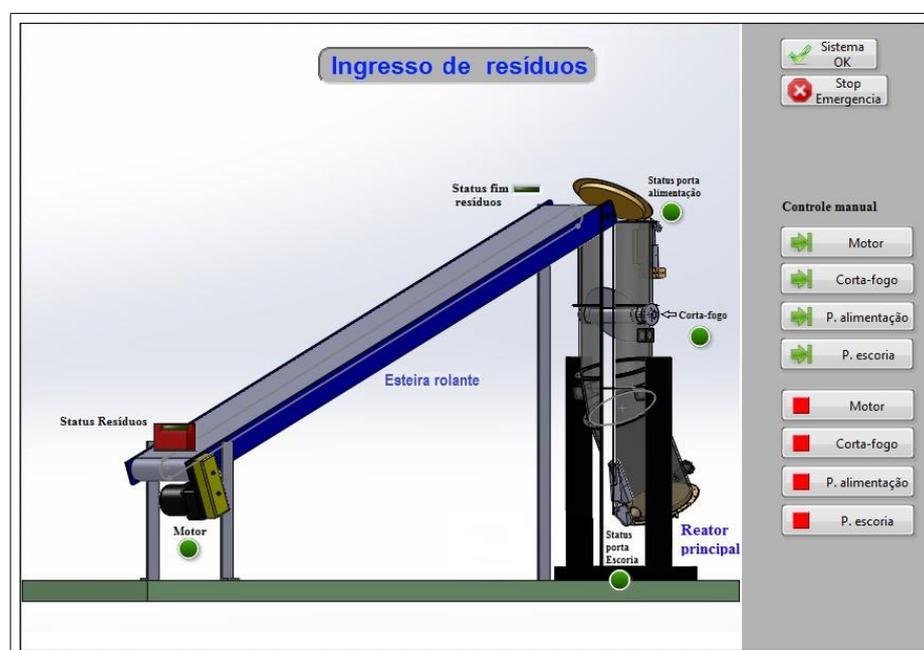


Figura 5.20: Tela principal do subsistema Ingresso de resíduos.

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

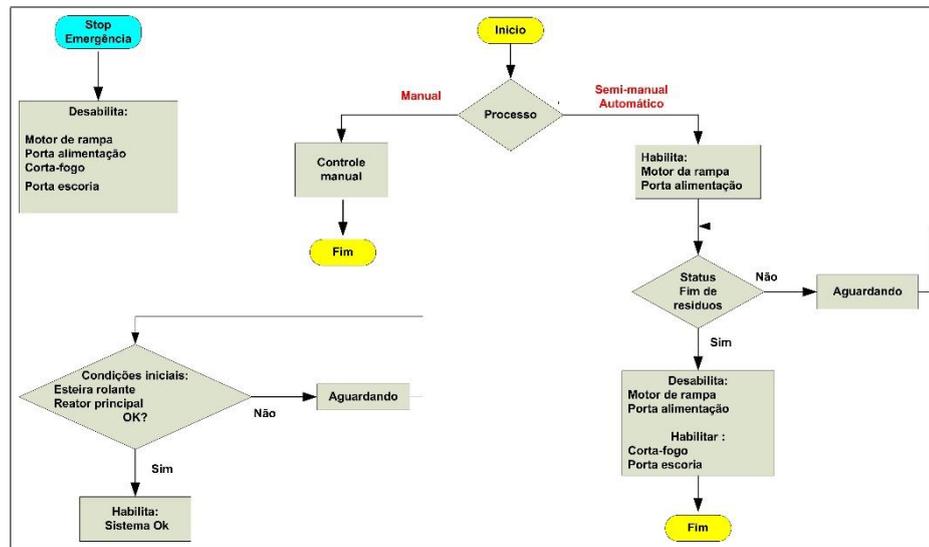


Figura 5.21: Fluxograma do funcionamento lógico do subsistema Ingresso de resíduos.

5.2.3 Sistema de refrigeração

A interface gráfica deste subsistema é mostrada na Figura 5.22. Posteriormente será feita uma descrição das suas principais funções.

- Botão "Sistema OK" define se o status inicial dos principais componentes do sistema (sistema de refrigeração água e sistema de refrigeração ar/gás) está apto para ser utilizado.
- Botão "Stop Emergência", cujo acionamento pode parar o funcionamento do sistema de forma rápida.
- "Sistema de refrigeração por água" pode definir manualmente o acionamento do sistema, como também o controle da vazão de água que passa por ele, além de visualizar o sinal de controle e a sua frequência de trabalho.
- "Sistema de refrigeração por ar/gás", pode definir manualmente o acionamento do sistema, como também o controle da vazão de ar que passa por ele, além de visualizar o sinal de controle.
- "Sistema Água", demarcado por linhas pontuadas, torna evidente o funcionamento e o monitoramento de algumas variáveis como: status ventilador, status sensor de pressão e vazão de água direcionada para o esfriamento da tocha ICPT. Também mostra o "sistema Ar", onde é visualizada a vazão de ar fornecida à tocha ICPT.
- Na figura 5.23 temos o fluxograma do funcionamento do subsistema.

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

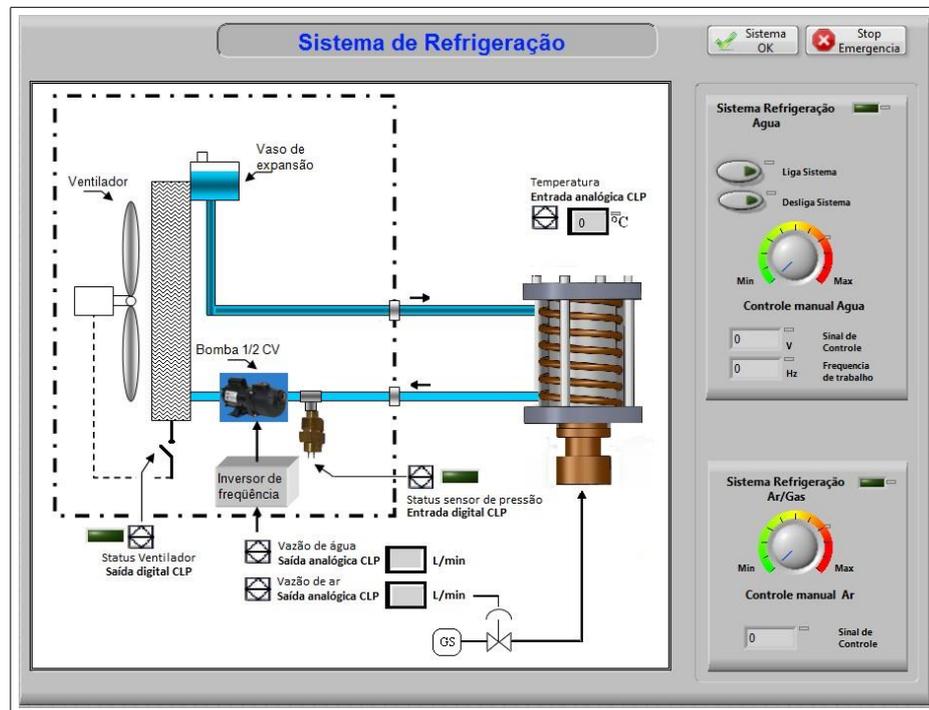


Figura 5.22: Tela principal do subsistema Sistema de refrigeração.

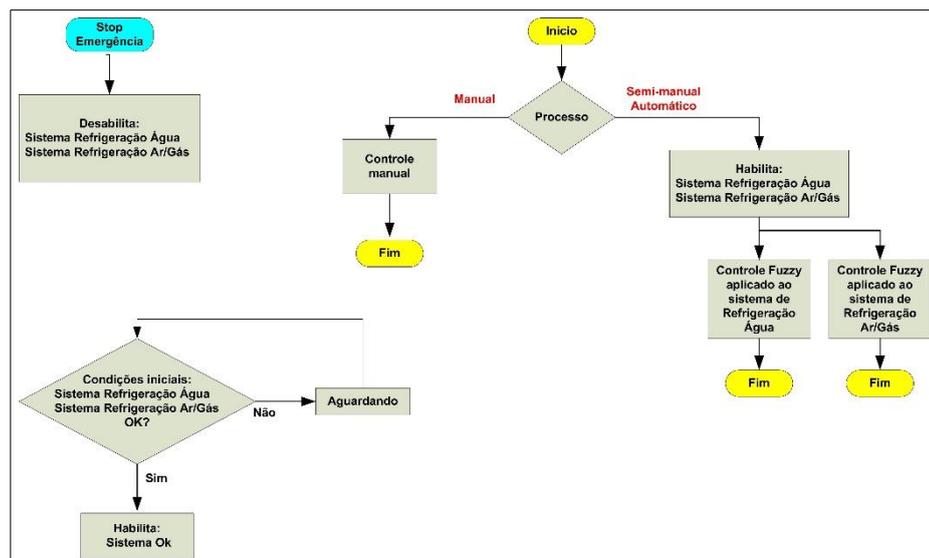


Figura 5.23: Fluxograma do funcionamento lógico do subsistema Sistema de refrigeração

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

5.2.4 Sistema de lavagem

Na Figura 5.24, é apresentada a tela principal deste subsistema:

- Botão "Sistema OK" define se o status inicial dos principais componentes do sistema (reator secundário) está apto para ser utilizado.
- Botão "Stop Emergência", cujo acionamento pode parar, de forma rápida, o funcionamento de todos os componentes do subsistema.
- "Controle manual" define manualmente o acionamento dos três elementos de controle deste subsistema.
- Os dois reatores mostrados na Figura 5.24 cumprem diferentes papéis no processo. O reator secundário é formado por um queimador à combustão situado sob ele, onde é possível visualizar o status de funcionamento. Posteriormente temos o reator de lavagem, formado por uma bomba, sensores de pressão, um exaustor e um sensor *On/Off*, sendo possível visualizar os status de funcionamento de cada um (na figura 5.25, é mostrado um fluxograma para compreender melhor o funcionamento deste subsistema).

5.2.5 Fonte de rádio frequência

Na Figura 5.26, é observada a tela principal deste subsistema:

- Botão "Sistema OK" define se o status inicial dos principais componentes do sistema (Fonte RF) está apto para ser utilizado.
- Botão "Stop Emergência" é definido para parar o funcionamento do subsistema de forma rápida.
- "Controle manual" define manualmente o acionamento da fonte de rádio frequência.
- - "Controle manual tensão CC" define manualmente o controle do conversor trifásico Boost.
- Os dois conversores (apresentados na figura 5.26) são utilizados na fonte de rádio frequência: conversor trifásico boost e inversor de frequência ressonante. Também é visualizado o sinal de controle aplicado ao conversor trifásico boost, além da sua saída de tensão contínua. Finalmente, é observada a potência total administrada pela fonte.
- Na Figura 5.27, é mostrado o fluxograma de funcionamento deste subsistema.

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

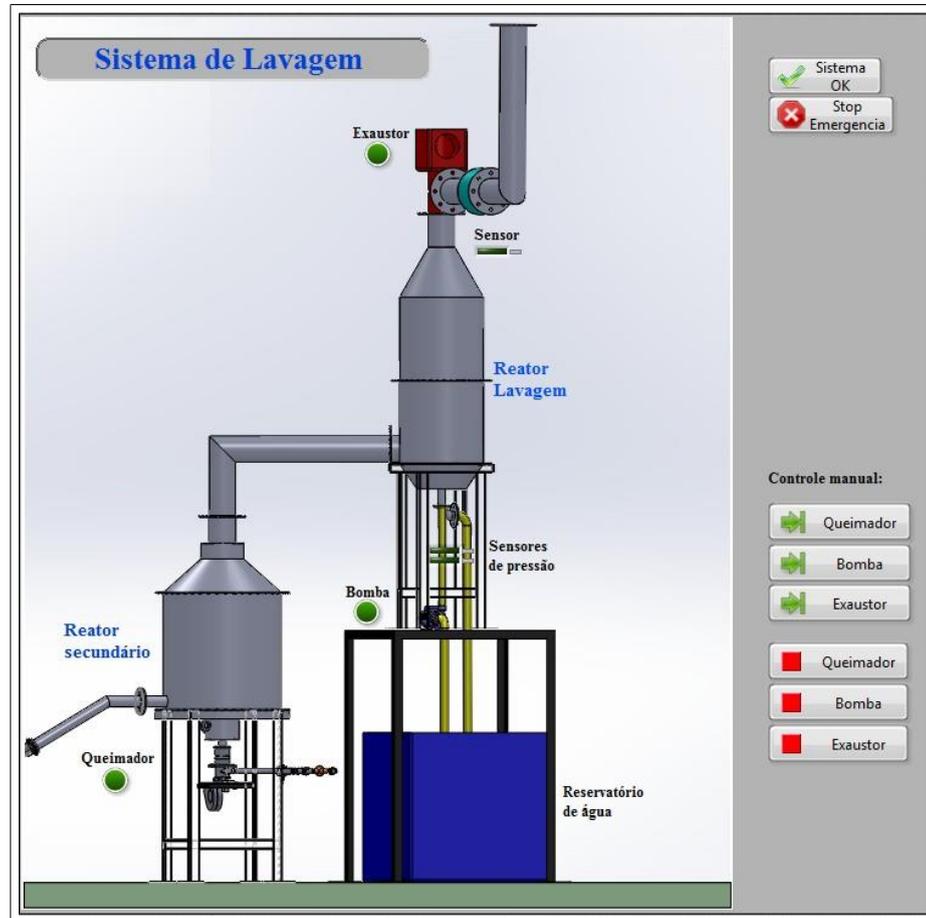


Figura 5.24: Tela principal do subsistema Sistema de lavagem.

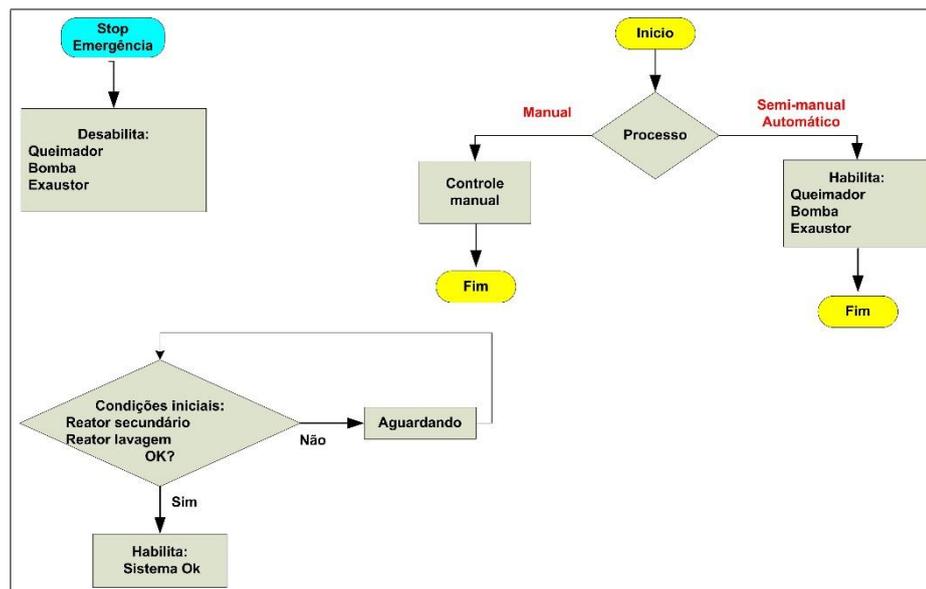


Figura 5.25: Fluxograma do funcionamento lógico do subsistema Sistema de lavagem.

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

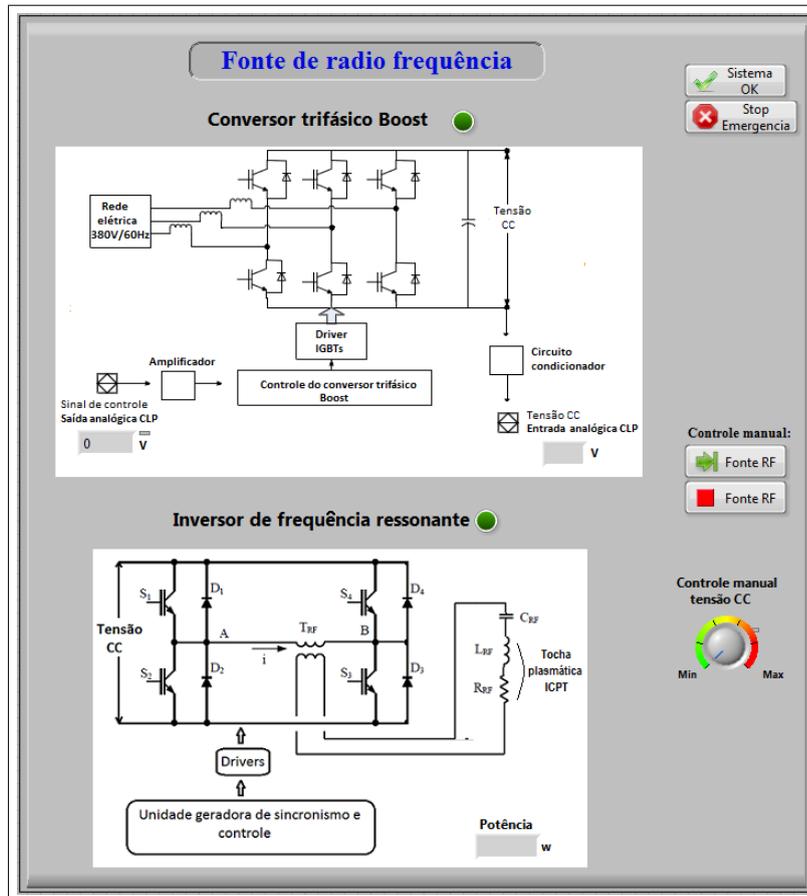


Figura 5.26: Tela principal do subsistema Fonte de rádio frequência.

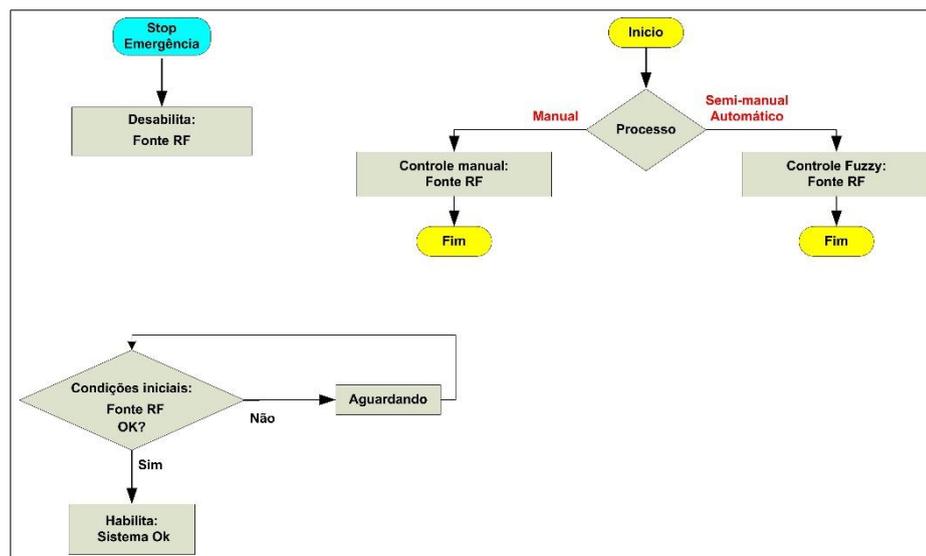


Figura 5.27: Fluxograma do funcionamento lógico do subsistema Fonte de rádio frequência.

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

5.2.6. Controle na geração de plasma

Na Figura 5.28, é apresentada a tela principal deste subsistema:

- Botão "Sistema OK" define se o status inicial dos principais componentes do sistema (Fonte RF, sistema de refrigeração água e sistema de refrigeração ar/gás) está apto para ser utilizado.
- Botão "Salvar gráficos" pode salvar todos os dados envolvidos no controle, por meio de um arquivo txt.
- Botão "Stop Emergência", cujo acionamento torna possível parar, de forma rápida, o funcionamento deste subsistema.
- "Fonte RF" torna possível ver o sinal de controle e o sinal CC fornecido por ele.
- "Sistema de refrigeração Ar/Gás" torna possível ver o sinal de controle aplicado nele.
- "Sistema de refrigeração Água" torna visível o sinal de controle e a frequência de trabalho da bomba.
- Tocha plasmática (ilustração gráfica na Figura 5.28) de acoplamento indutivo é onde está destacada as principais variáveis utilizadas no controle: Potência RF, vazão de água, sistema de ignição, vazão gás plasmático e vazão de ar.
- Finalmente é possível notar cinco gráficos em tempo real, que estão em sincronismo um com outro e auxiliaram no desenvolvimento do controle. No gráfico "Controle de temperatura", são mostradas as variáveis de controle: Setpoint e Sensor (Sensor de temperatura). Também mostra o gráfico "Erro de controle", referente ao erro gerado na aplicação do controle. O gráfico "Fonte RF" tem duas variáveis: Tensão CC e Potência RF. Os últimos dois gráficos mostram a vazão de água e ar dos sistemas de refrigeração.

5.2.7 Emulador virtual

Para completar a descrição do sistema de supervisão e aquisição de dados da planta de tratamento de resíduos, é visto o subsistema do Emulador virtual, descrito no tópico anterior.

CAPÍTULO 5. OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE INERTIZAÇÃO

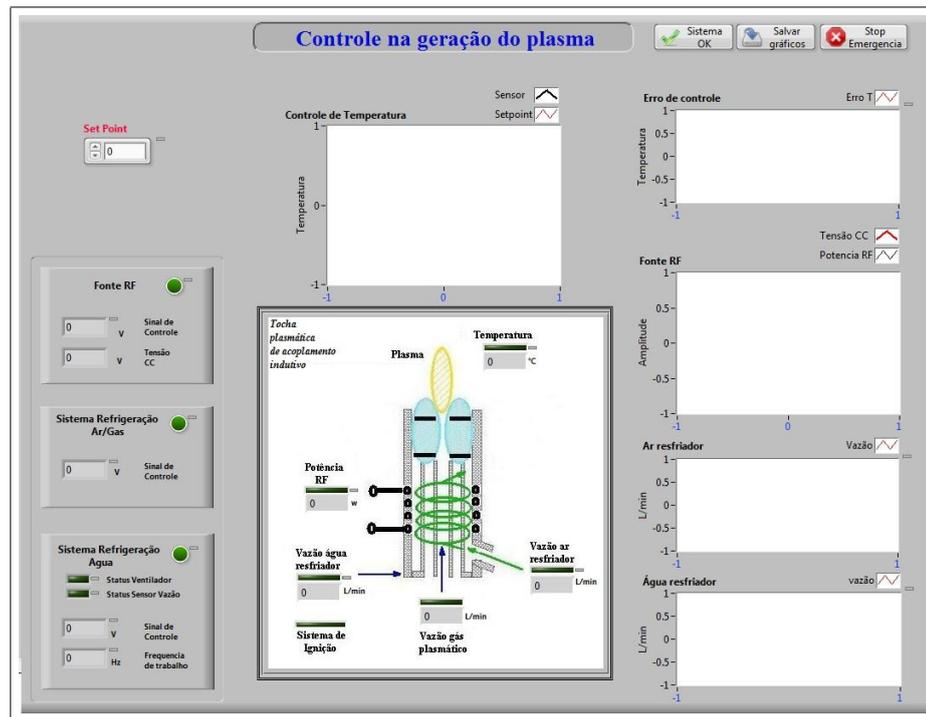


Figura 5.28: Tela principal do subsistema Controle de plasma.

5.3 Conclusões

- As grandes indústrias, cada vez mais, utilizam ferramentas de apoio para seus processos, que são cada vez maiores e mais complicados. Uma solução encontrada para estes problemas é a utilização de ferramentas virtuais, que dão suporte como as reais, porém sem perdas e gastos, permitindo gerar, planejar e estruturar os processos de uma forma mais rápida e eficiente.
- Após uma pesquisa bibliográfica neste assunto foi detectado que um dos melhores métodos para otimizar o processo da planta, sem ter contato com ela, seria a realidade virtual, que dá suporte em diversas áreas de engenharia e apresenta a disponibilidade de utilizar o sistema sem estar presente.
- Foi desenvolvida uma plataforma virtual, que conta com um desenho 3D, um gerenciador de dados e controle por elemento externo (*Hardware*). No desenho da planta, foi feito o controle de movimentos lineares e circulares na esteira rolante, na porta de alimentação, no corta fogo e na porta de escoria. A meta neste processo de otimização foi implementar uma plataforma que permita gerar a comunicação/controlar entre dispositivos reais (*hardware*) e dispositivos virtuais (planta 3D).
- Foram aprimorados os sistemas de supervisão da planta real, com a implementação de diversas ferramentas para melhorar o desempenho e a visualização do processo.

Capítulo 6

Resultados obtidos

O capítulo seguinte descreverá os principais resultados obtidos nos processos de otimização. Primeiramente serão mostrados os resultados aplicados ao processo de eliminação de resíduos por plasma, em que é destacada a realidade mista aplicada à planta virtual, como também o monitoramento da planta real. Em seguida, foi analisado o comportamento da fonte de rádio frequência, descrevendo as etapas de funcionamento que a compõem. Finalmente serão apresentados os resultados obtidos no processo de controle para gerar plasma.

6.1 Otimização do processo de inertização

6.1.1 Realidade mista aplicada na planta virtual

Preliminarmente, serão analisadas as simulações de cada parte envolvida, explicitando, assim, os desafios encontrados na implementação delas, para, por fim, mostrar os resultados do processo implementado. Na Figura 6.1, é mostrada a simulação da esteira rolante, em três estágios: No primeiro estágio é visto quando é colocada uma caixinha azul, que representa os resíduos; na sequência, é observado como está sendo o processo de deslocamento na esteira, até concluir a sua trajetória nos três estágios.

O principal desafio encontrado nesta simulação foi definir um ponto de referência entre o movimento do resíduo e o movimento da esteira rolante. Depois de várias tentativas sem sucesso, foi preciso utilizar um ponto de referência em comum, chamado de "gravidade", que dá suporte e sincronismo entre o movimento da esteira rolante e o resíduo. Na Figura 6.2, pode-se ver o ponto de gravidade, visualizado como uma seta de cor verde direcionada para baixo. Também podemos ver uma seta de cor vermelha, que sinaliza o movimento circular gerado pela esteira. O processo de simulação é mostrado na parte de baixo do desenho 3D.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS OBTIDOS

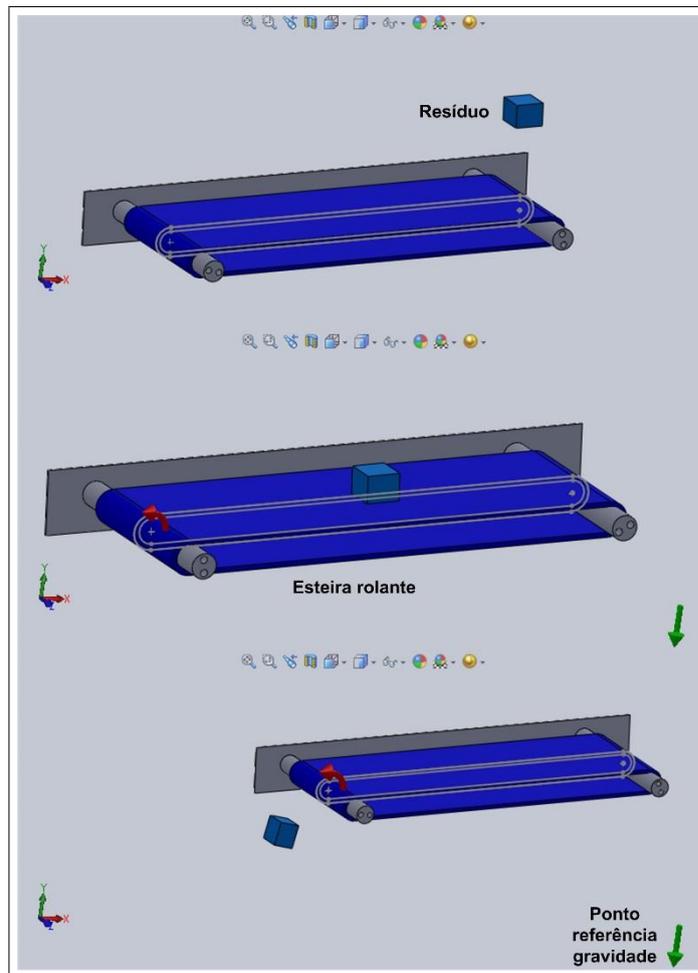


Figura 6.1: Esteira rolante 3D transportando o resíduo.

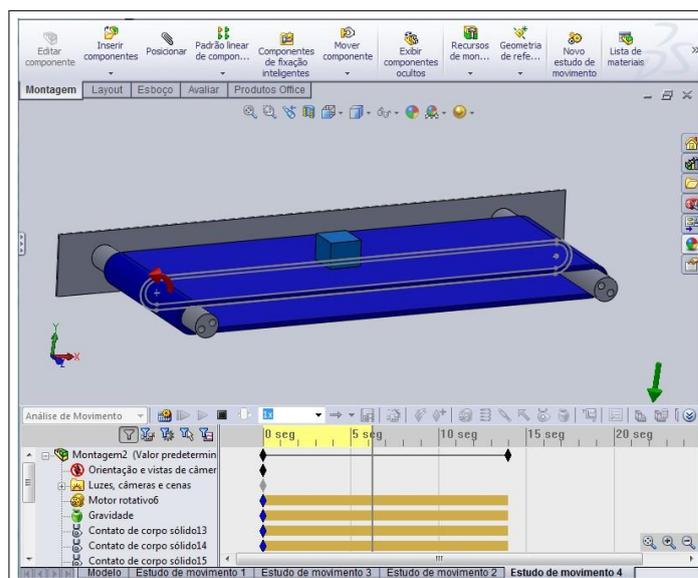


Figura 6.2: Simulando a esteira rolante 3D.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS OBTIDOS

Na Figura 6.3, é mostrada a execução do supervisor (gerenciador do processo - emulador virtual) junto com a planta 3D, onde são destacados os movimentos da porta de alimentação, representados por uma seta vermelha. A figura Também mostra que o modo de execução está em manual, onde a variável "posição" da porta principal (Tampa de entrada) tem o valor de 40% e 0% nas demais posições. O botão de "execute" neste componente está acionado e o led (*Status*) acesso informa que o movimento foi concluído com êxito. O controle feito no supervisor gerou o movimento na porta de alimentação virtual para um total de 40% do total de movimento possível dele.

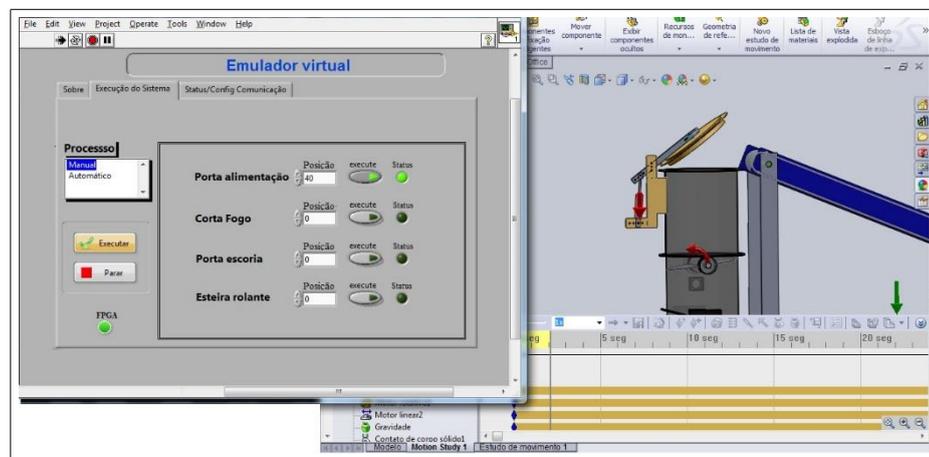


Figura 6.3: Interação de controle entre o sistema supervisório (gerenciador) e a porta de alimentação (virtual) em modo manual.

Na Figura 6.4, são mantidas as mesmas condições informadas inicialmente, mas foi mudado o posicionamento da porta de alimentação para 10% (movimento linear) e da porta corta fogo para 40% (movimento circular). No desenho 3D, são notadas estas modificações.

A interação de controle entre o supervisor e a porta de escoria é vista na Figura 6.5. O movimento linear é dado na posição de 40%.

Para chegar ao objetivo principal, foi definido utilizar, no sistema supervisor, o modo de execução em automático, em que a comunicação entre os ambientes envolvidos é possível. A Figura 6.6 exhibe o resultado obtido no processo de interação entre a parte real (placa de desenvolvimento), a interface (FPGA), o gerenciador do processo (emulador virtual) e a parte virtual (planta 3D). É importante destacar que o objetivo deste tipo de otimização é ter uma plataforma que permita a comunicação entre as partes envolvidas, para, assim, mais adiante, poder implementar técnicas que aprimorem o funcionamento mais adequado no processo de eliminação.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS OBTIDOS

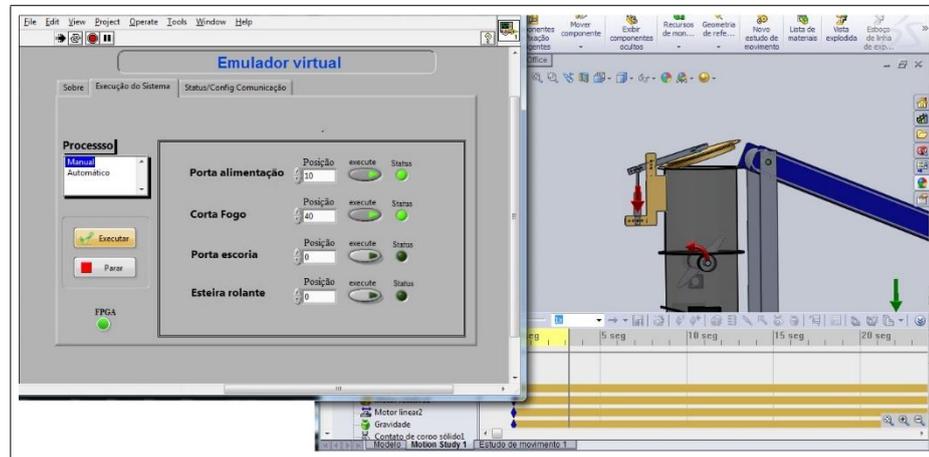


Figura 6.4: Interação de controle entre o sistema supervisor (gerenciador) e a porta de alimentação / porta corta fogo (virtual) em modo manual.

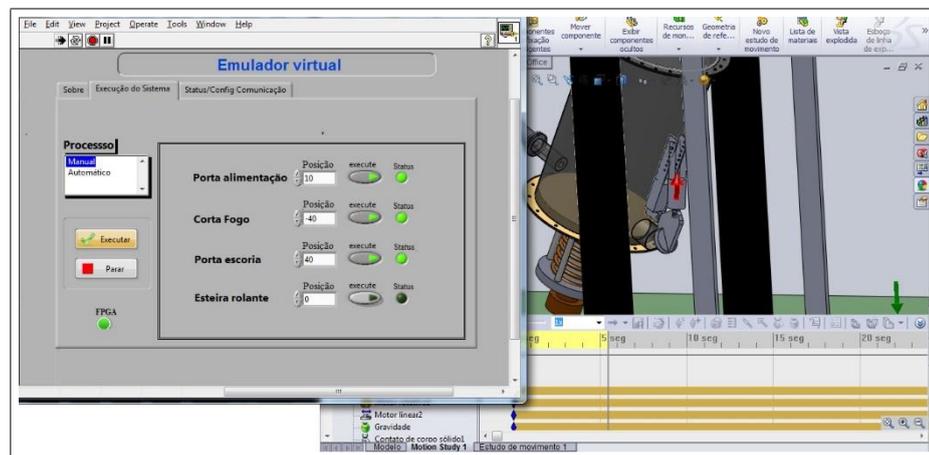


Figura 6.5: Interação de controle entre o sistema supervisor (gerenciador) e porta de escoria (virtual) em modo manual.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS OBTIDOS

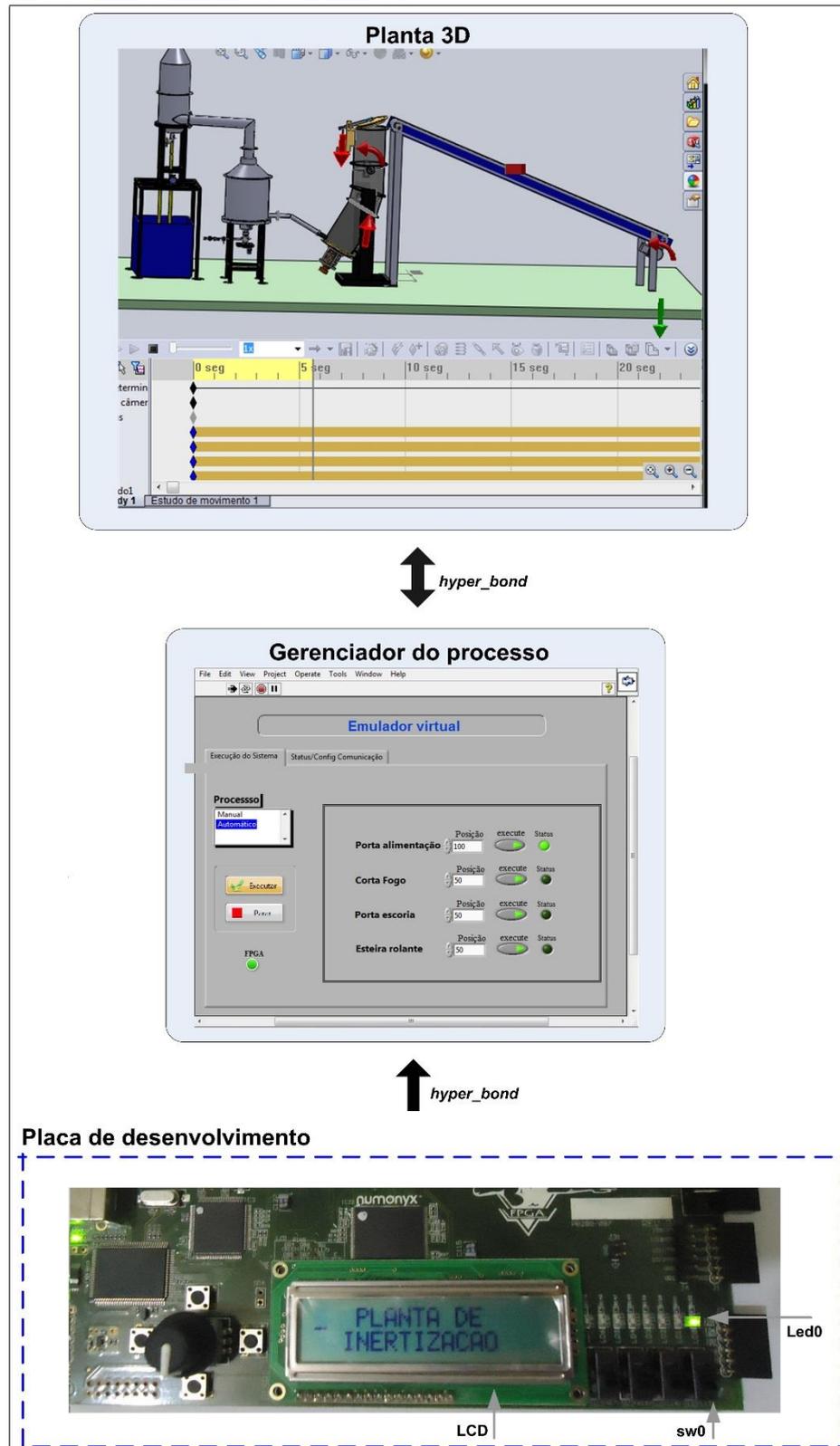


Figura 6.6: Implementação do processo de realidade mista na planta de inertização de resíduos por plasma.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS OBTIDOS

6.1.2 Sistema supervisor da planta de eliminação de resíduos

Na Figura 6.7, visualiza-se o sistema supervisor implementado para a planta de eliminação de resíduos por plasma, em processo de inicialização, em que solicita a senha para acessar o sistema.

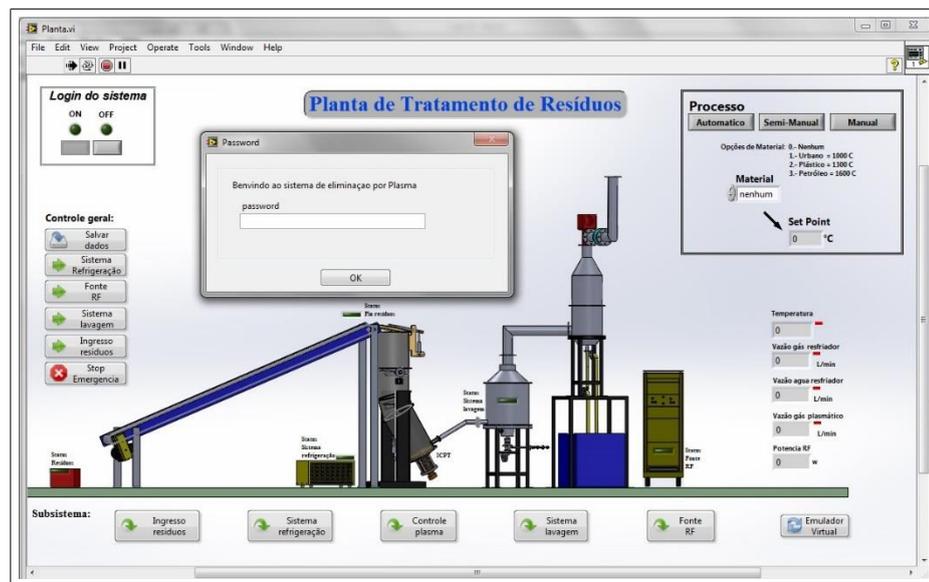


Figura 6.7: Sistema supervisor da planta de eliminação de resíduos por plasma.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS OBTIDOS

6.2 Fonte de rádio frequência

Aqui apresentam-se os resultados obtidos na avaliação final do desempenho da fonte de rádio frequência, bem como os resultados parciais levantados no decorrer do desenvolvimento. Serão mostrados também resultados obtidos na simulação.

6.2.1 Conversor CA/CC

Para poder efetuar as diversas medições requeridas, foi necessário desenvolver uma carga resistiva de 176W de 5.7kW de potência máxima. Na Figura 6.8, observa-se a sequência de pulsos PWM gerada por cada fase do sistema trifásico. A Figura 6.9 mostra o sincronismo entre o circuito de detecção de polaridade e os pulsos PWM para cada fase. O circuito de detecção de polaridade identifica se o sinal de fase está positivo ou negativo para assim poder implementar corretamente a sequência do conversor.

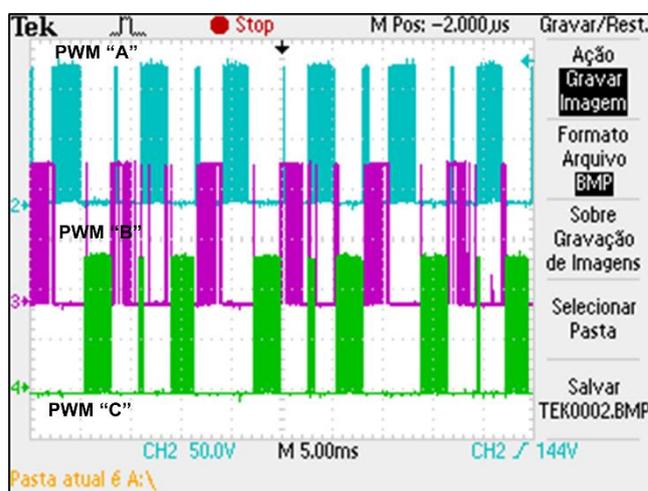


Figura 6.8: Sincronismo entre os pulsos PWM para cada Fase.

A Figura 6.10 mostra o sincronismo entre o sinal de tensão da Fase A e o pulso PWM para cada semiciclo. Da mesma forma é vista, na Figura 6.11, a corrente da Fase A, sincronizada com o pulso PWM. Finalmente, na Figura 6.12, há o resultado do controle efetuado pelo conversor no sistema trifásico, que mostra a tensão e as correntes controladas, referentes à Fase A.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS OBTIDOS

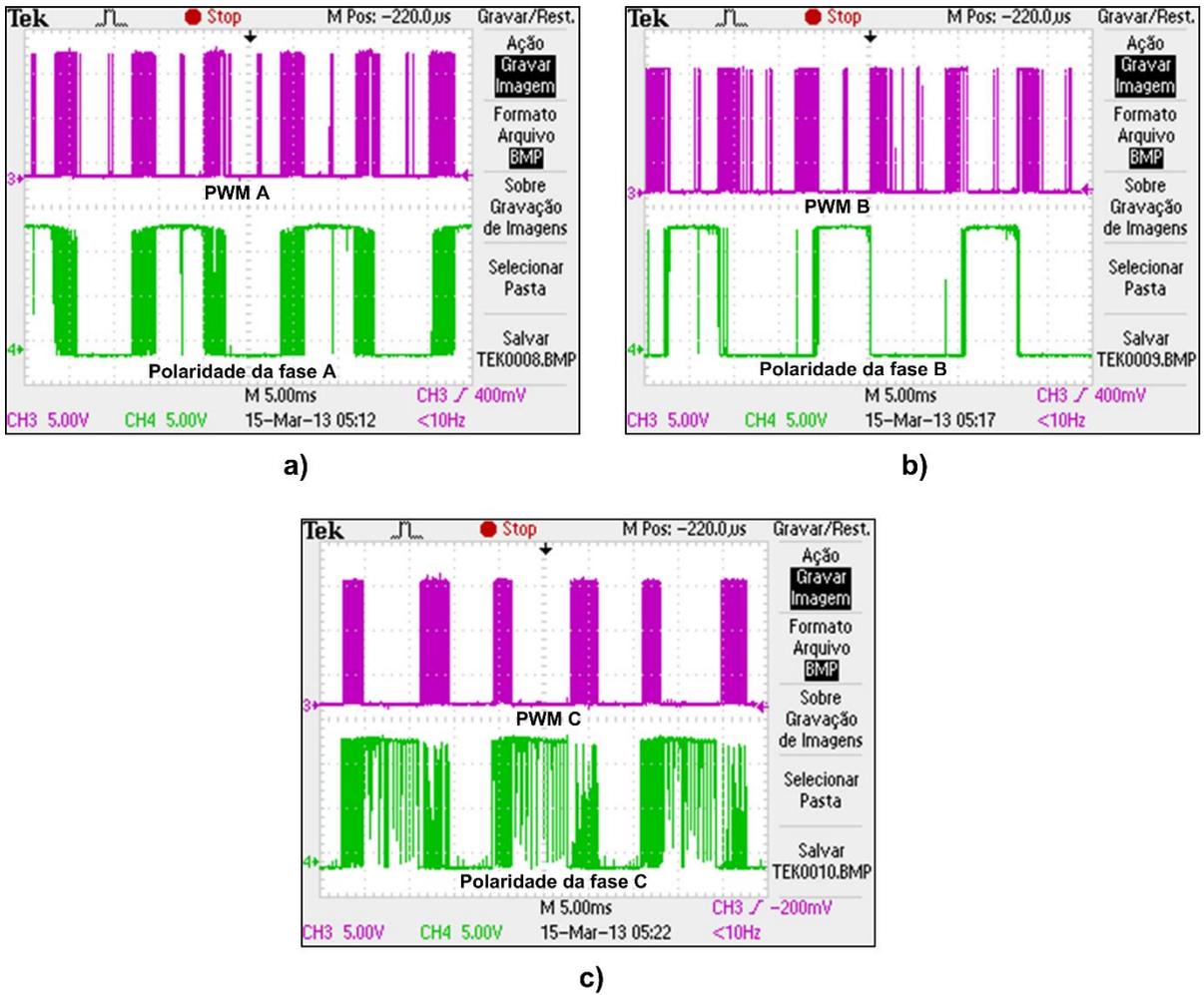


Figura 6.9: Sincronismo entre os pulsos PWM e o circuito detector de polaridade: a) Rede trifásica - Fase A, b) Rede trifásica - Fase B, C) Rede trifásica - Fase C.

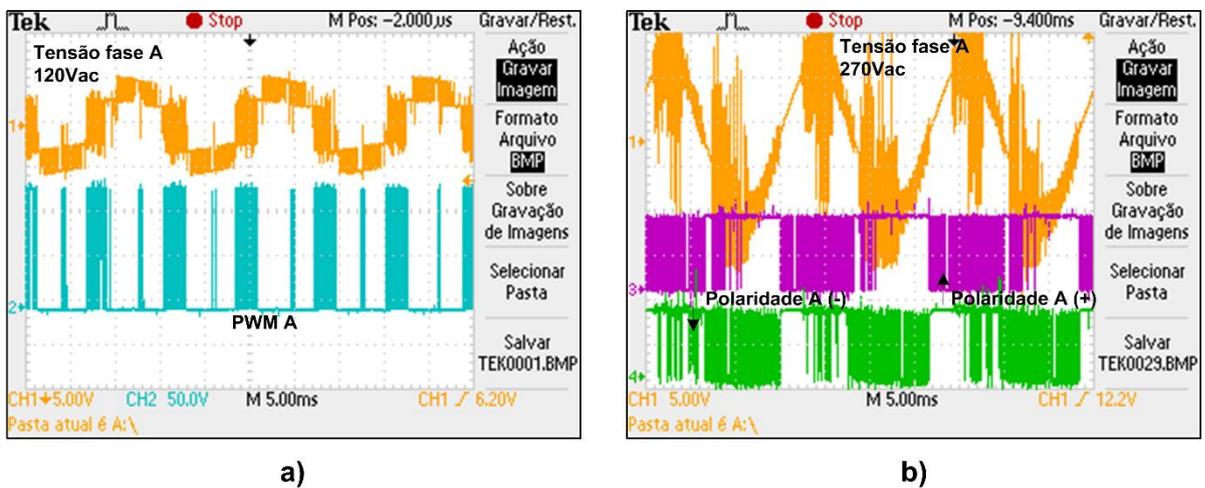


Figura 6.10: Sincronismo entre o pulso PWM-A com a tensão da Rede trifásica - Fase A.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS OBTIDOS

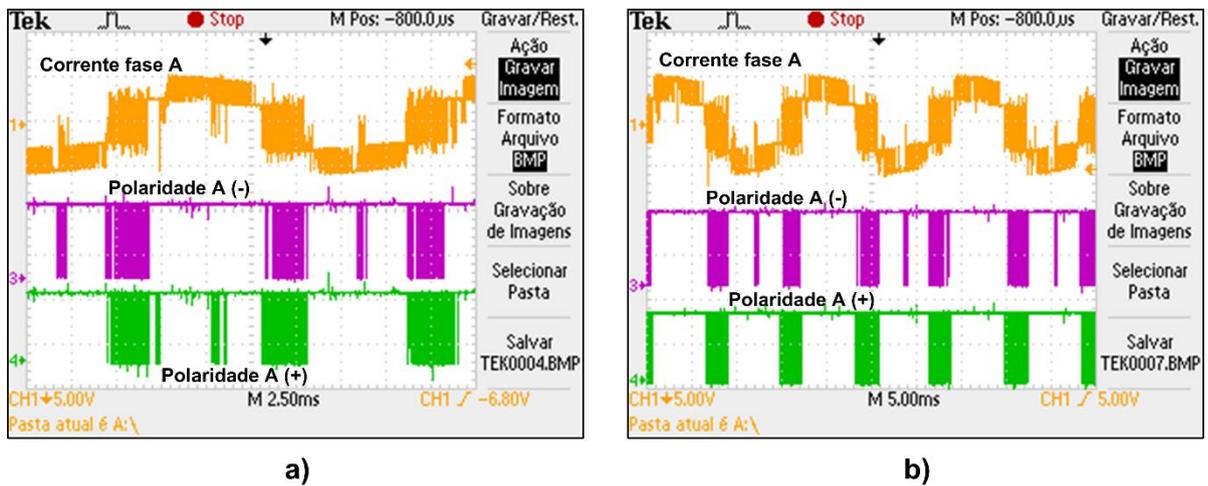


Figura 6.11: Sincronismo entre o pulso PWM-A com a corrente da Rede trifásica – Fase A.

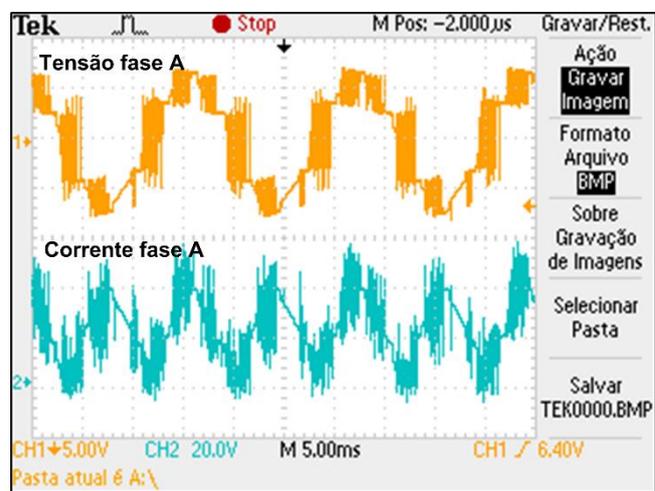


Figura 6.12: Tensão e corrente da Rede trifásica -Fase A.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS OBTIDOS

6.2.2 Conversor CC/CA ressonante

Para poder efetuar as diversas medições no circuito ressonante do conversor CC/CA, foi utilizada uma potência de 3.5kW e o conversor Boost trifásico foi implementado. Na Figura 6.13, é vista a frequência de ressonância obtida para este teste, juntamente com um pulso de acionamento para os módulos da estrutura do conversor. Este pulso foi gerado pelo UGCS.



a)



b)

Figura 6.13: (a) Frequência de ressonância e (b) Pulso de saída da Unidade Geradora de Sincronismo e Controle (UGSC).

Na Figura 6.14, é diagnosticada a resultante no circuito ressonante do conversor. Na Figura 6.14(a), está a tensão no capacitor ressonante e um pulso de acionamento enviado pelo UGSC. A Figura 6.14(b) mostra a tensão que é fornecida pelo conversor ao núcleo primário do transformador de acoplamento e, em seguida, apresenta a tensão do secundário do mesmo transformador. Quando é alcançada a ressonância no sistema, a concentração de tensão no capacitor é maior, indicando que é o ponto máximo de transferência de energia.

6.2.3 Simulação da fonte de rádio frequência

Como resultados de simulação do processo de distribuição de energia da fonte RF, é mostrada a Figura 6.15, com os pulsos de acionamento para os módulos do conversor 6.15(a); em seguida é vista na Figura 6.15(b) uma comparação com a situação apresentada na Figura 6.14(a). Finalizando os principais resultados obtidos na simulação, é apresentada a Figura 6.15(c), que mostra a tensão obtida no capacitor e no indutor ressonante.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS OBTIDOS

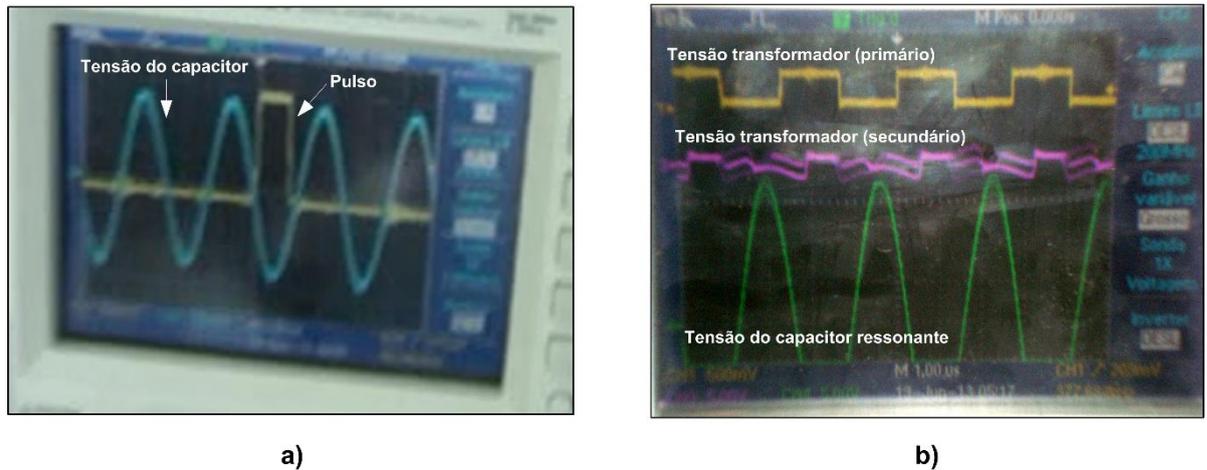


Figura 6.14: Medições no circuito ressonante: (a) Tensão do capacitor ressonante e pulso do UGSC; (b) Tensão primário e secundário do transformador de acoplamento; e tensão no capacitor ressonante.

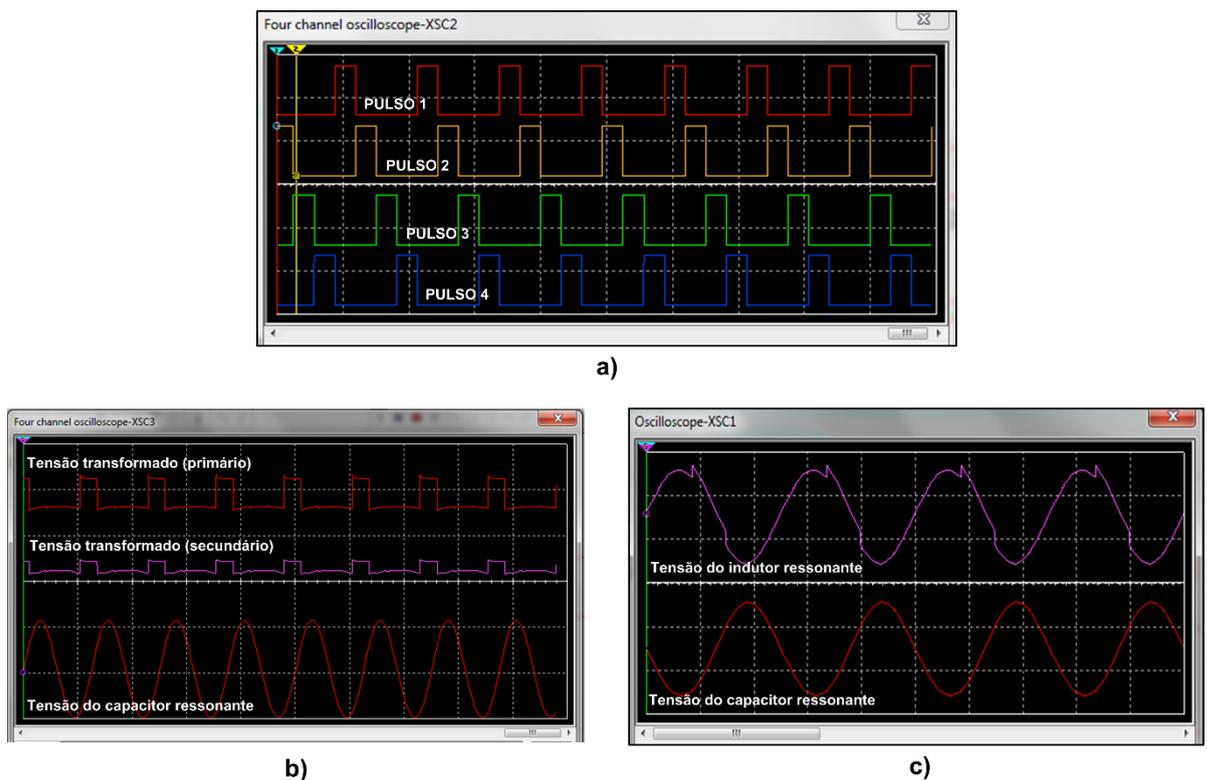


Figura 6.15: Resultados de simulação da fonte de rádio frequência.

6.3 Otimização na implementação do controle Fuzzy na geração de plasma

Nas figuras seguintes, são apresentados os gráficos obtidos no controle PI-Fuzzy em cascata. Para a aquisição dos dados, foi utilizada a tela de supervisão "Controle na geração do plasma", descrita no capítulo anterior. Para dar início aos testes, primeiramente, foram definidas as faixas de tensão do conversor Boost e o *Set point* desejado.

Foram selecionados dois testes, entre vários outros realizados, sendo estes os que mostram uma maior relevância em questão de resultados. Todos os resultados obtidos foram devidamente sincronizados em função do tempo de execução.

Para o primeiro teste, foram definidos os parâmetros de controle de tensão do conversor Boost trifásico entre 190V_{cc} até 235V_{cc}. Na Figura 1.16, foram definidos diferentes *Setpoints* no controle de subida, começando com 35°C e terminando com 58°C. Na Figura 6.17, foram definidos diferentes *Setpoints* no controle de decida, começando com 58°C e terminando com 43°C.

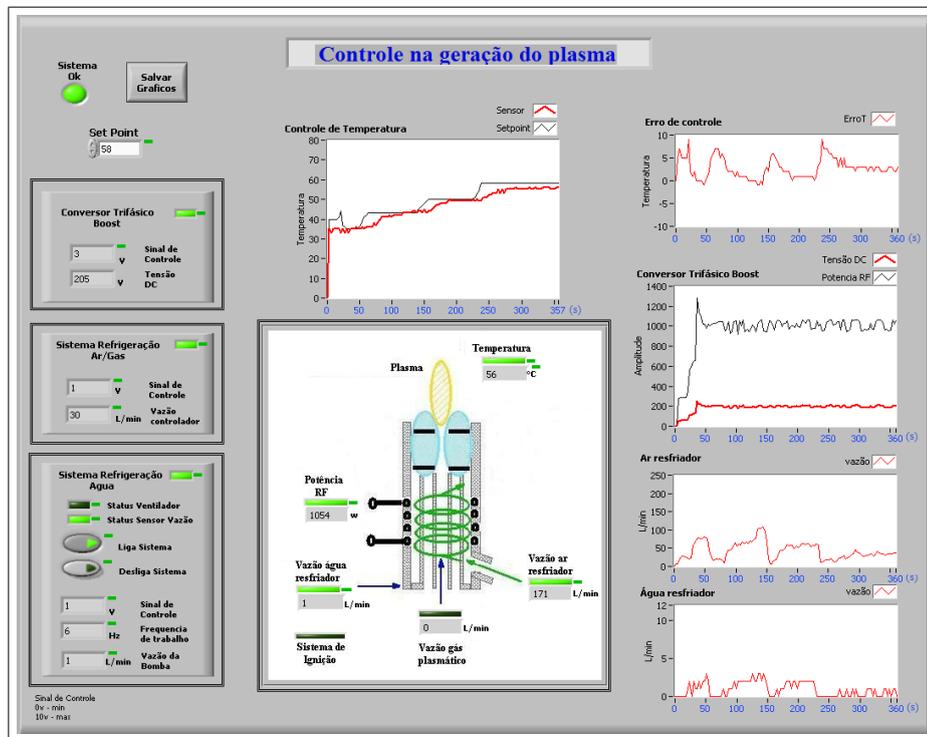


Figura 6.16: Curva de temperatura no controle de geração de plasma de subida (35°C , 43°C , 50°C , 58°C).

Na Figura 6.18, nota-se como o controle de temperatura reagiu às mudanças do *Set-point* e percebem-se algumas dificuldades para atingir a temperatura máxima de subida,

CAPÍTULO 6. RESULTADOS OBTIDOS

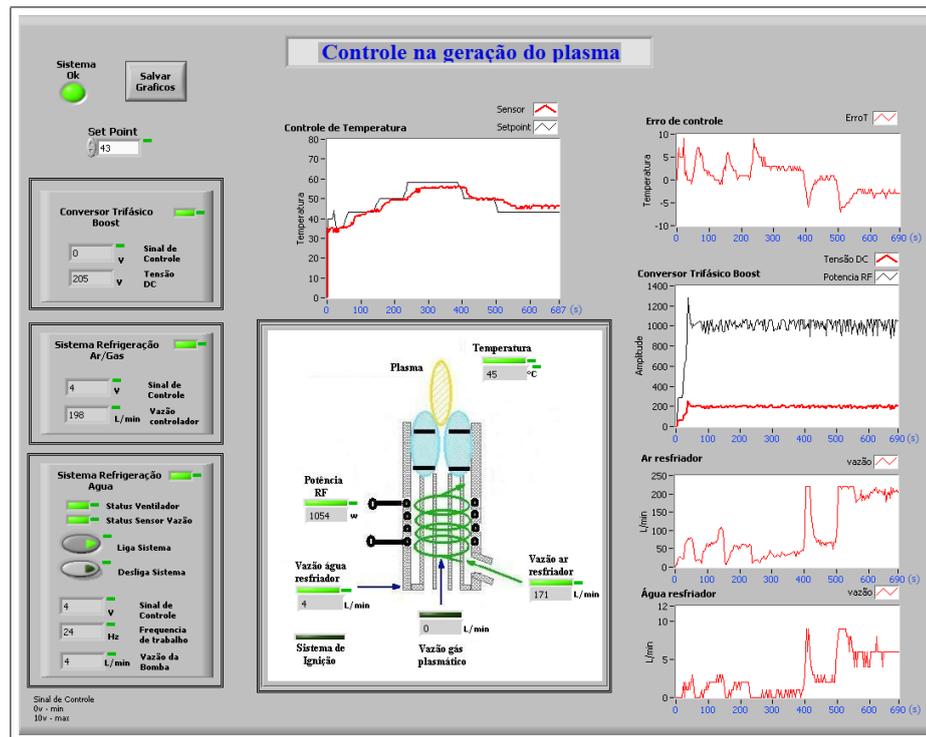


Figura 6.17: Curva de temperatura no controle de geração de plasma de descida (58°C , 50°C , 43°C).

como também a temperatura mínima. Um dos motivos analisados para esta dificuldade é a forma como o conversor Boost estava trabalhando, já que ele foi projetado para funcionar em uma faixa de tensão de 650Vcc até 850Vcc. Mas pode-se supor que o controle no sistema real (tocha ICP) teria um comportamento similar, já que a faixa de controle em função da potência fornecida pela fonte RF ao sistema seria de 35kW até 50kW , valores que, experimentalmente, têm que ser analisados para manter o plasma ativo.

Um fator importante a ser analisado são as condições em que a resistência está trabalhando, limitada que é em função da tensão (até 320V) e da corrente (até 6A). Ela precisa também ser resfriada constantemente por um ventilador para assim não aquecer demais. O ventilador não teve influência relevante no controle do sistema, já que a sua vazão do ar foi relativamente baixa (0 - 30L/min) e a vazão de ar do sistema de refrigeração foi de (0 - 200L/min). Outro ponto favorável da vazão de ar do ventilador, no sistema, foi a distribuição térmica constante gerada na câmara de direcionamento, fazendo com que a temperatura não se concentre só em um ponto.

Vários testes foram realizados nestas condições, assim foi necessário mudar os graus de pertinência das variáveis envolvidas e as regras. Os melhores resultados obtidos estão expostos na Figura 6.18.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS OBTIDOS

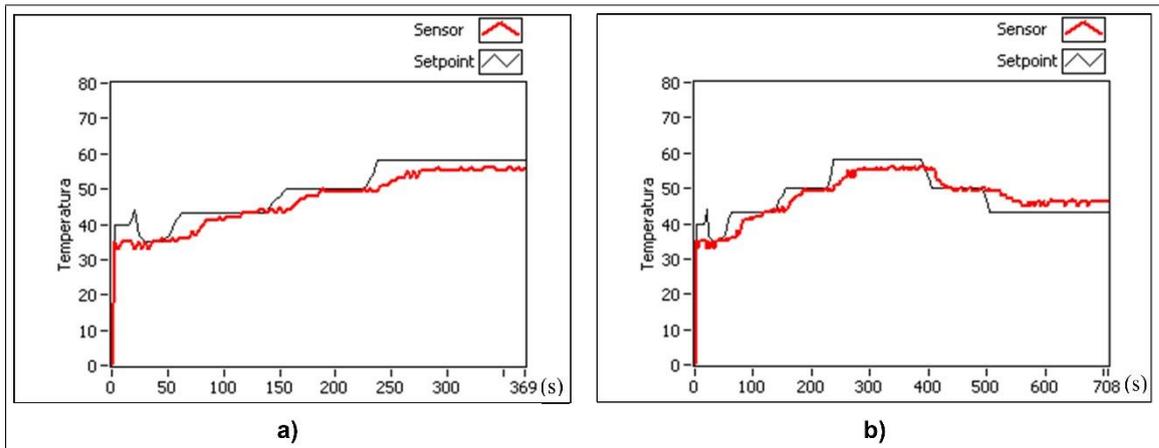


Figura 6.18: Controle na temperatura do sistema emulado, a) Incremento de temperatura e b) Incremento/ decremento de temperatura.

A Figura 6.19 mostra o gráfico obtido no erro de controle, onde se pode ver que, no tempo (400 segundos), ele muda o erro de temperatura de subida para temperatura de descida, mantendo o mesmo sincronismo com o gráfico anterior.

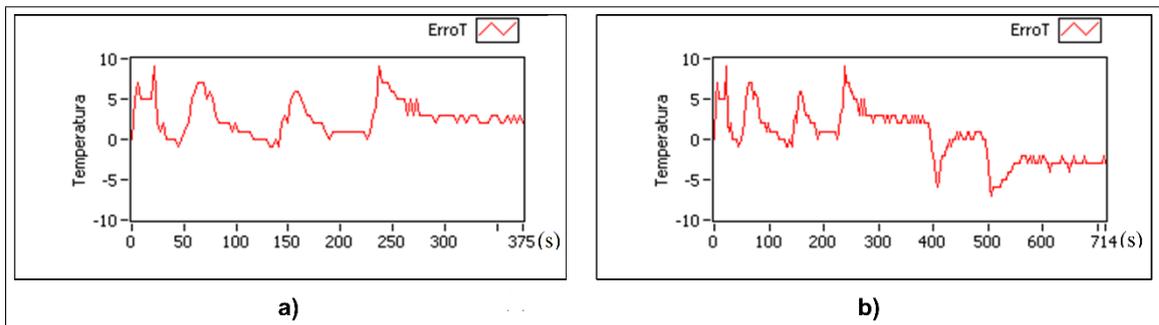


Figura 6.19: Gráfico do erro de controle.

O comportamento do conversor Boost pode ser visto na Figura 6.20, onde estão em evidência a sua potência e tensão.

Na Figura 6.21 e na Figura 6.22 é exposto o comportamento de controle do sistema de refrigeração de ar e água, respectivamente.

O segundo teste teve como principal diferença a faixa de controle fornecida pelo conversor trifásico Boost, que foi de $200V_{cc}$ até $245V_{cc}$. A Figura 6.23 e 6.24 mostra os resultados obtidos na aplicação do controle, incluindo as mudanças de tensão CC. Os *Setpoints* de controle selecionados na subida de temperatura foram de $40^{\circ}C$ até $60^{\circ}C$ e na descida de $60^{\circ}C$ até $45^{\circ}C$. Ficou em evidência um controle mais próximo do desejado que no caso anterior, uma vez que se conseguiu mantê-lo mais perto do *Setpoint* em quase todos os casos. Só houve maior dificuldade para chegar ao menor valor do *Set-*

CAPÍTULO 6. RESULTADOS OBTIDOS

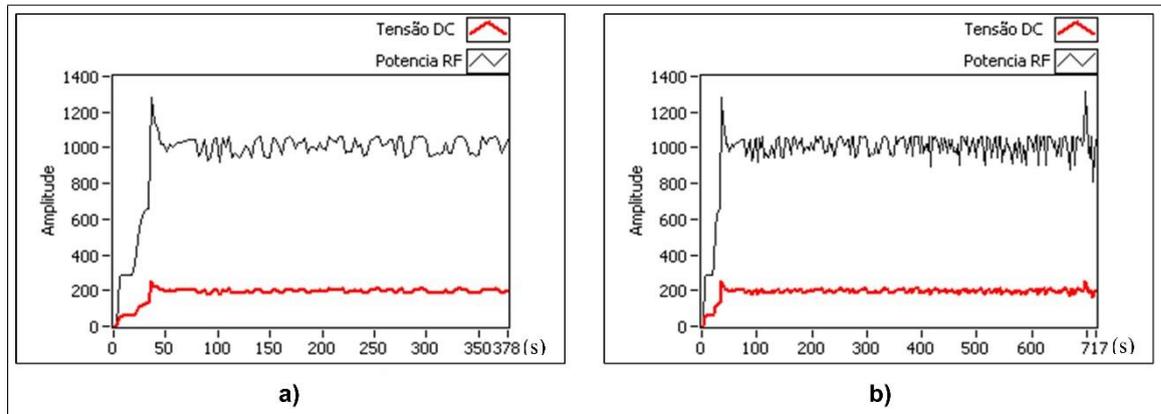


Figura 6.20: Gráficos de controle do conversor trifásico Boost.

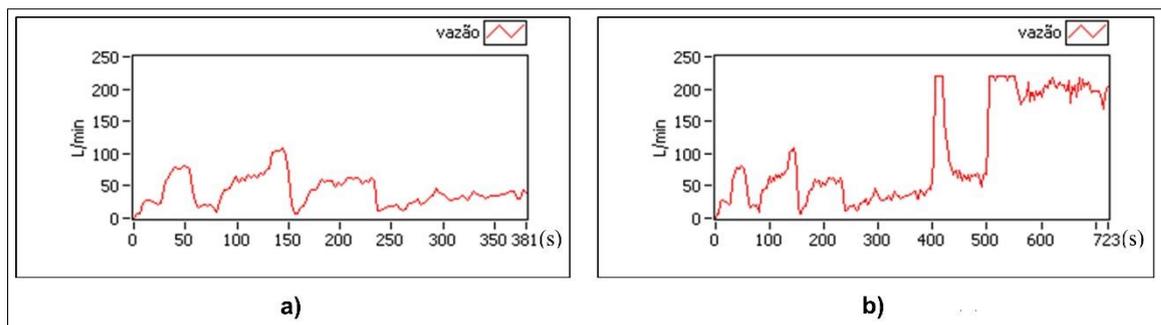


Figura 6.21: Gráficos de controle no sistema de refrigeração de ar.

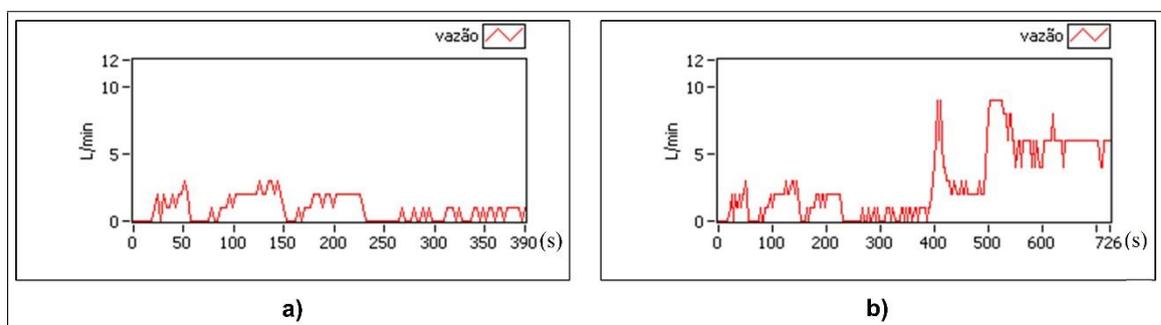


Figura 6.22: Gráficos de controle no sistema de refrigeração de água.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS OBTIDOS

point definido. Este comportamento do controle se deve à tensão aumentada em 10V em comparação com o teste anterior, dando ao controle maior força na subida de temperatura e demonstrando dificuldades na descida, apesar do bom desempenho das outras variáveis envolvidas.

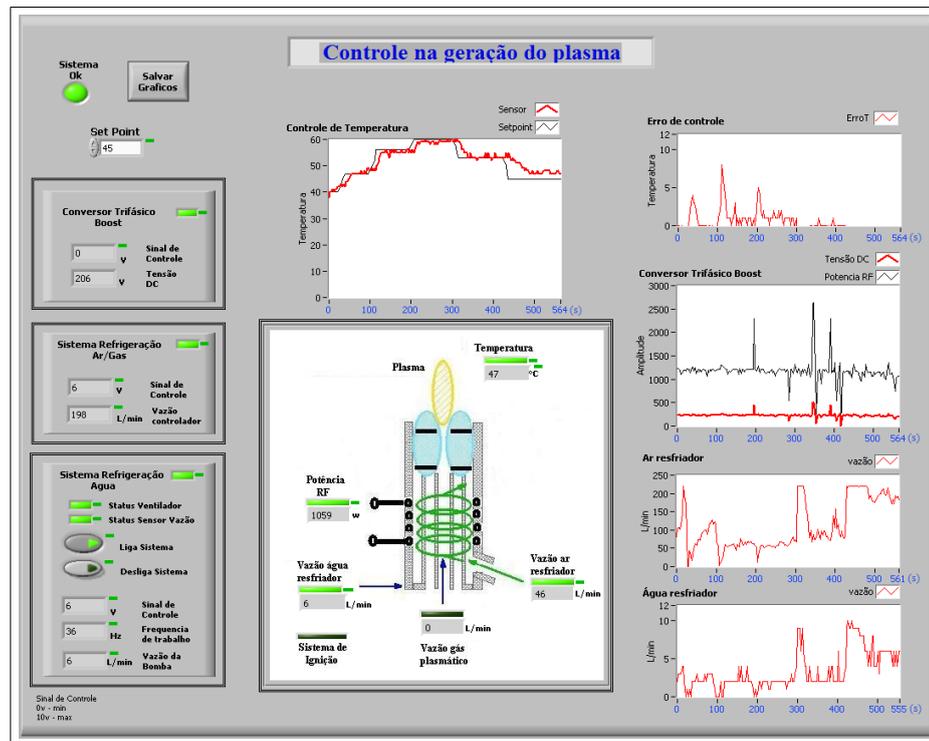


Figura 6.23: Supervisor de controle de temperatura (40°C, 47°C, 56°C, 60°C, 53°C, 45°C)

A estrutura física utilizada para a implementação do controle na geração do plasma pode ser vista no apêndice B, seguidamente os dados obtidos neste processo salvos em um arquivo "txt" (apêndice C).

CAPÍTULO 6. RESULTADOS OBTIDOS

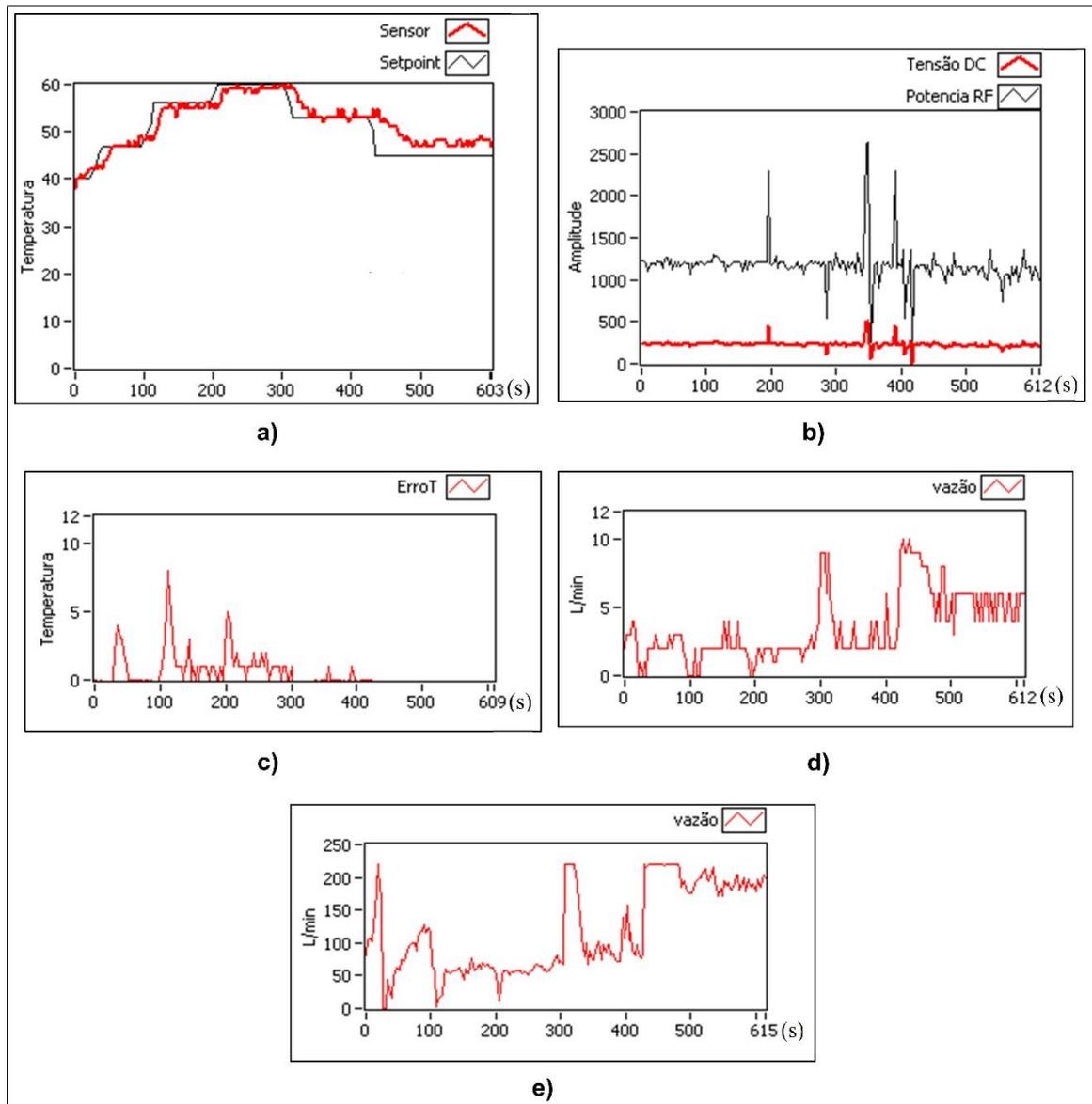


Figura 6.24: Gráficos das variáveis de controle: a) Controle temperatura, b) Tensão e potência da fonte RF, c) Erro de controle, d) Vazão de água, e) Vazão do ar.

Capítulo 7

Conclusões gerais e perspectivas

7.1 Conclusões gerais

- O objetivo deste trabalho foi implementar e otimizar o processo de inertização de resíduos que poderiam ser danosos ao meio ambiente e aos seres vivos. O processo em questão foi revisado, estudado e, finalmente, melhorado graças a desempenho, visualização e eficiência nas suas diferentes funções.
- Técnicas de otimização foram aplicadas na supervisão da planta real, como a criação de diferentes ferramentas de apoio, com visualização e segurança necessárias, que estão presentes no decorrer do processo de inertização dos resíduos. Resultados obtidos no processo de otimização virtual mostraram a comunicação entre um dispositivo real (Hardware) e um virtual (planta 3D) em que foram testados os conceitos de realidade mista, o que, futuramente, permitirá melhoras em função do desempenho de controle e estrutura física da planta. Todos os componentes virtuais da planta foram desenhados com dimensões e posições equivalentes à planta real.
- O desempenho obtido pelos dois conversores que fazem parte da fonte RF foi verificado. Eles mostraram comportamento individual e coletivo de forma aceitável. O conversor CA/CC foi totalmente adaptado e implementado para esta aplicação. Infelizmente, durante a integração dos conversores ao sistema de geração de plasma, houve uma falha técnica que impediu finalizar e verificar o desempenho total da fonte RF.
- O sistema de geração de plasma foi emulado para suprir o desempenho parcial da fonte RF, para, em fim, testar o controle desenvolvido. Os testes implementados utilizando o controle PI-Fuzzy MISO foram feitos com baixa potência a fim de adquirir o conhecimento necessário do fenômeno, para, assim, futuramente, trabalhar com potências mais elevadas. Os resultados do controle mostraram um bom desenvolvimento para altas temperaturas, mas, em alguns casos, este foi limitado nas

baixas temperaturas. O controle das outras variáveis envolvidas teve um comportamento esperado.

7.2 Trabalhos futuros

- Uma forma de otimizar ainda mais o sistema supervisorio virtual seria utilizar conceitos de ambiente virtual colaborativo (AVC), que forneceria um ambiente de desenvolvimento com maior segurança, desenvolvimento constante, interligação dos dados (banco de dados), controle e organização. Neste caso, não dependeria de softwares pagos, já que seria criada uma plataforma própria para ele.
- Foi importante aproveitar a estrutura montada na plataforma virtual e implementar técnicas de controle na planta, como por exemplo: fusão sensorial, tolerância a falhas, etc.
- Uma vez que o conversor CC/CA ressonante estiver reparado, a integração dos subsistemas necessários no processo de geração do plasma pode ser feita. A estrutura montada neste trabalho ajudará nesta futura integração.
- Verificou-se o reaproveitamento energético da energia que pode ser gerada por este sistema, por meio de um grupo motorgerador.
- Adaptação da planta piloto para um processo mais industrializado, que possa eliminar maiores quantidades de resíduos e co-gerar energia.

Referências Bibliográficas

- A. Carlos, A. Francisco, T. Santiago & T. Fernando (2011), 'Hands on experiences of undergraduate students in automatics and robotics using a virtual and remote laboratory', *ScienceDirect, Computers Education* **57**, 2451.
- A. Guimarães, H. Antônio de Moraes, A. Salazar & A. Maitelli (2006), 'Automation system applied to a plasma inertization plant', *Revista Eletrônica de Potência da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência*.
- A. Salazar, A. Maitelli & F. de Azevedo (2002), 'Implementação de um controlador fuzzy-pi por uma fonte pulsada de energia de nitretação a plasma', *Industry Applications Conference* **2**.
- Aalborg (2013), Operating manual, gfc mass flow controller, Relatório técnico, Technical Data Sheet No. TD9709M Rev. N Date of Issue.
- Abrelpe (2010), Relatório técnico, <http://www.abrelpe.org.br/>.
- Adachi, T. (2000), Performance of induction thermal plasmas generated by sit inverter power supply. Department of Electrical Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya University.
- Albuquerque, F. (2012), 42 % dos resíduos sólidos coletados no país vão para locais inadequados, indica estudo, Relatório técnico, EcoDebate,, <http://www.ecodebate.com.br/>.
- Antônio, A. & A. Silva (2010), Relatório do trabalho sobre medição de temperatura com pt100, Relatório técnico, Faculdade de engenharia, Universidade do Porto.
- ATSDR (2006), Top 20 hazardous substances, Relatório técnico, <http://www.atsdr.cdc.gov/SPL/index.html/>.
- Baratoff, G. & H. Regenbrecht (2004), 'Developing and applying ar technology in design production, service, and training, in virtual and augmented reality applications in manufacturing', *Springer*, p. 207.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Billinghamst, M. & H. Kato (1999), 'Collaborative mixed reality.', *International Symposium on Mixed Reality* p. 261.
- Bockholt, U. (2003), 'Augmented reality for enhancement of endoscopic interventions', *IEEE on Virtual Reality* p. 97.
- Boulos, M. (1991), 'Thermal plasma processing', *IEEE Transactions on plasma science* .
- Boulos, M. (1999), Diagnostics of thermal plasma. Plasma Technology Research Centre (CRTP), Université de Sherbrooke, Department of Chemical Engineering.
- Braga, C. Newton (2011), Utilizando o ni multisim 11 basico e detalhado, Relatório técnico, Sao Paulo.
- Bruns, F. (2005), 'Hyper bonds distributed collaboration in mixed reality', *Annual Reviews in Control, Rotterdam, Netherlands* **29**, 117.
- Bruns, F. & H. Erbe (2004), 'Mixed-reality with hyper-bonds a means for remote labs', *IFAC Symposium on Information control in Manufacturing* .
- Bucci, G. & C. Lnadi (2003), 'A distributed measurement architecture for industrial applications', *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* .
- Buss, P. & A. Pellegrini (2008), Artigo aborda os problemas da saúde e seus determinantes sociais, Relatório técnico, <http://www.coeptbrasil.org.br/portal/Publico/a>.
- Byungwhan, Kim & Seongjin Choi (2012), 'Regulation of plasma discharge using fuzzy logic and an in-situ plasma sensor', *International Journal of Control, Automation and Systems* **10**, 644.
- C. Chang, C. Leuo & C. Lin (2001), *J. Vac. Sci. Technol* **19**, 750.
- C. George, Y. Chan, M. Gary & Hieftje (2005), 'A labview program for determining confidence intervals of abel inverted radial emission profiles', *Spectroscopy* **60**, 1486.
- C. H. Chang, C. Lin. & K. C. Leou (2000), 'A fuzzy model of inductively coupled plasma by adaptive-network-based fuzzy inference system (anfis)', *Plasma Science, 2000. ICOPS 2000, IEEE Conference Record, Abstracts. The 27th IEEE International Conference* .
- Campos, M. M. e Saito, K (2004), *Sistemas inteligentes em controle automação de processos*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carlos (2007), Reciclagem, reaproveitamento e clima, Relatório técnico, <http://www.coeptbrasil.org.br/portal/Publico/>.
- Cengage, Learning Inc. (2012), 'Construction/completion with smartplant showcased', *GUI Program News* **25**.
- Chen., F. (1984), Introduction to plasma physics and controlled fusion. Nova York - Plenum.
- Cheneurope (2004), Plasma arc waste disposal, Relatório técnico, <http://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/>.
- Cienfuegos, F. & D. Vaitsman (2000), Análise instrumental. Editora Interciência. Colombo (2008), Rf thermal plasma treatment of waste glass and its reutilization in composite materials. University degli Studi di Bologna, Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni Meccaniche, Bologna, Italy.
- Costa, L. (2007), Desenvolvimento de reator de pirólise a plasma para a decomposição do metano em hidrogênio e carbono sólido, Tese de doutorado, Programa de pós-graduação de engenharia da Universidade Federal de Rio de Janeiro.
- Council, National Research (1995), Plasma science: From fundamental research to technological application, Relatório técnico, National Academy Press, Washington DC.
- Cubas, A. (2003), 'Pirólise de resíduos líquidos por plasma', *22 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental* .
- Cubas, A. (2004), Eliminação de organoclorados por plasma térmico de corrente contínua, Tese de doutorado, Programa de Pós graduação de Engenharia química, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Cunha, C. E (2009), Gestão de resíduos perigosos em refinarias de petróleo, Dissertação de mestrado, Centro de Tecnologia e Ciências Faculdade de Engenharia Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente, UERJ.
- D. Gomeza, R. Amutha & A. Boccaccinia (2009), 'Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review', *Journal of Hazardous Materials* .
- D. Greve, T. Knight, X. Cheng B. Krogh M. Gibson J. LaBrosse & J. Vac (1996), *J. Vac. Sci. Technol.* **14**, 489.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- D. Muller, J. Ferreira & M. Marvel (2004), A mixed-reality learning environment for vocational training in mechatronics, *em* 'Technology Enhanced Learning International Conference, Milano, Italy'.
- Daneels, A. & W. Salter (1999), 'What is scada', *International Conference on Accelerator on Large Experimental Physics Control Systems*.
- de Jesus Azevedo Barja, Gabriel (2006), A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico, Dissertação de mestrado, Ciências mecânicas, Universidade de Brasília.
- Dendy, Richard (1995), Plasma physics: Na introductory course. Cambridge University Press.
- Dubut, Jean Paul (2001), Uma proposta de fonte chaveada com correção do fator de potência para alimentação de um reator de nitretação iônica, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Natal, RN.
- Dubut, Jean Paul (2010), Conversor CC/CA de alta frequência baseado em inversores ressonantes com comutação sequencial para excitação de um tocha indutiva a plasma térmico, Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação.
- Eckert, E. & E. Pfemder (1967), Advances in plasma heat transfer. University of Minnesota.
- Einwag, H. (1999), Reference manual s40 fuzzy, Relatório técnico, Moeller.
- Ewire (1986), Plasma environmental technologies inc., Relatório técnico, <http://www.ewire.com/>.
- F. Schaf, C. Pereira, A. Assis C. Reichert F. Campana & I. Krahkeche (2007), 'Collaborative learning environment using distributed mixed reality experiment for teaching mechatronics', *Symposium on cost oriented automation IFAC*.
- Fauchais, P. & A. Vardelle (1991), 'Thermal plasma', *IEEE Transactions on plasma science* **25**.
- Faust, M. & F. Bruns (2003), Mixed reality web service, air through the internet, *em* 'International Conference on Technology Enhanced Learning, Milano, Italy'.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Faust, M. & F. Bruns (2006), 'Haptic feedback in pervasive games', *International workshop on Pervasive Gaming Applications, IEEE Computer Society*, **3**.
- Felipini, C. (2005), Noções sobre plasma térmico e suas principais aplicações, Relatório técnico, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia da UNIT.
- Ferreira, S. (2007), Os catadores do lixo na construção de uma nova cultura; a de separar o lixo e da consciência ambiental., Relatório técnico, <http://www.coeptbrasil.org.br/>.
- G. Wang, L. Gang & S. Shuguang (2007), 'Fuzzy cascade control based on controls history for superheated temperature', *Energy Power Eng* **3**, 285.
- Group, Plasco Energy (2010), Sobre o projeto, Relatório técnico, <http://www.zerowasteottawa.com/en/About-Project/>.
- Guimarães, Alexandre Magnus Fernandes (2009), Desenvolvimento De Um Sistema De Automação Para Uma Planta De Inertização De Resíduos Por Plasma, Tese de doutorado, PHD, PPgEEC, Universidade Federal Rio Grande do Norte, Natal.
- Halvorsen, Hans Petter (2012), Opc and real time systems in labview, Relatório técnico, Department of Electrical Engineering, Information Technology and Cybernetics, Telemark University College.
- Hershkowitz, N. & D. Auciello (1989), 'Plasma diagnostics', *Academic*, **1**.
- IEAv (2006), Esgoto, lixos, componentes tóxicos, Relatório técnico, <http://www.ieav.cta.br/>.
- Incorporated, Texas Instruments (2008), *Advanced-Power Fator PreRegulator UC1854A, UC2854A, UC2854B, UC3854A, UC3854B*.
- Industries, Advanced Energy (2005), Fundamentals of mass flow control, Relatório técnico, EUA.
- Instruments, National (2001a), Labview pid control toolset user manual, Relatório técnico, Austin, TX.
- Instruments, National (2001b), Manual de treinamento do labview básico i, Relatório técnico, Edição de novembro de 2001, Código do manual 322682A01, Copyright 2001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Instruments, Texas (2005), 1na129 - precision, low power, instrumentation amplifiers, Relatório técnico.
- J. Diaz-Amado, J. P. Dubut, A. Salazar A. Lock G. C. Maniçoba & R. Pinheiro (2012), 'Conversor cc-ca de alta frequência utilizando inversores ressonantes com comutação sequencial', *Sobraep* **14**(4), 744–752.
- J. Melendez, J. Colomer & J. Rosa (2008), 'Expert supervision based on cases', *8th IEEE International Conference* .
- J. Sung-Ho, O. Se-Jin, L. Young-Kwang & Ch. Chin-Wook (2013), 'Real time feedback control of plasma density using a floating probe in semiconductor processing', *Current Applied Physics* **13**, 76.
- Jenkins, S. (2013), 'New capabilities for this pipe-stress software', *Chemical Engineering* **120**(6).
- Karnopp, D. & R. Rosenberg (1990), 'System dynamics, a united approach', *New York, USA, Wiley-Interscience* p. 528.
- Keittani, M. & M. Hoyaux (1973), *Plasma engineering*. Londres, London Butterworths.
- Kompac, Grupo (2011), *Criando soluções ambientais com energia renovável*, Relatório técnico, <http://www.kompac.com.br/>.
- Kretshmer, U. (2001), 'Virtual reality, archeology, and cultural heritage', *International Workshop on Pervasive Gaming Applications* .
- L. Buss Becker, W. Pardi Junior & C. Eduardo Pereira. . (1999), 'Proposal of an integrated objectoriented environment for the design of supervisory software for real time industrial automation systems', *Fourth International Workshop on Object Oriented Real Time Dependable Systems* .
- L. Chaung, L. Keh-Chyang, H. Hong-Min & H. Cheng-Hung (2009), 'Feedback control of plasma electron density and ion energy in an inductively coupled plasma etcher', *Science & Technology of Materials, Interfaces, and Processing* p. 157.
- L. Zhi, J. Qin, T. Yu Z. Hu & Z. Hao (2000), 'The study an realization of scada system in manufacturing enterprises', *IEEE World Congress on Intelligent Control and Automation, Hefei, China, junjul* .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Lian, R. Jing & B. Fu Lin (2005), 'Design of a mixed fuzzy controller for multiple input multiple output system', *Journal Mechatronics*.
- Liao, F. (2002), Application of rf-induction thermal plasma in chemical vapor deposition of silicon carbide films, Relatório técnico.
- M. Boulos, P. Fauchaus & E. Pfender. (1994), Thermal fundamentals and applications. Vol. 1. Nova York: Plenum.
- N. Liebermann, A.J. Lichtenberg (2005), Principles of Plasma Discharges and Material Processing, second ed.
- O. Maniçoba, Glauco George Cipriano (2013), Controle de temperatura do sistema de refrigeração a Água de uma tocha plasmática indutiva utilizando lógica fuzzy, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação.
- Menezes (1991), Atuação do grupo kompac em sistemas de tratamento de resíduos sólidos, Relatório técnico, IV Workshop Brasil - Alemanha para o Intercâmbio em Ciências e Tecnologias Ambientais.
- Meyer, B. U. (2001), 'Digital signal processing with fpga', *Springer Verlag*.
- Mitchner, M. & C. Kruger (1973), Partially ionized gases. Nova York: Wiley.
- Moeller (1999), Clp ps4-341-mm1, werner albrecht, hardware and engineering, Relatório técnico.
- Moore, W. S. (2006), 'An intelligent maintenance system for continuous cost based prioritization of maintenance activities', *Comput Ind special issue on emaintenance* **57**, 595.
- Morabito, F. & M. Versaci (1997), 'A fuzzy-neural approach to real time plasma boundary reconstruction in tokamak reactors', *International Conference on Neural Networks* **1**, 43.
- Morabito, F. & M. Versaci (1999), 'A fuzzy neural approach to plasma disruption prediction in tokamak reactors', *International Joint Conference on Neural Networks* **5**, 3463.
- Morrow, R. & J. Crain (1998), *Applications of inductively coupled plasma-mass spectrometry to radionuclide determinations*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Mujjibur, T. F. (2000), 'Destruction technologies for polychlorinated biphenyls (pcbs)', *ICS Proceedings Expert Group on POPs and Pesticides Contamination: ICS-UNIDO PUBLICATIONS-Proceedings of Expert Group Meetings on POPs and Pesticides Contamination: Remediation Technologies (April 2000) and on Clean Technologies for the Reduction and Elimination of POPs (May 2000)* .
- Muller, D. (2006), Creating hybrid learning spaces for mechatronics education., em 'Interactive Computer aided Learning Conference - ICL , Proceedings. New York' .
- Nema, K. G. (2002), 'Plasma pyrolysis of medical waste', *Special Section: Plasma applications* **83, numero 3**.
- Ozdemir, E. & M. Karacor (2002), 'Run time position estimation with basic sensors in real-time scada applications', *7th International Workshop on Advanced Motion Control* .
- P. Klimecky, J.W. Grizzle & F.L. Terry (2003), *J. Vac. Sci. Technol* **21**, 706.
- P. Milgram, D. Drascic, J. Grodski A. Restogi-S. Zhai & técnico, <http://www.plascon.com.au/control-monitoring.html>. C. Zhou (1995), 'Merging real and virtual worlds', *Imagina Proceedings*. p. 221.
- Padovani, W. F. (2007), Os desafios da era do lixo, Relatório técnico, <http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/lixo/>.
- Paynter, H. M. (1960), 'Analysis and design of engineering systems', *Cambridge, USA, MIT Press* .
- Pereira, C. E. & W. P. Junior (2003), 'A supervisory tool for real-time industrial automation systems', *Sixth IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing* .
- Pereira, C. E. & W. P. Junior (2006), 'A supervisory tool for realtime industrial automation systems', *Sixth IEEE International Symposium on Object Oriented RealTime* .
- Pereira, C. E. & W. P. Junior (2012), Tecnologia geral, Relatório
- Power, Advanced Plasma (2008), Plans unveiled for breakthrough plasma plant, Relatório técnico, <http://www.letsrecycle.com/news/>.
- Prieto & T. Prieto (2003), 'Destruction of residual fumigant using a plasma reactor', *IEEE Transactions on Plasma Science* .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- R. Patrick, S. Baldwin & N. Williams (2000), ‘unpublished’, *J. Vac. Sci. Technol* **18**, 405.
- Raytek (1997), Raynger 3i series operators manual, Relatório técnico, Copyright Raytek Corporation.
- Reed, T. B. (1961), ‘Induction-coupled plasma torch’, *Journal of Applied Physics* **32**, número 5, 821–824.
- Rêgo (2002), Projeto de um sistema supervisorio com controlador fuzzy aplicado a um secador elétrico-solar de alimentos, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação.
- Riello (2007), Instrucciones para la instalación, uso y mantenimiento, quemador de gas de aire soplado, Relatório técnico.
- Roth, J. R. (2001), *Industrial Plasma Engineering*, IOP publishing Ltd.
- S. Bououden, M. Chadli & S. Filali (2012), ‘Fuzzy model based multivariable predictive control of a variable speed wind turbine: Lmiapproach’, *Renewable Energy* **37**, 434.
- S. Greenfield, I. Jones & C. Berry (1964), ‘High-pressure plasma as spectroscopic emission sources’, *Analyst* **89**, 713–720.
- Salazar, A. Erick & E. Macías (2009), ‘Virtual 3d controllable machine models for implementation of automations laboratories’, *39th ASEE IEEE Frontiers in Education Conference* .
- Salazar, G. C. Barbosa, M. A. Vieira F. O. Quintaes & J. R. da Silva (2011), ‘Modeling and simulation of high voltage and radio frequency transformer’, *IEEE Transactions on Magnetism* .
- Sandra, S. & C. Correa (1999), Lógica nebulosa. Conselho Nacional de Redes Neurais.
- Savran, Aydogan (2013), ‘A multivariable predictive fuzzy pid control system’, *Applied Soft Computing* **13**, 2658.
- Schaf, F. M. & C. E. Pereira (2009), ‘Integrating mixed reality remote experiments into virtual learning environments using interchangeable components’, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **56**, 4776.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Schaf, F. M. & C. E. Pereira (2011), 'Automation and control learning environment with mixed reality remote experiments architecture', *JOE International Journal of Online Engineering*.
- Schaf, Frederico Menine (2011), Arquitetura Modular Para Ambientes Virtuais De Ensino De Automação Com Suporte À Realidade Mista E Colaboração, Tese de doutorado, Universidade Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Elétrica, PPGEE, Porto Alegre.
- Semikron (2003), *SKHI 26W, SKHI 26F, Driver Electronic PCB Drivers 1959*, datasheet.
- Semikron (2005), *SKM 150GB128D, IGBT*, Datasheet.
- Shaw, I. S. & M. Godoy Simões (1999), *Controle e modelagem Fuzzy*, FAPESP.
- SolidWorks-National (2009), Getting started with ni softmotion for solidworks, national instruments corporation, Relatório técnico.
- Souza, A. Carlos (2001), Solidworks - guia prático para modelagem sólida., Relatório técnico, Florianópolis.
- Szente, R. N. (2000), Recuperação de materiais de lodos galvânicos at ravés de plasma térmico, Relatório técnico, IPT, São Paulo.
- T. Watanabe, N. Tonoike, T. Honda & A. Kanzawa (1991), 'Flow, temperature and concentration fields in reactive plasma in a icp rf discharge- characteristics in argon-oxygen and argon-nitrogen thermal plasmas', *Journal of Chemical Engineering of Japan* **24**, numero 1, 25–32.
- Tenhagen, Rainer (2002), Reference manual for function blocks, app-rtt-e-gb sucsoft s40 application software closed-loop control toolbox, Relatório técnico, Moeller.
- UERJ (2011), Tecnologia de plasma, universidade estadual do rio de janeiro, Relatório técnico, Laboratório de análise de Resíduos.
- University, National Cheng Kung (2008), Peat internacional, Relatório técnico, Tainan, Taiwan, <http://www.peat.com/>.
- UNUIAS (1998), International symposium on cooperation in plasma science and technology, the united nations university, Relatório técnico, Tokio, Japão.

- Went, R. H. & V. A. Fassel (1964), 'Induction-coupled plasma spectrometric excitation source', *Analyst* **89**.
- Xilinx (2008), Spartan 3e fpga starter kit board user guide, Relatório técnico, UG230 (v1.1).
- Xin-wei, L. & Ch. Xiang-min (2013), 'Application of fuzzy variable structure control in dc source of plasma arc welding', *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Electronics Engineering* .
- Y. A. Wang, W. J. Lee, C. Y. Chen & L. T. Hsieh (1999), 'Decomposition of dichloro difluoromethane by adding hydrogen in a cold plasma system', *Environmental Science Technology* **33**, 2234–2240.
- Yen, J. & R. Langari (1999), 'Fuzzy logic: Intelligence, control, and information', *Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ* .

Apêndice A

Planta de eliminação de resíduos por plasma

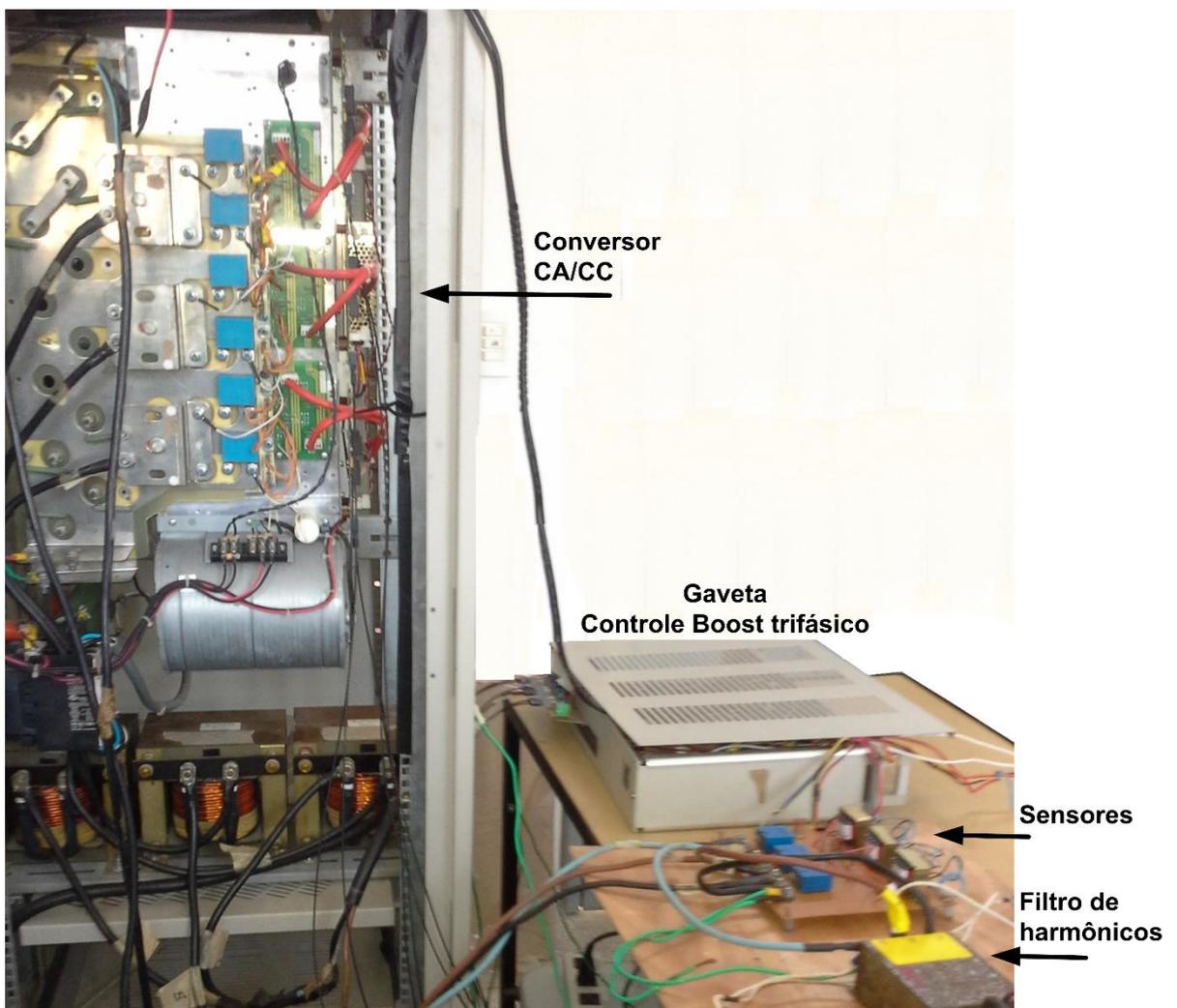


Figura A.1: Conversor Booster trifásico



Figura A.2: Estrutura da planta de eliminação de resíduos por plasma

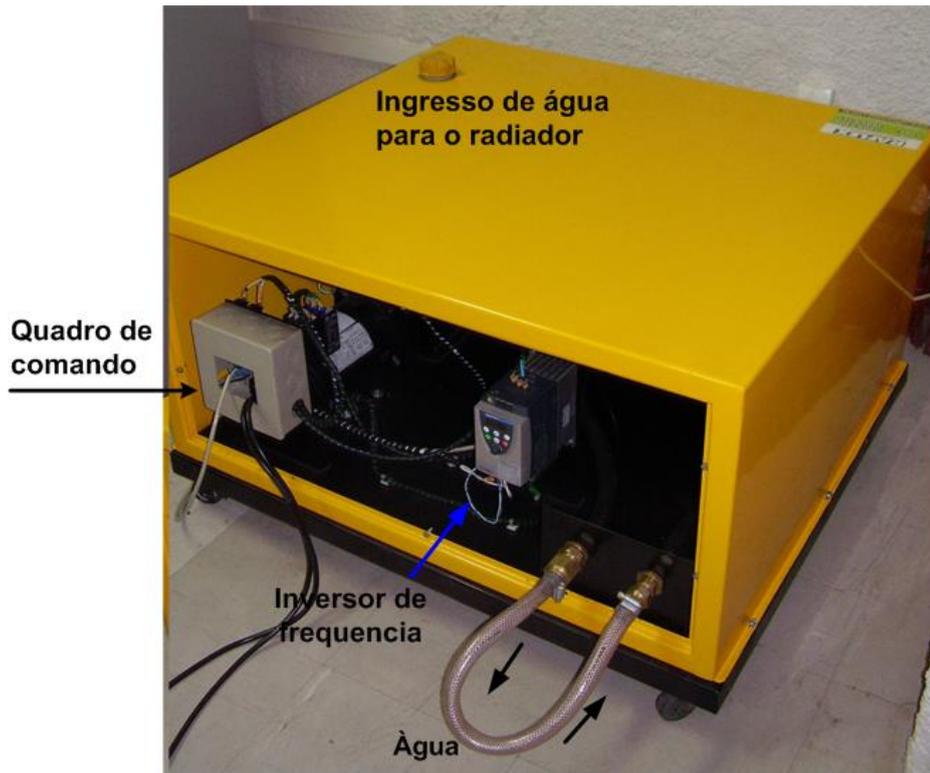


Figura A.3: Sistema de refrigeração por água da tocha ICP

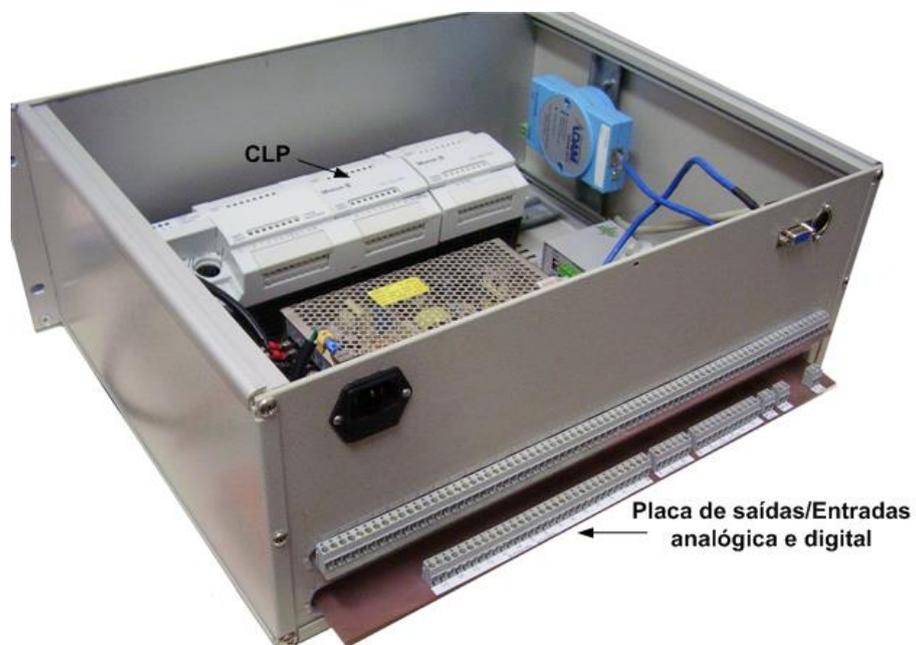


Figura A.4: Gaveta de controle do CLP

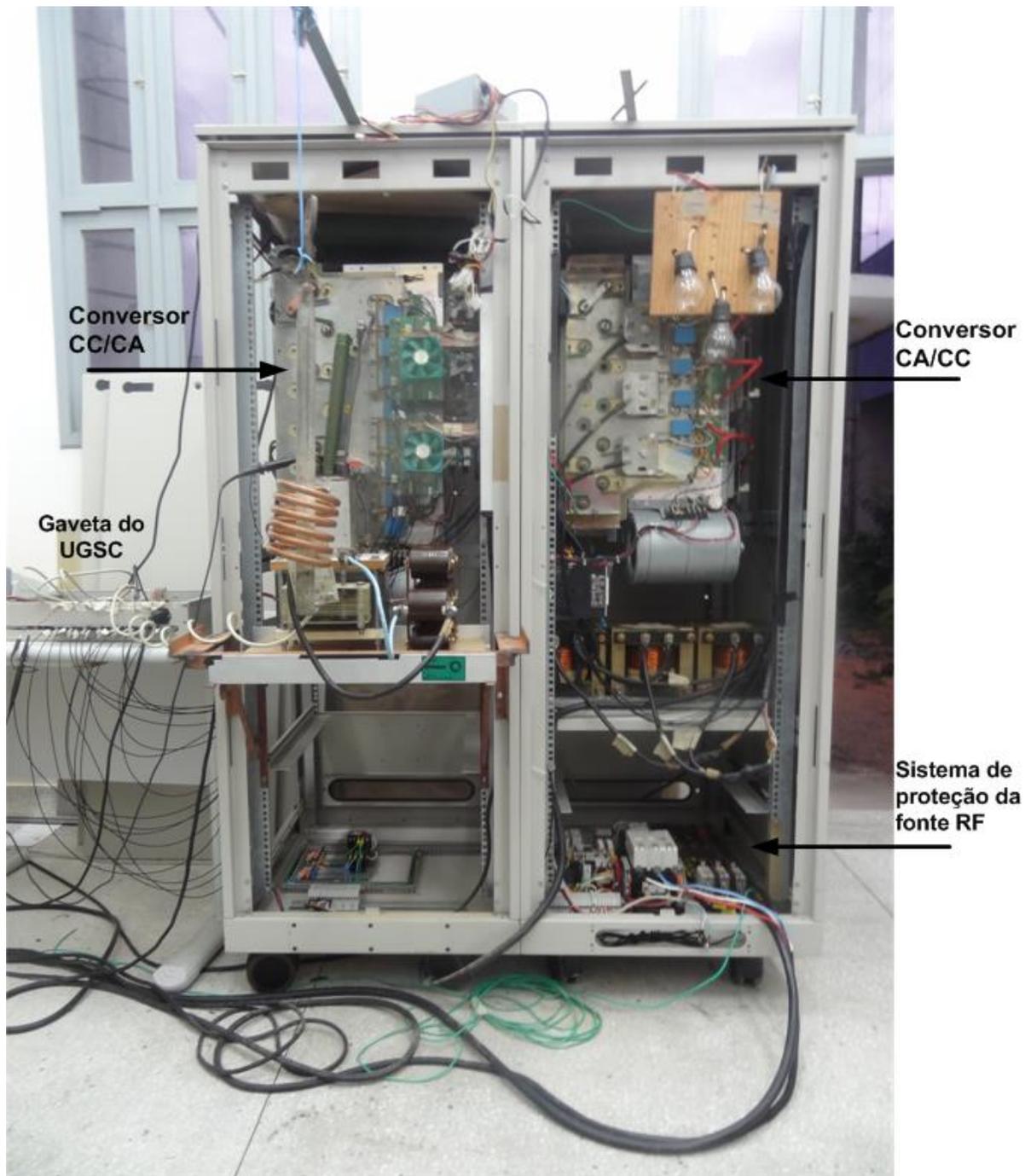


Figura A.5: Fonte de rádio frequência



Figura A.6: Queimador a gás

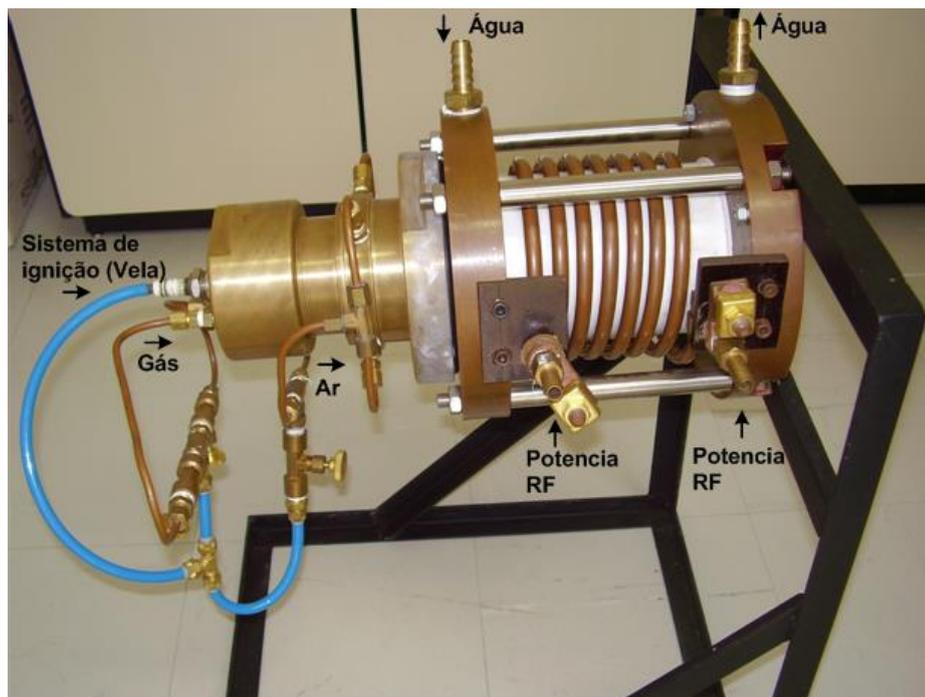


Figura A.7: Tocha de plasma de acoplamento indutivo – ICPT

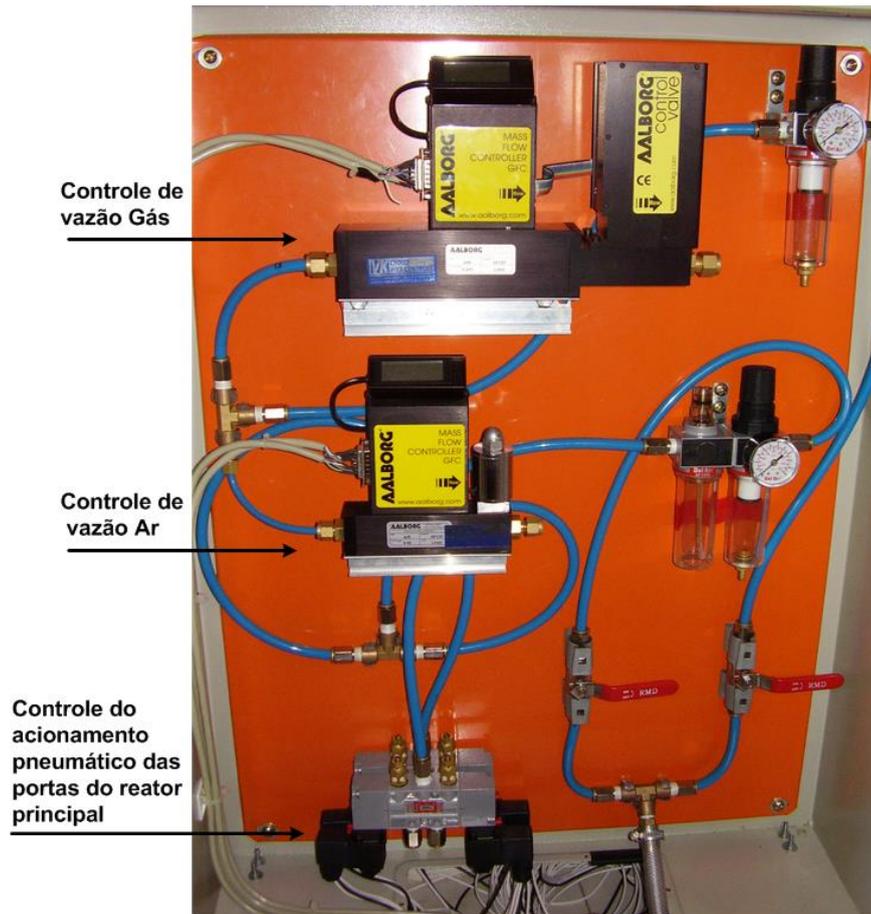


Figura A.8: Dispositivos de controle de vazão de gás e ar e do acionamento pneumático das portas do reator principal



Figura A.9: Exaustor de gases para o meio ambiente

Apêndice B

Estrutura utilizada para o controle do processo de geração de plasma

Na figura B.1, vemos a implementação do circuito ressonante utilizado para o processo de geração de plasma de acoplamento indutivo. Nele estão descritas todos os componentes que fazem parte do processo, como também as variáveis de controle utilizadas.

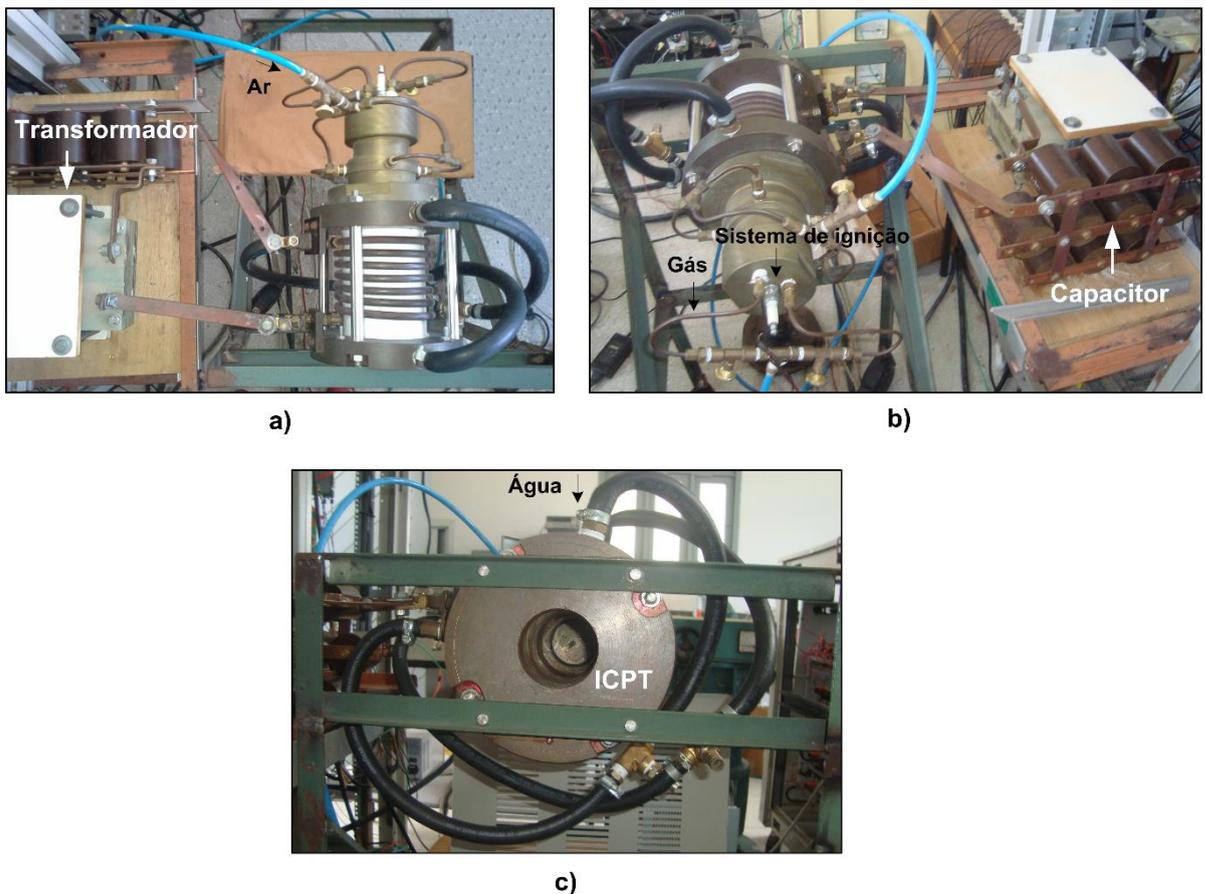


Figura B.1: Circuito ressonante implementado para o controle de geração de plasma (a) vista de cima, (b) vista por trás (c) vista frontal

Na figura B.2 podemos ver a implementação do sistema completo, destacando as principais partes que o compõem. Na figura B.3 é mostrado o sistema emulado para implementar as estratégias de controle no processo.

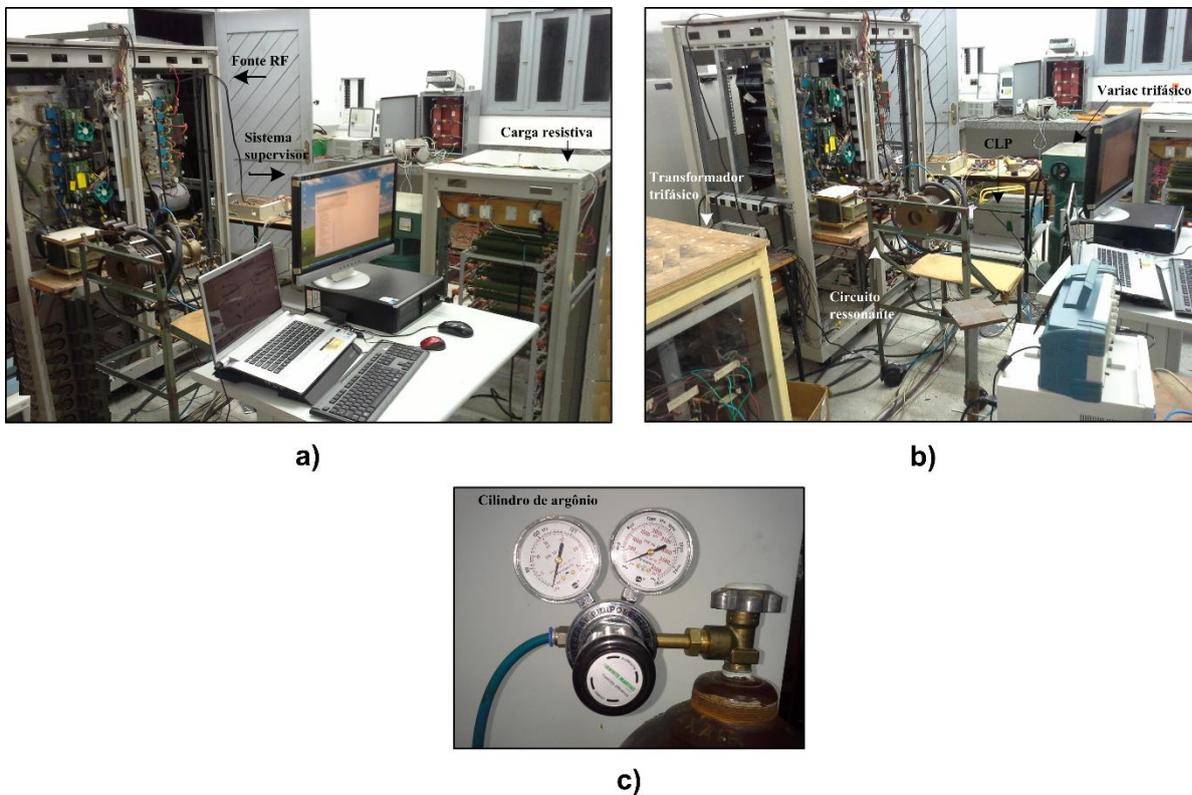


Figura B.2: Sistema completo utilizado para o processo de geração de plasma

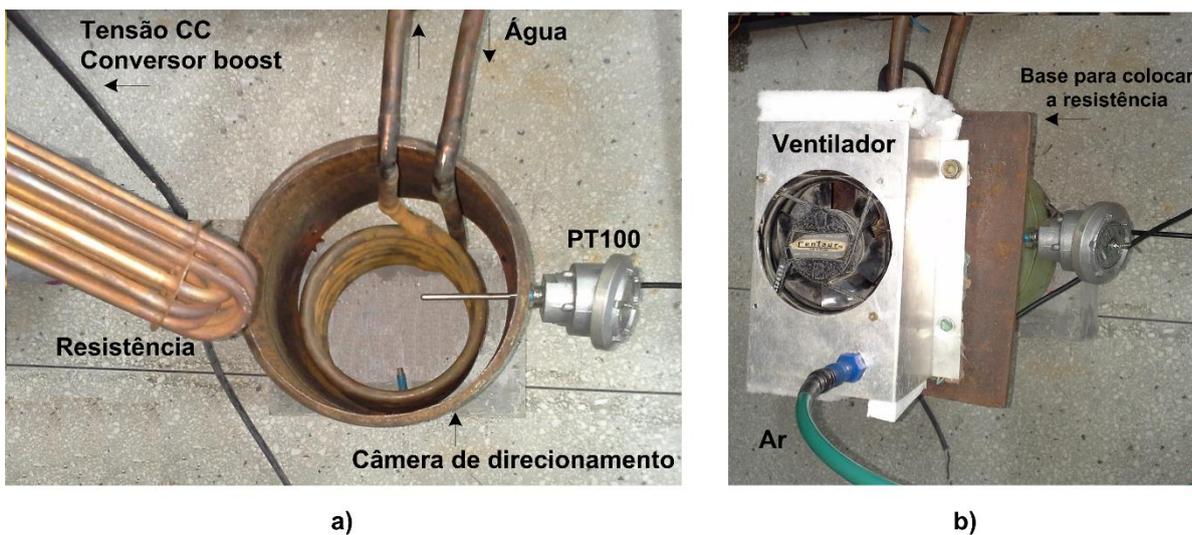


Figura B.3: Sistema emulador do processo de geração de plasma

Apêndice C

Aquisição de dados no controle de geração de plasma

Labels above the table:

- Temperatura (points to column T)
- Setpoint (points to column SP)
- Erro (points to column E)
- Tensão CC (points to column Ten)
- Potência (points to column Pot)
- Sistema de refrigeração de ar (points to column Sar)
- Sistema de refrigeração de água (points to column Sag)

T	SP	E	Ten	Pot	Sar	Sag
43	36	7	202	1033	14	0
43	36	7	201	1033	14	0
43	36	7	181	1033	19	0
43	36	7	202	1033	19	0
43	36	7	194	1033	19	0
43	36	7	203	1033	14	0
43	36	7	184	1033	15	0
43	36	7	179	1033	20	0
43	36	7	183	1033	18	0
43	36	7	197	1033	14	0
43	36	7	181	1033	20	0
43	36	7	183	1033	19	0
43	37	7	202	1033	19	0
43	36	7	179	1033	14	0
43	37	7	200	1033	19	0
43	37	7	204	1033	14	0
43	37	7	191	1033	16	0
43	36	7	183	1033	19	0
43	36	7	184	1033	20	0
43	37	7	203	1033	19	0
43	37	7	203	1033	15	0
43	36	7	202	1038	14	0
43	37	7	182	1038	20	0
43	37	7	204	1038	20	0
43	37	7	204	1038	20	0
43	37	7	183	1038	19	0
43	37	7	197	1038	20	0
43	37	7	187	1038	19	0
43	38	7	197	1038	20	0
43	36	7	183	1038	15	0
43	38	7	202	1038	14	0
43	37	7	193	1038	14	0
43	37	7	204	1038	20	0
43	37	7	185	1038	19	0
43	38	7	204	1038	19	0
43	38	7	184	1038	18	0
43	37	7	181	1038	14	0
43	38	7	187	1038	20	0
43	37	7	204	1038	19	0
43	37	7	202	1038	15	0
43	37	7	203	1038	17	0
43	38	5	203	1043	14	0
43	37	5	191	1043	19	0
43	38	5	202	1043	14	0
43	37	5	192	1043	19	0
43	37	5	183	1043	18	0
43	38	5	199	1043	14	0
43	37	5	204	1043	19	0
43	37	5	184	1043	14	0

Figura C.1: Aquisição de dados do controle, mostrados em um arquivo .txt

Apêndice D

Sensor PT-100

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	100,00	100,39	100,78	101,17	101,56	101,95	102,34	102,73	103,12	103,51	103,90
10	103,90	104,29	104,68	105,07	105,46	105,85	106,24	106,63	107,02	107,40	107,79
20	107,79	108,18	108,57	108,96	109,35	109,73	110,12	110,51	110,90	111,29	111,67
30	111,67	112,06	112,45	112,83	113,22	113,61	114,00	114,38	114,77	115,15	115,54
40	115,54	115,93	116,31	116,70	117,08	117,47	117,86	118,24	118,63	119,01	119,40
50	119,40	119,78	120,17	120,55	120,94	121,32	121,71	122,09	122,47	122,86	123,24
60	123,24	123,63	124,01	124,39	124,78	125,16	125,54	125,93	126,31	126,69	127,08
70	127,08	127,46	127,84	128,22	128,61	128,99	129,37	129,75	130,13	130,52	130,90
80	130,90	131,28	131,66	132,04	132,42	132,80	133,18	133,57	133,95	134,33	134,71
90	134,71	135,09	135,47	135,85	136,23	136,61	136,99	137,37	137,75	138,13	138,51
100	138,51	138,88	139,26	139,64	140,02	140,40	140,78	141,16	141,54	141,91	142,29
110	142,29	142,67	143,05	143,43	143,80	144,18	144,56	144,94	145,31	145,69	146,07
120	146,07	146,44	146,82	147,20	147,57	147,95	148,33	148,70	149,08	149,46	149,83
130	149,83	150,21	150,58	150,96	151,33	151,71	152,08	152,46	152,83	153,21	153,58
140	153,58	153,96	154,33	154,71	155,08	155,46	155,83	156,20	156,58	156,95	157,33
150	157,33	157,70	158,07	158,45	158,82	159,19	159,56	159,94	160,31	160,68	161,05
160	161,05	161,43	161,80	162,17	162,54	162,91	163,29	163,66	164,03	164,40	164,77
170	164,77	165,14	165,51	165,89	166,26	166,63	167,00	167,37	167,74	168,11	168,48
180	168,48	168,85	169,22	169,59	169,96	170,33	170,70	171,07	171,43	171,80	172,17
190	172,17	172,54	172,91	173,28	173,65	174,02	174,38	174,75	175,12	175,49	175,86
200	175,86	176,22	176,59	176,96	177,33	177,69	178,06	178,43	178,79	179,16	179,53
210	179,53	179,89	180,26	180,63	180,99	181,36	181,72	182,09	182,46	182,82	183,19
220	183,19	183,55	183,92	184,28	184,65	185,01	185,38	185,74	186,11	186,47	186,84
230	186,84	187,20	187,56	187,93	188,29	188,66	189,02	189,38	189,75	190,11	190,47
240	190,47	190,84	191,20	191,56	191,92	192,29	192,65	193,01	193,37	193,74	194,10
250	194,10	194,46	194,82	195,18	195,55	195,91	196,27	196,63	196,99	197,35	197,71
260	197,71	198,07	198,43	198,79	199,15	199,51	199,87	200,23	200,59	200,95	201,31
270	201,31	201,67	202,03	202,39	202,75	203,11	203,47	203,83	204,19	204,55	204,90
280	204,90	205,26	205,62	205,98	206,34	206,70	207,05	207,41	207,77	208,13	208,48

Figura D.1: Tabela fornecida pelo fabricante que relaciona a resistência da PT100 com a temperatura