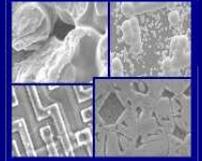




PUCRS

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS

Faculdade de Engenharia
Faculdade de Física
Faculdade de Química



PGETEMA

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM FORNO PARA PROCESSAMENTO DE CÉLULAS SOLARES

SÉRGIO BOSCATO GARCIA
ENGENHEIRO MECÂNICO

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA
E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

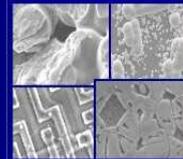
Porto Alegre
Julho, 2009



PUCRS

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia
Faculdade de Física
Faculdade de Química



PGETEMA

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM FORNO PARA PROCESSAMENTO DE CÉLULAS SOLARES

SÉRGIO BOSCATO GARCIA

Engenheiro Mecânico

ORIENTADOR: Prof. Dr. ADRIANO MOEHLECKE

COORIENTADORA: Profa. Dra. IZETE ZANESCO

Dissertação realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

Trabalho vinculado ao Projeto PUCRS/ FINEP 3374-06

**Porto Alegre
Julho, 2009**

O que é a razão senão a compreensão do logicamente correto?

Este é o ponto: compreensão.

Compreensão é algo particular, é individual.

Entretanto, um consenso é um acordo de que um ponto de vista deve prevalecer sobre os demais.

Ou simplesmente coexistir, mas de forma majoritária.

Nada disso impede que cada ser tenha a sua razão.

Surge então a discussão.

E com ela as regras, a civilização e também o racional.

Mas não excedendo o contexto metamórfico que nos cerca, a razão muda com o tempo. E não depende somente deste, mas também da posição e porque não, do acaso.

Sérgio Boscato Garcia

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus avós Darcy Garcia e Maria Lago Garcia, pra sempre... meus exemplos e minhas lições de vida.

AGRADECIMENTOS

Neste espaço quero agradecer a todos que passaram pelo meu caminho e de certa forma contribuíram e são também responsáveis pela conclusão deste trabalho. Não poderia deixar de iniciar agradecendo ao meu pai, Eng. Darci Garcia, que sempre me incentivou a crescer, tanto como pessoa como profissional. Agradeço à minha mãe, Rosane Boscato, creio que o "adjetivo" mãe dispense maiores comentários. Também à jornalista Leila Boscato Garcia, minha irmã, que sempre esteve presente. E à Glória... sua presença não tem preço. Enfim, sou o que sou pela família de onde vim e cheguei aonde cheguei pelo que aprendi com os exemplos que tive, obrigado a todos vocês.

Na minha "segunda casa", a PUCRS, obviamente quero agradecer ao Prof. Jorge Alé que despertou em mim o interesse pelas fontes renováveis de energia e me incentivou a iniciar este mestrado. Aos maiores responsáveis pela realização deste projeto, meus orientadores Prof. Adriano Moehleck e Profa. Izete Zanesco, que me acolheram no NT-Solar onde tive toda a estrutura para desenvolver este mestrado e com quem muito aprendi no decorrer deste período de curso e também de convívio profissional. Ao CE-Eólica e ao meu amigo Gabriel Simioni, técnico deste centro, que dentre outras colaborações devo citar a aquisição de imagens termográficas do forno. Também a todos os novos amigos que fiz chegando ao mundo fotovoltaico da PUCRS, especialmente, e em ordem quase cronológica em participação no decorrer deste projeto, aos amigos Dario Ebehardt, Eduardo Zen², Moussa Ly, Sílvio Luís, Esequiel Schaedler e Juliane Marcolino. Não poderia deixar de citar a importante contribuição das lições do Tiago Cassol, das dicas do Prof. Airton Cabral, das teorias da Gabriela Wehr e da amizade do Filipe Sehn.

Agradeço a FINEP e a PUCRS pela oportunidade do desenvolvimento deste projeto de pesquisa. A toda a colaboração recebida da Prefeitura Universitária da PUCRS, principalmente dos setores de Serralheria, Pintura, Marcenaria e Elétrica/Hidráulica. Salientando a importante participação do funcionário Cláudio na montagem elétrica do forno. Também agradeço ao apoio técnico do funcionário

Cristhiano Pinheiro, atuante na oficina do Museu de Ciência Tecnologia da PUCRS e do Eng. Antonio Cesar Gobbi Manfrin, atuante no LABELO.

À VOGES, empresa doadora do motor elétrico utilizado para o sistema de carregamento do forno.

Sou grato também à Aline Gross, principalmente pelo auxílio nas relações internacionais realizadas durante os processos de importação deste projeto, assim como, ao Dan Peters (AGC - EUA) e a Joanne Caron (Saint-Gobain - EUA) por todo auxílio técnico prestado na pesquisa inicial realizada sobre os componentes de quartzo e SiC para o forno.

E por último e nem por isso menos importante, agradeço a um raio de sol que brilhou em minha vida não me deixando perder o "Foco no Objetivo"... obrigado Daira.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	4
AGRADECIMENTOS	5
SUMÁRIO	7
LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS	20
LISTA DE QUADROS.....	21
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS	22
RESUMO	25
ABSTRACT	26
1. INTRODUÇÃO.....	27
2. OBJETIVOS	31
3. PROCESSAMENTO DE CÉLULAS SOLARES.....	33
3.1. Características das Células Solares.....	33
3.2. Estrutura da Célula Solar.....	35
3.3. Fabricação de Células Solares.....	38
3.3.1. Obtenção das Lâminas de Silício	38
3.3.2. Ambiente para Fabricação de Células Solares.....	39
3.3.3. Processos de Limpeza.....	41
3.3.4. Texturação	41
3.3.5. Dopagem do Substrato	42
3.3.6. Deposição de Filmes Antirreflexo	42
3.3.7. Metalização.....	43
3.3.8. Corte	43
3.3.9. Caracterização das Células Solares.....	44
3.4. Difusão	44
3.4.1. Fundamentação Teórica	44
3.4.2. Processos de Pré-deposição de Dopantes.....	54
3.4.3. Fluxo de Gases em Processos de Difusão	55

4. FORNOS PARA DIFUSÃO DE FÓSFORO EM SILÍCIO	61
4.1. Fornos Horizontais com Câmara de Processamento Tubular	61
4.2. Fornos Verticais	63
4.3. Fornos de Processamento Térmico Rápido	65
4.4. Fornos de Esteira	67
4.5. Aspectos Relevantes no Funcionamento de Fornos Convencionais.....	71
4.5.1. Componentes e Funcionamento da Câmara de Processamento.....	71
4.5.2. Sistema de Fluxo de Gases	77
4.5.3. Dopagem com POCl_3	81
5. PROJETO E MONTAGEM DE UM FORNO CONVENCIONAL PARA PROCESSAMENTO DE CÉLULAS SOLARES	84
5.1. Sistema de Aquecimento	84
5.2. Componentes de Quartzo e SiC.....	89
5.2.1. Materiais Utilizados.....	89
5.2.2. Projeto Desenvolvido	92
5.3. Estrutura.....	101
5.4. Armário de Gases.....	108
5.4.1. Esquema e Lógica de Funcionamento.....	109
5.4.2. Dimensionamento dos Controladores de Vazão.....	112
5.4.3. Aspectos na Seleção dos Controladores de Vazão.....	116
5.4.4. Análise da Calibração dos Controladores de Vazão	119
5.4.5. Projeto Físico e Montagem do Armário de Gases	122
5.5. Sistema de Carregamento	124
5.6. Sistema de Fluxo Laminar	129
5.7. Sistema de Exaustão.....	132
5.8. Isolamento Térmico.....	135
5.9. Sistema de Controle.....	138
6. CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DO FORNO	141
6.1. Estrutura para Caracterização Térmica.....	141
6.2. Instrumentação Aplicada	145
6.3. Processos de Medição.....	148
6.4. Análise dos Resultados	150

6.4.1. Rampas de Aquecimento	150
6.4.2. Rampas de Resfriamento.....	154
6.4.3. Perfil Térmico do Forno	156
7. CONCLUSÕES.....	163
8. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	166
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	167
ANEXOS.....	174
A.1 Análise Termográfica	174
A.2 Parâmetros de Projeto.....	178

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Marcos históricos na evolução da energia solar fotovoltaica.	33
Figura 3.2. Princípio de funcionamento de uma célula solar.	34
Figura 3.3. Estrutura básica de uma célula solar.....	36
Figura 3.4. Exemplos de estruturas de células solares. (a) Estrutura com BSF, (b) estrutura PERL, (c) estrutura BSC e (d) estrutura PCSC.....	37
Figura 3.5. Imagem do interior do Laboratório de Difusão do NT-Solar/PUCRS.....	40
Figura 3.6. (a) Representação da absorção de um raio solar em uma superfície texturada e (b) imagem obtida por MEV de micropirâmides em uma superfície de silício [14].....	42
Figura 3.7. Dopagem pelo processo de difusão, onde a concentração de átomos dopantes (C) diminui gradativamente de acordo com a profundidade no substrato (x).	45
Figura 3.8. (a) Difusão por meio do mecanismo intersticial e (b) difusão por vacâncias.	46
Figura 3.9. Esquema de um forno convencional para processos de difusão de dopantes em lâminas de Si.	47
Figura 3.10. Representação da posição dos principais dopantes do silício na Tabela Periódica.	47
Figura 3.11. Coeficiente de difusão em função da temperatura para os dopantes (a) boro e (b) fósforo [21].....	51
Figura 3.12. Representação ilustrativa de um escoamento com comportamento laminar (a) e com comportamento turbulento (b).	57
Figura 3.13. Representação das lâminas de silício dispostas em um suporte de quartzo.	58
Figura 3.14. (a) Linhas de fluxo em um escoamento laminar e (b) comportamento do fluido em um escoamento turbulento.	58
Figura 3.15. Representação esquemática de um tubo de processamento com aparato de quartzo para o aumento da turbulência em seu interior [23].	59

Figura 4.1. Forno horizontal com quatro câmaras de processamento.	62
Figura 4.2. Processo de inserção de lâminas de silício em um forno convencional.	62
Figura 4.3. Modelo de bancada voltado para aplicações laboratoriais [25].	63
Figura 4.4. Principais módulos componentes de um forno horizontal.	63
Figura 4.5. (a) Conjunto de resistores, tubo e acessórios de quartzo dispostos verticalmente e (b) imagem do carregamento de lâminas em um forno vertical [26].	64
Figura 4.6. Representação de um forno RTP e seus principais componentes.	66
Figura 4.7. Forno RTP instalado no laboratório de difusão do NT-Solar/PUCRS. ...	66
Figura 4.8. Representação esquemática de um forno de esteira.	68
Figura 4.9. Forno de esteira instalado no Laboratório de Metais e Filmes do NT-Solar/PUCRS.	68
Figura 4.10. Eficiência da célula solar em função do material e tipo de emissor [32]. ...	70
Figura 4.11. Conjunto de resistores elétricos envolto por camada de isolamento térmico com a indicação das zonas de aquecimento.	72
Figura 4.12. Indicação de temperaturas aplicadas a um determinado tubo de processamento para um método de difusão em particular [34].	73
Figura 4.13. Relação da resistência de folha em função da temperatura para a zona frontal do tubo [34].	74
Figura 4.14. Relação da resistência de folha em função da temperatura para a zona posterior do tubo [34].	74
Figura 4.15. Tubo de SiC onde (a) representa a extremidade por onde são inseridas as lâminas e (b) a extremidade oposta por onde são inseridos os gases.	74
Figura 4.16. (a) Espátula de SiC e (b) suporte de SiC [35].	75
Figura 4.17. Ilustração de um mecanismo de carregamento de lâminas em um forno horizontal.	76

Figura 4.18. Ilustração de um mecanismo de carregamento de lâminas em um forno horizontal utilizando hastes de alumina.	76
Figura 4.19. Detalhe do sistema de fixação das hastes do mecanismo apresentado na Figura 4.18.	77
Figura 4.20. Indicação do sistema de fluxo laminar em um módulo de carregamento... ..	77
Figura 4.21. Esquema simplificado da entrada de gases e dopante no tubo de processamento.	78
Figura 4.22. Vista em corte de um MFC [38].	79
Figura 4.23. (a) Representação sistemática do funcionamento do sensor térmico de vazão mássica e (b) imagem do sensor instalado em um MFC [38].	80
Figura 4.24. Representação do sensor utilizado em MFCs Coriolis.	80
Figura 4.25. Diagrama para definição de parâmetros para processos de difusão com POCl_3	82
Figura 5.1. Diagrama da estrutura de metas físicas das etapas de projeto e montagem do forno.	84
Figura 5.2. Desenho inicial do conjunto de resistores elétricos e o desenho do tubo de quartzo, que caracteriza a câmara de processamento.	85
Figura 5.3. Desenho do conjunto de resistores elétricos do sistema de aquecimento.	85
Figura 5.4. (a) Posicionamento dos espaçadores cerâmicos e (b) montagem do resistor de uma das zonas de aquecimento.	86
Figura 5.5. Conjunto de resistores recoberto por camadas de pasta cerâmica.	86
Figura 5.6. Detalhe de uma das extremidades da carcaça do conjunto de resistores salientando o flange cerâmico.	87
Figura 5.7. Zonas de aquecimento formadas pelo conjunto de resistores elétricos.	87
Figura 5.8. (a) Zona 2 em funcionamento e (b) zonas 1 e 3 em funcionamento.	88
Figura 5.9. (a) Conjunto completo do sistema de aquecimento e (b) interior da caixa de comando.	88

Figura 5.10. (a) Rede cristalina do quartzo α e (b) do quartzo β [42].	89
Figura 5.11. Estrutura cristalina do diamante [44].	90
Figura 5.12. Comparação entre o SiC e o quartzo quanto a estabilidade sob ataque químico com HF [46].	92
Figura 5.13. Conjunto de componentes de quartzo desenhado para este projeto....	93
Figura 5.14. Vista lateral do conjunto de componentes de quartzo, onde "a" indica os dois modelos de suportes desenhados e "b" indica os componentes intercambiáveis de acesso posterior do tubo.	95
Figura 5.15. (a) Espátula com punho quadrado de aresta 31,8 mm, as dimensões da pá são de 95,5 mm de largura e 19 mm de altura; (b) outro modelo de espátula também com o punho quadrado, mas com 50,8 mm de lado, tendo a pá 106,9 mm de largura e 25,4 mm de altura, a ilustração; (c) modelo com punho redondo de diâmetro igual a 49,5 mm, a pá possui largura de 105 mm e altura de 26,3 mm.....	95
Figura 5.16. (a) Sistema com uma espátula e (b) sistema com hastes de alumina de alta pureza.....	96
Figura 5.17. Ilustração da espátula desenhada para este projeto.	97
Figura 5.18. (a) Suporte para o processamento de lâminas de silício quadradas com aresta de até 150 mm e (b) suporte para o processamento de lâminas de silício quadradas com até 125 mm de aresta.....	97
Figura 5.19. Ferramenta desenhada para o manuseio dos suportes.....	98
Figura 5.20. Relação de dimensões radiais projetada para o carregamento do forno. Dimensões expressas em milímetros.	98
Figura 5.21. Ilustração da câmara de processamento e demais componentes de quartzo.	99
Figura 5.22. Projeção do fluxo de gases criado por este modelo de bico injetor....	100
Figura 5.23. (a) Ilustração do borbulhador desenhado para este projeto e (b) borbulhador com as válvulas conectadas.	100
Figura 5.24. Ilustração dos componentes de quartzo e SiC instalados no sistema de aquecimento.....	101

Figura 5.25. Vista lateral da estrutura do forno destacando o posicionamento de cada módulo.....	102
Figura 5.26. (a) Vista frontal da estrutura e (b) vista posterior da mesma, onde se localiza o armário de gases.....	103
Figura 5.27. Vista em perspectiva da estrutura do forno.	103
Figura 5.28. Estrutura fabricada com o sistema de aquecimento instalado.....	103
Figura 5.29. (a) Parte inferior da estrutura em frente ao Laboratório de Difusão, no lado externo da sala limpa e (b) montagem da estrutura em sua posição de operação.	104
Figura 5.30. (a) Vista das partes frontal e lateral do forno e (b) vista das partes posterior e lateral do forno com os componentes de fechamento projetados.....	105
Figura 5.31. Etapas da montagem do conjunto de tampas e portas de fechamento do forno.	105
Figura 5.32. Estrutura do forno montada com o conjunto de tampas e portas de alumínio e acrílico instaladas.....	106
Figura 5.33. Módulo de fluxo laminar e componentes de fechamento.....	106
Figura 5.34. Estrutura do forno montada com o módulo retrátil de fluxo laminar instalado.....	107
Figura 5.35. (a) Fechamento frontal e (b) fechamento posterior do módulo do sistema de aquecimento, fabricados em aço inoxidável 304.	107
Figura 5.36. Painel de gases.	109
Figura 5.37. Extensão da tubulação de gases para interligar a saída do painel à entrada do armário de gases do forno. À frente, parte inferior da estrutura durante a montagem.	110
Figura 5.38. Desenho esquemático da linha de gases.	111
Figura 5.39. Comparação entre a incerteza apresentada pela linha de última geração de MFCs com comando digital e a linha de MFCs totalmente analógicos de um mesmo fabricante [47].....	113

Figura 5.40. Configuração do sistema de controle de gases baseado no padrão de comunicação serial RS-485.	118
Figura 5.41. Ilustração do tipo de conexão por compressão com anilhas [50].	118
Figura 5.42. (a) Ilustração do calibrador primário utilizado e (b) esquema típico para calibração de MFCs [51], [52].	120
Figura 5.43. Ensaio de verificação das condições de medição e controle de vazão dos controladores de vazão mássica com o uso de um calibrador primário.	120
Figura 5.44. Desenho da configuração projetada para montagem do armário de gases.	122
Figura 5.45. Vista posterior da configuração do armário de gases.	123
Figura 5.46. (a) Montagem da tubulação e componentes metálicos da linha de gases, (b) e (c) conclusão da montagem da linha de gases.	123
Figura 5.47. Projeto do braço do sistema de movimentação apoiado sobre blocos e guias lineares.	124
Figura 5.48. Vista inferior do sistema de movimentação onde se observa a distribuição dos blocos e o posicionamento da castanha do fuso de esferas.	125
Figura 5.49. Projeto do sistema de movimentação do fuso de esferas acionado por um motor elétrico.	125
Figura 5.50. Vista explodida do mecanismo para fixação da espátula e tampas do forno.	126
Figura 5.51. (a) Vista isométrica e (b) vista lateral do mecanismo de fixação da espátula.	126
Figura 5.52. Ilustração do sistema de carregamento com acessórios de quartzo e SiC.	127
Figura 5.53. Ilustração de situações de movimentação do sistema de carregamento.	128
Figura 5.54. Sistema de carregamento instalado na estrutura do forno, destacando em (b) o sistema de roletes de apoio.	128

Figura 5.55. Controle do sistema de movimentação.....	129
Figura 5.56. (a) Sensores indutivos do final de curso frontal e (b) sensores indutivos do final de curso posterior do sistema de movimentação.	129
Figura 5.57. Equipamento de fluxo laminar [53].....	130
Figura 5.58. Esquema de funcionamento do equipamento de fluxo laminar [53]....	130
Figura 5.59. (a) Equipamento de fluxo laminar incorporado à estrutura do forno e (b) detalhe da face inferior do mesmo.	131
Figura 5.60. Filtro absoluto modelo F781.	131
Figura 5.61. (a) Fechamento da unidade de fluxo laminar e (b) detalhe da abertura na parte superior para a admissão de ar.	132
Figura 5.62. Ilustração da trajetória dos gases da inserção na câmara de processamento térmico à saída da câmara de exaustão.	133
Figura 5.63. (a) Vista frontal e (b) vista posterior da câmara de exaustão.	133
Figura 5.64. (a) Câmara de exaustão instalada no forno e (b) detalhe do acesso regulável à torre de extração.....	134
Figura 5.65. Tubulação do sistema de exaustão.	134
Figura 5.66. Pontos de extração do armário de gases.....	135
Figura 5.67. Ponto de conexão do sistema de exaustão do forno com a rede externa.	135
Figura 5.68. Exaustor para extração do ar quente do interior do módulo de processamento térmico.	135
Figura 5.69. (a) Colar de ALF e (b) disco bipartido de ALF.	136
Figura 5.70. Colar de ALF posicionado junto ao tubo de quartzo no lado de abertura do forno.	137
Figura 5.71. Disco de ALF posicionado na extremidade posterior do tubo de quartzo..	137
Figura 5.72. Cobertura das paredes internas da estação de processamento térmico com mantas cerâmicas.....	137

Figura 5.73. Indicação dos controladores para o controle e leitura de dados de temperatura do forno.....	138
Figura 5.74. (a) Painel de comando integrado do forno e (b) indicação das posições de acionamento.....	139
Figura 5.75. Aplicativo para controle e leitura de vazão nos MFCs.....	139
Figura 6.1. Componentes da estrutura para caracterização térmica do sistema de aquecimento do forno.....	142
Figura 6.2. (a) Tampa do tubo de quartzo com acesso às bainhas para termopares e (b) disco de quartzo para apoio das bainhas com base compatível ao desenho da espátula.....	143
Figura 6.3. Vista lateral do projeto da estrutura para caracterização.	143
Figura 6.4. Ilustração do projeto completo da estrutura de quartzo para caracterização térmica.	144
Figura 6.5. Seção reta da estrutura de caracterização térmica com destaque aos pontos de medição.	144
Figura 6.6. Estrutura de quartzo para caracterização térmica do sistema de aquecimento do forno instalada no sistema de carregamento.....	145
Figura 6.7. (a) Extremidade aberta das bainhas para a inserção dos termopares e (b) extremidade fechada para o posicionamento no interior do tubo de quartzo.	145
Figura 6.8. Diagrama da instrumentação aplicada à caracterização térmica do sistema de aquecimento do forno.	146
Figura 6.9. Instrumentação para caracterização do forno de difusão.	147
Figura 6.10. (a) Extremidades de medição dos termopares e (b) extremidades de conexão dos termopares com os fios de compensação.....	147
Figura 6.11. Representação do processo de medição aplicado quanto ao posicionamento do conjunto de termopares no interior da câmara de processamento.....	148
Figura 6.12. Abertura do forno para termopares na posição 1200 mm.....	149

- Figura 6.13. Representação dos termopares posicionados no início do conjunto de resistores elétricos, correspondente a posição 0 mm. 149
- Figura 6.14. Curvas de aquecimento de 300 °C para 725 °C. Temperaturas ajustadas nos controladores resultando em uma temperatura máxima e estável de 725 °C na zona de admissão de gases. Medição realizada a 1200 mm do início do conjunto de resistores elétricos..... 151
- Figura 6.15. Curvas de aquecimento de 300 °C para 800 °C; temperaturas ajustadas nos controladores. Medição realizada a 1200 mm do início do conjunto de resistores elétricos. 152
- Figura 6.16. Curvas de resfriamento de 725 °C para 300 °C; temperaturas ajustadas nos controladores. Medição realizada a 1200 mm do início do conjunto de resistores elétricos. 155
- Figura 6.17. Curvas de resfriamento de 850 °C para 300 °C; temperaturas ajustadas nos controladores. Medição realizada a 1200 mm do início do conjunto de resistores elétricos. 156
- Figura 6.18. Perfil térmico do forno para uma temperatura de 650 °C, ajustada nos controladores, resultando em uma temperatura máxima com características de ZP de 725 °C..... 157
- Figura 6.19. Representação do comportamento da saída do ar quente formado no interior do tubo de quartzo devido ao aquecimento do forno..... 157
- Figura 6.20. Perfil térmico do forno para uma temperatura de 745 °C, ajustada nos controladores, resultando em uma temperatura máxima com características de ZP de 800 °C..... 159
- Figura 6.21. Perfil térmico do forno para uma temperatura de 800 °C, ajustada nos controladores, resultando em uma temperatura máxima com características de ZP de 875 °C..... 160
- Figura 6.22. Perfil térmico do forno para uma temperatura de 850 °C, ajustada nos controladores, resultando em uma temperatura máxima com características de ZP de 965 °C..... 161
- Figura A.1. Forno aberto destacando os termopares e (b) imagem termográfica do sistema. 174
- Figura A.2. Forno parcialmente aberto e (b) imagem termográfica da mesma situação..... 175

Figura A.3. Imagens termográficas do forno totalmente aberto (a) vista lateral e (b) vista frontal.....	175
Figura A.4. (a) e (c) mostram o sistema de carregamento e termopares e (b) e (d) as respectivas imagens termográficas.....	176
Figura A.5. (a) Interior da estrutura do forno e (b) imagem termográfica.....	177
Figura A.6. Detalhe do armário de gases e (b) imagem termográfica (visão posterior do módulo de processamento térmico).	177
Figura A.7. Relação dos parâmetros de projeto do forno.....	178
Figura A.8. Resistor de fio de seção circular em formato espiral. D é o diâmetro interno do helicóide e d é o diâmetro do fio usado no resistor.....	179
Figura A.9. Elementos atuantes no sistema de transferência de calor.	179
Figura A.10. Indicação das cargas atuantes sobre os componentes do sistema de carregamento do forno.	180
Figura A.11. Indicação da distribuição física dos blocos sobre as guias lineares. .	181
Figura A.12. Elementos de projeto do sistema de carregamento do forno.	181

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1	Relação de características do quartzo e do SiC alfa com recobrimento de SiC beta pelo processo de CVD [46].....	92
Tabela 5.2	Relação de MFCs definidos para o projeto. SLPM é uma unidade de vazão em l/min em condições padrão.	116
Tabela 5.3	Relação dos valores medidos com o uso de um calibrador primário em função do percentual de vazão definido para cada MFC. Valores apresentados em <i>standard liters per minute</i> (SLPM) ou litros por minuto. (Temperatura ambiente: 19 °C; Pressão: 101 kPa)	121
Tabela 6.1	Relação dos valores ajustados e lidos nos controladores para o levantamento do gráfico apresentado na Figura 6.14.....	153
Tabela 6.2	Relação dos valores ajustados e lidos nos controladores para o levantamento do gráfico apresentado na Figura 6.15.....	154
Tabela 6.3	Relação dos valores ajustados e lidos nos controladores para o levantamento do gráfico apresentado na Figura 6.20 com os termopares posicionados em 1200 mm.....	159
Tabela 6.4	Relação dos valores ajustados e lidos nos controladores para o levantamento do gráfico apresentado na Figura 6.21 com os termopares posicionados em 1200 mm.....	160
Tabela 6.5	Variação dos valores lidos nos controladores, apresentados no Quadro 6.5, para o sistema de medição posicionado em 0 mm.....	161
Tabela 6.6	Valores observados nos controladores referentes ao gráfico apresentado na Figura 6.22. Posição dos termopares em 1200 mm.....	162

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1. Parâmetros e unidades de medida da Equação 3.1.	35
Quadro 3.2. Parâmetros e unidades de medida da Equação 3.2.	48
Quadro 3.3. Parâmetros e unidades de medida da Equação 3.4.	49
Quadro 3.4. Parâmetros e unidades de medida da Equação 3.5.	50
Quadro 3.5. Parâmetros e unidades de medida da Equação 3.9.	53
Quadro 3.6. Parâmetros e unidades de medida da Equação 3.14.	57
Quadro 4.1. Parâmetros e unidades de medida da Equação 4.1.	83
Quadro 5.1. Características do SiC alfa e beta [45].....	91
Quadro 5.2. Relação dos itens apresentados na Figura 5.13.....	94
Quadro 5.3. Relação de símbolos utilizados na Figura 5.38.	112
Quadro 5.4. Parâmetros e unidades de medida da Equação 5.1 [10].	114
Quadro 6.1. Relação descritiva da instrumentação aplicada.....	146

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

A	Área da célula	m^2
A	Área da célula onde ocorre a difusão	m^2
A	Constante para o crescimento do óxido térmico	-
B	Constante para o crescimento do óxido térmico	-
C	Concentração de átomos dopantes (impurezas)	Átomos/ m^3
C_S	Concentração de impurezas na superfície	Átomos/ m^3
D	Diâmetro interno do tubo	m
D	Difusividade ou coeficiente de difusão	m^2/s
D_0	Constante de difusão	m^2/s
E_a	Energia de ativação para difusão	eV
erfc	Função erro	-
F	Fluxo de difusão	Átomos/ m^2s
FF	Fator de Forma	-
I	Irradiância	W/m^2
I_{MP}	Corrente de máxima potência	A
I_{SC}	Corrente de curto-circuito	A
M	Número de átomos ou massa	Átomos ou kg
$P_{MÁX}$	Potência máxima	W
P_{V-POCl_3}	Pressão de vapor do $POCl_3$	Pa
Q	Número total de átomos de impurezas por unidade de área	Átomos/ m^2
Q_{N_2}	Vazão de N_2	m^3/s
Q_{N_2P}	Vazão do gás portador	m^3/s
Q_T	Quantidade total de gás	m^3
R	Constante universal dos gases	eV/átomoK
Re	Número de Reynolds	-
S	Quantidade total de impurezas na superfície	Átomos/ m^2
T	Temperatura absoluta	K
t	Tempo de oxidação	s
t	Tempo de difusão	s
T_B	Temperatura do dopante no borbulhador	K

T_C	Temperatura ajustada no controlador central	K
T_I	Temperatura no interior da câmara de processamento	K
T_V	Tempo de troca do volume do tubo	s
V	Velocidade média do fluido	m/s
V_{MP}	Tensão de máxima potência	V
V_{OC}	Tensão de circuito aberto	V
V_T	Volume do tubo	m ³
x	Profundidade no substrato	m
x_0	Espessura do óxido	m
η	Eficiência	%
τ	Constante para o crescimento do óxido térmico	-
ν	Viscosidade cinemática do fluido	m ² /s
ALF	Fibra constituída por 70 % de Al ₂ O ₃ e 30 % por SiO ₂	
BSC	<i>Buried contact cell</i> ou célula de contatos enterrados	
BSF	<i>Back surface field</i> ou campo retrodifusor	
CLP	Controlador lógico programável	
CTP	<i>Conventional thermal process</i> ou processo térmico convencional	
CVD	<i>Chemical vapour deposition</i> ou deposição química de vapor	
Cz	Método de Czochralski de crescimento de lingotes de Si	
EFG	<i>Edge defined film fed growth</i>	
F.E.	Fundo de escala	
Filme AR	Filme antirreflexo	
FZ	Método de fusão zonal flutuante (<i>float zone</i>)	
HEM	<i>Heat exchange method</i>	
IQE	<i>Internal quantum efficiency</i> ou eficiência quântica interna	
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>	
ISO	<i>International organization for standards</i>	
LPCVD	<i>Low pressure chemical vapour deposition</i> ou deposição química de vapor sob baixas pressões	
MEV	Microscópio eletrónico de varredura	
MFC	<i>Mass flow controller</i> ou controlador de vazão mássica	
NT-Solar	Núcleo Tecnológico de Energia Solar	
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo	

PCSC	<i>Point contacts solar cell</i> ou célula solar de contatos pontuais
PERL	<i>Passivated emitter and rear locally diffused</i> ou célula com emissor passivado e difusão posterior localizada
PFA	Perfluoroalcoxialcano
PID	Proporcional - Integral - Derivativo
PTFE	Politetrafluoretileno
PVC	Polivinil clorado
RTP	<i>Rapid thermal process</i> ou processo térmico rápido
<i>sccm</i>	<i>Standard cubic centimeters per minute</i> ou centímetros cúbicos por minuto
<i>SLPM</i>	<i>Standard liters per minute</i> ou litros por minuto
<i>USB</i>	Universal serial bus
ZP	Zona plana

RESUMO

BOSCATO GARCIA, Sérgio. **Projeto e Construção de um Forno para Processamento de Células Solares**. Porto Alegre. 2009. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

A produção de energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico requer o uso de dispositivos chamados de células solares. Dentre as etapas de fabricação de células solares a partir de lâminas de Si, a introdução de elementos dopantes pelo processo de difusão é a responsável pela formação da junção p-n, tornando as lâminas de Si passíveis de converter a radiação solar em energia elétrica. Para a realização deste processo são utilizados equipamentos denominados de fornos de difusão. O principal objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento e caracterização de um forno de difusão convencional para a fabricação de células solares com aresta de até 150 mm. Foi realizado o projeto e montagem dos componentes do forno, assim como a caracterização térmica do mesmo com a definição da zona plana de temperatura e análise da uniformidade térmica radial. O forno foi projetado e desenvolvido em módulos que correspondem ao sistema de aquecimento, ao conjunto de componentes de quartzo e SiC, à estrutura, ao armário de gases, ao sistema de carregamento, ao sistema de fluxo laminar, ao sistema de exaustão, ao isolamento térmico e ao sistema de controle. Para a caracterização térmica do forno, foram utilizados nove termopares do tipo K, permitindo a medição da temperatura no interior do tubo de processamento nos sentidos longitudinal e radial. O forno foi analisado para as temperaturas de 725 °C, 800 °C, 875 °C e 965 °C no interior do tubo. Em 875 °C verificou-se uma zona plana de aproximadamente 200 mm como uma variação de até 5 °C no sentido longitudinal e até 4 °C no sentido radial.

Palavras-Chaves: Fornos de Difusão. Fornos Horizontais. Células Solares.

ABSTRACT

BOSCATO GARCIA, Sérgio. **Project and Construction of a Furnace for Solar Cells Processing**. Porto Alegre. 2009. Master Thesis. Pos-Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

The production of electric energy by photovoltaic effect requires the use of devices called solar cells. The introduction of dopant elements by diffusion processes are used to form the p-n junction in silicon solar cells. In this way the Si wafers are able to convert the solar radiation into electric energy. In order to dope Si wafers diffusion furnaces are utilized. The main objective of this work was the development and characterization of a conventional diffusion furnace for manufacturing solar cells with dimensions up to 150 mm x 150 mm. The project and assembly of the components of the furnace was carried out, as well as the thermal characterization with the definition of the flat-zone temperature and analysis of the radial thermal uniformity. The furnace was projected and developed in modules that correspond to the heating system, the set of components of quartz and SiC, the structure, the gases cabinet, the load system, the laminar flow system, the exhaustion system, the thermal isolation and the control system. For the thermal characterization of the furnace, nine thermocouples type K had been used, allowing the measurement of the temperature inside of the processing tube in the longitudinal and radial directions. The furnace was analyzed for temperatures of 725 °C, 800 °C, 875 °C and 965 °C in the interior of the tube. At 875 °C a flat-zone of around 200 mm was verified with a variation up to 5 °C in the longitudinal direction and up to 4 °C in the radial direction.

Key-words: Diffusion Furnace. Horizontal Furnace. Solar Cells.

1. INTRODUÇÃO

Um tema bastante polêmico e de suma importância para qualquer sociedade ou nação é a questão da produção de energia. Este assunto, tão relevante quanto delicado, não só envolve o conforto de uma residência com o mínimo de utensílios eletro-eletrônicos, como também engloba toda uma questão política, de economia mundial e de preservação do meio ambiente. Isto se dá principalmente devido ao fato de que a energia elétrica é uma necessidade básica aos padrões de vida atuais.

Com a visão de formar uma matriz energética diversificada e sustentável, muitas nações em desenvolvimento seguem os países desenvolvidos no campo das fontes renováveis de energia. O aproveitamento dessas fontes, dentre as quais é válido citar a solar, a eólica e a biomassa, tende a ser facilitado por meio do desenvolvimento de pesquisas e indústrias nacionais, as quais permitem a redução dos custos dessa energia por meio do avanço e domínio tecnológico, associados à políticas de incentivo favoráveis. Das vantagens proporcionadas pelo uso das fontes renováveis de energia é relevante citar o conseqüente aumento da diversidade de fontes de fornecimento, a consolidação de fontes sustentáveis de energia em longo prazo, a redução de emissões à camada atmosférica, tanto local quanto global, a possibilidade de aplicação de sistemas autônomos, sistemas interligados à rede ou pequenas centrais em locais isolados e o surgimento de novos ramos empresariais e, conseqüentemente, de fontes de emprego [1].

Uma das formas limpas de produção de energia elétrica, a solar fotovoltaica, tem sido foco de estudos no Brasil e no mundo tanto em indústrias como em centros de pesquisa como o NT-Solar (Núcleo Tecnológico de Energia Solar), da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS.

Para tornar possível a produção de energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico é necessário o uso de dispositivos chamados células solares. Apesar de, sob um ponto de vista macroscópico, a produção deste tipo de energia ser muito simples, o processo de fabricação das células solares torna-se significativamente complexo à medida que se buscam maiores índices de qualidade e eficiência. É possível definir duas linhas atuais de processos para a fabricação de células solares, uma laboratorial voltada à pesquisa e à busca de altas eficiências e outra industrial voltada à produção e a uma melhor relação entre a potência produzida e o custo de produção. Em ambas as linhas se faz necessária a utilização de um ambiente restrito para a realização desses processos, comumente chamado de sala limpa. Nestes ambientes em geral há um controle adequado da quantidade de particulados no ar, temperatura, pressão, umidade entre outros fatores.

De acordo com Moehlecke e Zanescio [2], um processo de fabricação de células solares largamente aplicado nas indústrias consiste basicamente na seqüência das etapas descritas a seguir. Inicialmente se realiza a texturação (formação de micropirâmides na superfície) das lâminas de silício já dopadas com boro, ou seja, substratos do tipo p, reduzindo a refletância em cerca de 22 %. Processos de limpeza a base de H_2O_2 e HCl e H_2O_2 e NH_4OH são realizados a fim de remover as impurezas formadas durante a texturação, como o sódio e o potássio. Posteriormente, realiza-se a etapa de difusão de fósforo a partir de fonte líquida, de $POCl_3$, em fornos de alta temperatura com câmaras de processamento apropriadas, as quais são geralmente fabricadas em quartzo ou carbetto de silício. Estes materiais empregados na fabricação das câmaras evitam a contaminação das lâminas por impurezas indesejadas devido às possíveis reações entre os gases e as paredes do ambiente de processamento térmico. Neste processo convencional de difusão, as lâminas de silício são expostas a um ambiente com excesso de átomos do material dopante, de forma que este se deposita sobre todas as faces da lâmina dopando-a em função das altas temperaturas as quais são expostas. Como passo seguinte, ainda visando reduzir a refletância da superfície frontal da lâmina, deposita-se um filme antirreflexo (AR), normalmente de óxido de titânio ou nitreto de silício. Um passo importante no processo industrial de fabricação de células solares

é a metalização das lâminas por serigrafia. Este processo consiste na deposição de uma pasta metálica nas faces frontal e posterior das lâminas, seguida dos passos de secagem e queima em um forno adequado. A fim de evitar efeitos de curto-circuito entre as faces da lâmina, as bordas das lâminas são removidas por meio de ataque químico, plasma ou laser. Os processos laboratoriais geralmente são mais extensos e tendem a ser mais flexíveis quanto ao projeto das técnicas e etapas a serem aplicadas. Isto, justamente porque visam desenvolver novos processos, técnicas e materiais de processamento a fim de melhorar a eficiência das células solares produzidas. Um processo laboratorial típico do estado da arte para a fabricação de células solares de silício pode ser realizado seguindo-se os passos: ataque/texturação; difusão de fósforo; remoção do fosforosilicato formado na difusão; oxidação térmica; difusão de alumínio; fotolitografia; formação do contato frontal com Ti/Pd/Ag; formação do contato posterior com Al/Ti/Pd e Ag; eletrodeposição de Ag; isolamento; deposição de filme AR.

Aprofundando-se brevemente no princípio de funcionamento de uma célula solar, para que ocorra o efeito fotovoltaico e por consequência a produção de uma corrente elétrica e tensão, deve haver no interior da célula uma junção p-n, ou seja, uma interface entre uma região com excesso de lacunas e outra com excesso de elétrons, respectivamente. Uma vez que as lâminas já possuem uma dopagem definida, proveniente do processo de crescimento dos lingotes, a etapa do processo de fabricação de células solares que propicia a formação de uma junção p-n é a difusão. A difusão consiste em introduzir átomos de um elemento dopante na rede do substrato, obtendo-se uma concentração e profundidade pré-definida por meio de processos térmicos a alta temperatura. Para tais processos são utilizados equipamentos denominados de fornos de difusão.

Existem basicamente dois tipos de fornos utilizados para difusão: fornos convencionais com aquecimento por conjuntos de resistores elétricos, e os chamados RTPs (*rapid thermal process*), ou fornos de processamento térmico rápido. Dentro de cada um destes grupos ainda podem haver diversas subdivisões. De forma geral os RTPs podem ser caracterizados pela existência de uma câmara

de difusão com capacidade de processar uma única lâmina por vez, que permanece fixa durante o processo. Os fornos de esteira se caracterizam pela presença de uma esteira sobre a qual diversas lâminas são colocadas e passam a uma velocidade controlada pela câmara de processamento, a qual geralmente é aquecida por lâmpadas infravermelhas. Nos fornos convencionais a câmara de processamento é tubular, podendo estar disposta tanto na horizontal como na vertical, sendo assim também conhecidos como fornos tubulares. Conforme Goris et al. [3], tradicionalmente os fornos de esteira são usados para produções em grande escala de células solares de baixo custo e fornos tubulares aplicados a processos de produção de células solares de maior eficiência. De um modo geral, os fornos tubulares horizontais têm sido largamente utilizados tanto em processos laboratoriais quanto em processos industriais, uma vez que nos padrões atuais de produção o tempo despendido no processo, em relação aos RTPs, é suportado pela demanda existente e compensado pelos melhores resultados obtidos.

Outro processo térmico realizado nos mesmos fornos de difusão é a oxidação. O crescimento controlado de uma camada de óxido sobre as superfícies das lâminas permite a passivação das mesmas, ou seja, reduzem-se os defeitos superficiais que a rede cristalina apresenta.

Os processos térmicos são fundamentais na fabricação de células solares, de forma que a utilização de fornos adequados se faz indispensável. Características como uniformidade térmica na câmara de processos, tanto radial como longitudinal, conservação de um elevado grau de pureza no interior do tubo de processamento, controle adequado de rampas de aquecimento e resfriamento e controle do fluxo de gases no interior do tubo são básicas para que os processos térmicos produzam bons resultados. Atualmente não existem modelos de fornos voltados para a indústria solar fotovoltaica que sejam fabricados no Brasil, de forma que com o crescimento deste setor haverá um aumento na demanda para este produto devido à necessidade de instalação de plantas industriais e laboratoriais.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um forno de difusão convencional para a realização de processos na fabricação de células solares. Inerente a este desenvolvimento está a caracterização térmica do mesmo, com a definição da região denominada como zona plana (ZP).

Com a finalidade de enquadrar o forno dentro dos padrões atuais em termos de qualidade técnica e competitividade, busca-se um equipamento de estrutura compacta que atinja uma ZP de aproximadamente 500 mm de comprimento, estabelecendo assim, uma uniformidade térmica nesta região com uma variação máxima de 5 °C na temperatura ajustada. Para tanto, o conjunto final deve estar adequado à realização de processos de dopagem, utilizando POCl_3 , em lâminas de silício com dimensões máximas de 150 mm x 150 mm.

Os objetivos específicos foram:

- projetar e montar os componentes do forno: sistema de aquecimento, sistema de carregamento das lâminas, módulo de fluxo laminar e sistema de distribuição de gases;
- verificar a extensão da zona plana;
- verificar a uniformidade térmica radial.

Este trabalho foi desenvolvido em parceria com a empresa Irmãos Sanchis Ltda., sendo que ao mesmo tempo em que foi desenvolvido um forno para

processos térmicos a alta temperatura para a fabricação de células solares, pela 1ª vez no Brasil foi capacitada uma indústria local especializada no setor.

3. PROCESSAMENTO DE CÉLULAS SOLARES

3.1. Características das Células Solares

O ponto de partida tradicionalmente citado em qualquer revisão histórica a respeito de células solares data de 1839, ano em que o físico francês Edmund Becquerel observou pela primeira vez o efeito fotovoltaico. Na ocasião tal efeito foi percebido pelo surgimento de uma diferença de potencial (ddp) entre dois eletrodos de prata imersos em um eletrólito, quando os mesmos foram expostos à luz. Até o final da década de 50, as células solares apresentavam eficiências relativamente baixas, da ordem de até 6 %. A qualidade destes dispositivos teve um grande salto na época da corrida espacial, devido aos investimentos e pesquisas para seu emprego como fonte de energia para os satélites e posteriormente para ser suplemento em naves espaciais. A Figura 3.1 ilustra de forma sucinta alguns dos mais relevantes marcos históricos na evolução da energia solar fotovoltaica.



Figura 3.1. Marcos históricos na evolução da energia solar fotovoltaica.

O princípio de funcionamento de uma célula solar esta baseado no efeito fotovoltaico, conforme apresenta a Figura 3.2. Ao ser iluminada, a célula solar

converte a energia dos fótons incidentes diretamente em energia elétrica, sem quaisquer tipos de elementos mecânicos ou emissão de poluentes. Para que ocorra esta conversão deve haver uma assimetria eletrônica na estrutura do semicondutor, necessidade que é satisfeita com a formação de uma junção p-n. A adição de impurezas doadoras no substrato causa um aumento no número de elétrons na banda de condução, em condições normais de temperatura, formando uma região tipo n. Quando impurezas aceitadoras são adicionadas forma-se uma região tipo p, onde a densidade de lacunas é superior a de elétrons [4]. A iluminação faz com que ocorra a geração de pares elétron-lacuna que são separados pela ação do campo elétrico existente na junção p-n. Se portadores minoritários alcançarem a junção p-n serão conduzidos através dela tornando-se majoritários, e em uma situação de curto-circuito, os elétrons percorrem um circuito externo voltando ao semicondutor na condição de minoritários podendo se recombinar com as lacunas.

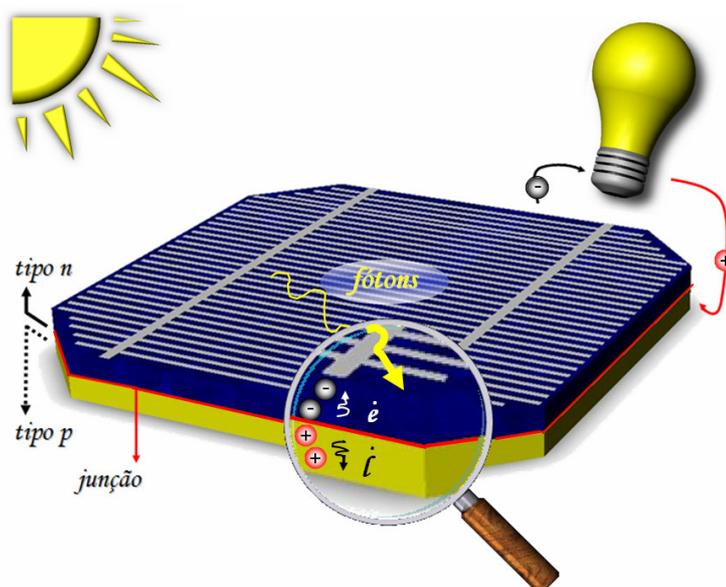


Figura 3.2. Princípio de funcionamento de uma célula solar.

Tratando-se de um dispositivo eletrônico, os parâmetros que definem o funcionamento de uma célula solar são basicamente suas características elétricas: corrente de curto-circuito (I_{SC}), tensão de circuito aberto (V_{OC}), potência máxima gerada ($P_{MÁX}$), fator de forma (FF) e a eficiência (η). O valor de I_{SC} é definido para uma tensão nula representando a máxima corrente que o dispositivo pode produzir. V_{OC} é a tensão definida quando os processos de geração e recombinação se

igualam, tornando nula a extração de corrente. A $P_{MÁX}$ é obtida por meio da multiplicação dos valores de corrente, I_{MP} , e tensão, V_{MP} , correspondentes ao ponto de máxima potência. Mas a mesma potência máxima pode ser obtida pela multiplicação dos termos I_{SC} e V_{OC} quando se considera o fator de forma da curva $I \times V$, sendo que quanto mais próximo da unidade for seu valor, melhor é a qualidade da célula. A eficiência de uma célula solar corresponde a uma relação entre a potência obtida e a irradiância incidente, conforme a equação [5]:

$$\eta = \frac{I_{SC} V_{OC} FF}{AI} 100 \quad (3.1)$$

onde os termos da expressão acima estão explicitados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1. Parâmetros e unidades de medida da Equação 3.1.

Símbolo	Descrição	Unidade
η	Eficiência	%
I_{SC}	Corrente de curto-circuito	<i>mA</i>
V_{OC}	Tensão de circuito aberto	<i>mV</i>
FF	Fator de forma (<i>Fill Factor</i>)	-
A	Área da célula	<i>cm²</i>
I	Irradiância	<i>mW/cm²</i>

3.2. Estrutura da Célula Solar

A estrutura de uma célula solar pode variar de acordo com cada projeto específico, mas em linhas gerais um modelo básico de célula solar é composto por um substrato de material semicondutor, uma região ou camada dopada, filmes AR

depositados na face frontal e trilhas metálicas em ambas as faces, conforme ilustra a Figura 3.3.

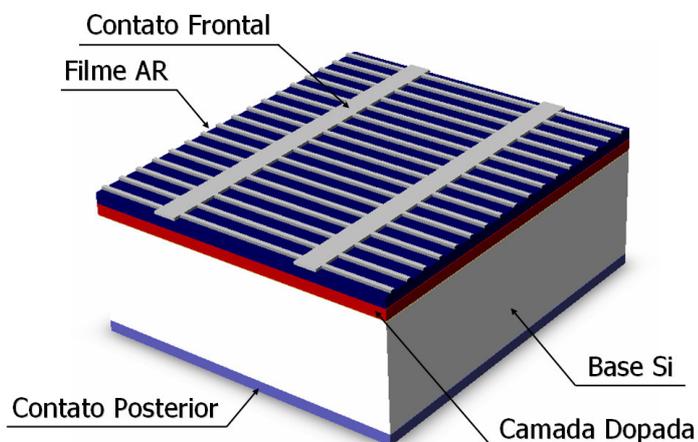


Figura 3.3. Estrutura básica de uma célula solar.

A camada dopada é constituída pela adição de impurezas doadoras ou aceitadoras que são difundidas no substrato, sendo responsável pela formação da junção p-n no dispositivo. Na face frontal, filmes AR são depositados com a finalidade de reduzir a reflexão da radiação incidente. Da mesma forma, geralmente se emprega o processo de texturação para a formação de micropirâmides, que também reduzem a quantidade de radiação que é refletida pela superfície da célula solar. Trilhas metálicas são adicionadas em ambas as faces da célula solar formando os contatos frontal e posterior, os quais são responsáveis pela extração da corrente elétrica produzida no interior do substrato. Por meio destes contatos a célula solar pode ser conectada a um circuito externo.

Alguns exemplos de estruturas de células solares são apresentados na Figura 3.4. O modelo representado pela Figura 3.4 (a) corresponde a uma estrutura que possui um campo retrodifusor formado pela adição de alumínio em sua face posterior, comumente denominado BSF (*back surface field*). Esta camada altamente dopada próxima ao contato posterior permite um aumento na corrente de curto-circuito e na tensão de circuito aberto. A Figura 3.4 (b) ilustra um tipo de estrutura bastante complexa denominada PERL (*passivated emitter and rear locally diffused*) com emissor passivado e difusão posterior localizada. Em 1999 a estrutura

PERL atingiu a eficiência de 24,7 % [6], tornando-se a célula solar de silício cristalino mais eficiente já fabricada até o ano de 2009.

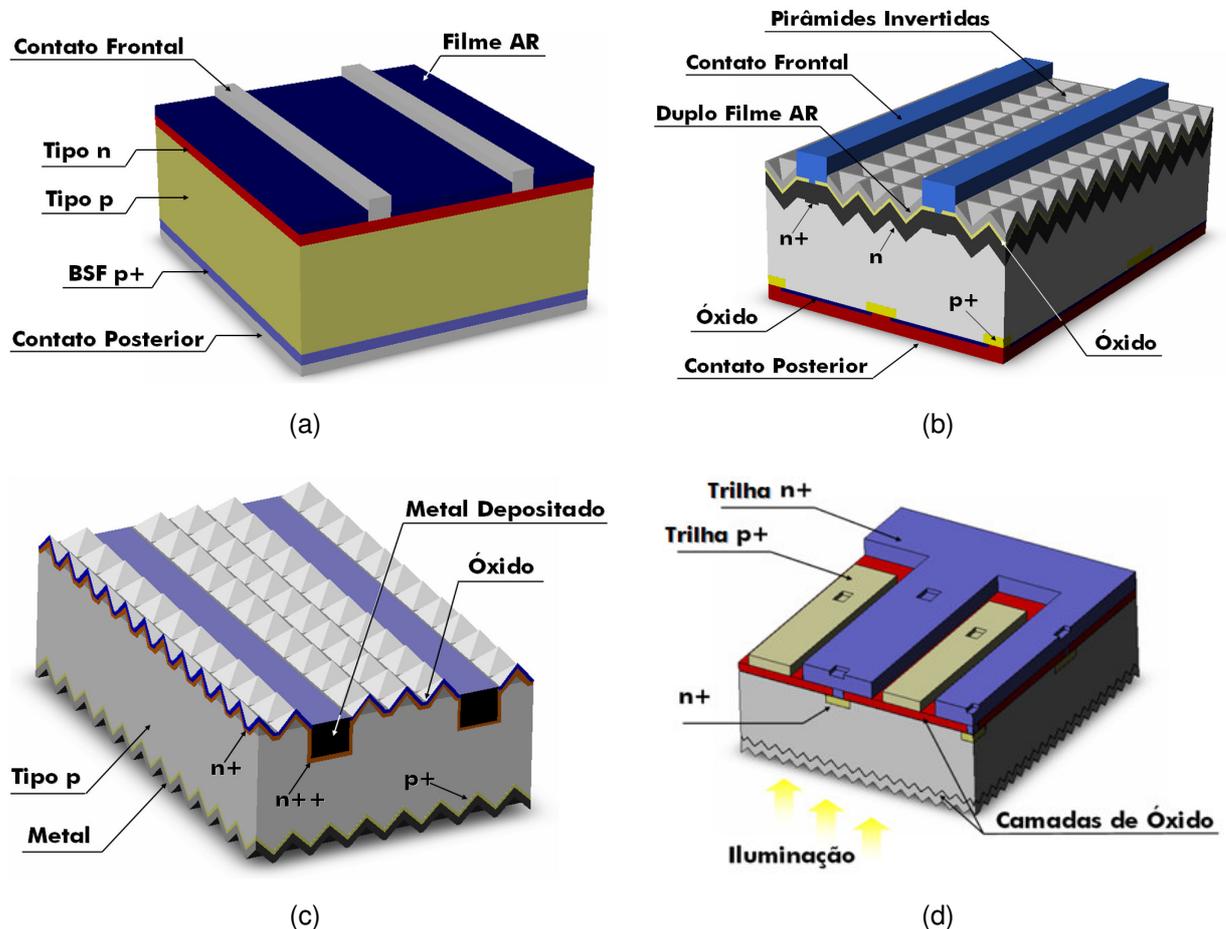


Figura 3.4. Exemplos de estruturas de células solares. (a) Estrutura com BSF, (b) estrutura PERL, (c) estrutura BSC e (d) estrutura PCSC.

Também é válido mencionar as estruturas de células solares denominadas BSC e PCSC, as quais foram muito relevantes no desenvolvimento destes dispositivos e nos processos de fabricação associados. A Figura 3.4 (c) representa o modelo de estrutura denominado BSC (*buried contact cell*) que possui contatos enterrados, desenvolvida na Universidade de *New South Wales*, e atingiu 20,6 % de eficiência. As células BSC são atualmente produzidas pela *BP Solar* nas plantas instaladas na Espanha e atingem eficiência de 17 % com processos industriais [7], [8]. A célula solar com contatos pontuais, PCSC (*point contacts solar cell*), é apresentada pela Figura 3.4 (d). Esta estrutura foi desenvolvida na década de 80 nos Estados Unidos na Universidade de *Stanford*, tendo como principais

características a total passivação da superfície e todos os contatos metálicos na face posterior. As células PCSC atingiram eficiência de 22 %, sob 1 sol (1000 W/m²) e de 26 % sob 200 sóis e atualmente são fabricadas pela empresa *SunPower* [9].

3.3. Fabricação de Células Solares

A indústria fotovoltaica atual está voltada principalmente para a produção de células solares a partir de substratos de silício, devido às numerosas vantagens no uso deste semicondutor em relação as suas qualidades técnicas e sua abundância como matéria prima. O processo de fabricação de células solares de certa forma tem início já na produção dos lingotes de silício, isto porque, a eficiência das células é diretamente afetada pela qualidade e características do substrato inicial. Mas como o silício também é empregado em outros ramos, como na indústria de microeletrônica, por exemplo, a fabricação de células solares propriamente dita tem início com a limpeza adequada das lâminas em um ambiente propício e livre de contaminantes. Neste ambiente, conhecido como sala limpa, são realizados diversos subprocessos, entre outros químicos e térmicos, até ter-se a célula solar pronta para o encapsulamento, onde então várias células são associadas e protegidas por camadas de materiais poliméricos sob uma lâmina de vidro formando um módulo fotovoltaico.

3.3.1. Obtenção das Lâminas de Silício

Como resultado direto dos processos de obtenção do silício, a estrutura cristalina das lâminas pode ser classificada como monocristalina ou multicristalina. As lâminas monocristalinas são as de melhor qualidade, isto justamente devido à uniformidade da rede cristalina sem a presença de contornos de grão. Tais lâminas podem ser obtidas por meio do método de Czochralski (Cz), ou pelo método de fusão zonal flutuante (FZ - *float zone*), entre outros.

As lâminas obtidas pelo método Cz, comumente empregadas na indústria, são fabricadas pelo crescimento de lingotes cilíndricos a partir da solidificação do silício. O monocristal é obtido uma vez que o lingote é crescido a partir de uma

semente de silício monocristalino posta em contato com o material em fase líquida no início do processo, sendo este formado verticalmente de um cadinho de quartzo com uma movimentação rotacional associada.

O método FZ também produz lingotes cilíndricos que são de melhor qualidade, uma vez que os níveis de impurezas, como oxigênio e carbono, são bastante reduzidos. De acordo com Swart [10], o processo de obtenção de silício cristalino por este método inicia-se com a usinagem de lingote de silício policristalino nas dimensões apropriadas e em uma de suas extremidades uma semente de silício monocristalino é conectada. Posteriormente, um sistema de radiofrequência produz a indução de uma corrente elétrica no tarugo, permitindo uma fusão local. O tarugo é movimentado para baixo a partir da semente, ocorrendo desta forma um deslocamento da região fundida seguida de solidificação de uma região de acordo com a orientação da semente. As lâminas obtidas por esta técnica são geralmente de emprego laboratorial uma vez que o maior custo do processo pode não justificar seu emprego, podendo ser mais competitivas as lâminas produzidas pela técnica de Cz.

A fabricação de silício multicristalino é mais simples e por conseqüência apresenta custos menores em relação à produção de silício monocristalino. A qualidade das lâminas multicristalinas é inferior principalmente devido à presença dos contornos de grãos que reduzem o tempo de vida dos portadores minoritários pela introdução de novas regiões de recombinação dos pares elétron-lacuna. Entretanto, esta técnica permite a obtenção em blocos o que reduz o desperdício de material no corte de lâminas de formato quadrado. O emprego deste tipo de silício pode ser vantajoso uma vez que fatores como o menor custo, podem se tornar mais relevantes do que a pequena diferença de eficiência entre a célula solar de silício multicristalino e a de silício Cz.

3.3.2. Ambiente para Fabricação de Células Solares

O ambiente definido como sala limpa, onde são fabricadas as células solares, é assim chamado por conter um sistema de manutenção e controle da qualidade do

ar. A sua construção e operação são planejadas de forma a minimizar a introdução, geração e retenção de partículas de impurezas no interior da sala, havendo também um controle de temperatura, pressão e umidade. Isto permite o controle dos níveis de particulados e contaminantes, de acordo com a atividade a ser realizada. A norma *Federal Standard 209* é a mais utilizada para classificar as salas limpas, medindo o número de partículas iguais ou maiores que $0,5 \mu\text{m}$ por unidade de volume. A primeira norma *Federal Standard 209 – “Cleanroom and Work Station Requirements, Controlled Environments”* – foi publicada em 1963 sofrendo revisões e atualizações gerando a 209 A (1966), 209 B (1973), 209 C (1987), 209 D (1988) e 209 E (1992). Até a 209 D o número de partículas define diretamente a classe da sala limpa, assim, existem as classes 1, 10, 100, 1.000, 10.000 e 100.000, onde a unidade de volume é considerada em pés cúbicos. Já na norma *Federal Standard 209 E* é adotado o sistema métrico de medidas, sendo que a sua classificação é definida como o logaritmo da concentração de partículas maiores que $0,5 \mu\text{m}$ por cada metro cúbico [11], [12]. A *International Organization for Standards (ISO)* desenvolveu a norma *ISO 14644-1 – “Classification of Air Cleanliness”* – publicada inicialmente na União Européia em 1999 e em 2001 nos Estados Unidos da América.

Além de o ambiente ser controlado, os operadores utilizam vestimentas adequadas tanto para proteção individual como para evitar a introdução de impurezas no meio, como pode ser observado na Figura 3.5, a qual apresenta o Laboratório de Difusão, onde são realizadas as etapas de difusão e oxidação nos processos de fabricação de células solares.



Figura 3.5. Imagem do interior do Laboratório de Difusão do NT-Solar/PUCRS.

3.3.3. Processos de Limpeza

Conforme apresentado no item 3.2.2, a fabricação de células solares é realizada em ambientes adequadamente limpos para tal finalidade. Mas, além disto, são realizados diversos processos de limpeza química antes e durante a fabricação de células solares, sendo que para padronizar e dar confiabilidade aos processos posteriores, uma limpeza inicial deve ser realizada em cada lote de lâminas. São utilizados ácidos com grande capacidade de remoção de metais como HCl e HNO₃ ou combinações de HCl+H₂O₂ e NH₄OH+H₂O₂ [13]. Utiliza-se em todos os processos de limpeza água deionizada, ou seja, água com baixa a presença de íons, e com resistividade de aproximadamente 18,2 MΩ·cm.

Tipicamente os processos RCA-1 (NH₄OH:H₂O₂:H₂O na proporção 1:1:5 a 80 °C por 10 minutos) e RCA-2 (HCl:H₂O₂:H₂O na proporção 1:1:5 a 80 °C por 10 minutos) são empregados para remover impurezas orgânicas e metálicas [13]. Estes processos promovem a criação de uma camada de óxido, tornando a lâmina hidrófila. A retirada deste óxido é realizada por meio de banho em HF diluído o qual torna sua superfície hidrófoba. Para evitar a oxidação superficial é realizada uma secagem manual por meio de jato de N₂ ou com o uso de equipamentos de centrifugação e jato de N₂.

3.3.4. Texturação

A etapa de texturação em um processo de fabricação de células solares consiste na formação de micropirâmides na superfície da lâmina, com à exposição dos planos (111). A formação das micropirâmides é realizada por meio da imersão da lâmina de silício em uma solução de NaOH ou KOH [14]. Este ataque químico, além de formar as micropirâmides, também elimina alguns micrômetros da superfície do substrato, possivelmente danificados pelos processos de corte dos lingotes. A refletância de uma superfície de silício texturada é cerca de 20 % menor do que a refletância apresentada por uma lâmina de silício polida. É ilustrado na Figura 3.6 (a) o caminho percorrido por um raio de luz incidente em uma superfície texturada, e na Figura 3.6 (b) uma vista superior, obtida por microscopia eletrônica

de varredura (MEV), de uma superfície de silício texturada onde se observam as micropirâmides formadas no processo de texturação.

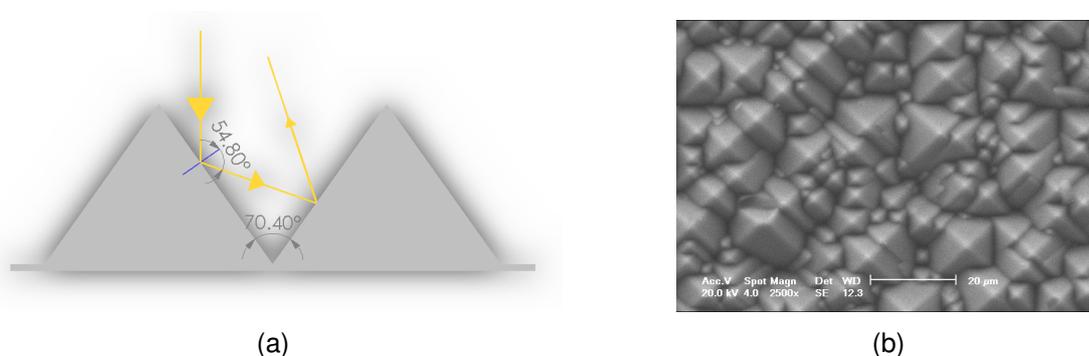


Figura 3.6. (a) Representação da absorção de um raio solar em uma superfície texturada e (b) imagem obtida por MEV de micropirâmides em uma superfície de silício [14].

3.3.5. Dopagem do Substrato

A dopagem dos substratos consiste justamente em introduzir elementos dopantes na rede cristalina do silício, material que possui a estrutura cristalina do diamante, com a principal finalidade de formar uma junção p-n no interior da lâmina. O processo de dopagem mais empregado na fabricação de células solares é a difusão térmica, realizada em fornos especiais. Existem outras técnicas de dopagem como a implantação iônica que requer processamento em vácuo e danifica a superfície das lâminas.

3.3.6. Deposição de Filmes Antirreflexo

Outra técnica usualmente associada à texturação é a deposição de filmes AR. Enquanto a texturação permite que a refletância seja reduzida em cerca de 11 % [14], quando é depositada sobre a lâmina um filme fino de um material antirreflexivo a refletância pode ser reduzida para até 1 %, e para até 10 % quando a deposição é realizada sobre superfícies polidas [13]. Os filmes AR são formados por materiais transparentes ao espectro solar para os comprimentos de onda onde a célula é ativa, podendo ter camadas simples ou duplas. Dentre os materiais mais empregados na deposição de filmes AR em lâminas de silício destacam-se o óxido

de titânio, o pentóxido de tântalo, o nitreto de silício, o óxido de alumínio e o óxido de silício. O processo de deposição de filmes AR pode ser realizado por centrifugação, ou deposição química de vapor sob baixas pressões, LPCVD (*low pressure chemical vapour deposition*), oxidação térmica do próprio silício e por meio de evaporação em alto vácuo. No processo de fabricação de células solares o filme AR pode ser depositado antes da metalização.

3.3.7. Metalização

Segundo Swart [10], o termo metalização descreve a etapa de obtenção dos contatos ôhmicos nos dispositivos semicondutores. Na fabricação de células solares esta etapa compreende a deposição de regiões metálicas sobre as superfícies do substrato, seguida de processamentos térmicos para formação dos contatos ôhmicos. São formados contatos metal-semicondutor nas faces frontal e posterior do substrato para a extração da energia elétrica produzida. Para que a metalização não prejudique a eficiência da célula solar, as perdas por resistência de contato devem ser minimizadas, assim como a área ocupada por regiões metálicas na face frontal, uma vez que a mesma causa o efeito de sombra na célula. As técnicas de metalização mais empregadas são: a serigrafia, a evaporação de metais e a deposição química sem eletrodos (*electroless*). Destes, o processo por serigrafia é o mais usual na indústria fotovoltaica devido à relação custo-benefício que apresenta. Células produzidas em laboratório geralmente utilizam fotolitografia e evaporação para formar as trilhas metálicas, de 10 μm a 15 μm de largura compostos por Ti/Pd/Ag. Por outro lado, processos industriais utilizam pastas de Ag ou Ag/Al depositadas por serigrafia, formando trilhas de aproximadamente 100 μm de largura [15].

3.3.8. Corte

Como resultado de processos convencionais de difusão, uma camada de mesmo material envolve todo o substrato, com isto, para evitar o curto-circuito entre ambas as faces da célula solar, realiza-se a separação da junção p-n nas bordas ou cortam-se as bordas, também conhecido como ataque de bordas. Um dos métodos

empregados para tal finalidade é o corte com radiação leiser, sendo muitas vezes realizada a posterior clivagem das lâminas. Outra função do corte é ajustar o formato e tamanho da célula, onde um exemplo é a produção de células quadradas ou pseudoquadradas de silício monocristalino.

3.3.9. Caracterização das Células Solares

Para caracterizar as células solares é necessário o uso de um equipamento capaz de realizar medições dos parâmetros elétricos de acordo com a norma internacional IEC 904-3. A caracterização de uma célula solar consiste justamente em medir e avaliar os parâmetros elétricos. O equipamento utilizado é geralmente composto por uma plataforma com controle de temperatura e com sistema de vácuo, um sistema de medições elétricas e uma fonte de iluminação capaz de simular a irradiância solar sobre a plataforma, também denominado simulador solar [16].

3.4. Difusão

3.4.1. Fundamentação Teórica

O processo de difusão é definido como o fenômeno de transporte de um material por meio de movimentação atômica [17]. Este conceito é relevante no tratamento de materiais quando se deseja modificar de forma controlada as suas propriedades, de acordo com uma finalidade ou aplicação proposta. Os elementos dopantes, considerados impurezas conhecidas, são introduzidos em uma matriz por meio da transferência de massa de uma fonte líquida, sólida ou na forma de gás. Em processos térmicos convencionais de difusão, o elemento dopante pode ser difundido no substrato após ser depositado previamente em sua superfície ou por meio de um fluxo de gás que circula na câmara de processos transportando os átomos dopantes.

Conforme May e Sze [18], a concentração de impurezas, ou seja, de átomos dopantes, diminui gradativamente da superfície para o seu centro, e o perfil da distribuição de dopagem é determinado principalmente pelos parâmetros

temperatura, tempo de difusão e concentração de dopante. Mas podem ocorrer situações onde a concentração de dopante deixa de ser gradual no sentido superfície para o interior da lâmina, como é o caso de substratos dopados com boro e posteriormente passivados por oxidação. Neste caso específico há uma ligeira queda da concentração na região próxima à superfície devido à segregação de átomos de boro para o óxido formado [19].

No processamento de dispositivos semicondutores, grupo onde se enquadram as células solares, a dopagem de impurezas tem como principal característica a modificação das propriedades elétricas do material, por meio da inserção de elementos capazes de formar regiões positivamente ou negativamente carregadas em relação ao material base, o substrato. A Figura 3.7 ilustra a concentração típica de átomos dopantes em um substrato semicondutor após um processo de difusão.

O movimento migratório dos átomos nos semicondutores, o qual constitui o processo de difusão, pode ser descrito por meio dos dois modelos básicos de difusão em sólidos. Os mecanismos de difusão intersticial e difusão por vacâncias permitem de maneiras distintas a formação de zonas dopadas com impurezas específicas na rede cristalina do substrato.

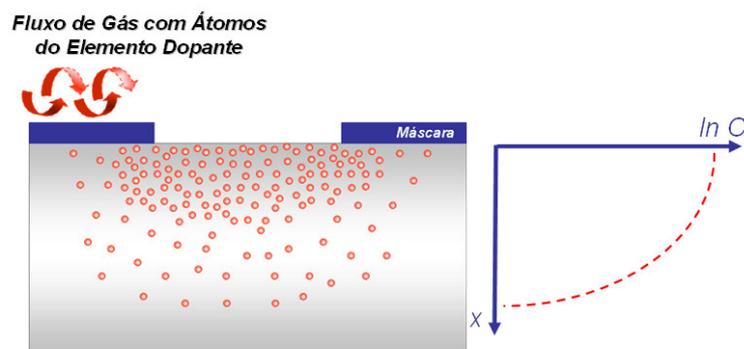


Figura 3.7. Dopagem pelo processo de difusão, onde a concentração de átomos dopantes (C) diminui gradativamente de acordo com a profundidade no substrato (x).

A difusão intersticial é própria de elementos que possuem raio atômico consideravelmente menor em relação aos átomos da matriz cristalina. Isto porque,

como o próprio nome define, estes átomos se alojam nos interstícios da rede, como ilustra a Figura 3.8 (a). Elementos como o hidrogênio, carbono, nitrogênio e oxigênio são alguns exemplos que tipicamente são difundidos em uma matriz por meio deste mecanismo.

O mecanismo de difusão por vacâncias exige que na rede haja a presença de espaços vazios, as chamadas vacâncias. A quantidade destes defeitos na rede determina as condições de difusão por meio deste mecanismo. A Figura 3.8 (b) ilustra o processo de difusão por meio do mecanismo de vacâncias, onde o átomo hospedeiro necessariamente ocupa uma posição atômica na rede.

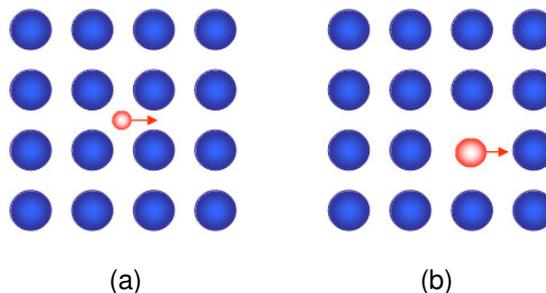


Figura 3.8. (a) Difusão por meio do mecanismo intersticial e (b) difusão por vacâncias.

Um comparativo entre estes mecanismos estabelece que devido ao menor tamanho dos átomos intersticiais em relação aos átomos da rede, estes podem se movimentar mais rapidamente e com maior mobilidade, o que também ocorre em função da maior probabilidade de existir um maior número de interstícios do que vacâncias na rede cristalina [17].

Processos convencionais de difusão, pelos quais as lâminas de silício passam durante a produção de células solares, são realizados geralmente em fornos tubulares horizontais. Nestes equipamentos o tubo é aquecido por um conjunto de resistores elétricos permitindo que a temperatura em seu interior atinja uma faixa aproximada de 800 °C a 1200 °C, a qual é usual para este tipo de processo em lâminas de silício [18]. O método mais comum de dopagem é por meio da passagem de um gás contendo o elemento dopante pelo interior do tubo, onde se encontram as lâminas durante o processo de difusão. Para tornar possível este

processo o tubo possui em uma de suas extremidades uma conexão adequada para entrada dos gases. A outra extremidade é normalmente aberta permitindo a entrada das lâminas e somente vedada durante o processo propriamente dito. A Figura 3.9 apresenta um esquema de um forno convencional de difusão.

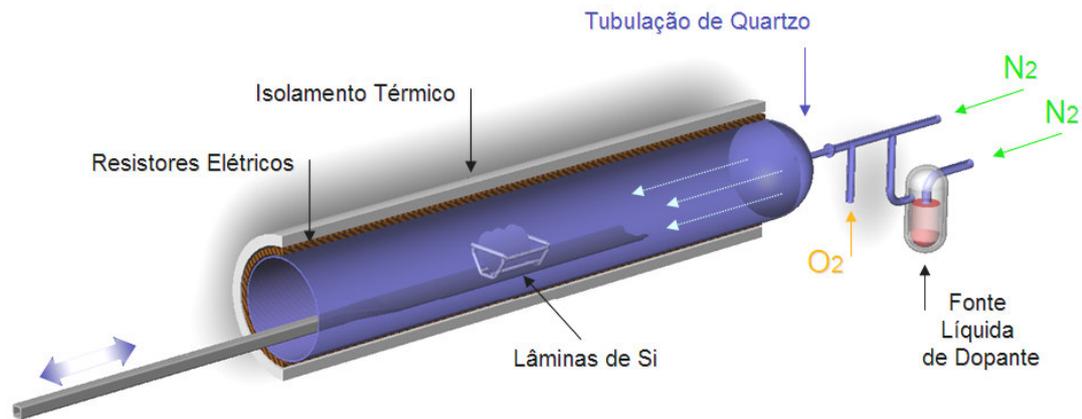


Figura 3.9. Esquema de um forno convencional para processos de difusão de dopantes em lâminas de Si.

Os dopantes mais utilizados para difusão em lâminas de silício são: o boro e o alumínio para formação de uma camada tipo-p, e o fósforo para formação de uma camada tipo-n. A Figura 3.10 ilustra a posição destes elementos em relação ao silício na Tabela Periódica.

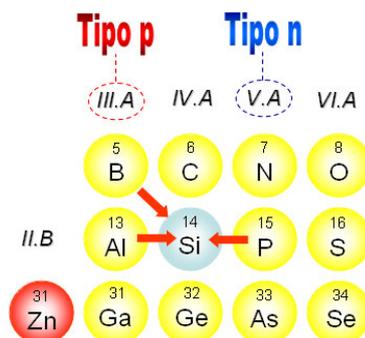


Figura 3.10. Representação da posição dos principais dopantes do silício na Tabela Periódica.

Um parâmetro relevante em processos de difusão é o fluxo de difusão F , o qual representa a taxa de transferência de massa, ou seja, em outros termos expressa o quão rápida é a difusão. Este valor corresponde ao número de átomos

dopantes, ou massa equivalente, que atravessa uma unidade de área no intervalo de uma unidade de tempo, conforme apresenta a equação [17]:

$$F = \frac{\partial M}{A \partial t} \quad (3.2)$$

onde cada termo da expressão acima está descrito no Quadro 3.2.

Quadro 3.2. Parâmetros e unidades de medida da Equação 3.2.

Símbolo	Descrição	Unidade
F	Fluxo de difusão	Átomos /cm ² s ou kg/cm ² s
M	Número de átomos ou massa	Átomos ou kg
A	Área onde ocorre a difusão	cm ²
t	Tempo no qual ocorre a difusão	S

Quando o fluxo de difusão não varia com o tempo, o processo é denotado como difusão em regime permanente, onde o fluxo de difusão é expresso pela Primeira Lei de Fick [17], [18]:

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3.3)$$

O fator $\partial C / \partial x$ corresponde ao gradiente de concentração de impurezas, onde C representa a concentração de dopante por unidade de volume e x a profundidade no substrato. O fator D corresponde a uma constante de proporcionalidade denominada coeficiente de difusão ou difusividade. O fluxo de átomos dopantes de acordo com a Primeira Lei de Fick ocorre das regiões de alta concentração para as regiões de baixa concentração, indicado pelo sinal negativo na Equação 3.3.

Processos de difusão em estado não-estacionário têm como características um fluxo de difusão variável com o tempo e um gradiente de concentração não linear. Para este tipo de processo de difusão se aplica a Segunda Lei de Fick [17], [18] e [20]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3.4)$$

onde os termos mencionados são definidos no Quadro 3.3.

Quadro 3.3. Parâmetros e unidades de medida da Equação 3.4.

Símbolo	Descrição	Unidade
<i>D</i>	Difusividade ou coeficiente de difusão	<i>cm²/s</i>
<i>C</i>	Concentração de impurezas	<i>Átomos/cm³</i>
<i>x</i>	Profundidade no substrato	<i>cm</i>

A Equação 3.4 pode ser obtida substituindo-se a Primeira Lei de Fick na equação da continuidade unidimensional, considerando que quando a concentração de átomos dopantes é baixa, pode-se assumir que o coeficiente de difusão é independente da concentração de impurezas.

A difusividade ou coeficiente de difusão é uma constante dependente da temperatura, podendo ser matematicamente expressa por meio da equação [17], [18] e [20]:

$$D = D_0 \exp \frac{-E_a}{RT} \quad (3.5)$$

sendo que os termos da expressão são explicitados no Quadro 3.4.

Quadro 3.4. Parâmetros e unidades de medida da Equação 3.5.

Símbolo	Descrição	Unidade
D_0	Constante de difusão	cm^2/s
E_a	Energia de ativação para difusão	eV
R	Constante universal dos gases	$eV/\text{átomo}\cdot K$
T	Temperatura	K

Dentre as impurezas dopantes do tipo p difundidas em silício, como alumínio, boro, gálio e índio, o boro e o alumínio são os elementos mais utilizados atualmente, do mesmo modo, das impurezas do tipo n, como antimônio, fósforo e arsênio, destaca-se o fósforo por ser o mais utilizado. Para formar as regiões n ou p frontais de uma célula solar, normalmente usa-se o fósforo como dopante n e o boro como dopante p, ambos a partir de fontes líquidas.

O boro tem um coeficiente de difusão da ordem de 10^{-12} cm^2/s a uma temperatura de 1150 °C e sua alta solubilidade no silício permite que o mesmo seja difundido, podendo gerar uma concentração superficial da ordem de 4×10^{20} átomos/ cm^3 [21]. Deve ser considerado que uma alta concentração de boro na rede cristalina do silício pode ocasionar o surgimento de tensões induzidas e assim, define-se como limite para concentração de impurezas o valor de 5×10^{19} átomos/ cm^3 [21]. O tribrometo de boro é a fonte líquida mais usada em processos de difusão de boro [21]. Geralmente nos processos de difusão de boro há a formação primária de B_2O_3 como produto das reações químicas envolvidas. Também são utilizados discos de nitreto de boro como fontes sólidas deste dopante.

O fósforo apresenta um coeficiente de difusão bastante próximo ao do boro, e assim como os demais dopantes tipo n, mencionados anteriormente, apresenta alta solubilidade. O composto mais comum nos processos de difusão de fósforo é o pentóxido de fósforo que prontamente se combina com o óxido de silício formando

fosforosilicatos. A Figura 3.11 apresenta os gráficos do coeficiente de difusão do boro e do fósforo em função da temperatura.

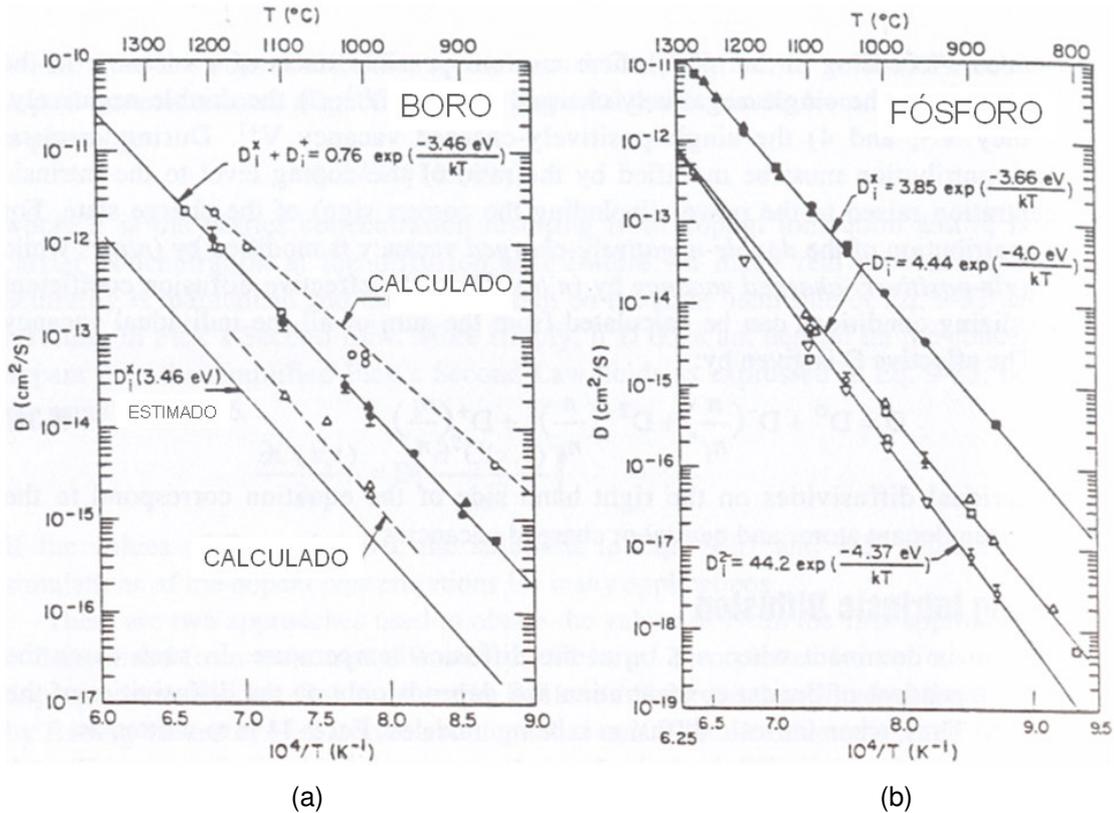


Figura 3.11. Coeficiente de difusão em função da temperatura para os dopantes (a) boro e (b) fósforo [21].

Em uma análise mais aprofundada do processo, os perfis de difusão dependem de algumas condições iniciais e de contorno. Sob este ponto de vista existem dois casos tradicionais que equacionam os processos de difusão. O primeiro é definido como difusão por meio de uma concentração constante na superfície, onde os átomos dopantes são transportados por um gás até a superfície do substrato e então difundidos, sendo que a concentração na superfície permanece constante durante todo o processo. No segundo caso, uma quantidade fixa de dopante é depositada no substrato e então difundida, assim, este processo pode ser definido como difusão com quantidade de dopante constante. À medida que o dopante se difunde no substrato a concentração na superfície tende a diminuir.

O primeiro caso define as condições iniciais e de contorno da concentração de dopante em função da profundidade e do tempo $C(x,t)$. Assim, tendo como condição inicial que em $t=0$ não há concentração de dopante no volume do substrato:

$$C(x,0) = 0 \quad (3.6)$$

Como condição de contorno, a concentração em $x=0$ corresponde à concentração na superfície que independe do tempo:

$$C(0, t) = C_s \quad (3.7)$$

e a concentração de impurezas tende a zero com o afastamento da superfície, ou seja, os níveis de concentração são menores para maiores profundidades no substrato,

$$C(\infty, t) = 0 \quad (3.8)$$

Uma solução analítica para o perfil de concentração de impurezas para estas condições é dada pela Lei de Fick, matematicamente expressa por meio da equação [18], [20]:

$$C(x,t) = C_s \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (3.9)$$

onde os termos da expressão são descritos no Quadro 3.5.

O número total de átomos de impurezas dopantes por unidade de área, $Q(t)$, é calculado por meio da integração de 0 ao ∞ do perfil de concentração de átomos dopantes em relação à profundidade no substrato, conforme apresenta a Equação 3.10. Uma forma simplificada desta equação é dada pela Equação 3.11 [18].

$$Q(t) = \int_0^{\infty} C(x, t) dx \quad (3.10)$$

$$Q(t) = 1,13C_s\sqrt{Dt} \quad (3.11)$$

Quadro 3.5. Parâmetros e unidades de medida da Equação 3.9.

Símbolo	Descrição	Unidade
C_s	Concentração de impurezas na superfície	Átomos/cm ³
$erfc$	Função erro	-
T	Tempo de difusão	s

O segundo caso considera a deposição de uma quantidade fixa de dopante na superfície do substrato, o que forma uma fina película para posterior difusão no forno. A condição inicial é a mesma apresentada no modelo anterior, da mesma forma que se considera como primeira condição de contorno $C(\infty, t) = 0$. A distinção deste equacionamento é verificada sob a segunda condição de contorno, que define que a quantidade de átomos dopantes que formam o perfil de difusão é igual à quantidade total de impurezas por unidade de área que é depositada na superfície (S):

$$\int_0^{\infty} C(x, t) = S \quad (3.12)$$

A solução da equação da difusão que satisfaz estas condições é dada pela distribuição gaussiana [18], [20]:

$$C(x, t) = \frac{S}{\sqrt{\pi D t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (3.13)$$

3.4.2. Processos de Pré-deposição de Dopantes

O que basicamente distingue as técnicas de difusão são as formas de realização das duas etapas em que se divide este processo. A primeira consiste na pré-deposição do material dopante sobre o substrato e a segunda em submeter a lâmina a elevadas temperaturas, a fim de realizar a difusão propriamente dita dos átomos dopantes na matriz do substrato. Substratos tipo p, dopados inicialmente com boro, são os mais empregados, e neste âmbito, o elemento dopante tipo n mais utilizado é o fósforo [13].

Os principais métodos aplicados para a pré-deposição de dopantes sobre os substratos de silício consistem nas técnicas de (i) serigrafia, (ii) centrifugação (*spin-on*), (iii) deposição por fonte sólida, (iv) deposição por fonte líquida e (v) por meio de fonte gasosa.

- (i) Nas deposições por meio de processos por serigrafia, uma fina camada de pasta é aplicada sobre a lâmina com o uso de uma máscara adequada. Antes do processo de difusão em altas temperaturas, a pasta deve passar por um processo de secagem dos solventes.
- (ii) Na técnica de centrifugação, também conhecida como *spin-on*, a lâmina é colocada em um aparelho que a faz atingir rotações de até 3000 rpm. Previamente são colocadas sobre uma das faces da lâmina gotas do dopante na forma líquida que se distribui por toda a superfície em função da alta rotação. Após a distribuição do dopante, as lâminas são colocadas em uma estufa para a completa secagem do solvente e, em seqüência levadas ao forno para a difusão.
- (iii) As fontes sólidas consistem geralmente de discos, contendo o material dopante, que são colocados de maneira intercalada com as lâminas de silício nos suportes que as levam à câmara de processos dos fornos de difusão convencionais. Como fonte de fósforo utiliza-se discos de SiP_2O_7 os quais se decompõem em P_2O_5 quando submetidos a altas

temperaturas por meio da seguinte reação química forçada pelo aumento da temperatura:



Outra técnica consiste em alojar o dopante na forma de pó ou grãos em uma região com temperatura adequada no fundo do forno e desta forma, o gás portador leva o vapor dopante até as lâminas.

- (iv) Deposições por meio de fontes líquidas como POCl_3 , BBr_3 e Sb_3Cl_5 são muito utilizadas em processos convencionais. Esta técnica consiste em orientar a passagem do gás portador, N_2 , para borbulhar o dopante líquido, arrastando as partículas dopantes para o tubo de processos do forno. O ambiente contendo a mistura dopante permite a difusão nas faces das lâminas de silício. O POCl_3 é a fonte de dopante mais empregada em deposições por fontes líquidas. Durante o processo de difusão ocorrem as seguintes reações químicas:



- (v) A deposição de dopantes por fluxo de gases consiste em inserir no ambiente de processos do forno o gás já dotado de partículas dopantes associado ao gás portador. Como uma das principais fontes gasosas de fósforo apresenta-se a fosfina, ou PH_3 , difundindo este dopante sobre as lâminas de silício de acordo com a seguinte reação: $2\text{PH}_3 + 4\text{O}_2 \rightarrow \text{P}_2\text{O}_5 + 3\text{H}_2\text{O}$. Esta técnica exige alguns cuidados especiais em relação a possíveis fugas de gases tóxicos, de forma que os custos de instalação e segurança são muito mais elevados em relação a outras técnicas.

3.4.3. Fluxo de Gases em Processos de Difusão

Em 1883, o físico e engenheiro irlandês Osborne Reynolds demonstrou por meio de um experimento que a forma do escoamento pode ser classificada em

diferentes tipos. Em sua experiência Reynolds determinou, de acordo com o comportamento do fluido sob condições de contorno específicas, dois tipos de escoamento: o laminar e o turbulento. O escoamento laminar pode ser definido como aquele onde se verifica que a movimentação do fluido ocorre em camadas ou lâminas, sendo que qualquer tendência à turbulência é dificultada pelas forças viscosas de cisalhamento e a velocidade em um ponto não varia com o tempo. Assim, ao visualizar um escoamento laminar deve-se observar uma corrente linear na movimentação dos fluidos. Em contrapartida, um escoamento turbulento apresenta uma movimentação caótica, ou seja, a movimentação do fluido mesmo obedecendo a um sentido de corrente o vetor velocidade varia com o tempo. Um escoamento turbulento é favorecido principalmente pelo aumento da velocidade do fluxo, pela presença de irregularidades nas superfícies de contato e também pela presença de obstáculos. A turbulência causa entre outros efeitos a formação de vórtices, alta dissipação de energia e irregularidade de fluxo. O tipo de escoamento, ou a estabilidade do fluxo, é determinado por meio do cálculo de um coeficiente adimensional denominado número de Reynolds (Re). O número de Reynolds corresponde a uma quantificação da relação das forças de inércia e das forças de viscosidade envolvidas em um escoamento, sendo assim, o quociente entre estas forças. Pode ser matematicamente expresso, para o caso de fluxo no interior de tubulações, pela equação [22]:

$$\text{Re} = \frac{VD}{\nu} \quad (3.14)$$

sendo que cada termo da expressão acima é descrito no Quadro 3.6.

Em escoamentos internos determina-se que o fluxo é laminar quando o número de Reynolds apresentar um valor inferior a 2000, e turbulento para valores acima de 3000. A faixa intermediária a estes limites caracteriza um fluxo em transição.

No processamento de células solares, nas etapas de difusão e oxidação, as lâminas de silício são posicionadas no interior de um tubo e submetidas a um fluxo

de gases. Para que ocorra a difusão por meio desta técnica, o tubo é externamente aquecido e por uma de suas extremidades é forçada a entrada de um gás inerte associado ao gás contendo os átomos dopantes. O gás inerte tem como principal função ser um transportador do dopante e preencher o volume do tubo regulando o tempo de troca do fluido no interior do mesmo. Uma representação aproximada de um escoamento laminar em comparação a um escoamento turbulento, no interior de um tubo de processamento térmico, é mostrada na Figura 3.12.

Quadro 3.6. Parâmetros e unidades de medida da Equação 3.14.

Símbolo	Descrição	Unidade
Re	Número de Reynolds	-
V	Velocidade média do fluido	m/s
D	Diâmetro interno do tubo	m
ν	Viscosidade cinemática do fluido	m^2/s

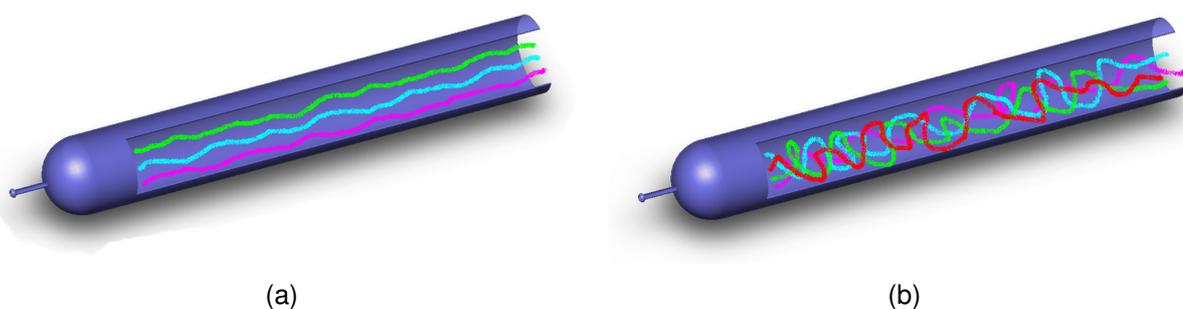


Figura 3.12. Representação ilustrativa de um escoamento com comportamento laminar (a) e com comportamento turbulento (b).

Geralmente as lâminas são inseridas no interior do tubo dispostas verticalmente em suportes fabricados de quartzo ou SiC, conforme ilustra a Figura 3.13. Esta forma de posicionar as lâminas no forno é adotada por propiciar uma maior capacidade de processamento. Estes suportes por sua vez são levados para dentro do tubo por uma espécie de espátula que é movimentada no sentido

longitudinal do tubo permitindo assim a entrada e saída das lâminas no forno sem qualquer contato adicional com as paredes do tubo.

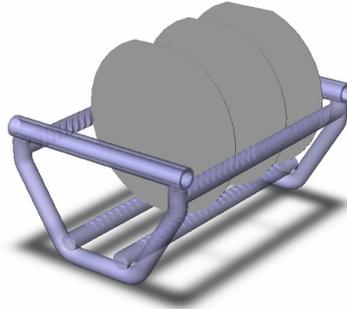


Figura 3.13. Representação das lâminas de silício dispostas em um suporte de quartzo.

Devido a esta configuração, é desejável que o escoamento dos fluidos no interior do tubo seja turbulento, de forma a permitir que a concentração de átomos dopantes seja uniforme ao redor das lâminas durante o processo de difusão. Um escoamento com baixo número de Reynolds pode ocasionar que algumas regiões da lâmina não atinjam a dopagem desejada, comprometendo posteriormente a eficiência da célula solar. Uma representação das linhas de fluxo sobre as lâminas no interior de um tubo é apresentada na Figura 3.14. Nesta salienta-se que em um escoamento turbulento a probabilidade de os átomos difundirem-se nas faces das lâminas é maior do que em um escoamento laminar.

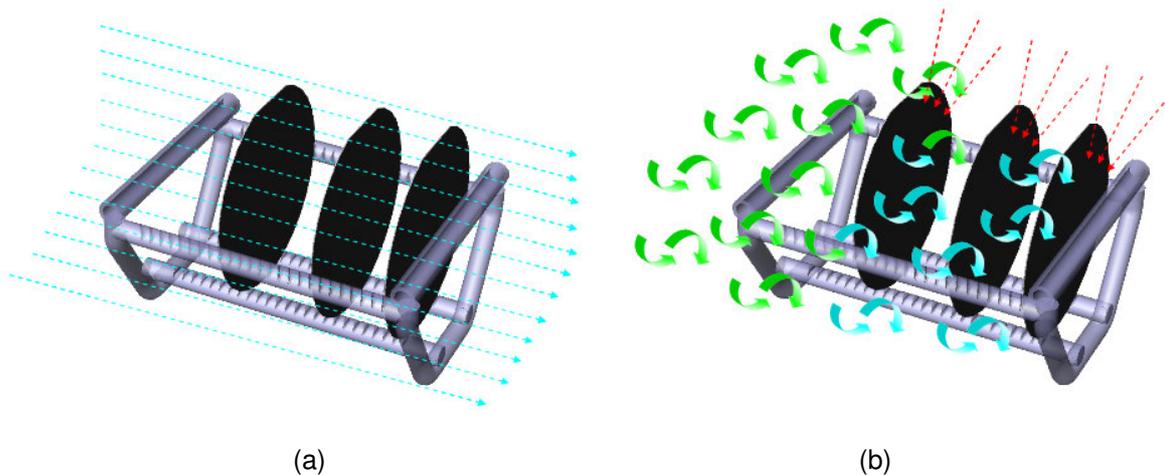


Figura 3.14. (a) Linhas de fluxo em um escoamento laminar e (b) comportamento do fluido em um escoamento turbulento.

Wang et al. [23] desenvolveu e patenteou um dispositivo para ser utilizado em fornos de difusão com a finalidade de aumentar a turbulência do fluxo de gases e a uniformidade da mistura com os dopantes. Tal invento apresentado na Figura 3.15 tem a justificativa de seu uso baseada no fato de que as reações envolvidas para a dopagem de lâminas de silício estão condicionadas a diversos fatores como temperatura, posicionamento das lâminas, fluxo de gases, entre outros. Um dos principais fatores considerados nesta patente é a condição da existência de uma mistura ideal entre os gases e o dopante e a formação de um fluxo de gases turbulento, favorecendo uma dopagem uniforme sobre toda a superfície da lâmina.

As posições numeradas na Figura 3.15 correspondem aos seguintes itens: 1) ponto de inserção dos gases; 2) defletor, objeto do invento; 3) tubo de processamento; 4) conjunto de resistores elétricos; 5) suportes para transporte de lâminas; 6) lâminas de silício; 7) pá de carregamento e 8) ponto de saída dos gases, após a reação química. Destaca-se o defletor indicado na posição 2, o qual assegura a formação de um fluxo turbulento de gás nas lâminas. Seu formato cônico proporciona um aumento na uniformidade da mistura dos gases com o dopante em um intervalo de tempo menor devido à ação de um fluxo turbulento.

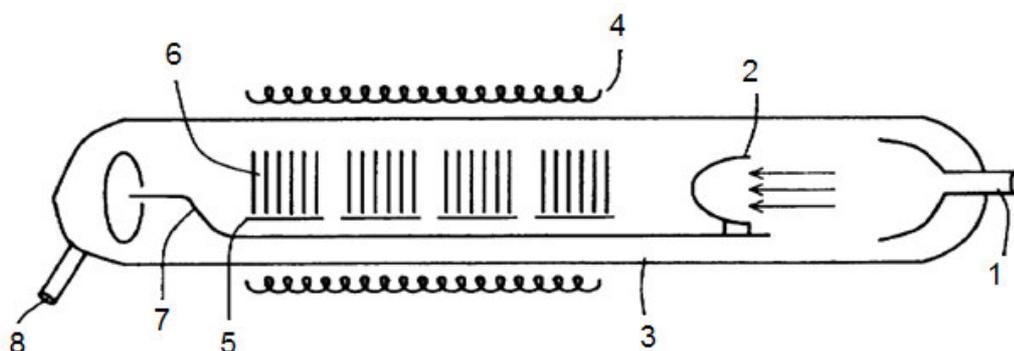


Figura 3.15. Representação esquemática de um tubo de processamento com aparato de quartzo para o aumento da turbulência em seu interior [23].

Segundo o autor, a utilização deste aparato ou método de difusão melhora a uniformidade da dopagem sem afetar a produtividade. Existem outros métodos já utilizados que implicam em um afastamento maior entre as lâminas ou no uso de

lâminas já dopadas posicionadas entre as que serão dopadas, métodos estes que acabam por reduzir a capacidade de produção dos fornos.

4. FORNOS PARA DIFUSÃO DE FÓSFORO EM SILÍCIO

Como já mencionado anteriormente, dentre as etapas da fabricação de células solares existem diversos processos térmicos a serem realizados. Destes, os processos de difusão e oxidação estão entre os mais relevantes. Tais processos, para serem realizados, necessitam o uso de equipamentos adequados, sendo então neste contexto que se apresentam os fornos para processamento de células solares.

Existem basicamente duas linhas de fornos para o processamento de células solares, os pertencentes ao grupo de processos térmicos rápidos e os pertencentes ao grupo de processos térmicos convencionais. Em cada um destes grupos existem ainda diferentes modelos que podem ser classificados quanto à configuração estrutural e/ou a aplicação específica.

4.1. Fornos Horizontais com Câmara de Processamento Tubular

Devido à vasta utilização destes fornos no processamento térmico de lâminas de silício, os processos realizados neste tipo de forno são tidos como convencionais. Pela mesma razão estes fornos são também conhecidos como fornos convencionais ou simplesmente fornos de difusão, dentre outras denominações existentes. Tais equipamentos representam a tecnologia dominante para a formação de emissores na fabricação de células solares. Atribui-se este fato principalmente aos altos níveis de eficiência alcançados por meio de processos realizados com estes equipamentos [24].

A estrutura destes fornos adota uma configuração adequada para alojar um tubo de quartzo disposto horizontalmente, o qual vem a ser a própria câmara de

processamento. Geralmente, fornos deste tipo voltados para aplicações industriais possuem no mínimo quatro tubos dispostos em uma única estrutura, conforme apresenta a Figura 4.1. Com isto, diferentes e/ou diversos processos podem ser realizados simultaneamente, aumentando assim, o fator de produtividade do equipamento. A Figura 4.2 mostra o processo de inserção de lâminas de silício em um forno convencional. Nesta imagem, a região incandescente é a própria câmara de processamento.



Figura 4.1. Forno horizontal com quatro câmaras de processamento.

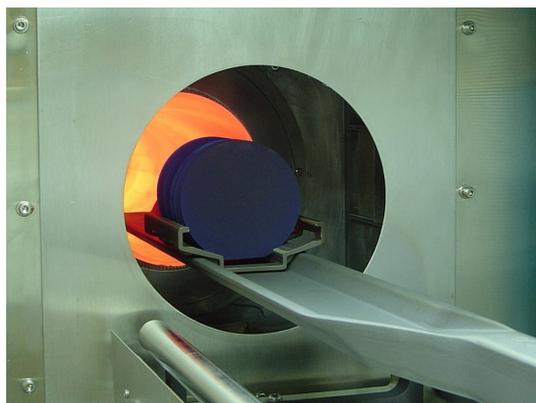


Figura 4.2. Processo de inserção de lâminas de silício em um forno convencional.

Versões laboratoriais podem possuir uma única câmara de processamento, pois são em geral utilizadas para desenvolvimento de processos e análise de materiais dispensando o fator produtividade. Estes fornos são geralmente denominados modelos de bancada, como pode ser visto um exemplo na Figura 4.3.



Figura 4.3. Modelo de bancada voltado para aplicações laboratoriais [25].

Os fornos horizontais são compostos por módulos que devem ser analisados de forma individual. Em geral são três os módulos existentes: o módulo de carregamento, o módulo de processamento térmico e o armário de gases. A Figura 4.4 apresenta uma ilustração relacionando estas principais estações em um forno convencional. Estes módulos componentes podem vir a adotar diferentes configurações de acordo com as características específicas de cada projeto.

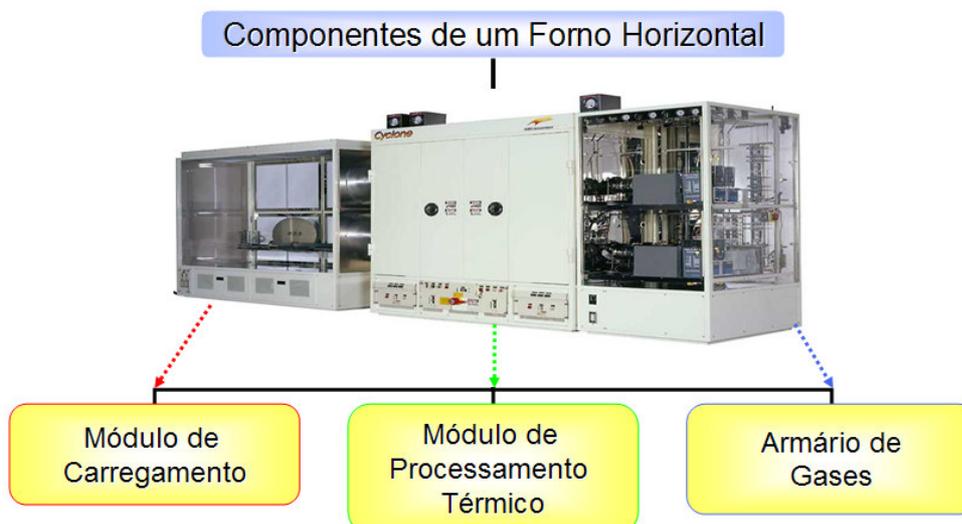


Figura 4.4. Principais módulos componentes de um forno horizontal.

4.2. Fornos Verticais

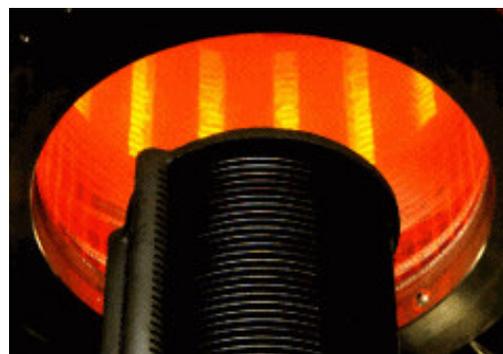
Os fornos verticais são muito semelhantes aos horizontais no sistema de funcionamento. As diferenças surgem em função do posicionamento do tubo de quartzo e estrutura para suportar esta configuração. Fornos verticais oferecem

algumas vantagens tecnológicas em relação aos fornos horizontais, embora os fornos horizontais ofereçam maior produtividade por um menor custo. Um forno horizontal possuindo quatro tubos de processamento térmico podia custar de 0,8 a 1 milhão de dólares no ano de 1998, enquanto apenas um forno vertical podia custar este valor [21]. Contudo, a razão do emprego dos fornos verticais esta fortemente vinculada a algumas vantagens que estes apresentam: melhor controle dos processos, maior controle do grau de pureza do ambiente de processo e maior capacidade de automação [21].

Em uma análise mais detalhada, também se observa que o gradiente térmico em fornos verticais é menor quando as lâminas são posicionadas paralelas ao plano horizontal, isto por que não há a presença da espátula na região onde as lâminas são processadas. Deve-se recordar que nos fornos horizontais as lâminas são carregadas por uma espátula que de certa forma representa uma carga térmica extra no processo, além de ser um obstáculo entre a parede do tubo e as lâminas. Nos fornos verticais existe uma espécie de pedestal de SiC, chamado de torre, que permite o carregamento centralizado das lâminas no tubo, podendo ser rotacionado e proporcionando um maior equilíbrio térmico e uniformidade do fluxo de gases. A Figura 4.5 ilustra a entrada de dois tubos de processos em fornos verticais. A Figura 4.5 (a) apresenta um conjunto de tubos e acessórios de quartzo e a Figura 4.5 (b) ilustra as lâminas de silício sendo inseridas em um tubo de quartzo carregadas por uma estrutura de SiC.



(a)



(b)

Figura 4.5. (a) Conjunto de resistores, tubo e acessórios de quartzo dispostos verticalmente e (b) imagem do carregamento de lâminas em um forno vertical [26].

Fornos como estes são usados geralmente para o processamento de lâminas com diâmetro entre 200 mm e 305 mm (8" e 12", respectivamente) e podem operar em faixas de temperatura de 140 °C até 1250 °C.

4.3. Fornos de Processamento Térmico Rápido

Fornos de processamento rápido, geralmente chamados de RTPs, são equipamentos que permitem um rápido ciclo térmico, mas de uma única lâmina por vez. Estes fornos são compostos por um sistema de refrigeração, um sistema de aquecimento por lâmpadas halógenas, um sistema de controle de temperatura e uma câmara de processamento térmico dotada de entrada e saída adequadas para permitir o fluxo de gases em seu interior. As câmaras de processamento podem ser de quartzo, aço inox ou alumínio e são resfriadas por água para manter uma baixa temperatura, sendo que o sistema do forno pode ser operado em pressão atmosférica ou reduzida. Alguns modelos desses fornos possuem o alojamento para dezenas de lâmpadas logo acima da câmara de processamento, onde as lâmpadas são arranjadas em uma estrutura de colméia com a finalidade de prover a maior uniformidade possível a radiação emitida que chega nas amostras. Também o suporte da lâmina pode ser fixo ou dotado de um sistema que permita a rotação da lâmina durante o processo. A rotação da lâmina evita variações de temperatura e do fluxo de gás resultando em um processo de melhor uniformidade [21].

A Figura 4.6 ilustra uma representação de um forno RTP indicando os seus principais componentes. Esta figura apresenta um forno de suporte fixo de lâminas com iluminação superior e inferior da câmara de processos. A Figura 4.7 apresenta um forno RTP utilizado no NT-Solar/PUCRS. Neste, a câmara de processamento é de alumínio e as paredes possuem sistema de refrigeração.

Dentre as vantagens apresentadas por estes fornos é válido citar que as perdas térmicas são minimizadas em função do baixo volume de processamento. Também, que o sistema de lâmpadas utilizado permite a redução do consumo de energia e a redução das rampas de aquecimento e resfriamento, o que deve ser cuidadosamente controlado para não produzir defeitos na lâmina por *stress* térmico.

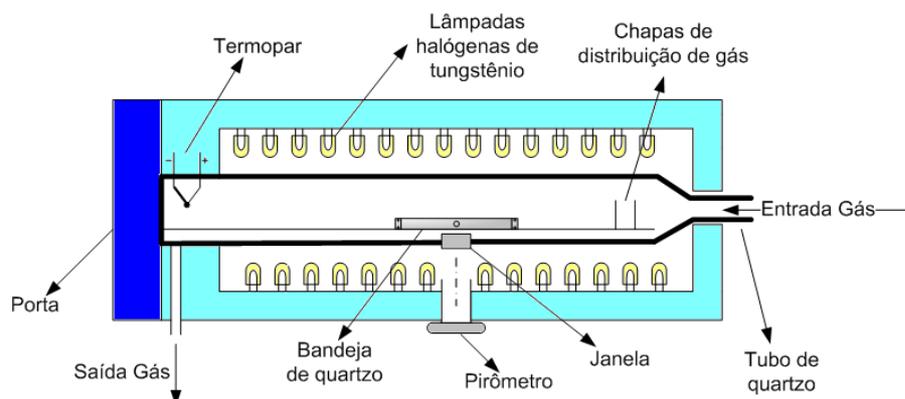


Figura 4.6. Representação de um forno RTP e seus principais componentes.



Figura 4.7. Forno RTP instalado no laboratório de difusão do NT-Solar/PUCRS.

Peters et al. [27] cita que a eficiência de células solares fabricadas com silício tipo fita (*ribbon*) que são submetidas a processos térmicos em fornos RTP apresentam parâmetros superiores em relação às células submetidas a processos térmicos em fornos convencionais. É mencionado que, durante processos convencionais a temperaturas inferiores a 900 °C, pode haver a precipitação do oxigênio dissolvido. Em contraste, por meio de processos térmicos rápidos a temperaturas acima de 900 °C existe a possibilidade de suprimir a formação deste defeito mantendo o oxigênio intersticialmente dissolvido.

Estes fornos permitem ciclos térmicos com temperaturas máximas superiores a 1100 °C com pequenas variações de temperatura, permitindo o aquecimento de uma lâmina da temperatura ambiente a 1100 °C em poucos segundos, com rampas típicas de 50 °C/s - 75 °C/s [21].

4.4. Fornos de Esteira

Os fornos de esteira (*belt furnace*) pertencem à família dos RTPs. A grande vantagem deste equipamento é a possibilidade de um processo térmico rápido de várias lâminas por ciclo. Estes fornos possuem uma esteira que permite com que as lâminas realizem o processo térmico em movimento. Desta forma, as lâminas são colocadas sobre uma esteira à temperatura ambiente e passam por uma câmara aquecida por lâmpadas que emitem na região da infravermelho e visível ou por resistores elétricos. As lâminas são resfriadas posteriormente e retiradas na outra extremidade do forno. Este tipo de forno recebe grande enfoque justamente pela capacidade que possui de tornar automatizado o processo térmico em uma linha de produção [28], [29]. Nota-se que o grau de pureza do ambiente de processamento é inferior aos que possuem uma câmara como um tubo de quartzo por exemplo. Estes fornos geralmente são empregados para a secagem das pastas e formação do contato metal-semicondutor na metalização por serigrafia [30].

A Figura 4.8 ilustra uma representação esquemática de um forno de esteira e a Figura 4.9 apresenta o forno de esteira instalado no Laboratório de Metais e Filmes do NT-Solar/PUCRS.

Em processos de difusão são utilizadas diferentes fontes de dopantes, como por exemplo, as pastas dopantes de fósforo já utilizadas a mais de 20 anos. As vantagens incluem a relativa facilidade de formação de emissores seletivos, devido à alta viscosidade do material. Por outro lado, durante a serigrafia aplica-se pressão nas lâminas, podendo aumentar o risco de quebra das mesmas. Além disso, o material contém constituintes orgânicos que queimam e evaporam durante os passos de secagem e difusão, sendo um problema em potencial a possibilidade de que resíduos orgânicos sofram forte adesão à superfície de silício durante o tratamento de difusão e que continuem presentes na superfície mesmo após a limpeza posterior ao passo de difusão [31]. A dopagem por este processo térmico é bastante uniforme entre as lâminas, uma vez que todas passam pelo mesmo perfil de temperatura durante o ciclo [21].

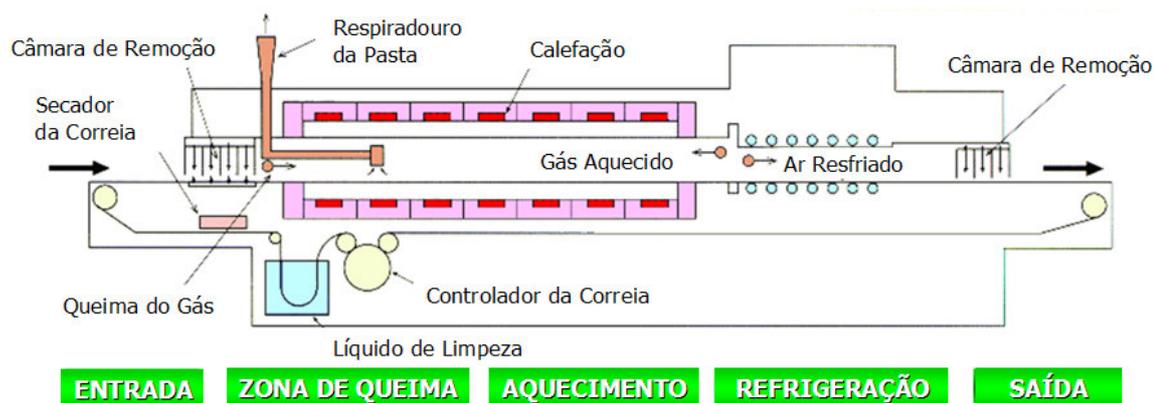


Figura 4.8. Representação esquemática de um forno de esteira.



Figura 4.9. Forno de esteira instalado no Laboratório de Metais e Filmes do NT-Solar/PUCRS.

De acordo com Goris et al. [3], o processo de difusão do emissor por um forno de esteira pode ser melhorado de forma a competir com os resultados de emissores difundidos em um sistema convencional por POCl_3 . Desta forma células solares com difusão de emissores realizada em fornos convencionais ou em fornos de esteira teriam características elétricas comparáveis. Contudo, uma vantagem importante da difusão em fornos de esteira seria que células fabricadas com lâminas da base do lingote, tendo tempo de vida de minoritários pequeno, seriam comparáveis em eficiência à células fabricadas com lâminas do meio e do topo do lingote. Em um estudo comparativo, Goris et al. [3] apresentam o valor médio de $45 \Omega/\square$ - $50 \Omega/\square$ de resistência de folha para dopagem n^+ em lâminas processadas em

fornos convencionais com POCl_3 e as faixas de $50 \Omega/\square$ - $55 \Omega/\square$ e $45 \Omega/\square$ - $50 \Omega/\square$ para dois experimentos distintos realizados em fornos de esteira. A partir dos resultados da medição de tempo de vida dos portadores minoritários, observou-se que as lâminas processadas em fornos convencionais apresentaram tempo de vida de minoritários ligeiramente superior. Entretanto, para as lâminas selecionadas da base do lingote, o tempo de vida foi de 5 a 9 μs para os emissores difundidos em fornos de esteira e cerca de 1 μs para os emissores difundidos por POCl_3 . Com isso espera-se que células solares processadas com lâminas da base do lingote e difundidas em forno de esteira sejam muito melhores que as células correspondentes difundidas em fornos convencionais. Em relação à eficiência das células se observou neste estudo que um processo convencional atinge um valor médio de 15,2 % ao passo que um processo em um forno de esteira atinge um valor médio de 14,4 %, utilizando lâminas de qualidade padrão (meio e topo do lingote). Já utilizando lâminas da base do lingote, de baixa qualidade, em um processo convencional a eficiência média foi de 9,6 %, e em um processo em forno de esteira a eficiência atingiu 13,2 %.

Ebong et al. [32] apresentam um estudo comparativo entre o uso de fornos convencionais e fornos de esteira utilizando lâminas de silício de diferentes tipos para o processo de fabricação por serigrafia. Neste estudo dois métodos de formação de emissores foram analisados para o processo de difusão em fornos de esteira. No primeiro, fósforo foi depositado por *spin-on* em um dos lados da lâmina e o lado posterior da mesma ficou em contato direto com a esteira do forno. No segundo método, fósforo foi depositado em ambas as faces da lâmina, sendo que o lado posterior foi dopado com óxido de fósforo para proteger a lâmina do contato direto com a esteira. Estes dois métodos juntamente com a formação de emissores em fornos convencionais utilizando POCl_3 foram aplicados para avaliar o impacto da contaminação da esteira sobre o desempenho das células solares.

O estudo mostrou que as células solares fabricadas em fornos de esteira com a deposição de fósforo em apenas um dos lados apresentaram perdas de 1 % a 2 % na eficiência quando comparadas à células com emissores formados por POCl_3 . Segundo os autores, estas perdas podem ser compensadas ao se aplicar um

elevado grau de fósforo em ambos os lados da lâmina. De forma que, utilizando esta técnica, as lâminas com emissores formados em fornos de esteira diferem daquelas processadas em fornos convencionais devido aos baixos valores de fator de forma e tensão de circuito aberto resultantes. Estas ocorrências se justificam pelos emissores relativamente rasos formados nos processos em fornos de esteira. Medições de tempo de vida e eficiência quântica interna indicaram significativa contaminação proveniente da esteira, o que foi mais acentuado em lâminas FZ que possuíam inicialmente valores de tempo de vida superiores a $200 \mu\text{s}$. A partir dos resultados obtidos o autor presumiu que o baixo desempenho observado em muitos processos comerciais de fabricação de células solares, em que normalmente há a deposição de fósforo em apenas um dos lados, ocorre devido à contaminação da esteira. No entanto, os resultados sugerem que a deposição de fósforo em ambos os lados por *spin-on* ou *spray-on* pode eliminar esta perda em eficiência resultante da contaminação. O emissor pouco profundo formado pela difusão em fornos de esteira, com adição de fósforo em ambos os lados da lâmina, produz em geral maiores correntes de curto-circuito que as resultantes dos demais processos. No entanto, a maior profundidade da junção em células com emissores formados por POCl_3 resulta em uma maior tensão de circuito aberto e fator de forma. Este estudo concluiu que a eficiência de células solares dopadas em forno de esteira podem vir a apresentar valores de eficiência muito próximos ao de células com emissores formados por POCl_3 , como mostra a Figura 4.10.

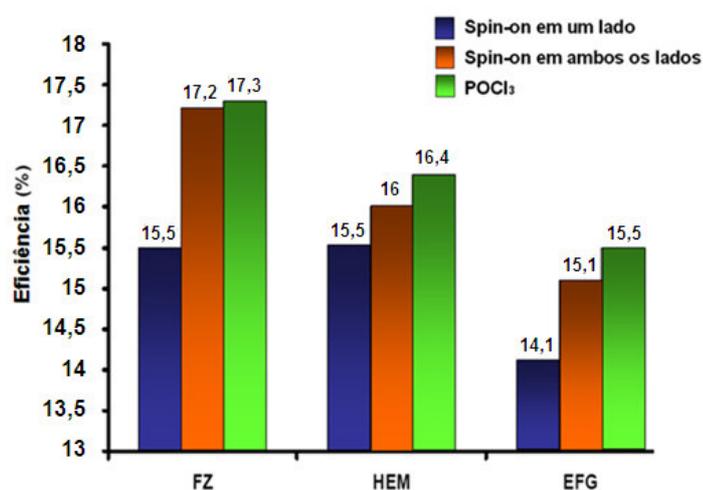


Figura 4.10. Eficiência da célula solar em função do material e tipo de emissor [32].

Os materiais utilizados neste estudo e citados no eixo "x" do gráfico apresentado na Figura 4.10 foram os seguintes: silício FZ, silício multicristalino fabricado pelo método HEM (*heat exchange method*) e silício tipo fita obtido por EFG (*edge defined film fed growth*).

4.5. Aspectos Relevantes no Funcionamento de Fornos Convencionais

Uma vez que o enfoque principal deste trabalho é o desenvolvimento de um forno convencional, este tópico trata de abordar alguns pontos de alta relevância na estrutura e funcionamento de fornos deste tipo.

4.5.1. Componentes e Funcionamento da Câmara de Processamento

O tubo ou câmara de processamento é aquecido por um conjunto de resistores elétricos dispostos no formato de espiras. Geralmente com isto se distribui o controle da temperatura em três regiões, as quais vêm a definir as três zonas de aquecimento do forno. Em língua inglesa estas três regiões são mais conhecidas como *load*, *center* e *source*. A Figura 4.11 apresenta um sistema de aquecimento formado pelo conjunto de resistores elétricos e o isolamento térmico, sendo que estão indicadas nesta imagem as regiões de aquecimento descritas para o tubo de processamento. Desse modo, tem-se uma zona de aquecimento na região de carregamento do forno (*load*), denominada assim por ser a região de entrada das lâminas. Há outra região centralizada em relação ao conjunto de resistores (*center*), sendo esta a região tida como zona de processamento propriamente dita. E por fim, há uma terceira região responsável pelo aquecimento da parte posterior do tubo (*source*), por onde são injetados os gases e dopantes.

Uma característica relevante nestes fornos é o comprimento da ZP, região que corresponde à faixa, no sentido longitudinal do tubo, onde deve ocorrer uma variação mínima de temperatura, podendo então esta ser tida como uniforme em termos de processamento térmico. Esta zona é de suma importância para o equipamento uma vez que corresponde a região do tubo onde as lâminas de silício serão posicionadas para o processamento. Geralmente esta zona está localizada na

região central do conjunto de resistores elétricos. A ZP é afetada principalmente por fatores como as dimensões do tubo, o sistema de aquecimento e o sistema de isolamento térmico aplicado.

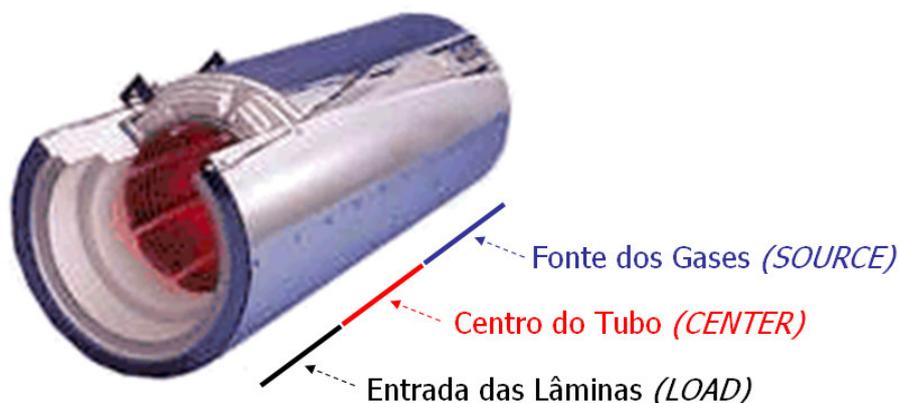


Figura 4.11. Conjunto de resistores elétricos envolto por camada de isolamento térmico com a indicação das zonas de aquecimento.

Outro aspecto importante a ser determinado por meio de ensaios de caracterização térmica longitudinal é a definição dos valores a serem programados nos controladores do conjunto de resistores elétricos. Estes valores devem ser definidos para cada uma das três zonas de aquecimento, a fim de ajustar a temperatura desejada no interior do tubo com o maior comprimento de ZP possível. Sabe-se que nas extremidades do tubo de processamento as perdas de temperaturas serão maiores, exigindo mais potência destas zonas de aquecimento. O que comumente ocorre na programação destes fornos é que para se atingir uma determinada temperatura na ZP deve-se ajustar nos controladores valores próximos, mas diferentes do desejado, sendo que a relação entre estes valores varia para cada forno [33].

Kiyose [34] apresenta um método patenteado para a difusão uniforme de impurezas em lâminas de materiais semicondutores. O autor justifica que em processos normais de difusão a temperatura da região central do forno é regulada para formar uma zona uniforme de temperatura e, por conseguinte, as zonas frontal e posterior apenas formam barreiras para manter a zona central estável. Desta maneira há um decréscimo na quantidade de impurezas depositadas nas lâminas no

sentido do lado posterior (entrada dos gases) para o lado frontal do tubo. A metodologia proposta é a de aplicar um gradiente de temperatura na zona central da câmara de processamento, estabelecendo uma temperatura x para a região posterior e uma temperatura x' para a região frontal do tubo, sendo que $x' > x$. A formação deste ΔT promove um carregamento das impurezas ao longo do tubo proporcionando uma difusão uniforme a todas as lâminas posicionadas na região central do tubo. Este esquema é apresentado na Figura 4.12, indicando também os principais componentes do processo de difusão.

Os itens descritos na Figura 4.12 correspondem a: 1) tubo de processamento; 2) conjunto de resistores posterior; 3) conjunto de resistores central; 4) conjunto de resistores frontal; 5) suporte; 6) lâminas de silício; 7) fonte líquida de dopante; 8) cilindro de N_2 ; 9) cilindro de O_2 e 10) tubulação de gás.

Em um exemplo onde a temperatura da zona central é ajustada em $900\text{ }^\circ\text{C}$ é possível visualizar nas Figuras 4.13 e 4.14 as faixas de temperaturas necessárias para as zonas frontal e posterior, a fim de que este conjunto de ajustes proporcione valores uniformes de resistência de folha a todas as lâminas processadas.

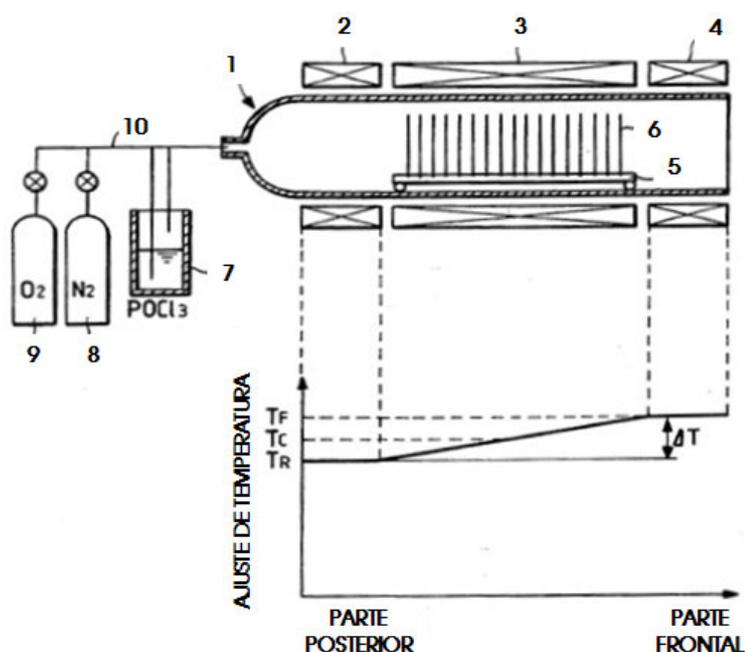


Figura 4.12. Indicação de temperaturas aplicadas a um determinado tubo de processamento para um método de difusão em particular [34].

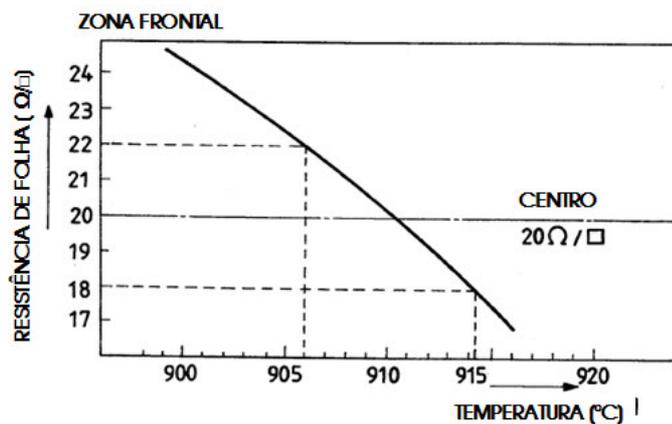


Figura 4.13. Relação da resistência de folha em função da temperatura para a zona frontal do tubo [34].

Dentre as peças de quartzo, o tubo de processamento é uma das peças mais importantes. Os tubos possuem uma de suas extremidades aberta e a outra dotada de conexões próprias para a entrada dos gases, conforme apresenta a Figura 4.15.

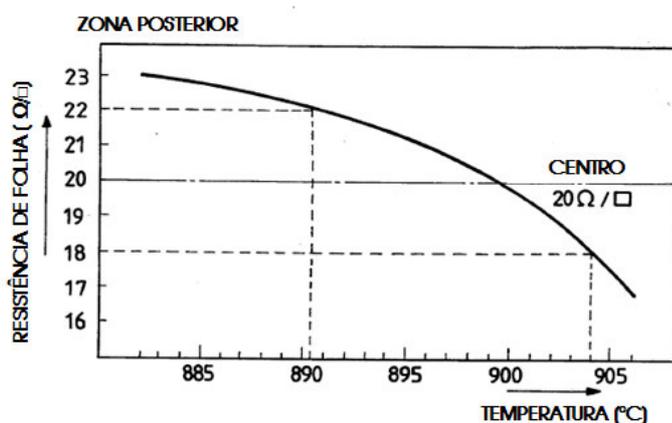


Figura 4.14. Relação da resistência de folha em função da temperatura para a zona posterior do tubo [34].



(a)



(b)

Figura 4.15. Tubo de SiC onde (a) representa a extremidade por onde são inseridas as lâminas e (b) a extremidade oposta por onde são inseridos os gases.

Pode haver ainda uma classificação em relação aos tubos de acordo com a pressão interna requerida em cada processo. Os tubos podem ser classificados como operantes em pressão atmosférica, baixas pressões ou altas pressões. Os fornos que trabalham em pressão atmosférica são os mais amplamente utilizados, tanto em processos de difusão quanto oxidação. Já os sistemas que operam em baixas pressões são principalmente empregados em processos de deposição química de vapor (CVD - *chemical vapour deposition*) [21].

Além do tubo, outras peças de quartzo ou SiC são utilizadas na composição destes fornos. Peças que tem contato direto com as extremidades do tubo, tanto no sistema de carregamento das lâminas como na fonte de gases, sendo geralmente confeccionadas em materiais cerâmicos. A Figura 4.16 (a) apresenta uma espátula de SiC com um suporte posicionado sobre ela, e a Figura 4.16 (b) ilustra um suporte, também fabricado em SiC, carregando uma lâmina de silício.



(a)



(b)

Figura 4.16. (a) Espátula de SiC e (b) suporte de SiC [35].

O mecanismo de carregamento em fornos deste tipo, quanto automatizado, permite que as lâminas sejam introduzidas no tubo de processamento sob um controle integrado de velocidade e posicionamento. A Figura 4.17 ilustra um modelo destes mecanismos que utiliza uma espátula cerâmica para levar as lâminas ao interior do forno. Neste mecanismo a espátula é fixada em um suporte móvel que se desloca horizontalmente sobre um trilho.

O módulo de carregamento é geralmente alojado em uma estrutura de tamanho similar à que comporta os tubos de processamento térmico. Desta forma, o

comprimento do trilho deve permitir que a espátula seja totalmente removida ao exterior do tubo para o carregamento e posterior retirada das lâminas.

As espátulas de SiC têm uma utilização muito difundida na composição de sistemas de carregamento em fornos convencionais. Entretanto, outras ferramentas são também utilizadas para tal finalidade, como é o caso das hastes de alumina apresentadas na Figura 4.18. Em geral, estas hastes são colocadas em bainhas de quartzo para evitar a contaminação do interior da câmara de processamento. A Figura 4.19 ilustra o sistema de fixação destas hastes, o qual se mostra um tanto mais complexo que o sistema de fixação de espátulas de SiC.

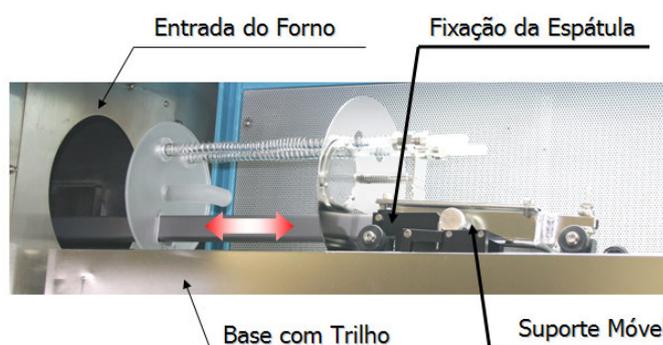


Figura 4.17. Ilustração de um mecanismo de carregamento de lâminas em um forno horizontal.



Figura 4.18. Ilustração de um mecanismo de carregamento de lâminas em um forno horizontal utilizando hastes de alumina.

Em geral, nos módulos de carregamento destes fornos existe um sistema de fluxo laminar incorporado ao mesmo. Sua função é tornar a região de entrada e saída das lâminas livre de partículas contaminantes, por meio da ação de uma cortina de ar atuante neste espaço. O módulo de fluxo laminar pode estar disposto tanto na horizontal quanto na vertical. A Figura 4.20 apresenta o exemplo de um

módulo de fluxo laminar instalado em um forno convencional com quatro tubos, onde as regiões marcadas correspondem à saída do ar no sentido horizontal.



Figura 4.19. Detalhe do sistema de fixação das hastes do mecanismo apresentado na Figura 4.18.



Figura 4.20. Indicação do sistema de fluxo laminar em um módulo de carregamento.

4.5.2. Sistema de Fluxo de Gases

Os fornos convencionais de difusão geralmente possuem um módulo próprio para o sistema de controle do fluxo de gases e também para o armazenamento adequado da fonte de dopante, neste caso o POCl_3 . Este módulo é comumente chamado de armário de gases e a Figura 4.21 ilustra uma configuração básica desta estrutura. A sigla MFCs (*mass flow controller*) indicada na figura se refere aos controladores de vazão mássica, equipamentos que serão abordados novamente no decorrer deste capítulo.

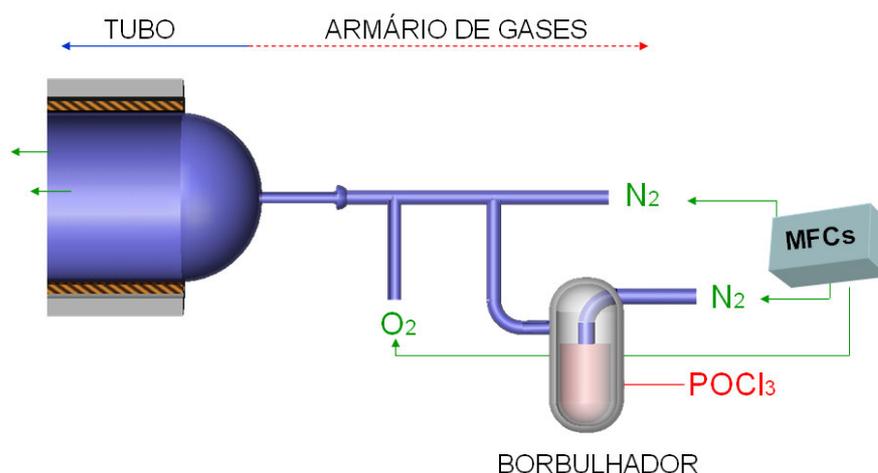


Figura 4.21. Esquema simplificado da entrada de gases e dopante no tubo de processamento.

Em tal representação existem dois pontos de entrada para o gás N₂, um próprio para altas vazões, sendo responsável pela troca de volume deste gás no interior do tubo, e outro voltado para vazões relativamente inferiores. O fluxo de N₂ em vazões menores destina-se ao transporte do dopante para o tubo de processamento de forma que este gás passa previamente pelo recipiente onde se encontra o POCl₃ a uma temperatura controlada. Com a finalidade de proteger a superfície do silício e facilitar a decomposição do POCl₃ em P₂O₅, são adicionadas pequenas quantidades de O₂ à câmara de difusão [36]. Para tanto, há um ponto de acesso específico para o gás O₂ em baixas vazões. É comum que nestes fornos sejam realizados também processos de oxidação nas lâminas de silício. Neste caso, adiciona-se uma fonte de O₂ que permita maiores vazões deste gás no tubo de processamento [36].

Heynes et al. [37] apresenta uma configuração experimental onde os gases N₂ e O₂ podem ser utilizados para preencher o volume do tubo, assim como ambos podem ser empregados como transportadores de POCl₃. Na indústria atual de células solares o gás transportador é o N₂.

O controle das vazões em fornos convencionais é geralmente realizado com o uso de equipamentos como os controladores de vazão mássica. Nestes sistemas, a definição do fluxo de gases vem a determinar variáveis de processos como a

quantidade de dopante a ser inserida no interior da câmara de processamento e o tempo de troca de volume no tubo. O fluxo dos gases é medido e controlado pelos MFCs, de forma que se faz relevante a definição do tipo e a capacidade destes equipamentos, os quais devem estar adequados às dimensões da câmara de processamento e à capacidade do forno.

Existem distintos tipos de medidores de vazão, que ao serem acrescidos de uma válvula e um comando apropriado tornam-se, além de medidores, também controladores de vazão. Em fornos convencionais de difusão geralmente são utilizados os controladores de vazão mássica térmicos, os quais possuem um sensor capaz de determinar diretamente a vazão mássica por meio da medição de temperatura do fluido. Desta forma, a diferença de temperatura medida antes e após a passagem do fluido por uma zona de aquecimento é tida como proporcional à vazão mássica. A Figura 4.22 mostra a vista em corte de um MFC típico e alguns detalhes do mesmo são ilustrados na Figura 4.23.

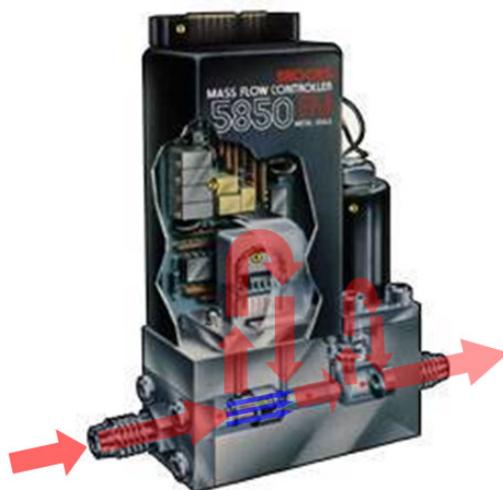


Figura 4.22. Vista em corte de um MFC [38].

Além de apresentar uma precisão bastante superior aos rotâmetros (medidores de área variável), o uso destes equipamentos ainda é preferencial frente aos controladores de vazão mássica que utilizam o princípio de Coriolis, uma vez que apresentam um custo relativamente inferior e não há restrições para o uso em baixas vazões de gases.

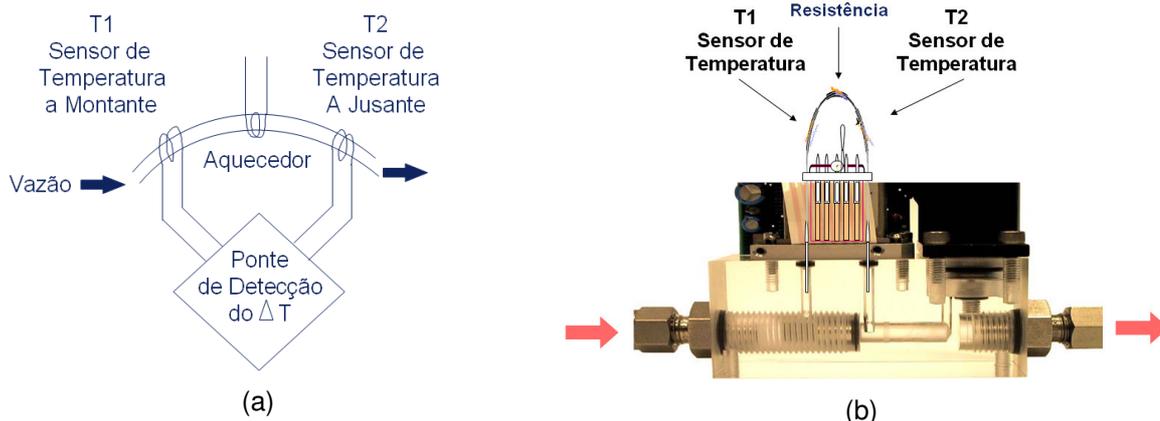


Figura 4.23. (a) Representação sistemática do funcionamento do sensor térmico de vazão mássica e (b) imagem do sensor instalado em um MFC [38].

Os MFCs Coriolis correspondem à uma linha de controladores de vazão relativamente recente e apresentam alguns aspectos bastante positivos, uma vez que não dependem dos processos ou fluidos, não necessitam de calibrações periódicas e garantem medições com alta precisão, independentemente da viscosidade, densidade, temperatura ou pressão do fluido [39]. Estes equipamentos utilizam um sensor que geralmente adota o formato de "U", o qual é submetido a vibrações. Desta forma, a frequência das vibrações é proporcional à massa do tubo e, portanto, à densidade do fluido contido nele. A amplitude da deflexão resultante, por sua vez, é proporcional à vazão mássica. Uma ilustração deste sensor é apresentada na Figura 4.24.

Ao contrário dos MFCs que utilizam o princípio térmico, nos MFCs Coriolis toda a massa do fluxo é analisada enquanto passa através do sensor. Desta forma, surge uma limitação para as vazões de gases muito pequenas, uma vez que estas podem não ser suficientes para causar interferência na vibração do sensor.

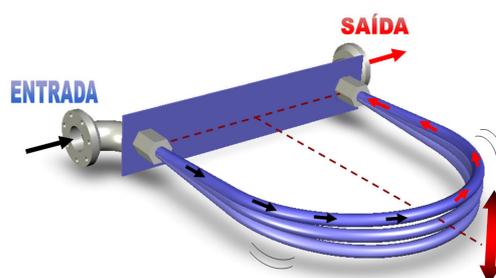


Figura 4.24. Representação do sensor utilizado em MFCs Coriolis.

Os controladores de vazão mássica térmicos têm sido largamente utilizados em aplicações com gases que necessitem baixa incerteza na medição de vazão, mas ressalta-se que esta incerteza é fortemente dependente de que as condições de vazão sejam conhecidas e permaneçam estáveis. Além disto, estes instrumentos são susceptíveis a variações no processo em função de fatores como: temperatura, densidade, pressão ou composição do fluido [39].

Atualmente, MFCs térmicos com controle digital estão gradativamente substituindo os MFCs térmicos analógicos em aplicações que requerem maior versatilidade e um grau de controle superior, sendo equipamentos ideais para aplicações com gases. Mas independente do tipo de MFC térmico a ser empregado, deve-se dimensionar sua capacidade de acordo com a aplicação proposta.

4.5.3. Dopagem com POCl_3

A Figura 4.25 apresenta os principais parâmetros a serem considerados para a definição das capacidades dos controladores de vazão, de forma que sejam adequados aos processos de oxidação e difusão de fósforo por POCl_3 .

De acordo com o diagrama ilustrado na Figura 4.25, o primeiro parâmetro a ser calculado é a vazão de N_2 , gás que é considerado inerte em processos de difusão de fósforo e oxidação em lâminas de silício. Estabelecendo-se a geometria e as dimensões da câmara de processamento térmico, determina-se a vazão máxima de N_2 em função do tempo de troca de volume requerido, conforme a Equação 4.1, sendo os termos desta equação descritos no Quadro 4.1.

$$Q_{N_2} = \frac{V_T}{T_V} \quad (4.1)$$

A quantidade de O_2 presente no fluxo total de um processo de difusão é definida como uma porcentagem do fluxo de N_2 considerado. Assim, a vazão de O_2 necessária ao processo pode ser expressa pela Equação 4.2.

$$Q_{O_2} = Q_{N_2} \frac{O_2}{100} \quad (4.2)$$

onde Q_{O_2} representa a vazão do gás O_2 .

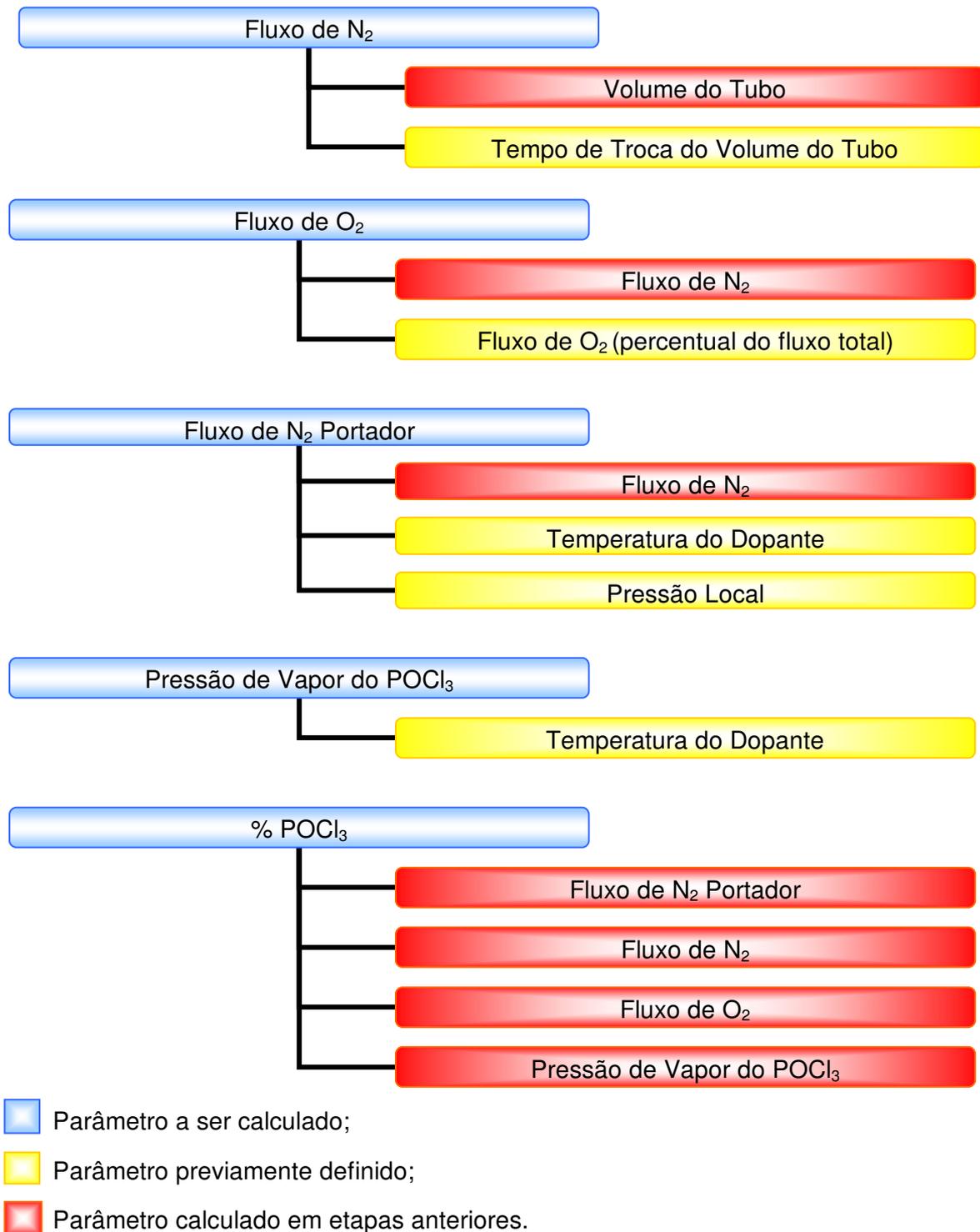


Figura 4.25. Diagrama para definição de parâmetros para processos de difusão com $POCl_3$.

Quadro 4.1. Parâmetros e unidades de medida da Equação 4.1.

Símbolo	Descrição	Unidade
QN_2	Vazão de N_2	m^3/s
V_T	Volume do tubo	m^3
T_V	Tempo de troca do volume do tubo	s

Existem diferentes caminhos para controlar a quantidade de átomos de fósforo que se difundem nos substratos de silício, como por exemplo: modificar a concentração de $POCl_3$, a concentração de O_2 , a temperatura do forno e o tempo de difusão. Para modificar a concentração de $POCl_3$ deve-se regular o fluxo de N_2 que passa pelo líquido dopante ou agir sobre a pressão de vapor do dopante por meio do controle de temperatura [40].

A pressão de vapor do $POCl_3$ (P_{V-POCl_3}) é definida por meio da Equação 4.3 para uma faixa de 2 °C a 50 °C [40], sendo portanto função da temperatura em que o dopante se encontra no borbulhador (T_B). Nesta equação o valor da pressão é obtido na unidade Torr e a temperatura deve estar expressa em °C.

$$\log P_{V-POCl_3} = 0,9476 + 0,02638T_B - 8,81 \times 10^{-5} T_B^2 \quad (4.3)$$

O gás portador (N_2) deve passar pelo borbulhador e "carregar" o dopante em uma determinada quantidade para o interior da câmara de difusão. Assim, a vazão deste gás portador pode ser estimada para se obter uma certa porcentagem de $POCl_3$ a ser aplicada ao processo de difusão por meio da equação [40].

$$Q_{N_2,p}(P_V / 760) = (\%POCl_3 / 100)Q_T \quad (4.4)$$

Onde $Q_{N_2,p}$ representa a vazão do gás portador e Q_T representa a quantidade total de gás a ser inserida no tubo de processamento.

5. PROJETO E MONTAGEM DE UM FORNO CONVENCIONAL PARA PROCESSAMENTO DE CÉLULAS SOLARES

O projeto e as seqüentes etapas de montagem do forno foram estruturadas conforme apresenta o diagrama da Figura 5.1.

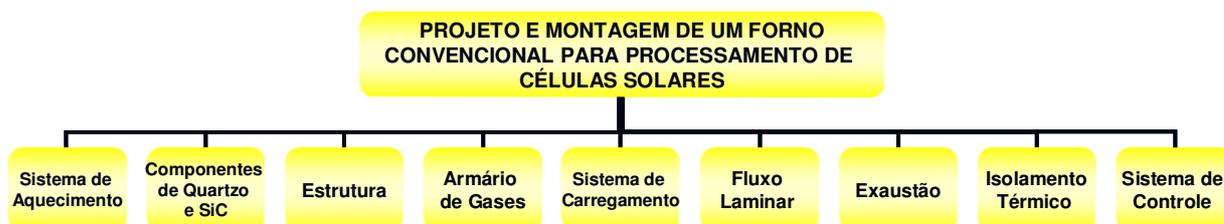


Figura 5.1. Diagrama da estrutura de metas físicas das etapas de projeto e montagem do forno.

5.1. Sistema de Aquecimento

O sistema de aquecimento do forno foi desenvolvido e fabricado em parceria com a empresa interveniente no projeto financiador desta pesquisa (Convênio FINEP/ PUCRS de número 01.06.1069.00 e Ref. 3374-06), a Irmãos Sanchis Ltda. Este sistema é basicamente composto por um conjunto de resistores elétricos ligado a uma unidade de alimentação e controle. O projeto deste conjunto envolveu principalmente alguns fatores pré-definidos, tais como, ter a capacidade de operar com uma temperatura nominal de até 1000 °C, dispor de uma zona plana com pelo menos 500 mm e estar dimensionado adequadamente para o processamento de lâminas de silício quadradas com aresta de até 150 mm.

O projeto inicial do conjunto de resistores partiu de um conceito usualmente aplicado em fornos convencionais de difusão, conforme mostra a Figura 5.2. Em linhas gerais, um ou mais resistores são montados em forma helicoidal em uma

estrutura tubular com paredes preenchidas por materiais com propriedades de isolante térmico. Utilizam-se flanges nas extremidades do conjunto para complementar o isolamento térmico nestas regiões, minimizando assim os efeitos de transferência de calor nestas regiões.

Mantendo o mesmo princípio descrito acima, adotou-se a forma apresentada na Figura 5.3 para a fabricação desta peça. A estrutura externa com seção quadrada propicia um maior isolamento térmico e por conseqüência menores perdas de calor para o meio externo. Em contrapartida, isto significa rampas de resfriamento mais lentas durante os processos.

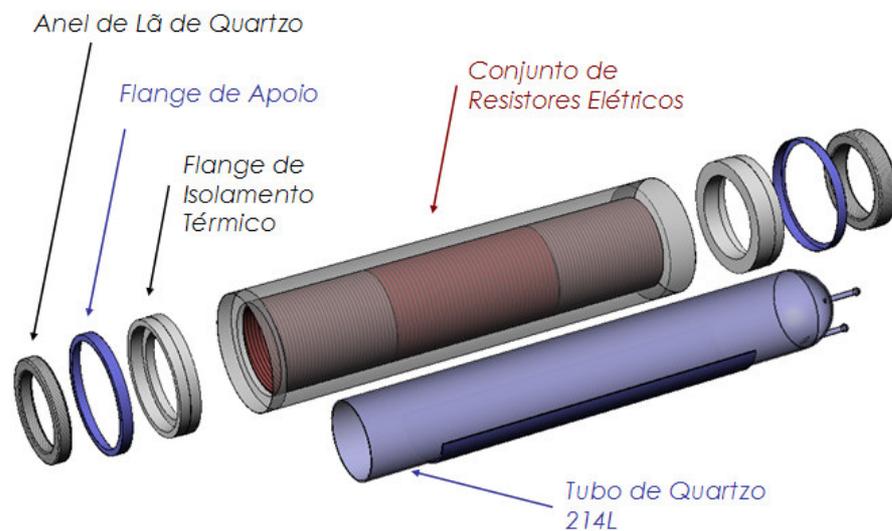


Figura 5.2. Desenho inicial do conjunto de resistores elétricos e o desenho do tubo de quartzo, que caracteriza a câmara de processamento.

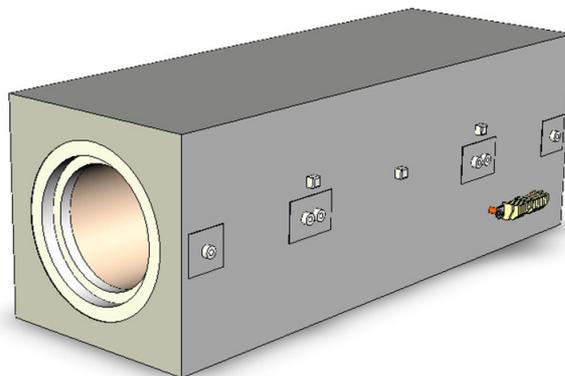


Figura 5.3. Desenho do conjunto de resistores elétricos do sistema de aquecimento.

Para a montagem dos resistores em forma helicoidal foram fabricados espaçadores cerâmicos, mostrados na Figura 5.4 (a), e com o uso de um tubo como molde, o fio de resistência (Kanthal A1) pôde ser conformado nesta geometria, como mostra a Figura 5.4 (b). Após a montagem das três zonas, todo o conjunto foi recoberto por camadas sinterizadas de massa de fibra cerâmica composta por 99 % de alumina e sílica. O resultado final desta etapa pode ser visto na Figura 5.5, na qual é possível identificar as extremidades de cada resistor que se mostram salientes a camada de massa cerâmica. Por fim, todo este conjunto é montado em uma estrutura metálica fabricada em aço inoxidável com flanges cerâmicos em ambas as extremidades, conforme apresenta a Figura 5.6.

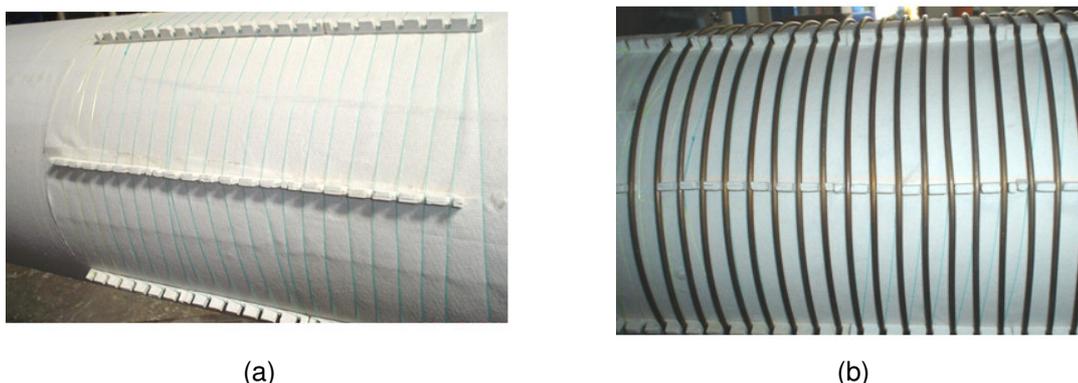


Figura 5.4. (a) Posicionamento dos espaçadores cerâmicos e (b) montagem do resistor de uma das zonas de aquecimento.



Figura 5.5. Conjunto de resistores recoberto por camadas de pasta cerâmica.

Para a obtenção de uma zona plana de 500 mm, um conjunto de três resistores permite a formação de três zonas de aquecimento distintas, conforme mostra a Figura 5.7. As zonas 1 e 3 são zonas de estabilização, ou seja, têm a

função de facilitar o surgimento de uma região com homogeneidade da temperatura na zona central, a zona 2. As zonas 1 e 3 são alimentadas com uma tensão de 110 V, permitindo um ajuste de até 46 A na corrente elétrica, o que implica em uma potência máxima de 5 kW em cada zona. Por sua vez, a zona 2 é alimentada com uma tensão de 220 V e permite um ajuste de até 50 A na corrente elétrica, correspondendo a uma potência máxima de 11 kW.



Figura 5.6. Detalhe de uma das extremidades da carcaça do conjunto de resistores salientando o flange cerâmico.

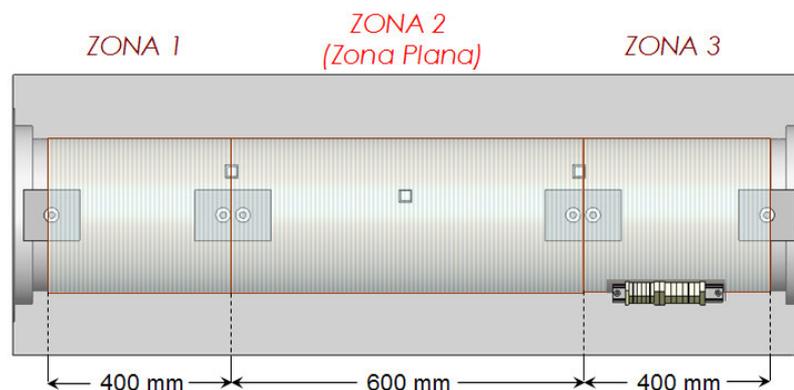


Figura 5.7. Zonas de aquecimento formadas pelo conjunto de resistores elétricos.

O controle da temperatura é realizado com o uso de três controladores (ou contadores), que operam em resposta a leitura de três termopares tipo S posicionados, longitudinalmente, no centro e extremidades da zona 2. A junta quente destes termopares está posicionada de forma a tocar a parede externa do tubo de quartzo, sendo este o ponto de referência radial aplicado neste sistema de

controle. Os controladores que recebem informações dos termopares das extremidades atuam como escravos do controlador central estando vinculados ao PID (proporcional - integral - derivativo) definido para este. Desta forma, o valor de temperatura desejado deve ser ajustado apenas no controlador central e os demais são acionados de forma automática. A Figura 5.8 permite a visualização do funcionamento independente das três zonas de aquecimento, onde em (a) apenas a zona 2 está ativada e em (b) apenas as zonas 1 e 3 estão ativadas.

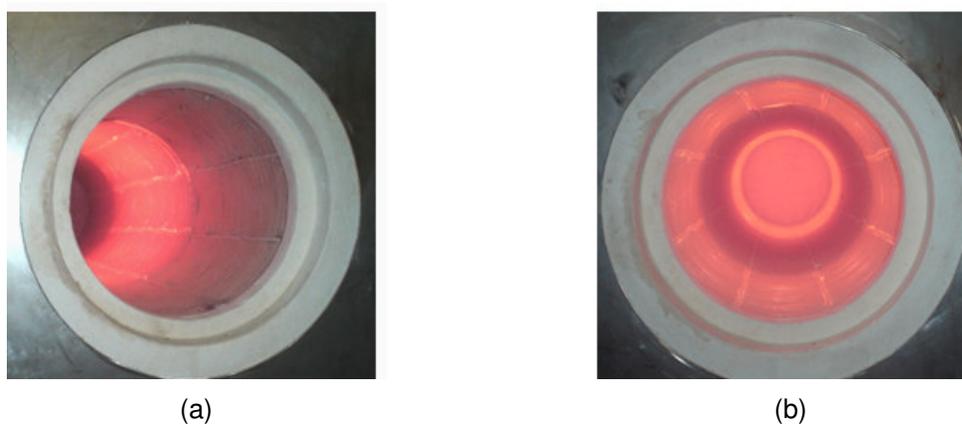


Figura 5.8. (a) Zona 2 em funcionamento e (b) zonas 1 e 3 em funcionamento.

O conjunto completo do sistema de aquecimento pode ser visualizado na Figura 5.9 (a), onde a esquerda está a câmara de aquecimento propriamente dita e a direita está a caixa de comando na qual estão instalados os componentes de alimentação e controle. Estes componentes, relés de estado sólido, fusíveis e controladores podem ser visualizados na Figura 5.9 (b).



Figura 5.9. (a) Conjunto completo do sistema de aquecimento e (b) interior da caixa de comando.

5.2. Componentes de Quartzo e SiC

5.2.1. Materiais Utilizados

A realização de processos térmicos em lâminas de silício para a fabricação de células solares, principalmente dos processos de difusão e oxidação, requer um ambiente de alta pureza e livre de contaminantes indesejados para ser bem sucedida. Na indústria fotovoltaica, o quartzo e o SiC são materiais amplamente utilizados como componentes em fornos de difusão.

O quartzo é uma das muitas variações da sílica vítrea, que é o termo genérico utilizado para descrever todos os tipos de vidro fabricados a partir do dióxido de silício. A sílica natural (areia ou rocha) fundida corresponde à fonte do material chamado simplesmente de quartzo fundido [41]. Em termos de estrutura cristalina, pode-se considerar que quando todos os oxigênios dos vértices dos tetraedros são compartilhados por tetraedros adjacentes, resulta em uma rede tridimensional de tetraedros de SiO_4^{4-} . O quartzo é uma das principais formas polimórficas resultantes [42]. Estruturas da rede cristalina formada por sua estrutura são apresentadas na Figura 5.10.

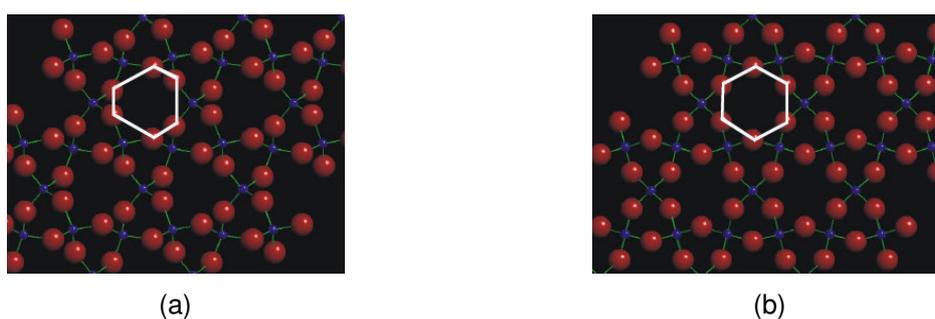


Figura 5.10. (a) Rede cristalina do quartzo α e (b) do quartzo β [42].

O desempenho da maioria de produtos de quartzo fundido é estreitamente relacionado à pureza do material. Desta forma os processos de fabricação são monitorados e controlados a fim de serem obtidos produtos com uma quantidade de impurezas inferior a 50 ppm por peso. A condutividade elétrica do quartzo é da ordem de $10^{-8} (\Omega\text{m})^{-1}$, de forma que este material apresenta ótimas características

como isolante. Em termos de propriedades mecânicas, o quartzo se assemelha muito aos vidros comuns, sendo um material extremamente resistente a compressão e muito afetado por falhas superficiais. Em linhas gerais, o quartzo é um material impermeável a maioria dos gases, mas em alguns casos gases como o hélio e o nitrogênio podem ser difundidos através do mesmo, fator que é crescente com o aumento da temperatura [41].

No âmbito da indústria de semicondutores uma combinação de alta pureza e excelentes propriedades sob altas temperaturas fazem do quartzo fundido um material ideal para a composição da câmara de processamento térmico de lâminas de silício em fornos de difusão. Atualmente, o quartzo oferecido no mercado apresenta níveis de contaminação abaixo de 25 ppm, com níveis de alcalóides abaixo de 1 ppm [41].

O carbeto de silício por sua vez, está dentre os importantes compostos que apresentam a estrutura cristalina do diamante [43]. Esta estrutura pode ser visualizada na Figura 5.11.

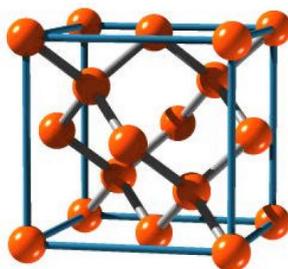
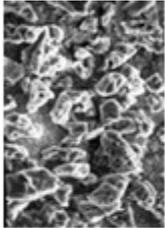
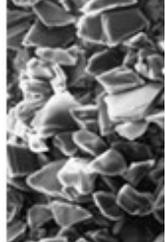


Figura 5.11. Estrutura cristalina do diamante [44].

Em geral, aparatos de SiC para atender a indústria de semicondutores são fabricados por meio da moldagem de SiC (fase alfa), sendo que posteriormente silício é depositado no material para proporcionar uma porosidade próxima de 0 %. Em alguns casos SiC beta é adicionado como revestimento por meio da técnica de CVD. Observa-se, então, em uma análise comparativa que o nível de impurezas verificado em SiC alfa com silício depositado é superior a 20 ppm e, em contrapartida, com a aplicação do revestimento por CVD este nível se encontra

abaixo de 1 ppm. O quadro 5.1 apresenta algumas características do SiC alfa e beta.

Quadro 5.1. Características do SiC alfa e beta [45].

Tipo	Características	Aparência
<p>SiC Beta</p>	<p>Apresenta estrutura cúbica e alta resistência ao desgaste, sendo altamente sinterizável. Possui formas porosas arredondadas.</p>	
<p>SiC Alfa</p>	<p>Apresenta estrutura hexagonal, cristais relativamente grandes, sendo mais duro que o SiC na fase beta. É altamente sinterizável e apresenta formas pontiagudas.</p>	

Ambos materiais, quartzo e SiC, quando utilizados na composição da câmara de processamento garantem a pureza adequada e apresentam altos níveis de estabilidade durante os ciclos térmicos. Entretanto, existem algumas diferenças significativas quanto à aplicação destes materiais. O SiC apresenta um excelente comportamento frente a produtos químicos como hidrocloreídricos, hidrofluorídricos e ácido nítrico, assegurando a característica de alta estabilidade química durante processos de limpeza. Esta estabilidade chega a ser 1000 vezes maior do que a apresentada pelo quartzo, conforme mostra a Figura 5.12 [46]. Outro aspecto relevante é a relação de resistência a altas temperaturas, mostrada na Tabela 5.1. Em contrapartida, o valor de mercado de componentes fabricados em SiC é muito mais elevado do que o valor do quartzo. Um exemplo disto se verifica no caso em que um tubo de SiC pode custar aproximadamente sete vezes mais do que o equivalente em quartzo. Desta forma, a seleção do material adequado para cada caso envolve uma completa análise da aplicação, principalmente considerando situações de curto, médio ou longo prazo de utilização.

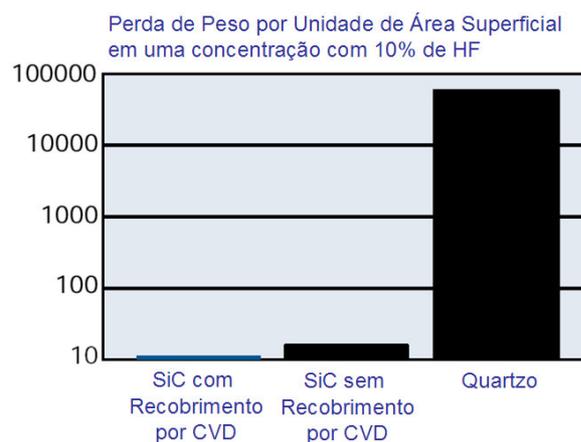


Figura 5.12. Comparação entre o SiC e o quartzo quanto a estabilidade sob ataque químico com HF [46].

Tabela 5.1 Relação de características do quartzo e do SiC alfa com recobrimento de SiC beta pelo processo de CVD [46].

Característica	Quartzo	SiC	Unidade
Resistência Mecânica	42	230	MPa
Softening Point Temperatura máxima para a qual o vidro pode ser moldado sem deformação permanente	1070	>1400	°C

5.2.2. Projeto Desenvolvido

Fornos convencionais de difusão podem apresentar o sistema de carregamento tanto manual como automatizado. Esta diferença é um dos fatores que, por exemplo, pode influenciar no projeto dos componentes de quartzo e SiC. Aspectos peculiares de cada forno são responsáveis pela vasta gama de componentes de quartzo e SiC existentes no mercado, pois muitos deles necessitam ser fabricados sob medida para cada projeto.

Basicamente os componentes para compor uma câmara de processamento são: um tubo com uma das extremidades totalmente aberta e a outra com um ou mais acessos à injeção de gases, uma tampa para o fechamento da extremidade

aberta, suportes para o carregamento das lâminas de silício e uma ferramenta para colocação e retirada dos suportes na espátula. Desenhado especialmente para este projeto, o conjunto de componentes apresentado na Figura 5.13 destaca cada item projetado e fabricado para este forno. Foi previsto o uso de um sistema de carregamento automatizado e possibilidade de testar diferentes tipos de bicos injetores de gases, além da possibilidade de inserir termopares no interior do tubo.

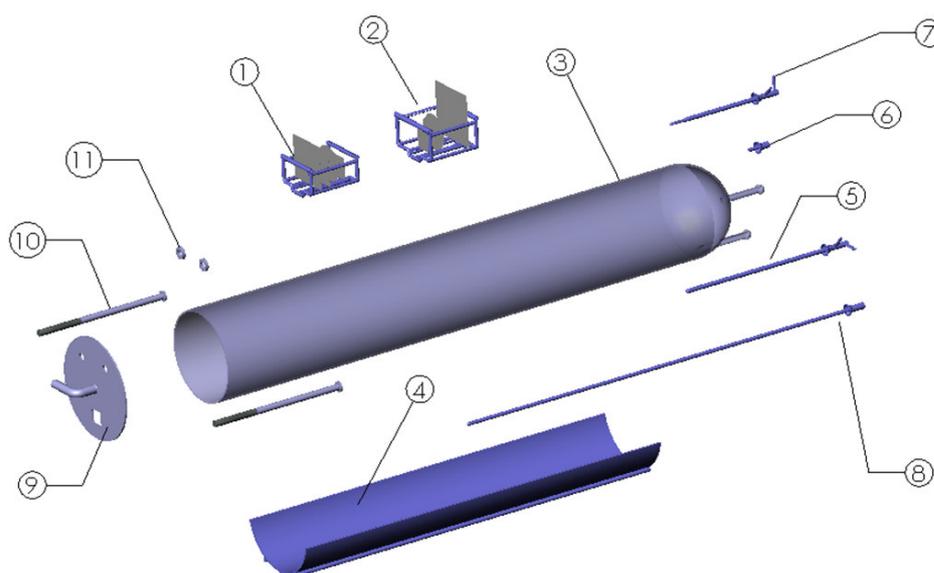


Figura 5.13. Conjunto de componentes de quartzo desenhado para este projeto.

Os itens apresentados na Figura 5.13 estão relacionados e descritos no Quadro 5.2. A Figura 5.14 apresenta uma vista lateral do conjunto de componentes ilustrando a posição dos mesmos para a situação em que a câmara se encontra fechada. Os itens assinalados por "b" são peças intercambiáveis, sendo que estas podem vir a ser utilizadas para aplicações específicas mudando assim as características do forno.

O uso de sistemas de carregamento automatizados implica na necessidade de uma ferramenta para o transporte dos suportes para o interior do tubo. Em geral, nestes casos os suportes de lâminas são posicionados sobre esta ferramenta e a mesma permanece no interior do tubo durante os ciclos térmicos. A utilização de uma ferramenta fabricada apenas de quartzo para essa finalidade não é indicada devido à carga aplicada. Em geral, se utilizam peças de outros materiais com maior

resistência a carga, como a alumina, revestidas com quartzo. No entanto, existem no mercado espátulas de SiC padronizadas com a exclusiva finalidade de transportar e posicionar os suportes contendo lâminas de silício em fornos de difusão.

Quadro 5.2. Relação dos itens apresentados na Figura 5.13.

Item	Denominação	Descrição
1	Suporte para lâminas quadradas com aresta de até 125mm	Dispositivos de quartzo adequados ao carregamento das lâminas de silício durante os processos térmicos
2	Suporte para lâminas quadradas com aresta de até 150 mm	
3	Câmara de processamento	Câmara em formato tubular na qual são realizados os processos térmicos
4	Base para o tubo	Base com seção transversal semicircular que evita o contato direto do tubo de processamento com os resistores do forno
5	Bico injetor de gases	Bico para injeção de gases pelo acesso inferior da parte posterior do tubo
6	Selo	Peça com a finalidade de bloquear os acessos à gases posteriores do tubo
7	Bico injetor de gases	Bico para injeção de gases pelo acesso central do tubo
8	Bainha para termopares	Bainha que evita o contato direto dos termopares com o ambiente interno da câmara de processamento
9	Tampa para o tubo	Vedação para extremidade aberta do tubo e exaustão dos gases
10	Hastes de sustentação da tampa	Hastes que sustentam a tampa e permitem o deslocamento desta na vedação do tubo
11	Anéis de apoio	Anéis que pressionados por molas fazem com que a tampa feche o tubo

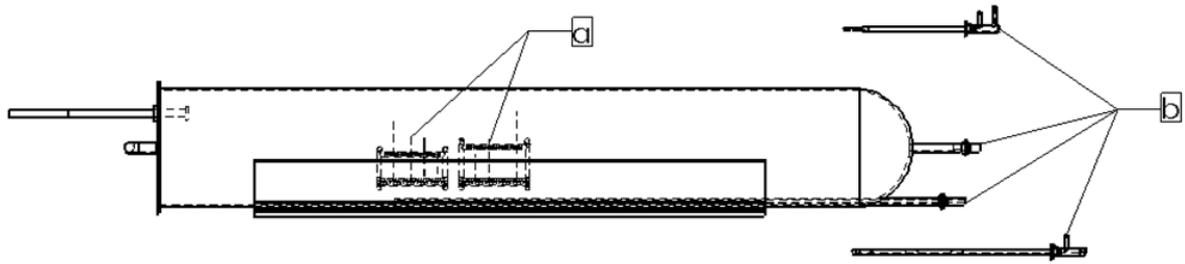


Figura 5.14. Vista lateral do conjunto de componentes de quartzo, onde "a" indica os dois modelos de suportes desenhados e "b" indica os componentes intercambiáveis de acesso posterior do tubo.

A Figura 5.15 apresenta os três modelos de espátula de SiC mais difundidos no mercado. Para cada um destes modelos é possível que haja variação no comprimento tanto da pá quanto do braço, tornando passíveis de adequações à diferentes projetos.

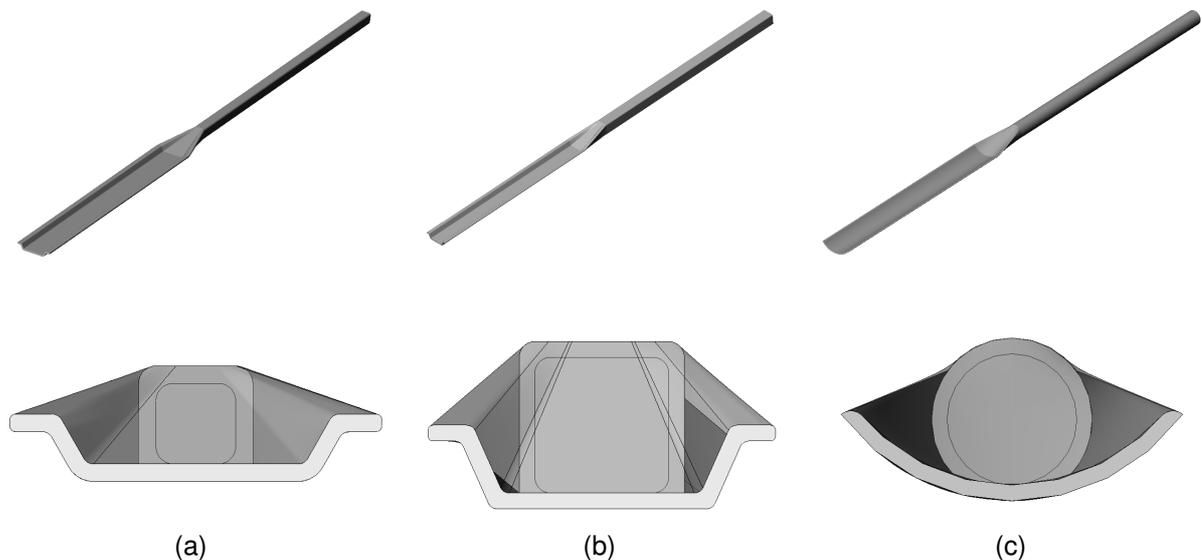


Figura 5.15. (a) Espátula com punho quadrado de aresta 31,8 mm, as dimensões da pá são de 95,5 mm de largura e 19 mm de altura; (b) outro modelo de espátula também com o punho quadrado, mas com 50,8 mm de lado, tendo a pá 106,9 mm de largura e 25,4 mm de altura, a ilustração; (c) modelo com punho redondo de diâmetro igual a 49,5 mm, a pá possui largura de 105 mm e altura de 26,3 mm.

A Figura 5.16 apresenta um comparativo entre o uso de uma espátula de SiC e o uso de hastes de alumina revestidas com bainhas de quartzo no transporte de lâminas de silício para o interior do tubo.

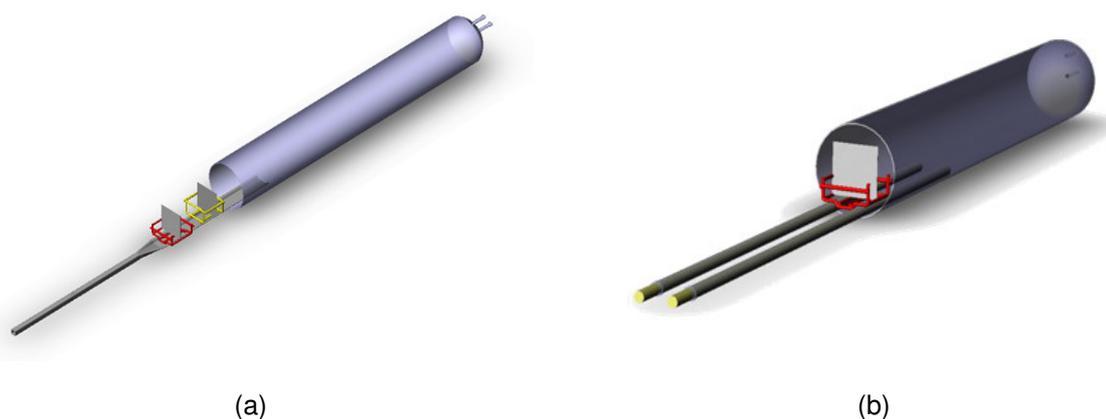


Figura 5.16. (a) Sistema com uma espátula e (b) sistema com hastes de alumina de alta pureza.

Para este projeto foi selecionado o modelo de espátula com seção idêntica à mostrada na Figura 5.15 (a). Este modelo é amplamente utilizado por fabricantes de fornos de difusão sendo também compatível com os modelos de suportes de lâminas utilizados no Laboratório de Células Solares. Além disto, este modelo apresenta facilidades de montagem no sistema de carregamento. Os comprimentos do braço e da pá foram definidos especialmente para este forno fazendo com que a maior parte possível da espátula que ficasse no interior do tubo fosse constituída pela pá. Este fato é justificado porque se trata de um protótipo de forno e a posição da zona plana pode estar deslocada do centro do conjunto de resistores, e deste modo o suporte pode ser deslocado facilmente. Outro aspecto considerado foi a condição de explorar ao máximo a capacidade de produção do forno. A Figura 5.17 ilustra o desenho definido para a espátula deste forno. A presença de uma região vazada na pá da espátula tem como principal finalidade dar melhores condições para que o fluxo de gases tenha maior recirculação na parte inferior dos suportes, e por conseqüência, entre as lâminas de silício.

Como já mencionado, um dos objetivos deste projeto é a possibilidade de processar lâminas de silício quadradas de até 150 mm de aresta. Assim, uma vez definida a espátula, foi possível projetar um suporte adequado a esta e também às dimensões da maior lâmina. Suportes são acessórios encontrados no mercado em diversas formas e tamanhos, fabricadas tanto em quartzo como em SiC. Considerando que lâminas quadradas com 150 mm de lado são usuais em indústrias, mas não em laboratórios, optou-se por projetar um modelo de suporte

mais versátil. Assim, dois modelos foram projetados para serem fabricados em quartzo tendo em vista o processamento de lâminas com arestas de até 150 mm e também de até 125 mm. A Figura 5.18 ilustra os suportes projetados comportando lâminas desde 62,5 mm x 62,5 mm até as máximas dimensões citadas. Na Figura 5.18 também é possível visualizar a parte inferior do suporte, o qual possui um desenho que acompanha o perfil da pá da espátula.



Figura 5.17. Ilustração da espátula desenhada para este projeto.

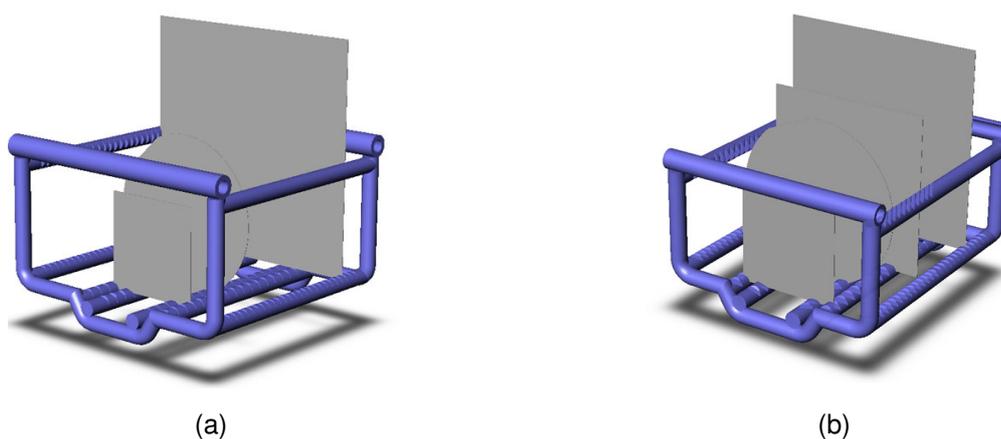


Figura 5.18. (a) Suporte para o processamento de lâminas de silício quadradas com aresta de até 150 mm e (b) suporte para o processamento de lâminas de silício quadradas com até 125 mm de aresta.

Para o manuseio destes suportes foi desenhada uma ferramenta que ao ser encaixada nos mesmos permite o transporte sem que haja um contato direto das

mãos do operador com o suporte. Esta ferramenta que possui o desenho de um garfo é mostrada na Figura 5.19.

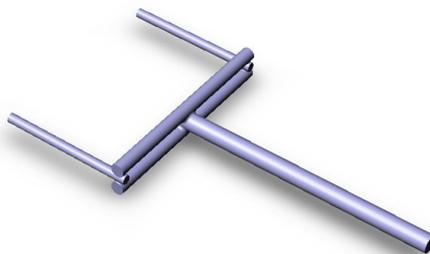


Figura 5.19. Ferramenta desenhada para o manuseio dos suportes.

O conjunto espátula, suporte e lâminas de silício é o principal fator determinante para o dimensionamento da câmara de processamento. Determinada a área máxima ocupada por estes componentes, um diâmetro interno de 250 mm foi definido para o tubo de quartzo. É apresentada na Figura 5.20 a relação de dimensões radiais consideradas neste projeto.

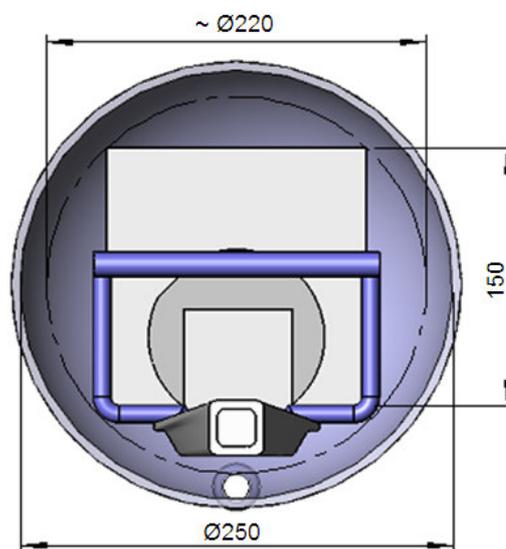


Figura 5.20. Relação de dimensões radiais projetada para o carregamento do forno. Dimensões expressas em milímetros.

O dimensionamento do tubo está associado também ao comprimento pré-estabelecido para a zona plana de 500 mm. Considerando a existência de duas zonas de estabilização que cercam a zona plana, o comprimento útil definido para o tubo foi de 1535 mm. Com isto, o volume resultante para a câmara de

processamento é de aproximadamente 78,95 l (0,07895m³). A Figura 5.21 apresenta o tubo em conjunto com os demais componentes, para a situação da câmara de processamento fechada.

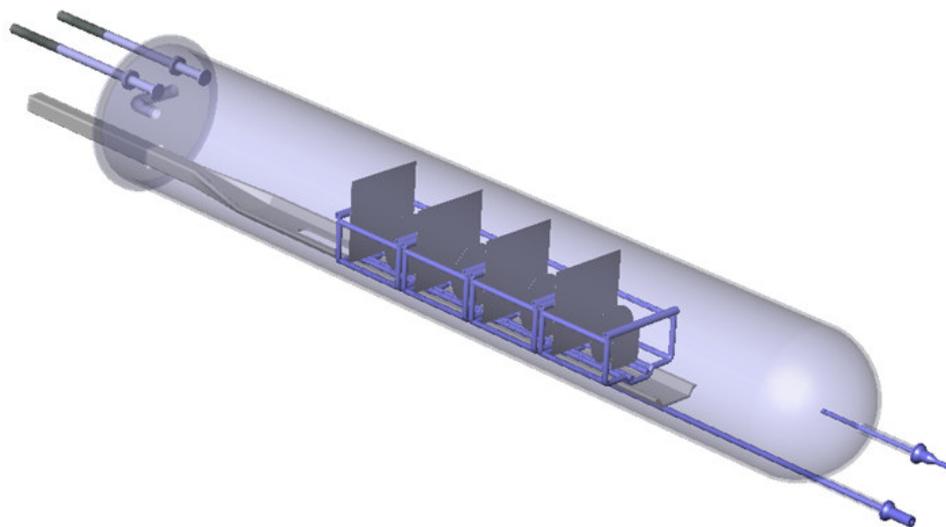


Figura 5.21. Ilustração da câmara de processamento e demais componentes de quartzo.

A inserção de gases e dopantes na câmara de processamento é realizada pela parte posterior do tubo, sendo que neste caso, existem dois canais de acesso. Estes canais podem ser utilizados simultaneamente ou não em função da aplicação prevista e/ou do tipo de bico injetor utilizado. Os bicos injetores são peças acopláveis ao tubo que têm a função de conectar os pontos finais da linha de gases à câmara de processamento. Os bicos injetores desenhados para este projeto possuem um tipo de conexão conhecido como *ball joint*, na qual ambas as peças possuem uma esfera em formato de semiesfera que se sobrepõem sendo pressionadas por uma espécie de grampo, vedando assim a conexão. Um modelo convencional de bico injetor que foi desenhado é apresentado na Figura 5.22. Este bico injetor é para o uso preferencial no canal de acesso central, pois os pontos de saída dos gases estão posicionados no interior do tubo com uma angulação que faz com que o jato de gases atinja a parte posterior semiesférica do tubo, criando assim um fluxo de maior turbulência. A formação de um fluxo turbulento torna mais propícia a ocorrência de difusões mais uniformes, como já mencionado. Esta uniformidade pode ser verificada após o processo de difusão medindo-se a resistência de folha das lâminas.

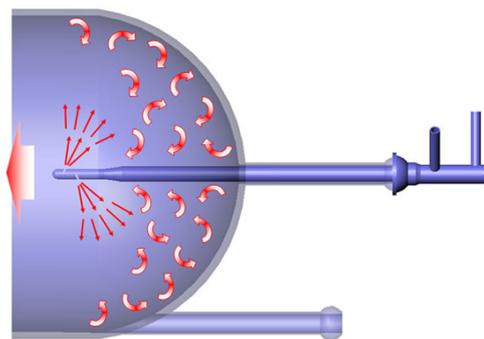


Figura 5.22. Projeção do fluxo de gases criado por este modelo de bico injetor.

Para processos de difusão com POCl_3 se faz necessário o uso de um borbulhador. Este aparato, além de armazenar o dopante líquido, permite a entrada de um gás inerte que faz o dopante borbulhar. Neste processo, pelo aumento da pressão no borbulhador, o dopante é conduzido para o interior da câmara de processamento. A Figura 5.23 ilustra o borbulhador desenhado para este projeto. No item (a), os pontos 1 e 2 correspondem respectivamente aos acessos de entrada e saída do gás inerte, estando ambas as extremidades abertas. Para que o líquido dopante borbulhe, o ponto 2 deve estar submerso no mesmo. O ponto 3 corresponde a saída do dopante que é conectada à entrada do tubo. O ponto 4 corresponde ao acesso para o uso de termopares a fim de permitir a verificação da temperatura do dopante, sendo que a extremidade 5 é fechada evitando o contato direto com o líquido. O volume deste borbulhador é de 911 ml ($9,11 \times 10^{-4} \text{ m}^3$).

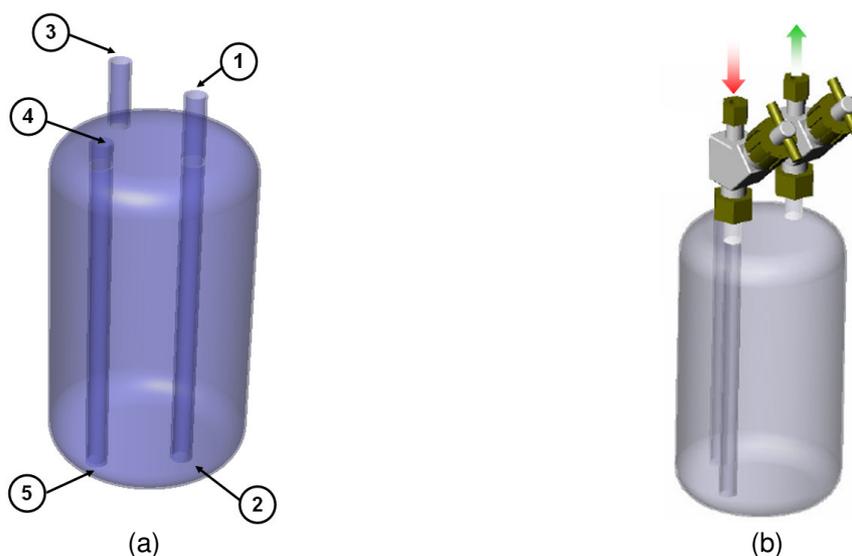


Figura 5.23. (a) Ilustração do borbulhador desenhado para este projeto e (b) borbulhador com as válvulas conectadas.

Por fim, a Figura 5.24 ilustra os componentes de quartzo e SiC instalados no conjunto de resistores do sistema de aquecimento para a situação da câmara de processamento aberta. Nesta ilustração é possível visualizar a tampa do tubo de quartzo apoiada em duas hastes de quartzo. Observa-se que existe uma tubulação no centro da mesma para que haja um ponto de fuga (F) dos gases, após a reação química no interior do tubo.

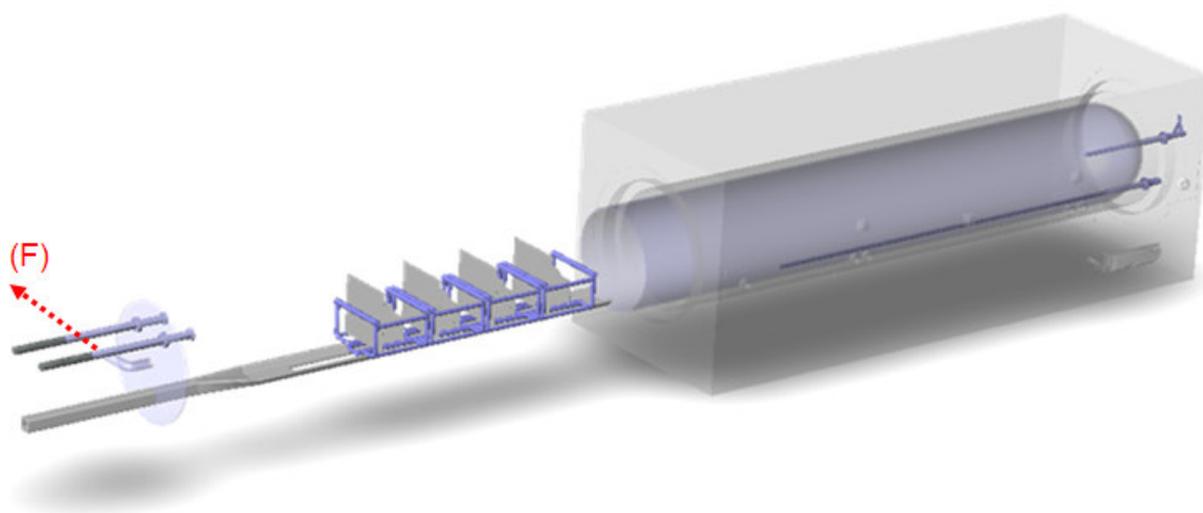


Figura 5.24. Ilustração dos componentes de quartzo e SiC instalados no sistema de aquecimento.

5.3. Estrutura

A estrutura tem a função de agregar de forma organizada e funcional todos os módulos do forno. Tratando-se de um protótipo, um dos critérios fundamentais para o desenvolvimento de uma estrutura para este projeto foi a versatilidade em um modelo compacto. Com isto, optou-se pelo emprego de perfis de alumínio para a fabricação da estrutura, sendo esta totalmente desmontável e ressaltando as características de leveza e facilidade em adaptações. Outro fator considerado foi quanto ao acabamento, o qual dispensa a necessidade de pintura ou outros tratamentos superficiais pelo uso de perfis de alumínio anodizados.

Para tornar o modelo compacto, o projeto conta com um sistema de carregamento retrátil, de forma que a estrutura é então composta por três módulos praticamente integrados. No primeiro módulo é instalado o sistema de aquecimento,

no segundo módulo o conjunto do sistema de movimentação e os equipamentos de controle do forno e no terceiro módulo está disposto o armário de gases. A Figura 5.25 apresenta uma vista lateral da estrutura projetada para o forno, onde cada módulo é devidamente indicado. Foram utilizados perfis com seções de 40 mm x 40 mm, 40 mm x 80 mm e 80 x 80 mm na confecção desta estrutura e rodízios posicionados internamente de forma a proporcionar a menor influência possível na altura final da estrutura. A Figura 5.26 mostra as vistas frontal e posterior da estrutura e a Figura 5.27 apresenta uma vista em perspectiva da mesma. Na Figura 5.28 é apresentada a estrutura fabricada com o sistema de aquecimento já instalado, onde o conjunto de resistores encontra-se no módulo correspondente ao sistema de aquecimento e a caixa de comando deste encontra-se no módulo que corresponde ao sistema de movimentação e controle.

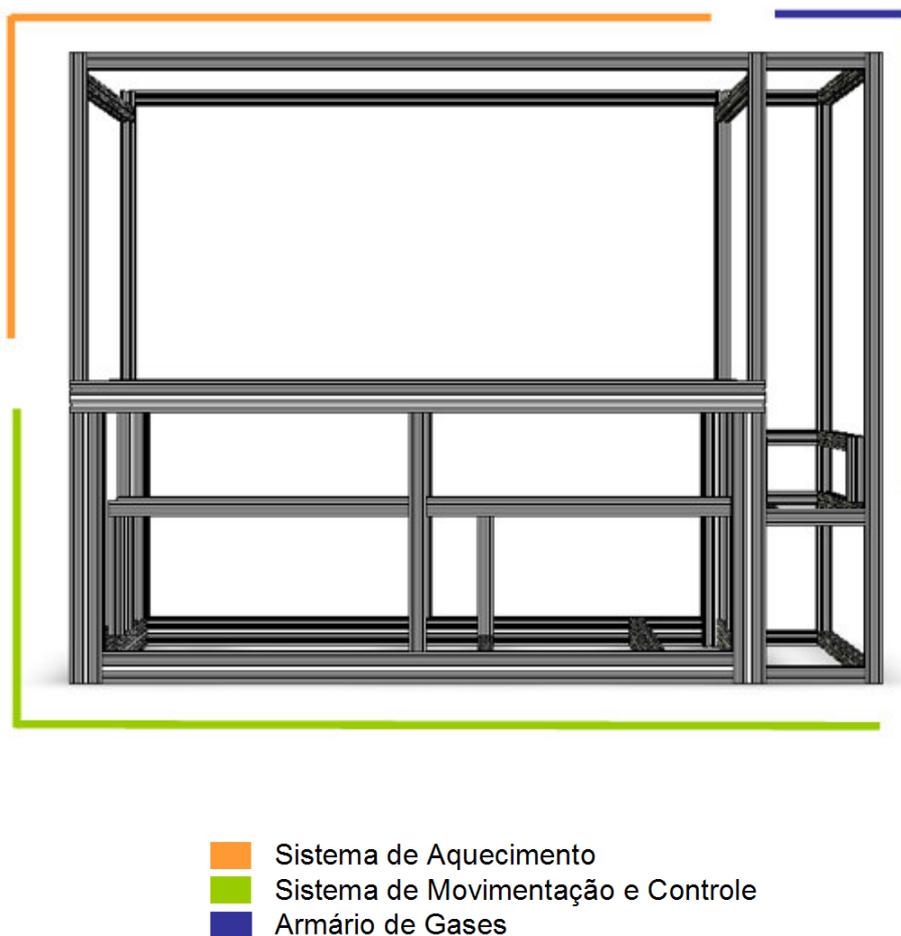


Figura 5.25. Vista lateral da estrutura do forno destacando o posicionamento de cada módulo.

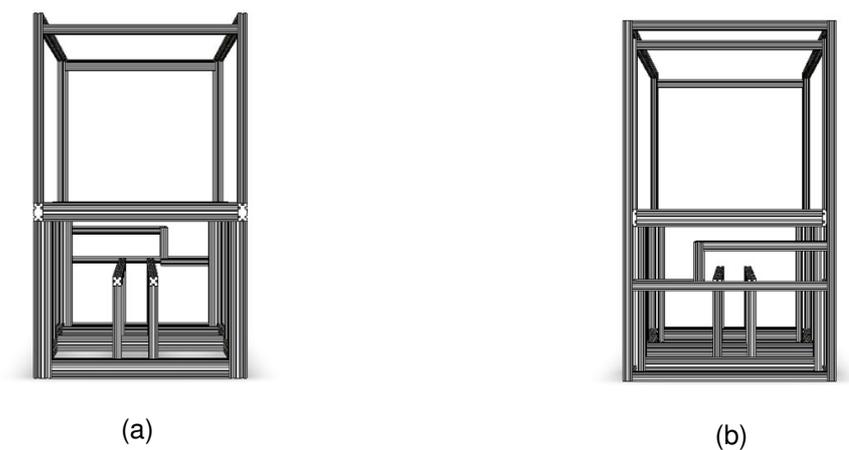


Figura 5.26. (a) Vista frontal da estrutura e (b) vista posterior da mesma, onde se localiza o armário de gases.

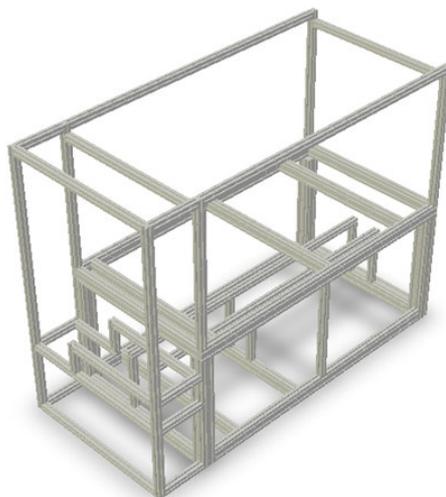


Figura 5.27. Vista em perspectiva da estrutura do forno.

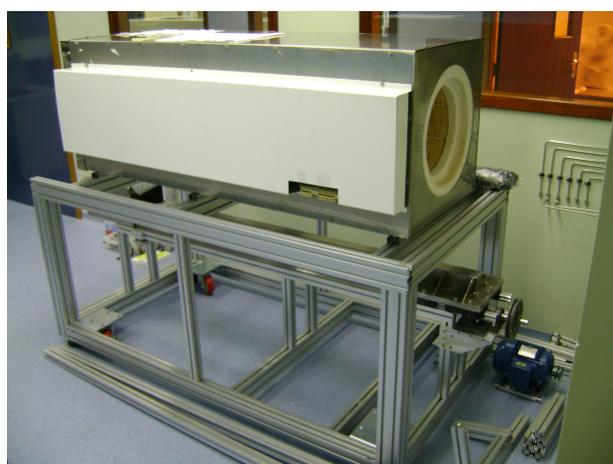


Figura 5.28. Estrutura fabricada com o sistema de aquecimento instalado.

Montada previamente fora da sala limpa do NT-Solar, a estrutura foi adequada para comportar os módulos citados, como por exemplo, por meio da realização de testes como o sistema de carregamento, onde muitos ajustes foram necessários. Planejada para ser transportada em módulos para o interior da sala limpa, de modo a não prejudicar os processos em andamento, a mesma foi desmontada, transportada e novamente montada na sua posição de trabalho no Laboratório de Difusão. A Figura 5.29 (a) apresenta a parte inferior da estrutura em frente à sala limpa e a Figura 5.29 (b) mostra a mesma já posicionada no Laboratório de Difusão, com parte do sistema de aquecimento já instalado.



(a)



(b)

Figura 5.29. (a) Parte inferior da estrutura em frente ao Laboratório de Difusão, no lado externo da sala limpa e (b) montagem da estrutura em sua posição de operação.

O fechamento da estrutura foi projetado conforme apresenta a Figura 5.30. Neste, portas e tampas de alumínio anodizado foram consideradas para completar o acabamento externo da estrutura. Portas de acrílico semitransparente foram desenhadas para proporcionar o fácil acesso e a visualização do borbulhador e do armário de gases em geral. A Figura 5.31 mostra etapas da montagem do fechamento da estrutura e a Figura 5.32 apresenta a mesma devidamente montada.

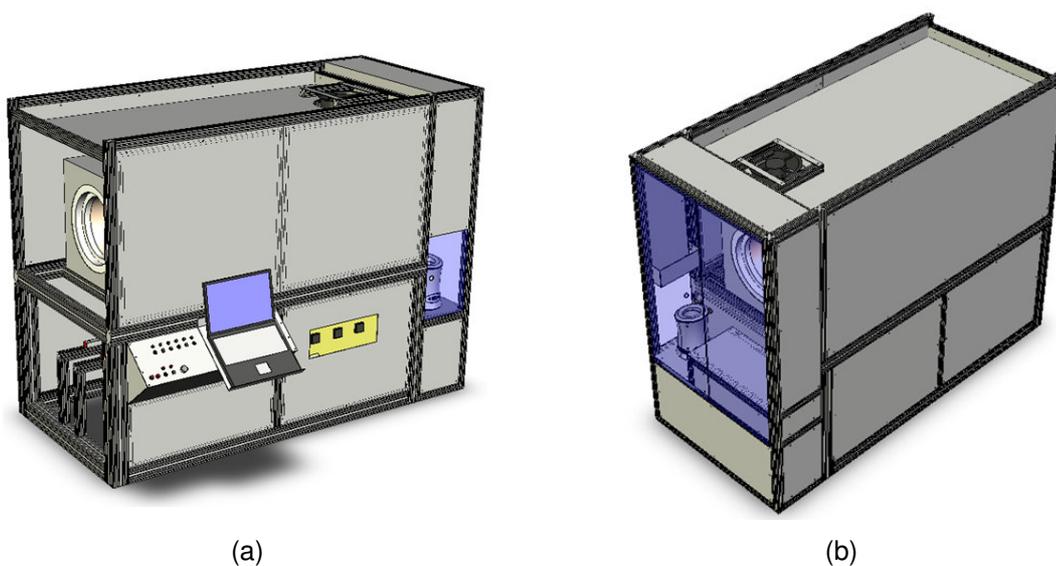


Figura 5.30. (a) Vista das partes frontal e lateral do forno e (b) vista das partes posterior e lateral do forno com os componentes de fechamento projetados.

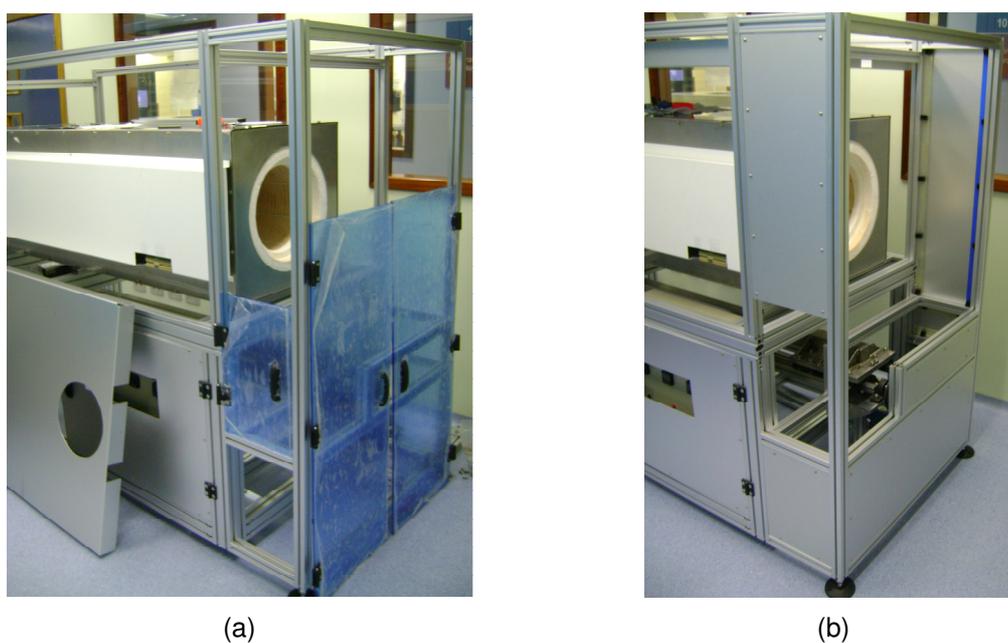


Figura 5.31. Etapas da montagem do conjunto de tampas e portas de fechamento do forno.



Figura 5.32. Estrutura do forno montada com o conjunto de tampas e portas de alumínio e acrílico instaladas.

Um módulo adicional desta estrutura corresponde à instalação de um sistema de fluxo laminar. Por se tratar de uma estrutura compacta um sistema retrátil foi desenhado, conforme mostra a Figura 5.33, onde o item "A" corresponde ao equipamento de fluxo laminar, o item "B" indica o conjunto de trilhos e perfis que formam a estrutura retrátil e os demais itens são responsáveis pelo fechamento deste módulo. Montado sobre a estrutura, este sistema proporciona um fluxo laminar vertical, acionado manualmente em ocasiões de abertura do forno. A Figura 5.34 mostra o forno com este módulo instalado em sua parte superior. O sistema de fluxo laminar será abordado com maiores detalhes na seqüência deste capítulo.

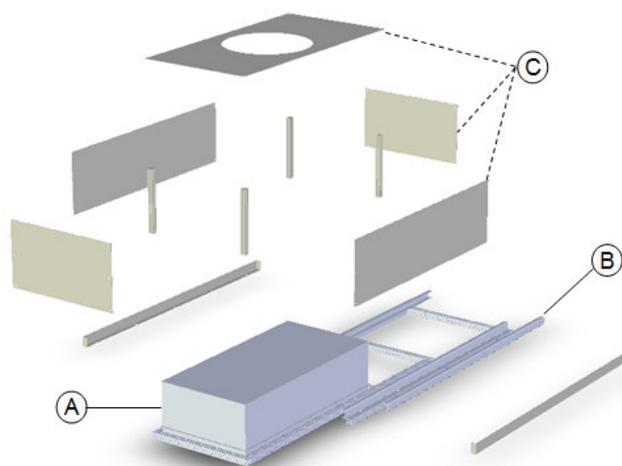


Figura 5.33. Módulo de fluxo laminar e componentes de fechamento.

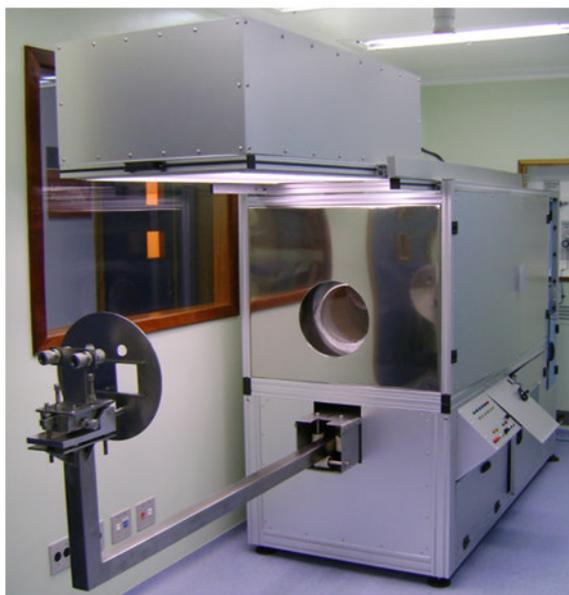


Figura 5.34. Estrutura do forno montada com o módulo retrátil de fluxo laminar instalado.

Por fim, o fechamento do forno é completado com a instalação de duas tampas de aço inoxidável 304 nas extremidades do módulo do sistema de aquecimento, conforme é indicado na Figura 5.35. Estas são as regiões da estrutura mais susceptíveis à variações de temperatura. Além disto, pode haver contato direto com os gases e produtos de reações químicas envolvidas, principalmente na extremidade frontal, onde há um ponto de exaustão do fluxo.



(a)



(b)

Figura 5.35. (a) Fechamento frontal e (b) fechamento posterior do módulo do sistema de aquecimento, fabricados em aço inoxidável 304.

5.4. Armário de Gases

Armário de gases é um termo utilizado para denominar o espaço físico do forno de difusão no qual são instalados os equipamentos que compõem a linha de gases e fonte de dopantes que abastecem a câmara de processamento. Este espaço é geralmente localizado na parte posterior da estrutura do forno em um gabinete independente, ou em alguns casos específicos pode até mesmo estar disposto em um ambiente isolado da sala limpa. A lógica e os dispositivos definidos para formar a linha de gases são características bastante peculiares de cada forno e são determinados em razão das aplicações a que este se propõe. Fornos industriais que possuem mais de um tubo de processamento podem vir a ter uma configuração da linha de gases diferente para cada tubo.

Neste projeto o enfoque em termos de aplicação é a realização de processos de difusão de fósforo utilizando POCl_3 e de oxidação a seco em lâminas de silício. Isto implica em permitir diferentes processos com variação da vazão, tipo de gás e concentração de dopantes com a finalidade de comparar e avaliar os resultados.

Em casos como este, onde o armário de gases é integrado à estrutura do forno, o local de instalação do mesmo deve estar equipado com uma tubulação adequada que permita o seu abastecimento. Desta forma, os cilindros de gases ficam dispostos fora da sala limpa e são conectados por meio de tubulações aos painéis que atendem o interior da sala limpa. O painel de gases disponível para suprir o forno no laboratório de difusão é apresentado na Figura 5.36. Neste painel estão habilitadas conexões para os seguintes gases:

- 1) Nitrogênio industrial;
- 2) Oxigênio superseco (99,98 %);
- 3) Nitrogênio ultrapuro (99,999 %);
- 4) Argônio (99,999 %);
- 5) *Forming gas*;
- 6) Oxigênio industrial;
- 7) Ar comprimido.

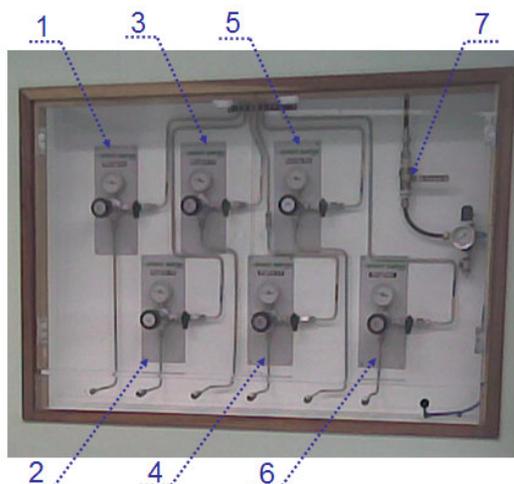


Figura 5.36. Painel de gases.

Dentre estes, essencialmente os gases N_2 e O_2 são utilizados nos processos de difusão e oxidação. Como se pode observar, o painel apresentado permite o uso de dois tipos de cada um destes gases. Assim, a proposta para o projeto em questão é permitir a maior versatilidade no uso destes gases nos processos citados para fins como, por exemplo, possibilitar a avaliação do uso de gases com distintos graus de pureza durante os processos. Além do N_2 , o argônio também pode ser empregado com o gás inerte, e dentre as aplicações do *forming gas*, mistura de até 10 % de hidrogênio no nitrogênio, é válido citar seu emprego em processos de recozimento para redução de danos causados na superfície das lâminas de silício. O ar comprimido é empregado exclusivamente para suprir o sistema pneumático do forno.

Para permitir a conexão entre o painel de gases destinado a este projeto e o armário de gases do forno, se fez necessária a instalação de uma tubulação de gases adequada, conforme mostra a Figura 5.37.

5.4.1. Esquema e Lógica de Funcionamento

Mesmo permitindo a conexão de todos os gases mencionados anteriormente, apenas o nitrogênio ultrapuro e o oxigênio superseco, além do ar comprimido, são considerados para suprir o armário de gases do forno em sua configuração convencional. O desenho da linha implantada é esquematizado na Figura 5.38.

Neste desenho, praticamente duas linhas principais são projetadas: uma direcionada ao transporte do dopante para o interior do tubo, por um gás denominado como portador, e outra que permite a passagem direta dos demais gases. O fluxo do gás portador é ajustado com o uso de um controlador de vazão mássica e três válvulas pneumáticas do tipo NF (normalmente fechada), identificadas como 1, 5 e 6 na Figura 5.38. Para abertura destas válvulas a seqüência 1, 6 e 5 é estabelecida para evitar a possibilidade de refluxo e contaminação na linha, de forma que há uma pressurização na tubulação até o borbulhador antes da abertura da válvula de passagem deste. A segunda linha que chega ao tubo de processamento permite a passagem dos gases N_2 e O_2 , sendo estes responsáveis por criar uma atmosfera apropriada no interior do tubo. A atmosfera pode ser modificada por meio da combinação do ajuste das vazões destes gases. Também nesta linha, as três válvulas pneumáticas do tipo NF (válvulas 2, 3 e 4) são utilizadas para o controle da passagem dos gases e, antecedendo cada uma destas válvulas, há um controlador de vazão mássica que permite a leitura e o ajuste das vazões.



Figura 5.37. Extensão da tubulação de gases para interligar a saída do painel à entrada do armário de gases do forno. À frente, parte inferior da estrutura durante a montagem.

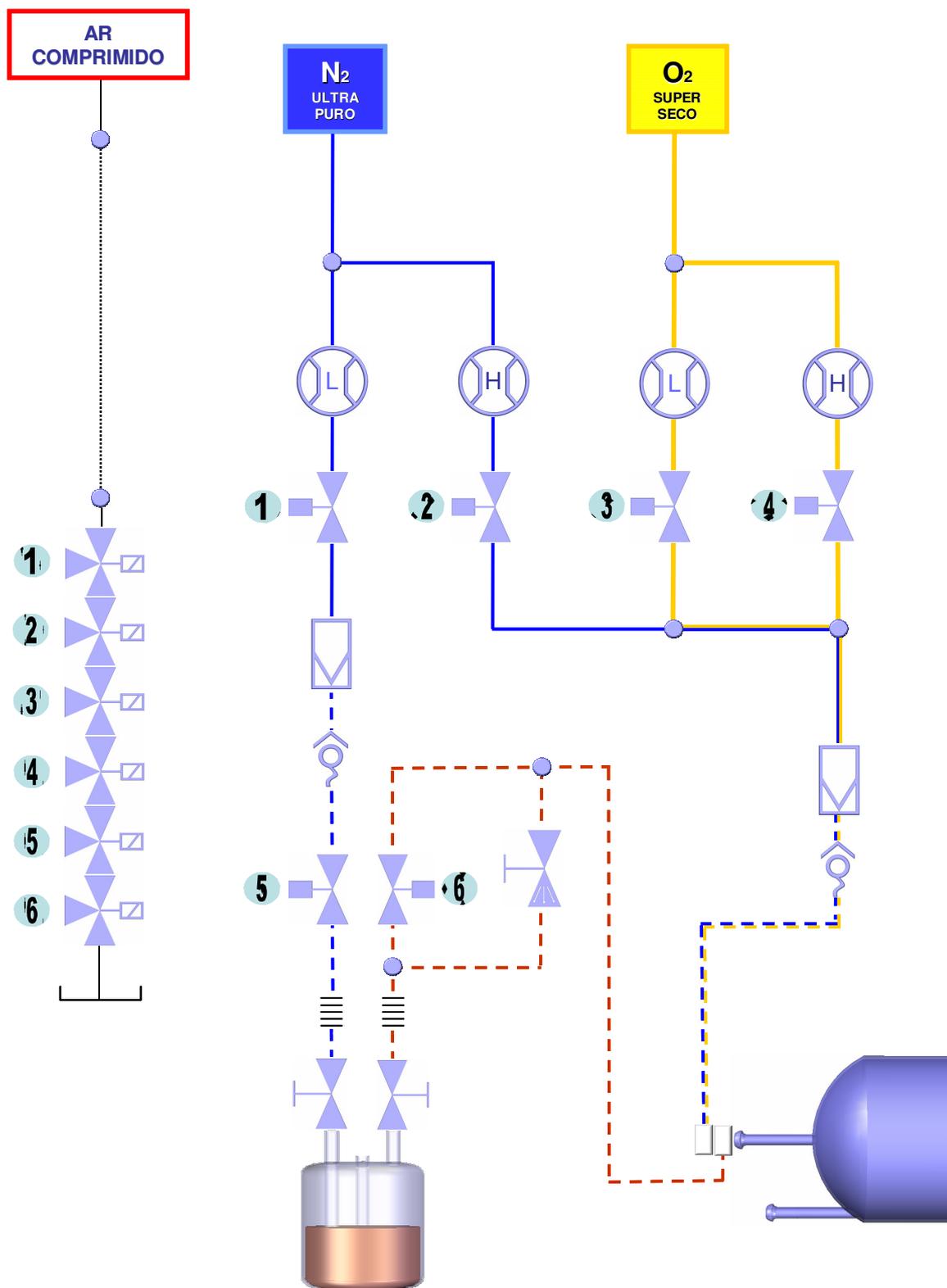


Figura 5.38. Desenho esquemático da linha de gases.

O Quadro 5.3 apresenta uma relação da simbologia utilizada para este esquema da linha de gases.

Quadro 5.3. Relação de símbolos utilizados na Figura 5.38.

Símbolo	Denominação
	Eletroválvula 3/2 vias
	Controlador de vazão mássica H (<i>high</i>): alta vazão; L (<i>low</i>): baixa vazão
	Válvula pneumática 2 vias
	Filtro de linha
	Válvula antirrefluxo
	Válvula de alívio de pressão
	Válvula manual 2 vias

No esquema citado, as linhas pontilhadas representam o uso de tubulações de PFA (perfluoroalcoxiálcano) e o uso de linhas contínuas representa a parte da tubulação que pode ser fabricada em aço inoxidável 316 L. As linhas onde flui o POCl_3 devem ser em PFA ou outro polímero fluorado, isto porque este produto apresenta propriedades de corrosão de metais.

5.4.2. Dimensionamento dos Controladores de Vazão

Dentre todos os dispositivos mencionados como componentes da linha de gases, os controladores de vazão correspondem às mais importantes peças deste sistema. O dimensionamento destes implica em estabelecer os limites de vazão aplicáveis e, por conseqüência, os limites quanto às variáveis de processos

envolvendo o fluxo de gases, como por exemplo, o percentual de POCl_3 e o tempo de troca de volume do tubo.

Atualmente o mercado oferece uma linha de MFCs com controle digital que apresenta um avanço significativo em fatores como precisão, repetibilidade e tempo de resposta, quando comparados aos MFCs totalmente analógicos. Uma comparação entre duas linhas de MFCs de um mesmo fabricante é apresentada na Figura 5.39. Nesta é possível perceber o ganho em precisão que os equipamentos digitais proporcionam, principalmente para os valores mais afastados do fundo de escala (F.E.). A incerteza na medição, que no equipamento digital mencionado é de $\pm 1\%$ da vazão para valores superiores a 20% do F.E. e de $\pm 0,2\%$ do F.E. para valores abaixo de 20% deste, é o fator que permite a aplicação de uma margem maior na seleção da capacidade do equipamento sem o aumento da incerteza nas medições. Destaca-se esta característica do funcionamento dos MFCs para acentuar a importância do dimensionamento dos mesmos, uma vez que há um aumento da incerteza em situações onde a vazão nominal de trabalho está muito abaixo do valor de F.E. definido.

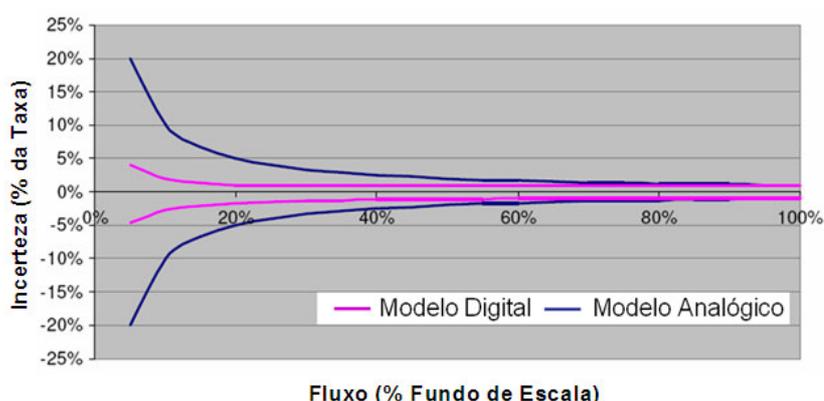


Figura 5.39. Comparação entre a incerteza apresentada pela linha de última geração de MFCs com comando digital e a linha de MFCs totalmente analógicos de um mesmo fabricante [47].

Considerando as características dos equipamentos com controle digital e arbitrando-se um tempo de troca do volume do tubo de 5 minutos (valor típico aplicado à processos), a vazão de gás requerida para este projeto é de 15,79 l/min ($\sim 2,6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$). É possível requerer equipamentos com este valor de F.E.,

entretanto, é mais usual a aplicação de valores inteiros, o que simplifica o sistema em termos de utilização. Com isto, os MFCs de alta vazão, tanto de N₂ como de O₂, foram definidos com um valor de F.E. de 20 l/min ($\sim 3,3 \times 10^{-4}$ m³/s). Com isto, tem-se a possibilidade máxima de troca do volume do tubo em aproximadamente 3,95 minutos.

Processos de oxidação térmica são realizados em fornos similares aos usados para difusão de dopantes, com temperaturas na faixa de 800 °C a 1200 °C. Sob altas temperaturas o silício reage de forma controlada com espécies oxidantes como o gás O₂ e o vapor d'água. Assim, é apresentado por meio da Equação 5.1 um modelo matemático para o crescimento do óxido térmico [10].

$$x_0^2 + Ax_0 = B(t + \tau) \quad (5.1)$$

sendo que os termos desta equação estão descritos no Quadro 5.4.

Quadro 5.4. Parâmetros e unidades de medida da Equação 5.1 [10].

Símbolo	Descrição
x_0	Espessura do óxido
t	Tempo de oxidação
A, B e τ	Constantes que dependem da temperatura, do ambiente (gás), da pressão e da orientação da superfície da lâmina de silício, sendo que τ ainda depende da espessura inicial do óxido já existente.

Em geral a bibliografia focaliza os parâmetros tempo e temperatura para a definição da espessura da camada de óxido formada. Em razão disto, dados referentes aos fluxos de O₂ utilizados em processos de oxidação a seco são basicamente experimentais.

Em 2007, Moehlecke et al. [48] apresentaram um processo de oxidação realizado em forno de difusão no qual a vazão empregada durante o processo pleno

de oxidação foi de 2 l/min. Para esta vazão, estima-se que o tempo de troca de volume de O₂ empregado foi de aproximadamente 15,2 minutos. Traçando uma correlação com este processo o valor de F.E. definido para o MFC de alta vazão para o gás O₂ (20 l/min) deve atender perfeitamente os requisitos básicos de processo.

Para o dimensionamento dos MFCs de baixa vazão, alguns processos de difusão foram simulados utilizando o algoritmo e as equações apresentadas no item 4.5.3. Como mencionado, a definição dos parâmetros de processos de difusão utilizando POCl₃ envolve variáveis como o tempo de troca de volume de N₂ no tubo, a temperatura do POCl₃ no borbulhador, o percentual de POCl₃, o percentual de O₂, entre outros. Considerando o mesmo tempo de troca de volume no tubo de 5 minutos e estipulando a aplicação de um percentual de POCl₃ de 0,17 %, tem-se a necessidade de uma vazão de gás portador de 0,78 l/min ($\sim 1,3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$). Da mesma forma, considerando 5 % de O₂ no fluxo total, há uma necessidade de uma vazão deste gás de 0,79 l/min ($\sim 1,3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$). Portanto, foi definida a vazão de 2 l/min ($\sim 3,3 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$) como valor de F.E. para os MFCs de baixa vazão, de forma que considerando o referido percentual de POCl₃ como valor nominal, os equipamentos estarão sendo utilizados dentro da sua melhor faixa em relação a incerteza na medição. Além disto, percentuais de POCl₃ superiores a este poderão ser aplicados, por exemplo, utilizando as mesmas condições da simulação realizada e alterando o valor da vazão do gás portador para o F.E. do equipamento, para 2 l/min, resultando em uma concentração de aproximadamente 0,44 % de POCl₃. Heynes et al. [37] apresentaram um estudo comparativo de processos de difusão onde o percentual de POCl₃ aplicado chega ao extremo de 0,70 %. Entretanto o mesmo estudo mostra que esta supersaturação pode ser obtida com percentuais de cerca de 0,35 %, valor que esta dentro da faixa considerada neste projeto.

É válido ressaltar que é comum o uso das unidades de medida SLPM (*standard liters per minute*) e sccm (*standard cubic centimeters per minute*) para quantificar as vazões tanto nestes equipamentos quanto em suas aplicações. Estas unidades indicam que as condições de temperatura e pressão no momento da medição devem estar em condições padronizadas. Em função disto, as vazões foram

tratadas em l/min e o tempo em minutos, ao invés de m³/s e segundos conforme indica o Sistema Internacional.

Por fim, a Tabela 5.2 apresenta resumidamente os valores de F.E. definidos para os MFCs a serem utilizados neste projeto.

Tabela 5.2 Relação de MFCs definidos para o projeto. SLPM é uma unidade de vazão em l/min em condições padrão.

MFC	Gás	F.E. (SLPM)
1	N _{2p}	2
2	N ₂	20
3	O ₂	2
4	O ₂	20

5.4.3. Aspectos na Seleção dos Controladores de Vazão

Em cada aplicação específica, fatores como custo-benefício, características peculiares e experiência dos fabricantes de fornos conduzem à melhor especificação dos controladores de vazão. Existe uma lista bastante vasta de modelos e fabricantes de controladores de vazão mássica térmicos. Entretanto, atualmente o mercado nacional carece destes instrumentos, o que torna necessária a sua importação. É possível mencionar alguns nomes de fabricantes como: *AERA*, *BROOKS*, *CELERITY*, *MASS-STREAM*, *MKS*, *QUALIFLOW*, *SIERRA*, *STEC*, *TELEDYNE*, *TYLAN*, *UNIT*, *VÖGTLIN*, entre outros, que oferecem linhas completas de controladores de vazão.

Cada modelo possui características bastante específicas. Assim, definido o tipo de controlador de vazão, que é o primeiro passo para a seleção deste instrumento, devem ser traçadas as exigências básicas requeridas. O foco neste projeto é a aplicação de MFCs térmicos de última geração, por razões já citadas anteriormente. Salienta-se que os MFCs analógicos operam por meio de sinais de corrente ou tensão elétrica, ao passo que nos MFCs digitais esta comunicação pode

ser feita por meio de interfaces como RS-232, RS-485 ou outra forma especificada pelo fabricante.

Na interface RS-232 a representação dos sinais é feita por níveis de tensão que são referenciados ao aterramento. A interface RS-232 é a mais amplamente utilizada para comunicação serial, sendo muito útil para comunicação do tipo ponto a ponto, onde não se exigem altas velocidades de transmissão e o comprimento do cabo se limita a poucos metros. Os principais inconvenientes desta interface são a suscetibilidade a ruídos externos ao sistema e a elevada resistência elétrica do cabo.

O padrão RS-485 foi desenvolvido para atender necessidades de comunicação multiponto, permitindo assim a conexão de até 32 dispositivos. Uma importante qualidade deste equipamento é a eliminação dos ruídos, que tendem a ser induzidos nos dois fios anulando qualquer interferência, o que permite o uso de cabos com comprimentos consideravelmente maiores em relação ao uso da interface RS-232, sem perda na velocidade de transmissão. Uma vez que o nível lógico é determinado por meio da diferença de tensão existente entre os fios, define-se este tipo de comunicação como modo de operação diferencial [49].

Considerando que no presente projeto tem-se a necessidade de controlar simultaneamente quatro MFCs, este último tipo de comunicação se mostra adequado. Adotando este padrão de comunicação, a configuração do sistema de controle dos gases deve obedecer à estrutura apresentada na Figura 5.40.

Além do tipo de comunicação, outra importante característica prevista no projeto que incide sobre a especificação do controlador de vazão é o uso de uma tubulação com diâmetro de 1/4" (6,35 mm), a qual corresponde ao padrão das instalações do Laboratório de Difusão do NT-Solar/PUCRS.

A escolha do tipo de conexão a ser aplicado à tubulação da linha de gás e aos dispositivos que a compõem representa um fator determinante para a versatilidade e para os custos de instalação e manutenção deste sistema. O tipo de

conexão definido como compressão por anilhas permite um desempenho livre de vazamentos a um custo relativamente inferior, quando comparado a outras conexões existentes. Este tipo de conexão é formado por duas anilhas que se encaixam sobre a tubulação comprimindo-a. Desta forma, limitam o movimento da conexão fêmea. Por outro lado, a conexão macho possui uma esfera cônica, a qual se encaixa perfeitamente no formato também cônico, mas oposto, da anilha frontal. Os detalhes desta conexão podem ser observados na Figura 5.41.

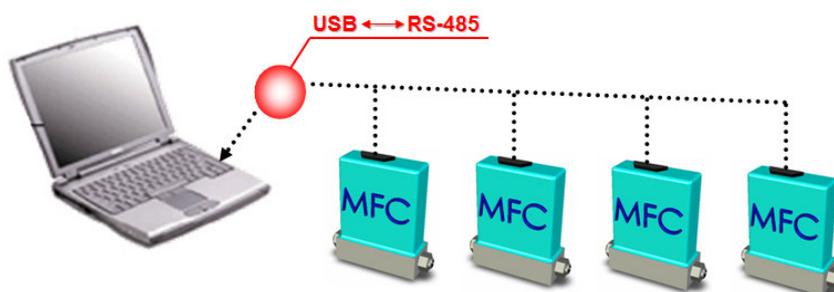


Figura 5.40. Configuração do sistema de controle de gases baseado no padrão de comunicação serial RS-485.

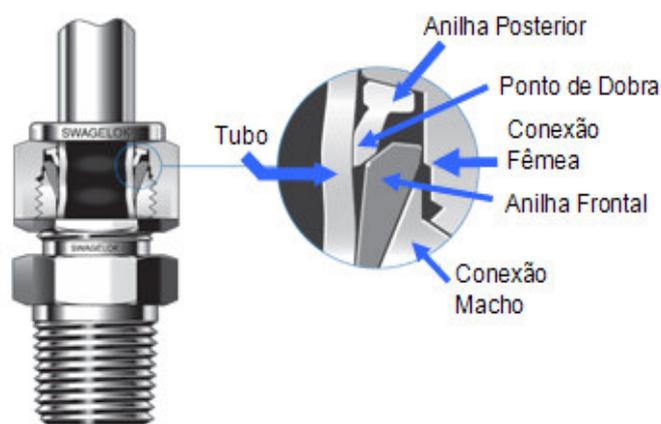


Figura 5.41. Ilustração do tipo de conexão por compressão com anilhas [50].

Uma vez que os gases previstos, N_2 e O_2 , não proporcionarão o acúmulo de partículas nas anilhas e é uma necessidade do projeto a facilidade para a montagem e ajustes da linha de gás, este tipo de conexão se mostra bastante adequado para esta fase do projeto. Livre da necessidade de soldas para o encaixe

das conexões nos tubos se tem desta forma a mobilidade de rearranjar facilmente a disposição da linha e dos dispositivos, caso isto se faça necessário.

Após uma análise criteriosa dos produtos existentes no mercado e priorizando as características descritas e os custos, o modelo SLA 5850S da marca BROOKS foi selecionado para esta aplicação.

5.4.4. Análise da Calibração dos Controladores de Vazão

A priori todos os MFCs são fornecidos pelos fabricantes com a devida calibração, em geral secundária, para cada F.E. selecionado. Entretanto, uma vez que o controle do fluxo de gases é realizado com o uso de uma escala percentual do F.E. e pode haver uma certa variação do fluxo real para o fluxo ajustado, apresenta-se uma análise da calibração dos MFCs utilizando um calibrador primário.

Um calibrador primário é um equipamento que utiliza células de calibração constituídas por um cilindro e um pistão que se movimenta em uma distância conhecida. Assim, com o uso de sensores e uma medição precisa determina-se o fluxo que faz com que o pistão se movimente por meio da relação comprimento e tempo, sendo que o fluxo se caracteriza por ser uma unidade derivada do volume e do tempo. Se comparados com os calibradores secundários, que geralmente fazem apenas uma analogia eletrônica ou mecânica, estes equipamentos garantem resultados muito superiores.

A Figura 5.42 (a) apresenta uma ilustração do calibrador utilizado, sendo este constituído por uma base e uma célula de calibração, a qual pode ser substituída em função da faixa de vazão considerada. Na Figura 5.42 (b) é apresentado o esquema físico típico aplicado em processos de calibração. Para simples processos de medição, ajusta-se com o uso de um manômetro a pressão de entrada no MFC e, por conseguinte, a vazão desejada no próprio MFC e assim realizam-se as leituras das vazões com o calibrador primário.

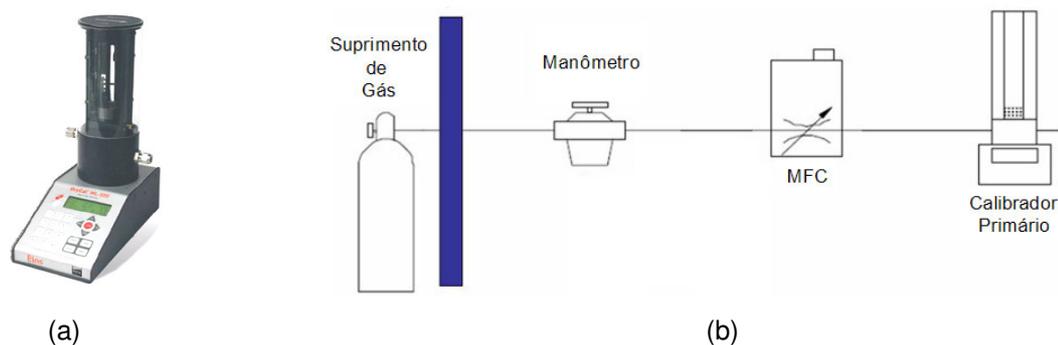


Figura 5.42. (a) Ilustração do calibrador primário utilizado e (b) esquema típico para calibração de MFCs [51], [52].

Tanto o ajuste das vazões do MFC quanto a leitura dos dados do calibrador primário puderam ser realizados com o uso de um computador como mostra a Figura 5.43, a qual ilustra a configuração aplicada no processo de medição de um dos MFC deste projeto.



Figura 5.43. Ensaio de verificação das condições de medição e controle de vazão dos controladores de vazão mássica com o uso de um calibrador primário.

O resultado das medições dos MFCs é apresentado na Tabela 5.3, sendo que para cada valor percentual de vazão estipulado apresenta-se a média obtida com a aquisição de dez leituras realizadas. As leituras foram obtidas em condições normais de temperatura e pressão de acordo com os certificados fornecidos pelo fabricante junto a cada aparelho. Para a indústria de gás Natural na América do Norte e para a OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo), as condições padrão são normalmente $P=14,73$ PSIA e $T=60$ °F. Para a IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) utiliza-se $T=0$ °C e $P=1$ bar. Algumas áreas ligadas à engenharia ambiental utilizam condições normais de $T=15$

°C e 20 °C e P=101,325 kPa. Assim, verifica-se que as condições padronizadas variam de setor para setor de aplicação. Para este caso específico, são adotadas como condições de referência T=0 °C e P=14,7 PSIA, estes valores são registrados no aparelho de medição o qual deve operar a uma temperatura ambiente de 15°C a 30 °C. O equipamento utilizado foi um calibrador primário modelo ML-500 da marca Bios que apresenta uma incerteza de $\pm 0,35\%$ nas leituras.

Tabela 5.3 Relação dos valores medidos com o uso de um calibrador primário em função do percentual de vazão definido para cada MFC. Valores apresentados em *standard liters per minute* (SLPM) ou litros por minuto. (Temperatura ambiente: 19 °C; Pressão: 101 kPa)

Controladores de Vazão	MFC para N ₂	MFC para N ₂	MFC para O ₂	MFC para O ₂
	F.E.: 2 SLPM	F.E.: 20 SLPM	F.E.: 2 SLPM	F.E.: 20 SLPM
VALOR AJUSTADO NO MFC (%)	VAZÃO (SLPM)	VAZÃO (SLPM)	VAZÃO (SLPM)	VAZÃO (SLPM)
5	0,109	0,970	0,111	1,068
10	0,207	1,975	0,211	2,064
15	0,305	2,970	0,311	3,072
20	0,404	3,979	0,411	4,080
25	0,503	4,984	0,511	5,095
30	0,602	5,990	0,611	6,112
35	0,701	6,998	0,710	7,127
40	0,800	8,002	0,810	8,143
45	0,900	9,010	0,910	9,158
50	0,999	10,012	1,010	10,174
55	1,099	11,012	1,110	11,186
60	1,198	12,036	1,211	12,197
65	1,298	13,054	1,311	13,203
70	1,397	14,060	1,411	14,224
75	1,498	15,088	1,510	15,241
80	1,599	16,095	1,610	16,249
85	1,698	17,111	1,711	17,268
90	1,799	18,135	1,810	18,282
95	1,898	19,154	1,911	19,295
100	1,998	20,174	2,011	20,312

O processo de calibração dos MFCs pode ser enquadrado como item de manutenção preventiva do forno, uma vez que deve ser realizado com certa periodicidade de acordo com as instruções do fabricante.

5.4.5. Projeto Físico e Montagem do Armário de Gases

O projeto físico do armário de gases corresponde ao desenho de instalação da linha e definição dos componentes mencionados na Figura 5.38. Fundamentalmente a questão principal neste tópico é o estudo da disposição dos componentes em um espaço reduzido, uma vez que se tem este forno como um equipamento compacto. As Figuras 5.44 e 5.45 ilustram o projeto da configuração para o armário de gases. As linhas azuis indicam a passagem de N_2 e as linhas amarelas indicam a passagem de O_2 , sendo que a partir dos filtros de linha todos os demais componentes seqüenciais, a contar das válvulas antirefluxo, são fabricados em materiais poliméricos (PFA ou PTFE - politetrafluoretileno). O borbulhador é colocado dentro de um climatizador onde a temperatura do líquido dopante pode ser controlada.

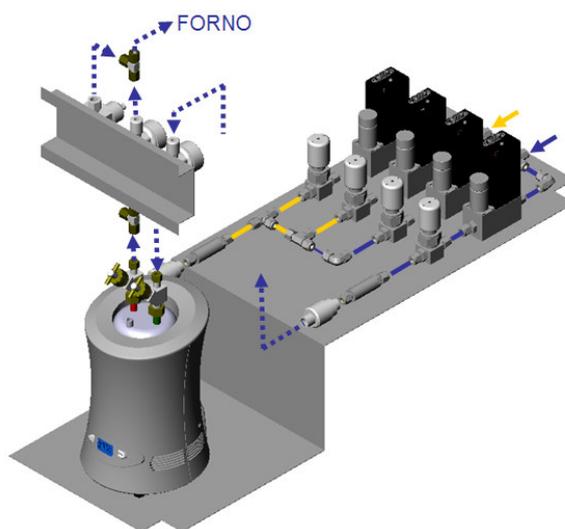


Figura 5.44. Desenho da configuração projetada para montagem do armário de gases.

Para a montagem da tubulação foi utilizado o menor número possível de conexões com o objetivo de reduzir a perda de carga e a possibilidade de vazamentos na linha. A Figura 5.46 (a) mostra a conclusão da montagem da

tubulação e componentes metálicos da linha de gases. Os itens (b) e (c) da Figura 5.46 mostram a conclusão da montagem da linha de gases.

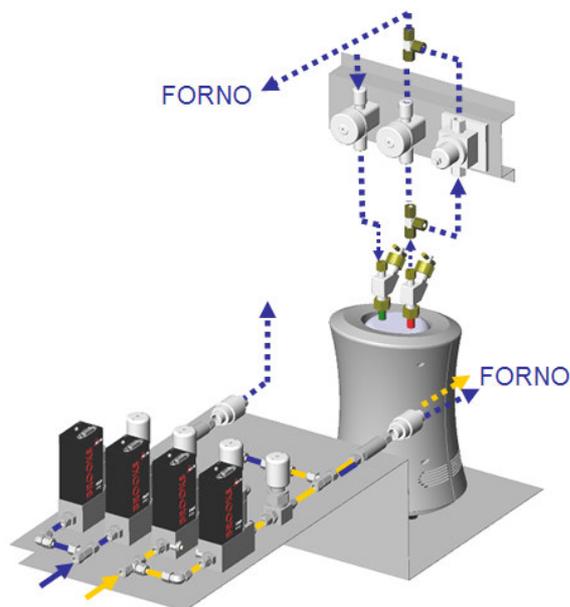


Figura 5.45. Vista posterior da configuração do armário de gases.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.46. (a) Montagem da tubulação e componentes metálicos da linha de gases, (b) e (c) conclusão da montagem da linha de gases.

5.5. Sistema de Carregamento

O sistema de carregamento deste projeto consiste em um conjunto de elementos mecânicos que possibilita a inserção e retirada das lâminas de silício na câmara de processamento de forma automatizada. Devido à opção por uma estrutura compacta para o forno, o sistema de carregamento foi desenhado para atuar de forma retrátil, implicando com isto, a necessidade de um robusto conjunto de peças para suportar os esforços envolvidos. O sistema de carregamento tem como função básica a de deslocar a espátula de SiC longitudinalmente em relação ao tubo, fixando-se uma de suas extremidades e permitindo os devidos ajustes para o melhor alinhamento do conjunto. Para tanto, este ponto de fixação deve estar instalado sobre um elemento móvel a fim de permitir o seu deslocamento. Desta forma, o desenho do sistema de carregamento consiste em um braço mecânico apoiado sobre um conjunto de blocos e guias lineares. Em uma das extremidades do braço é acoplado o mecanismo de fixação da espátula e tampas primária e secundária do forno. A outra extremidade é fixada sobre um conjunto de quatro blocos, divididos em duas guias lineares. O desenho do braço apoiado sobre o mecanismo de movimentação é apresentado na Figura 5.47 e uma vista inferior deste conjunto é mostrada na Figura 5.48.



Figura 5.47. Projeto do braço do sistema de movimentação apoiado sobre blocos e guias lineares.

A movimentação deste conjunto é realizada pela ação de um fuso de esferas posicionado entre as guias lineares e acionado por um motor elétrico. O

acoplamento do fuso de esferas com o motor é produzido por um conjunto de correia e polias redutoras, como mostra a Figura 5.49.

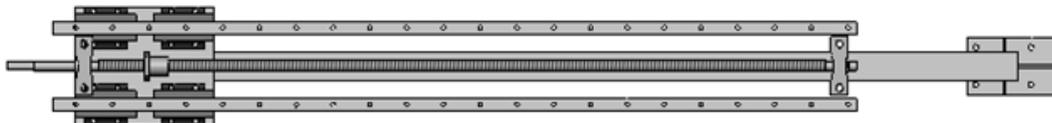


Figura 5.48. Vista inferior do sistema de movimentação onde se observa a distribuição dos blocos e o posicionamento da castanha do fuso de esferas.

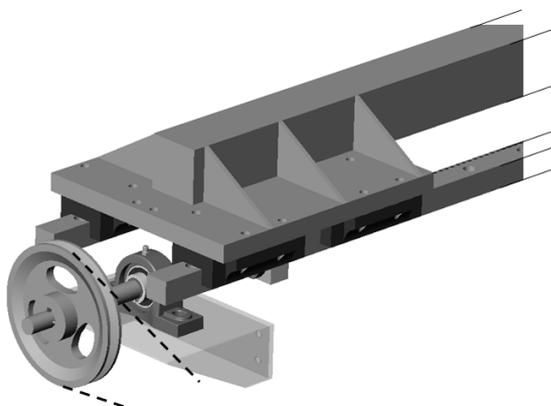


Figura 5.49. Projeto do sistema de movimentação do fuso de esferas acionado por um motor elétrico.

Para a fixação da espátula foi desenhado um mecanismo independente do braço, apresentado em vista explodida na Figura 5.50. Nesta ilustração, os itens enumerados correspondem a: 1) tampa secundária do forno; 2) suporte para fixação das hastes de quartzo; 3a) fechamento da estrutura de engaste da espátula; 3b) ajuste superior da fixação da espátula; 4) estrutura de engaste da espátula; 5) suporte lateral para eixo da estrutura de engaste da espátula; 6) base para fixação da estrutura de engaste da espátula no braço mecânico. Tal conjunto permite a regulação angular do posicionamento da espátula tanto verticalmente quanto horizontalmente.

O desenho deste conjunto montado é apresentado na Figura 5.51. Na Figura 5.51 (b) observa-se que a estrutura está apoiada sobre barras roscadas. Estas são

responsáveis pelo ajuste vertical do mecanismo em relação ao braço de movimentação.

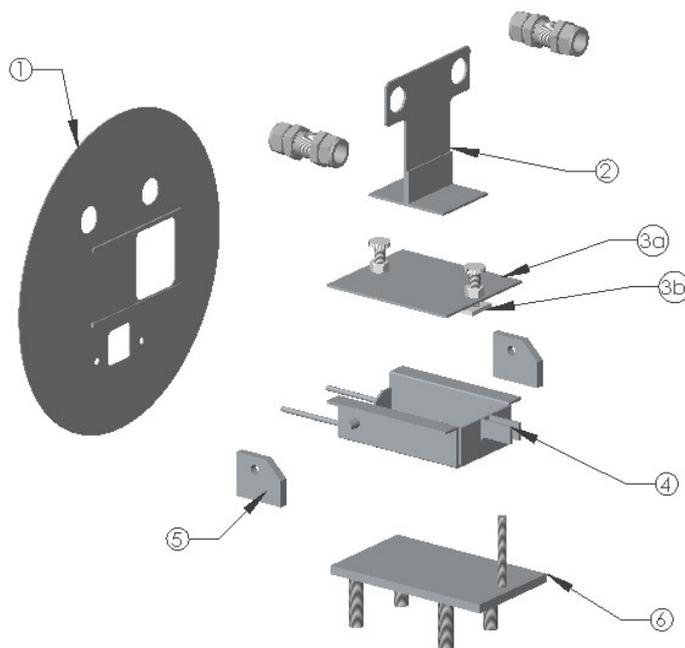


Figura 5.50. Vista explodida do mecanismo para fixação da espátula e tampas do forno.

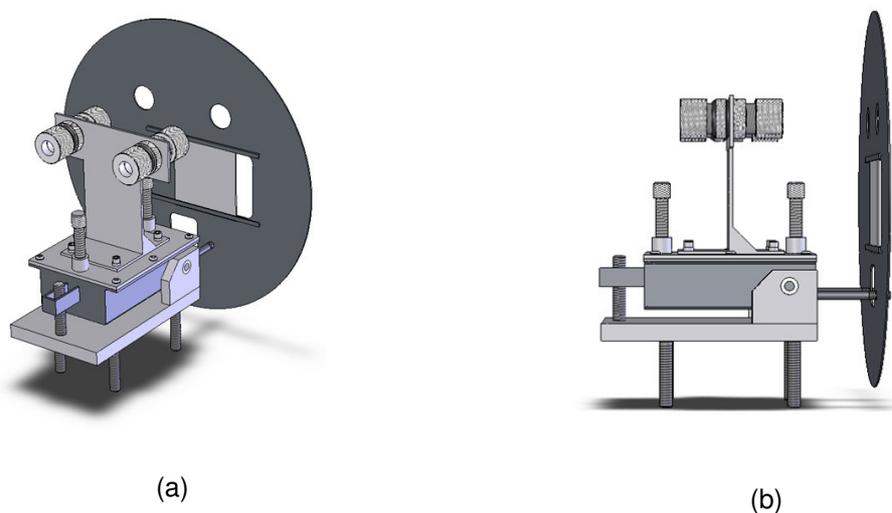


Figura 5.51. (a) Vista isométrica e (b) vista lateral do mecanismo de fixação da espátula.

A Figura 5.52 apresenta uma ilustração do projeto com a espátula e acessórios de quartzo fixados ao sistema de movimentação. Ambas as tampas do forno, primária e secundária (fabricadas em quartzo e aço inox 304,

respectivamente), são fixadas em hastes e pressionadas por molas a fim de garantir o fechamento das câmaras de processamento e exaustão do forno.

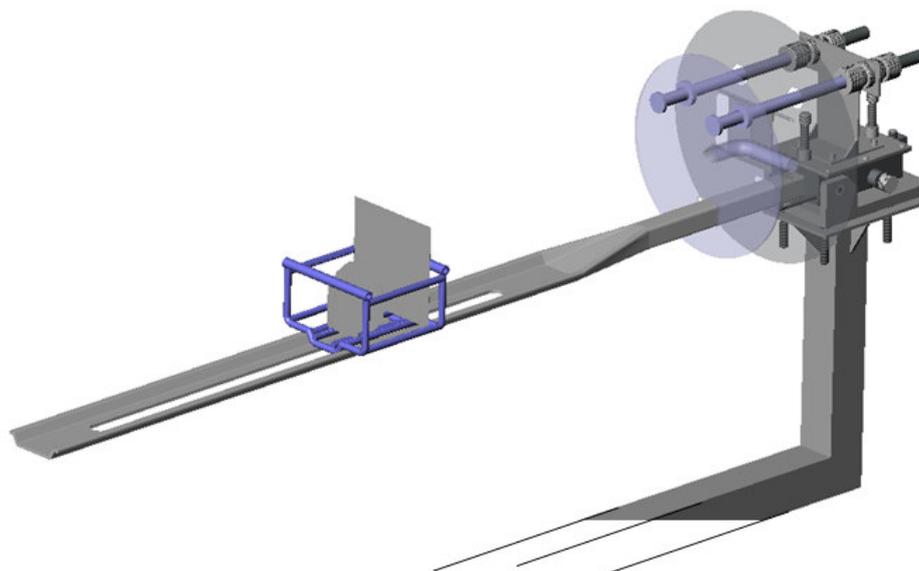


Figura 5.52. Ilustração do sistema de carregamento com acessórios de quartzo e SiC.

Resultante da combinação dimensional da câmara de processamento, estrutura e espátula, o curso útil necessário para a abertura e fechamento do forno foi definido em 1400 mm. Na Figura 5.53 (a) é ilustrado o estudo do sistema de abertura, mostrando-o totalmente fechado. A Figura 5.53 (b) mostra o mesmo sistema parcialmente aberto e a Figura 5.53 (c) apresenta a situação onde o conjunto encontra-se totalmente aberto.

Devido ao demasiado comprimento do braço foi necessário o uso de um sistema de apoio. Este sistema, formado por um conjunto de roletes e envolto por uma caixa de aço inox é ilustrado na Figura 5.54, junto ao restante dos componentes do sistema de carregamento.

O controle da movimentação é realizado com a utilização de um inversor de frequência que controla a rotação do motor. A Figura 5.55 (a) mostra o painel de controle instalado à estrutura do forno e a Figura 5.55 (b) apresenta uma vista da parte posterior do forno, onde se visualiza todo o conjunto de controle da movimentação deste sistema.

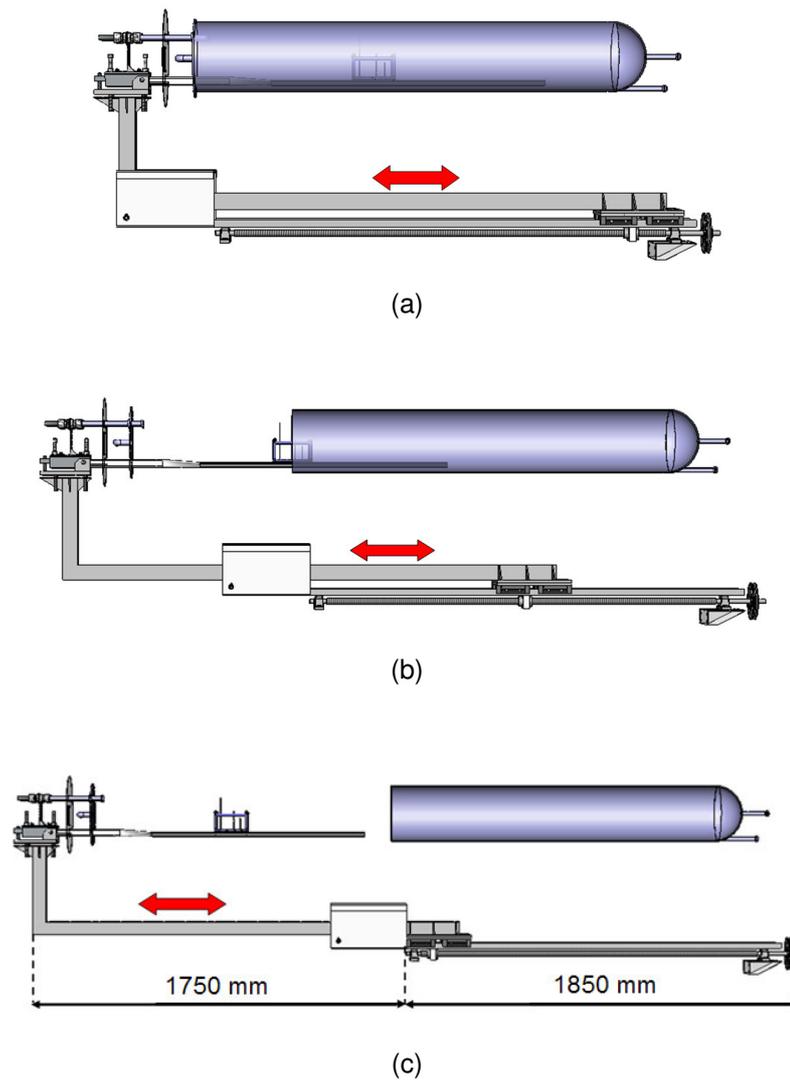
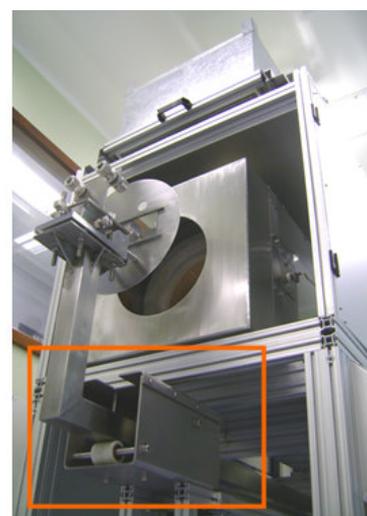


Figura 5.53. Ilustração de situações de movimentação do sistema de carregamento.



(a)



(b)

Figura 5.54. Sistema de carregamento instalado na estrutura do forno, destacando em (b) o sistema de roletes de apoio.

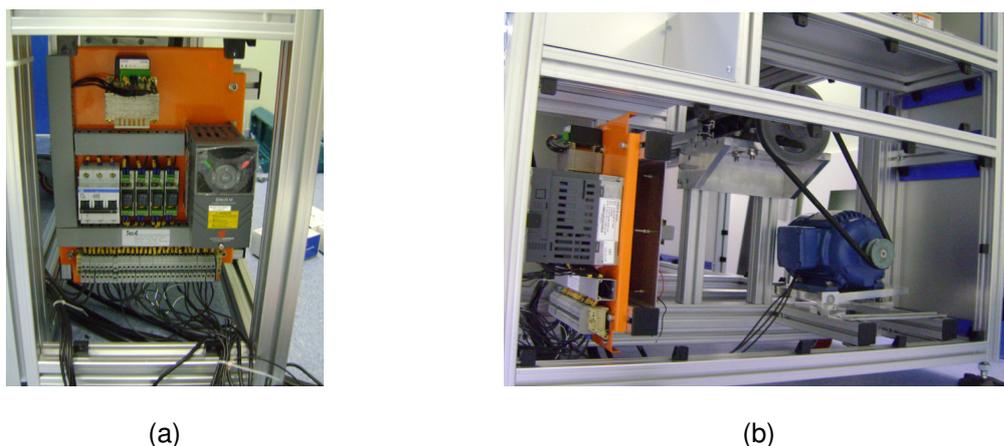


Figura 5.55. Controle do sistema de movimentação.

Existem limitadores mecânicos de final de curso montados na própria estrutura do forno, entretanto, foram utilizados sensores indutivos para limitar os pontos extremos do sistema de movimentação, assim como, para identificar os pontos para redução de velocidade com vista a proporcionar paradas e arrancadas suaves ao sistema. A Figura 5.56 mostra o detalhe dos sensores indutivos posicionados junto às guias lineares. Estes sensores são ativados pela presença da mesa de apoio entre o braço e os blocos.

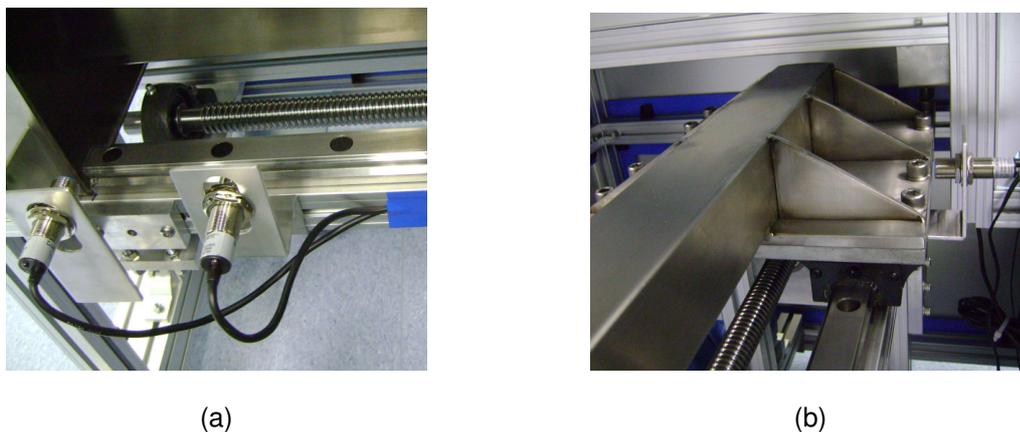


Figura 5.56. (a) Sensores indutivos do final de curso frontal e (b) sensores indutivos do final de curso posterior do sistema de movimentação.

5.6. Sistema de Fluxo Laminar

Como já foi mencionado anteriormente, o módulo de fluxo laminar é a unidade responsável por proporcionar uma região com menor concentração de

impurezas no ponto de entrada e saída das lâminas no forno. Pela mesma razão com que o sistema de carregamento é constituído por um módulo retrátil, buscou-se montar um módulo de fluxo laminar que seguisse os mesmos parâmetros. Com isto, foi selecionada uma unidade compacta e independente, dotada de um filtro absoluto capaz de atender as exigências requeridas. Uma ilustração deste equipamento de fluxo laminar é apresentada na Figura 5.57.



Figura 5.57. Equipamento de fluxo laminar [53].

O funcionamento deste equipamento é bastante simples e pode ser compreendido com a ilustração apresentada na Figura 5.58. O ar é admitido pela parte superior do equipamento e expelido em forma de fluxo laminar em sua parte inferior, sendo que as condições do fluxo podem ser reguladas devido a rotação do motoventilador ser ajustável.

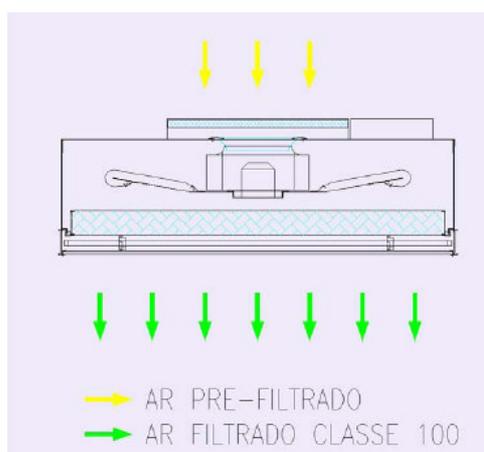


Figura 5.58. Esquema de funcionamento do equipamento de fluxo laminar [53].

Instalado sobre uma estrutura telescópica, é possível movimentar este equipamento no momento de sua utilização. O item (a) da Figura 5.59 mostra o

equipamento de fluxo laminar incorporado ao forno e o item (b) mostra a face inferior do mesmo.

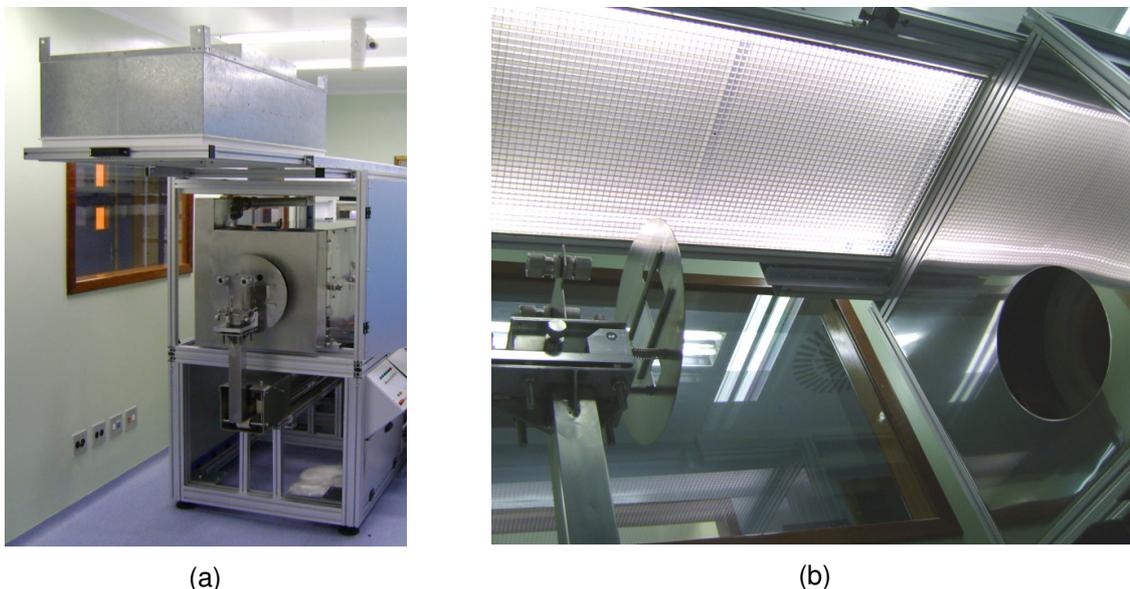


Figura 5.59. (a) Equipamento de fluxo laminar incorporado à estrutura do forno e (b) detalhe da face inferior do mesmo.

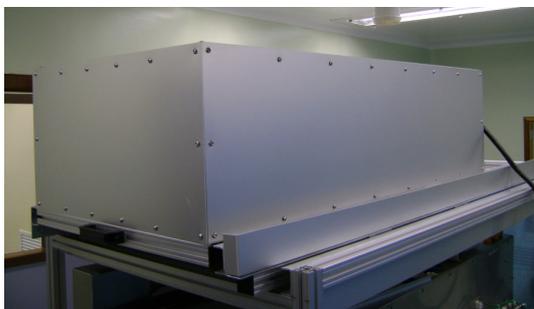
O filtro absoluto utilizado é o modelo F781 e se caracteriza como uma peça independente e passível de substituição. Uma imagem do filtro fora do equipamento é mostrada na Figura 5.60. Com este sistema é possível atingir uma região de classe 100, equivalente a ISO 5.



Figura 5.60. Filtro absoluto modelo F781.

O equipamento de fluxo laminar foi coberto por uma caixa de alumínio com uma abertura em sua face superior para a admissão do ar. Observa-se em detalhe

este acabamento na Figura 5.61 e se salienta na Figura 5.61 (b) a presença de um préfiltro na admissão do ar ambiente.



(a)



(b)

Figura 5.61. (a) Fechamento da unidade de fluxo laminar e (b) detalhe da abertura na parte superior para a admissão de ar.

5.7. Sistema de Exaustão

O sistema de exaustão interno do forno compreende o conjunto de componentes utilizados para a extração dos gases injetados na câmara de processamento e também em pontos localizados no interior da estrutura do forno. Este sistema é conectado à rede de extração do Laboratório de Difusão por meio de um acesso, ou tubulação, prolongado até o forno.

Os gases injetados no forno após as reações químicas na câmara de processamento chegam a uma câmara de exaustão que é fixada a estrutura do conjunto de resistores elétricos do forno. Esta câmara de exaustão possui uma torre para a qual os gases são direcionados por uma tubulação existente na tampa de quartzo que faz a vedação do tubo. O ponto de captação dos gases na torre possui uma regulagem para o controle da vazão e o ponto de saída é conectado a uma

tubulação de PVC (Polivinil clorado) que conduz estes gases ao exterior do forno. A Figura 5.62 mostra o caminho dos gases desde a entrada no tubo até a saída da câmara de exaustão.

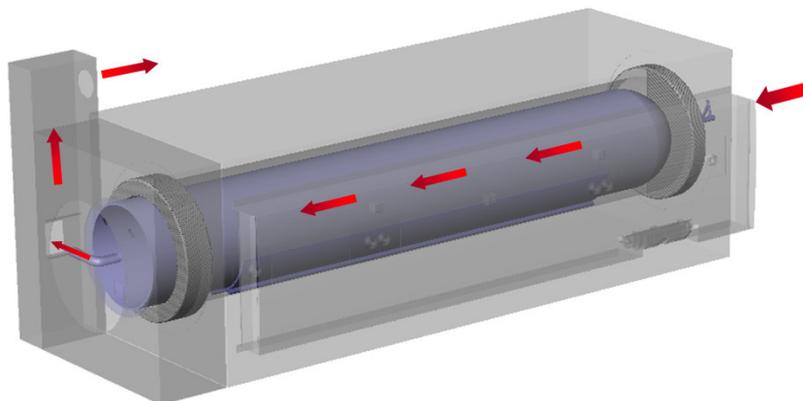


Figura 5.62. Ilustração da trajetória dos gases da inserção na câmara de processamento térmico à saída da câmara de exaustão.

A Figura 5.63 apresenta o desenho da câmara de exaustão projetada e a Figura 5.64 ilustra a mesma confeccionada e instalada no forno onde é possível verificar o detalhe do ponto de captação dos gases com regulagem de área de abertura. Esta câmara foi totalmente confeccionada em aço inoxidável devido à condição de estar sujeita ao contato direto com os gases e resíduos provenientes dos processos realizados, bem como pelo fato de estar exposta a constantes variações de temperatura.

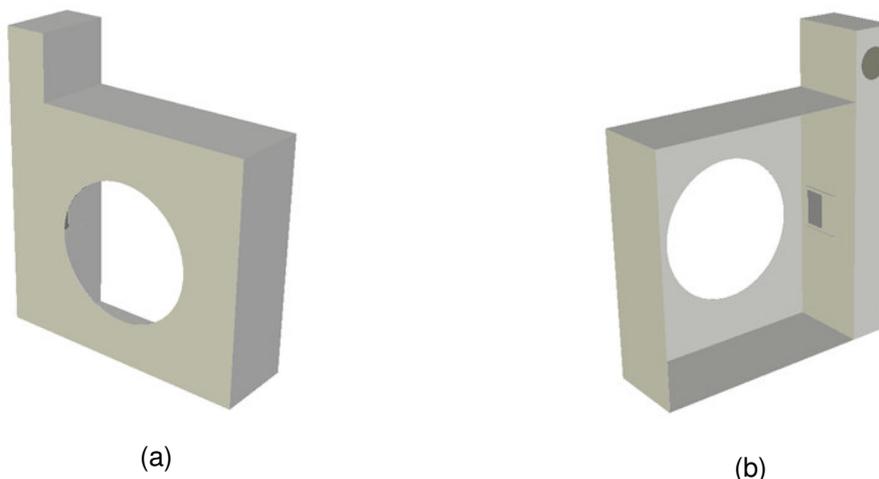


Figura 5.63. (a) Vista frontal e (b) vista posterior da câmara de exaustão.

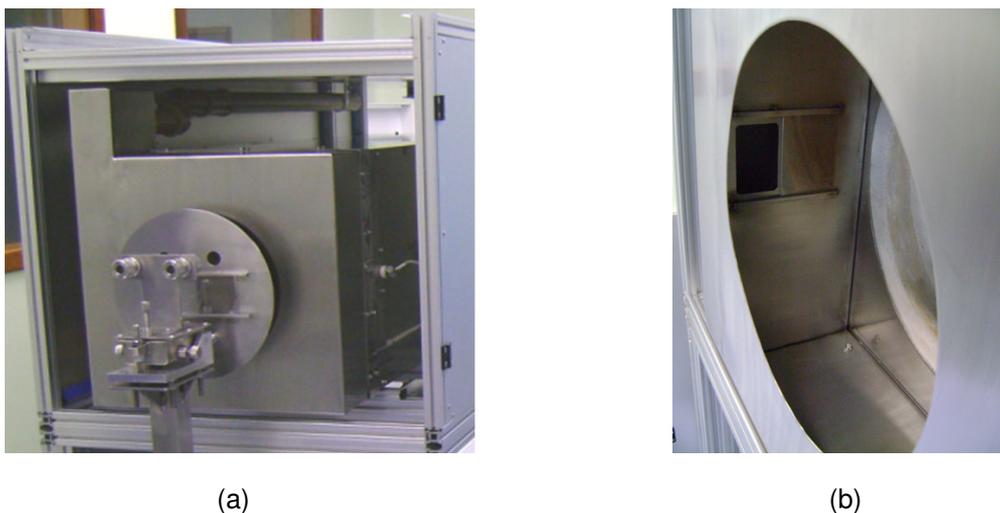


Figura 5.64. (a) Câmara de exaustão instalada no forno e (b) detalhe do acesso regulável à torre de extração.

Conectada à saída da câmara de exaustão, instalou-se uma tubulação de PVC para conduzir os gases para o sistema de extração do laboratório. A mesma tubulação é utilizada para realizar uma extração localizada sobre a conexão da linha de gases ao tubo de quartzo e sobre o borbulhador a fim de prevenir a contaminação por qualquer vazamento existente nestes pontos. A Figura 5.65 apresenta esta tubulação do sistema de exaustão instalada no forno, conectada à parte superior da torre de extração da câmara de exaustão.



Figura 5.65. Tubulação do sistema de exaustão.

A Figura 5.66 apresenta os pontos de extração localizados no armário de gases e a Figura 5.67 mostra o ponto de conexão da tubulação com a parte externa do forno.



Figura 5.66. Pontos de extração do armário de gases.



Figura 5.67. Ponto de conexão do sistema de exaustão do forno com a rede externa.

O espaço interno da estrutura que comporta o sistema de aquecimento fica sujeito ao calor transferido pelas paredes externas da carcaça do conjunto de resistores elétricos. Para minimizar esta condição um extrator foi instalado nesta estação como mostra a Figura 5.68.



Figura 5.68. Exaustor para extração do ar quente do interior do módulo de processamento térmico.

5.8. Isolamento Térmico

O conjunto de resistores elétricos é envolto por uma cobertura isolante como mencionado anteriormente. Entretanto, o lado externo desta estrutura ainda

constitui uma fonte de calor. As extremidades da câmara de aquecimento são os pontos críticos para a dissipação do calor proveniente dos resistores elétricos. Com isto, para minimizar as perdas de calor nestes pontos, foram desenhados alguns acessórios para aumentar o isolamento térmico. Fabricados sob medida, colares e discos de quartzo ou ALF (fibra constituída por 70 % de Al_2O_3 e 30 % por SiO_2) são muito utilizados em fornos de difusão justamente para este fim. A Figura 5.69 (a) apresenta o desenho de um colar para ser utilizado em torno do tubo em sua extremidade aberta e a Figura 5.69 (b) apresenta o desenho de um disco para envolver o bulbo da extremidade posterior do tubo. Tais acessórios são peças típicas utilizadas em equipamentos da indústria de semicondutores, portanto, houve a necessidade de importação destes componentes.

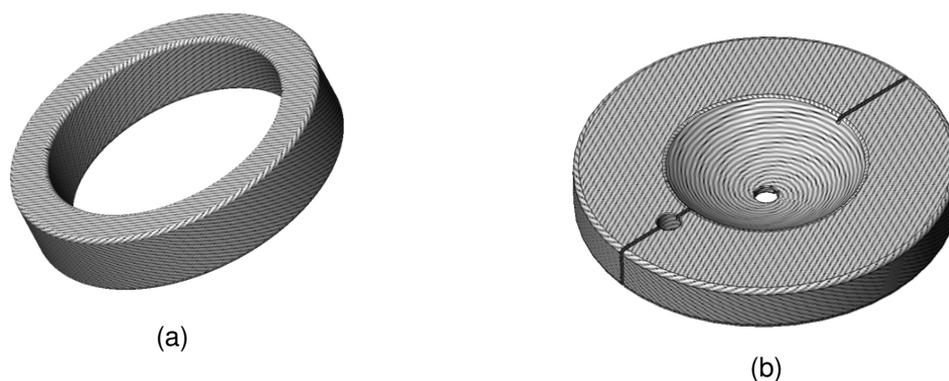


Figura 5.69. (a) Colar de ALF e (b) disco bipartido de ALF.

A Figura 5.70 ilustra o colar de ALF instalado junto ao tubo na abertura da câmara de processamento térmico do forno. Posicionada desta forma, esta peça impede a dissipação de calor proveniente do espaço existente entre o tubo e as paredes do conjunto de resistores. A Figura 5.71 ilustra o disco, também fabricado em ALF, posicionado na parte posterior do tubo. Constituído de duas partes, este item envolve o tubo permitindo apenas a exposição das conexões para inserção de gases.

As paredes internas do módulo de processamento térmico também foram revestidas com uma manta cerâmica, como mostra a Figura 5.72. Esta medida tem a finalidade de evitar a transferência de calor da carcaça do conjunto de resistores para o meio externo e outras partes do forno.

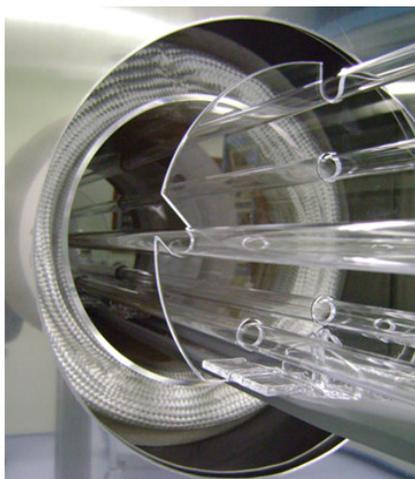


Figura 5.70. Colar de ALF posicionado junto ao tubo de quartzo no lado de abertura do forno.



(a)



(b)

Figura 5.71. Disco de ALF posicionado na extremidade posterior do tubo de quartzo.



(a)



(b)

Figura 5.72. Cobertura das paredes internas da estação de processamento térmico com mantas cerâmicas.

5.9. Sistema de Controle

Para o controle do sistema de aquecimento são utilizados três controladores como já mencionado anteriormente. Estes equipamentos podem ser acessados pelo operador conforme mostra a Figura 5.73. Nesta etapa do projeto, o ajuste da temperatura deve ser realizado diretamente no controlador central. Entretanto, estes equipamentos permitem a realização de envio e recebimento de dados por meio da interface RS-485. Desta forma, este sistema pode ser facilmente integrado futuramente à um comando central em um CLP (controlador lógico programável) e/ou em um computador.

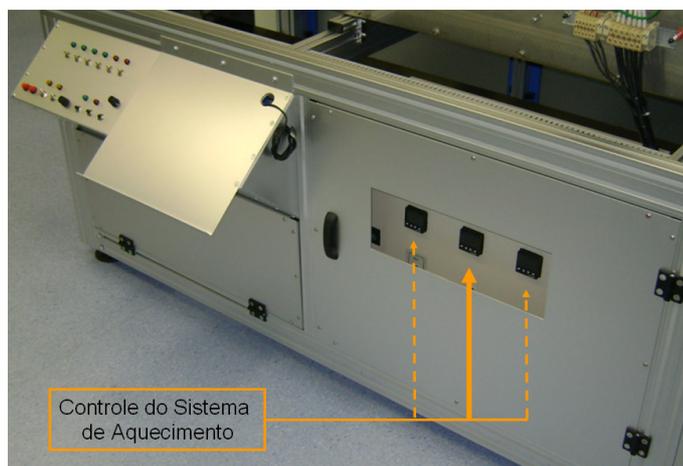


Figura 5.73. Indicação dos controladores para o controle e leitura de dados de temperatura do forno.

Do mesmo modo, as demais unidades foram instaladas para serem operadas manualmente, isto com a possibilidade de uma futura integração de todos os comandos do forno. Assim, foi confeccionado um painel para possibilitar o acionamento manual destas unidades, conforme mostra a Figura 5.74.

As seis chaves de acionamento posicionadas na parte superior do painel, indicadas por "A", possibilitam o comando das eletroválvulas e por consequência das válvulas pneumáticas do armário de gases. As chaves posicionadas no canto inferior esquerdo, indicadas por "B", permitem o acionamento da iluminação e do ventilador da unidade de fluxo laminar, respectivamente. Para o controle da rotação do ventilador um potenciômetro é posicionado ao lado destas chaves. Para o

comando do sistema de carregamento existem no canto inferior direito do painel três botões para a abertura, fechamento e parada deste sistema, indicados por "C". Também há um potenciômetro que permite a regulação da velocidade de movimentação. A leitura e o controle das vazões dos MFCs são realizados via computador com o uso de um aplicativo que é apresentado na Figura 5.75.

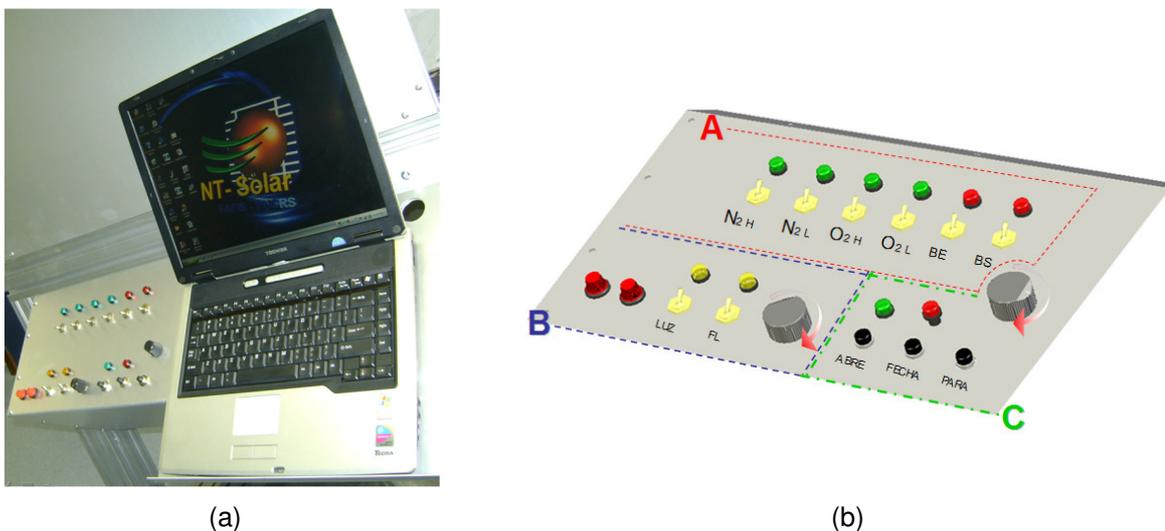


Figura 5.74. (a) Painel de comando integrado do forno e (b) indicação das posições de acionamento.

Cada MFC é controlado em uma janela individual, podendo assim, os quatro MFCs serem utilizados simultaneamente. Neste aplicativo é regulado um percentual do F.E. do equipamento, sendo que as vazões correspondentes a escala em percentual foram medidas e apresentadas no Quadro 5.7.

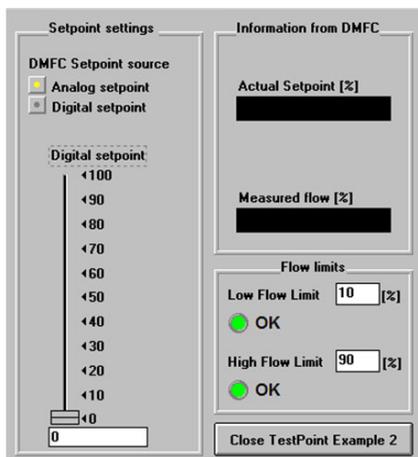


Figura 5.75. Aplicativo para controle e leitura de vazão nos MFCs.

Este sistema de comando manual requer a preparação de uma sequência de operações para cada processo, exigindo do operador a máxima atenção em sua utilização. Contudo, tratando-se de um protótipo, este sistema possibilita um amplo estudo do real funcionamento do forno e está preparado para uma futura integração do controle de todas as unidades com a criação de *software* de gerenciamento.

6. CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DO FORNO

A caracterização térmica do sistema de aquecimento do forno consiste na medição da temperatura no interior da câmara de processamento, obtendo-se assim, o perfil de distribuição térmica radial e longitudinal ao qual as lâminas de silício estarão submetidas durante os processos térmicos. O levantamento do perfil longitudinal é relevante para a determinação do comprimento e posição da ZP, ao passo que o mapeamento radial permite identificar o comportamento do sistema de aquecimento quanto à uniformidade térmica em uma dada seção do tubo.

Para caracterizar termicamente o sistema de aquecimento do forno foi necessário o desenvolvimento de três tópicos: a estrutura para caracterização térmica, o conjunto de instrumentos de medição e a definição do processo de medição.

Neste capítulo será apresentado de forma detalhada todo o desenvolvimento, aplicação e análise do processo de caracterização térmica do sistema de aquecimento do forno de difusão.

6.1. Estrutura para Caracterização Térmica

Para o levantamento do perfil térmico da câmara de processamento se faz necessária a introdução de sensores em seu interior ao passo que os valores de temperatura a serem medidos são ajustados no controle do sistema de aquecimento. Os sensores mencionados devem ser termopares próprios para a medição de temperatura até 1100 °C. Com isto, estes termopares devem ser colocados no interior do tubo de quartzo e movimentados de acordo com os pontos a serem medidos. Desta forma, para a realização deste processo de caracterização

se fizeram necessários o projeto e a confecção de uma estrutura própria para permitir a introdução dos termopares no interior do tubo.

Uma vez que deve ser evitado o contato direto de materiais contaminantes com a atmosfera interior da câmara de processamento, o primeiro critério para o desenvolvimento de uma estrutura foi o desenho de bainhas de quartzo para envolver os termopares. Para sustentar estas bainhas, foram desenhados discos de quartzo capazes de apoiar e ao mesmo tempo posicionar os termopares para o levantamento do perfil radial de temperatura. Prevendo a utilização do sistema de carregamento do forno para possibilitar a movimentação longitudinal dos termopares, a base de dois dos três discos foi desenhada para ser compatível com a espátula de SiC. O terceiro disco de quartzo funciona como uma tampa para o tubo de processamento. Uma ilustração do projeto desta estrutura é apresentada na Figura 6.1.

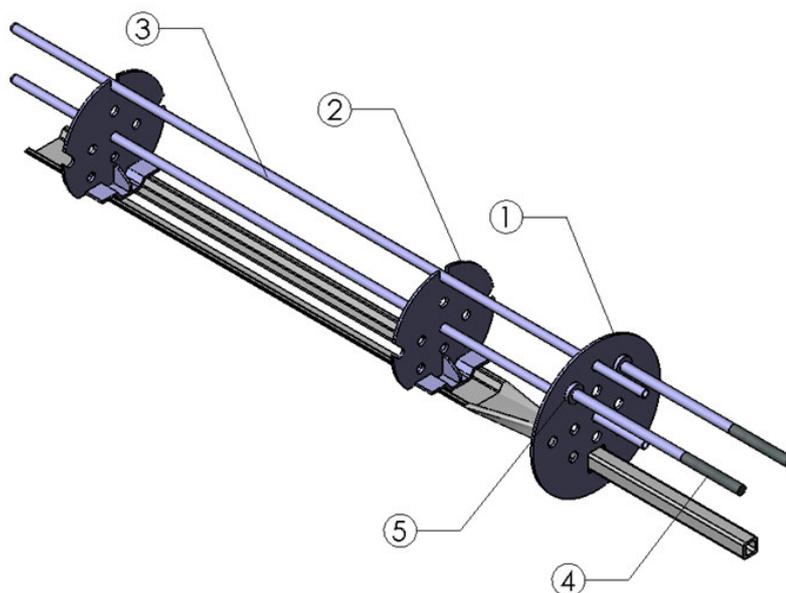


Figura 6.1. Componentes da estrutura para caracterização térmica do sistema de aquecimento do forno.

Os itens 1, 2 e 3 da Figura 6.1 correspondem à tampa, aos discos de quartzo e às bainhas para termopares, respectivamente. Os itens 4 e 5 são a espátula e as

hastes de sustentação da tampa do sistema de carregamento padrão do forno. Os itens 1 e 2 são apresentados em destaque na Figura 6.2.



Figura 6.2. (a) Tampa do tubo de quartzo com acesso às bainhas para termopares e (b) disco de quartzo para apoio das bainhas com base compatível ao desenho da espátula.

A opção pelo projeto de um conjunto de peças independentes foi preferencial para facilitar questões de fabricação e transporte, uma vez que a estrutura é constituída de itens importados fabricados sob medida, bem como permitir a variação de sua configuração conforme a necessidade de uso.

Uma vista lateral desta estrutura é apresentada na Figura 6.3 onde são definidos os pontos de medição dos termopares (junta quente) e de conexão com os fios de compensação.



Figura 6.3. Vista lateral do projeto da estrutura para caracterização.

A estrutura foi desenhada para permitir o uso de até nove termopares. Uma ilustração deste conjunto de componentes de quartzo e SiC completo é apresentada na Figura 6.4.

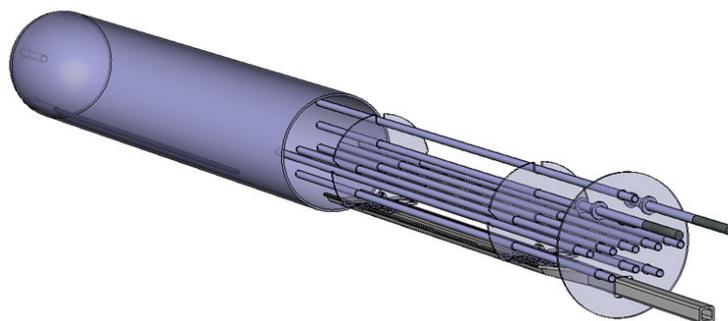


Figura 6.4. Ilustração do projeto completo da estrutura de quartzo para caracterização térmica.

A Figura 6.5 apresenta uma seção reta deste conjunto. Nesta ilustração são destacados os pontos passíveis de medição com o uso da estrutura projetada e os respectivos diâmetros em relação ao centro.

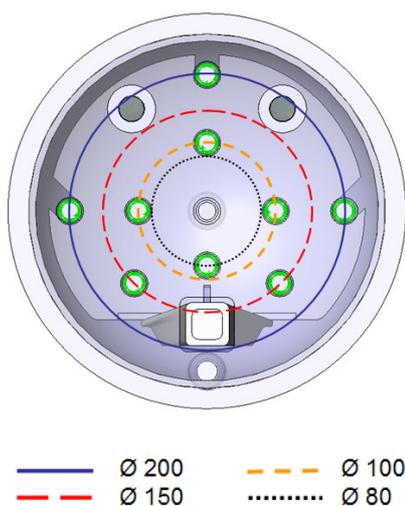


Figura 6.5. Seção reta da estrutura de caracterização térmica com destaque aos pontos de medição.

O resultado do projeto e fabricação destes componentes é apresentado na Figura 6.6. Do mesmo modo, a Figura 6.7 apresenta as extremidades desta estrutura de quartzo para caracterização térmica instalada no sistema de carregamento do forno. Salienta-se que nestas imagens a estrutura de quartzo é apresentada sem a presença dos termopares, sendo montada previamente desta forma para complementar o processo de secagem após a limpeza das mesmas. Assim como os demais componentes de quartzo e SiC do forno, todas estas peças foram submetidas a processos de limpeza baseados em HCl e HF.

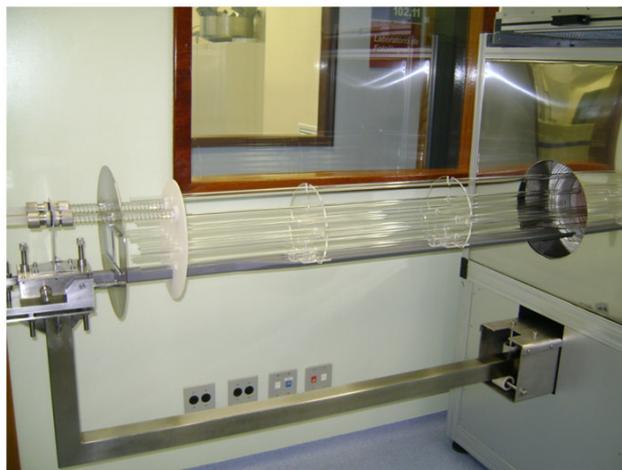


Figura 6.6. Estrutura de quartzo para caracterização térmica do sistema de aquecimento do forno instalada no sistema de carregamento.



(a)



(b)

Figura 6.7. (a) Extremidade aberta das bainhas para a inserção dos termopares e (b) extremidade fechada para o posicionamento no interior do tubo de quartzo.

6.2. Instrumentação Aplicada

Para a medição e aquisição de dados na caracterização térmica do sistema de aquecimento do forno foi utilizado um conjunto de instrumentos típico para medição de temperatura. Com exceção da estrutura projetada e fabricada exclusivamente para este forno, os demais componentes da instrumentação aplicada são de uso comum em medições de temperatura e sistemas de aquisição de dados automatizados. Como sensores de temperatura foram utilizados termopares do tipo K (níquel-cromo/ níquel-alumínio), selecionados por apresentarem baixo custo e permitirem a medição de temperaturas na faixa de 800 °C a 1100 °C. Cada termopar possui 1450 mm de comprimento sendo montados em tubos isoladores cerâmicos. Com o uso de fios de compensação, os termopares

foram conectados à placa multiplexadora, modelo *Agilent 34901A*. Esta placa multiplexadora é acoplada ao multímetro que permite a medição da tensão produzida pelos termopares além de convertê-la em unidades de temperatura. Os dados registrados neste equipamento foram transferidos por meio da interface RS-232 para um microcomputador onde são apresentados em tempo real e armazenados. A Figura 6.8 apresenta o esquema da instrumentação aplicada a este processo de caracterização térmica do forno desenvolvido.

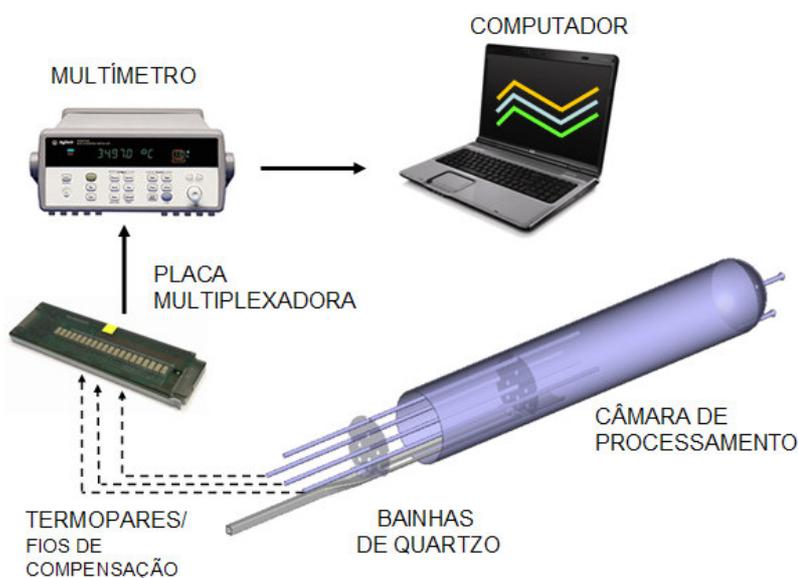


Figura 6.8. Diagrama da instrumentação aplicada à caracterização térmica do sistema de aquecimento do forno.

O Quadro 6.1 apresenta uma relação descritiva dos equipamentos que compõem o sistema de instrumentação aplicado.

Quadro 6.1. Relação descritiva da instrumentação aplicada.

Equipamento/ Dispositivo	Marca/ Modelo	Especificações
Multímetro	<i>Agilent 34970A</i>	-
Placa Multiplexadora	<i>Agilent 34901A</i>	-
Aplicativo	<i>Agilent BenchLink Data Logger II</i>	-
Termopares	Tipo K	8 AWG (Ø 3,26 mm)

O conjunto de instrumentos instalados no forno para o processo de caracterização é apresentado na Figura 6.9. Com a utilização de uma mesa móvel, o sistema de aquisição de dados automatizado é movimentado à medida que o sistema de carregamento introduz ou retira os termopares do forno. A Figura 6.10 destaca as extremidades de medição e conexão dos termopares envolvidos por bainhas de quartzo.

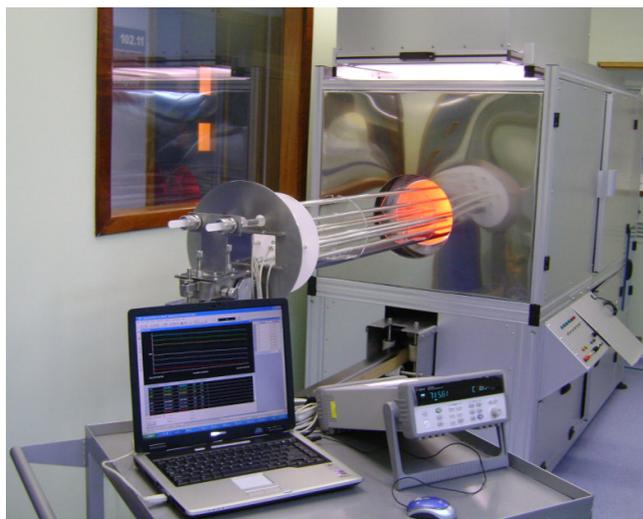
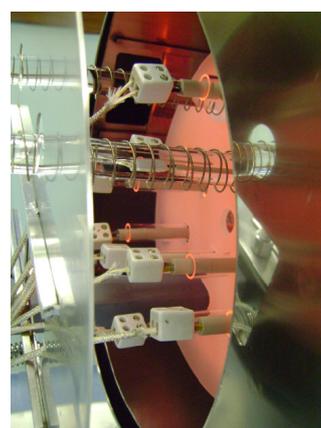


Figura 6.9. Instrumentação para caracterização do forno de difusão.



(a)



(b)

Figura 6.10. (a) Extremidades de medição dos termopares e (b) extremidades de conexão dos termopares com os fios de compensação.

A incerteza indicada para o conjunto multímetro e placa multiplexadora é de 1 °C ao passo que os termopares tipo K apresentam uma incerteza de $\pm 2,2$ °C. Com isto, o conjunto de medição apresenta uma incerteza total de 2,4 °C.

6.3. Processos de Medição

O principal objetivo a ser alcançado com a realização destes testes é o levantamento das curvas de aquecimento, resfriamento e variação da temperatura quanto à posição no interior da câmara de processamento. Para isto, a metodologia aplicada ao processo de medição está baseada em uma técnica usual para a determinação da posição e dimensão da ZP em fornos convencionais. Tal técnica consiste em movimentar termopares no eixo longitudinal da câmara de processamento obtendo-se assim o perfil térmico do forno. Esta metodologia baseia-se também em uma análise prévia do comportamento do forno em conjunto com a instrumentação aplicada. Desta forma, foram realizadas medições iniciais verificando-se a estabilidade temporal das leituras dos termopares dos controladores e termopares do sistema de caracterização.

O método utilizado neste processo de medição consiste em posicionar os termopares a 1200 mm do início do conjunto de resistores elétricos, como mostra a Figura 6.11. Nestes pontos são realizadas as medições das curvas de aquecimento e resfriamento para diferentes temperaturas. Mesmo estando fora dos limites previstos para a ZP, os dados obtidos nesta região são mais estáveis para as condições de teste em razão de que a câmara de processamento não se encontra totalmente fechada, causando assim, maiores perdas de calor na região de carregamento. A posição da tampa da câmara de processamento com os termopares na posição 1200 mm é apresentada na Figura 6.12.

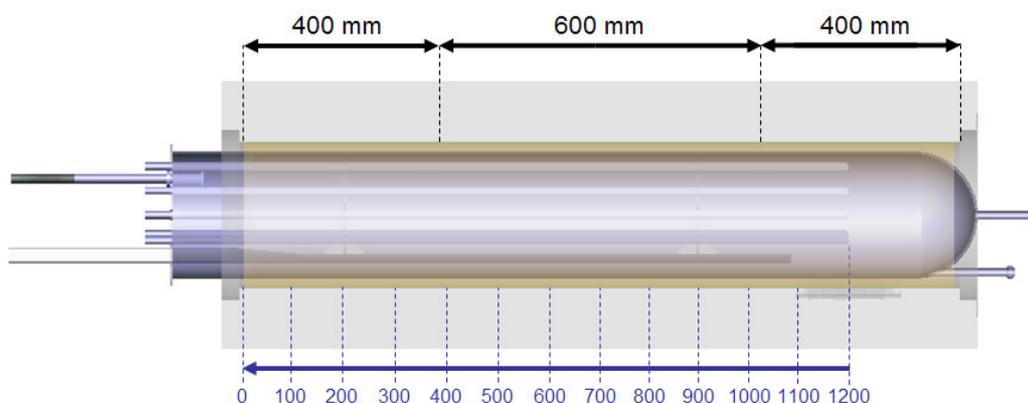


Figura 6.11. Representação do processo de medição aplicado quanto ao posicionamento do conjunto de termopares no interior da câmara de processamento.

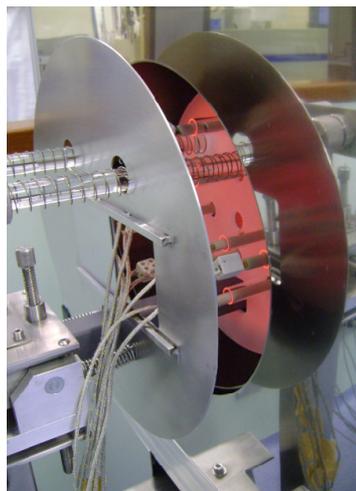


Figura 6.12. Abertura do forno para termopares na posição 1200 mm.

A partir desta posição (1200 mm), o conjunto de termopares é movimentado para fora da câmara de processamento e medidas são realizadas em intervalos de 100 mm, conforme mostra a Figura 6.11.

O tempo de estabilização adotado para cada posição foi de cinco minutos, com medidas realizadas a cada dez segundos. Este critério para a realização das medidas de temperatura é validado pela análise dos resultados apresentada no item 6.4.

Ao passo que a Figura 6.11 apresenta o conjunto de termopares totalmente inseridos no tubo de quartzo, a Figura 6.13 mostra a condição verificada para medições na posição 0 mm, ou seja, no início do conjunto de resistores elétricos com o sistema de carregamento totalmente aberto.

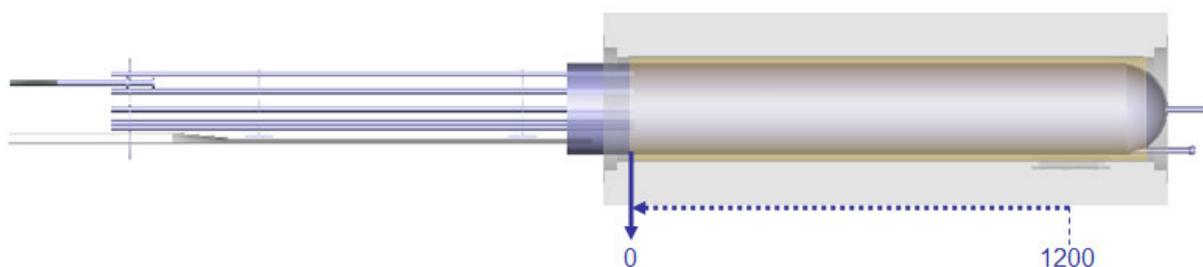


Figura 6.13. Representação dos termopares posicionados no início do conjunto de resistores elétricos, correspondente a posição 0 mm.

6.4. Análise dos Resultados

Com o procedimento apresentado, o forno foi analisado para as temperaturas de 725 °C, 800 °C, 875 °C e 965 °C no interior do tubo. Uma característica comum e também observada neste forno é a diferença entre a temperatura medida com os termopares externos ao tubo (conectados aos controladores de temperatura) e pelos termopares do sistema de caracterização. Em geral, a temperatura medida no interior do tubo é ligeiramente superior ao valor apresentado pelos controladores. Com isto, foi estabelecida uma relação entre os valores ajustados nos controladores e os valores lidos pelo sistema de caracterização para os termopares posicionados no centro do tubo. Esta relação é expressa por meio da equação:

$$T_i = 0,004T_c^2 - 4,8T_c + 2155 \quad (6.1)$$

Obtida por meio de uma curva de tendência expressa matematicamente por um polinômio de segunda ordem, esta equação permite uma previsão aproximada da temperatura no interior da câmara de processamento (T_i) em função do valor de temperatura ajustado no controlador central (T_c) para o PID utilizado. Este tipo de ajuste foi utilizado anteriormente em fornos da marca Bruce que receberam o mesmo tipo de controladores [33]. Tal curva foi obtida pela relação das temperaturas de 725 °C, 875 °C e 965 °C com os valores ajustados nos controladores em 650 °C, 800 °C e 850 °C, respectivamente. A temperatura de aproximadamente 800 °C medida no interior do tubo foi obtida com a aplicação desta equação, com o valor ajustado no controlador central em 745 °C. Contudo, é válido ressaltar que para valores acima de 850 °C, ajustados nos controladores, observou-se uma dificuldade do sistema de aquecimento atingir e estabilizar a temperatura com a entrada do forno semiaberta.

6.4.1. Rampas de Aquecimento

O processo de aquecimento e estabilização de temperatura na câmara de processamento está diretamente associado ao PID aplicado e ao percentual de

potência liberado para cada conjunto de resistores. Os resultados apresentados foram obtidos com a utilização de 60 % da potência na zona central, 60 % na zona de carregamento e 40 % na região posterior.

Os gráficos apresentados nas Figuras 6.14 e 6.15 mostram duas diferentes situações observadas durante o ciclo de aquecimento. A Figura 6.14 apresenta a curva de aquecimento de 300 °C para 725 °C, temperaturas ajustadas nos controladores. A Figura 6.15 mostra a curva de aquecimento com a temperatura ajustada no controlador em 800 °C, partindo também de 300 °C. Quanto maiores os valores de temperatura ajustados maior é o intervalo de tempo para o sistema atingir a estabilidade térmica. Este fato é verificado inclusive em função da abertura existente na região de carregamento, sendo esta uma característica inerente ao aparato de medição. Desta forma, ao passo que os controladores das regiões de admissão de gases e central atingem a igualdade e estabilidade entre valores ajustados e medidos pelos termopares externos ao tubo, o controlador da região de carregamento mostra uma diferença considerável entre estes valores, com incrementos adicionados em longos intervalos de tempo.

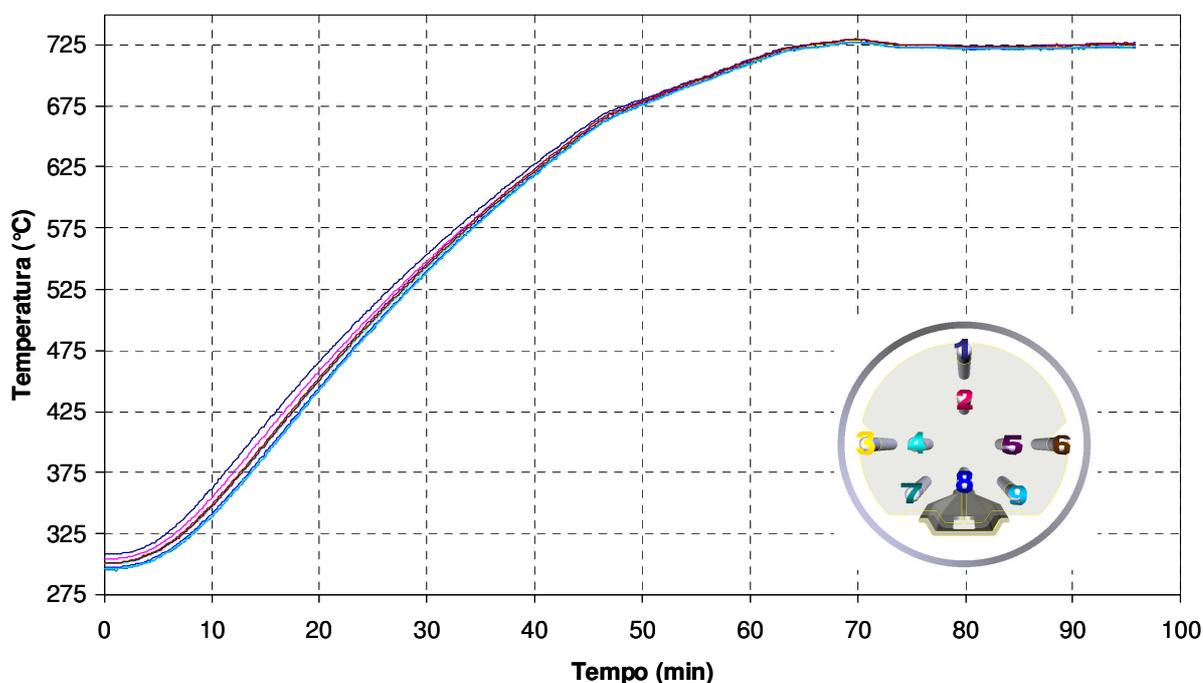


Figura 6.14. Curvas de aquecimento de 300 °C para 725 °C. Temperaturas ajustadas nos controladores resultando em uma temperatura máxima e estável de 725 °C na zona de admissão de gases. Medição realizada a 1200 mm do início do conjunto de resistores elétricos.

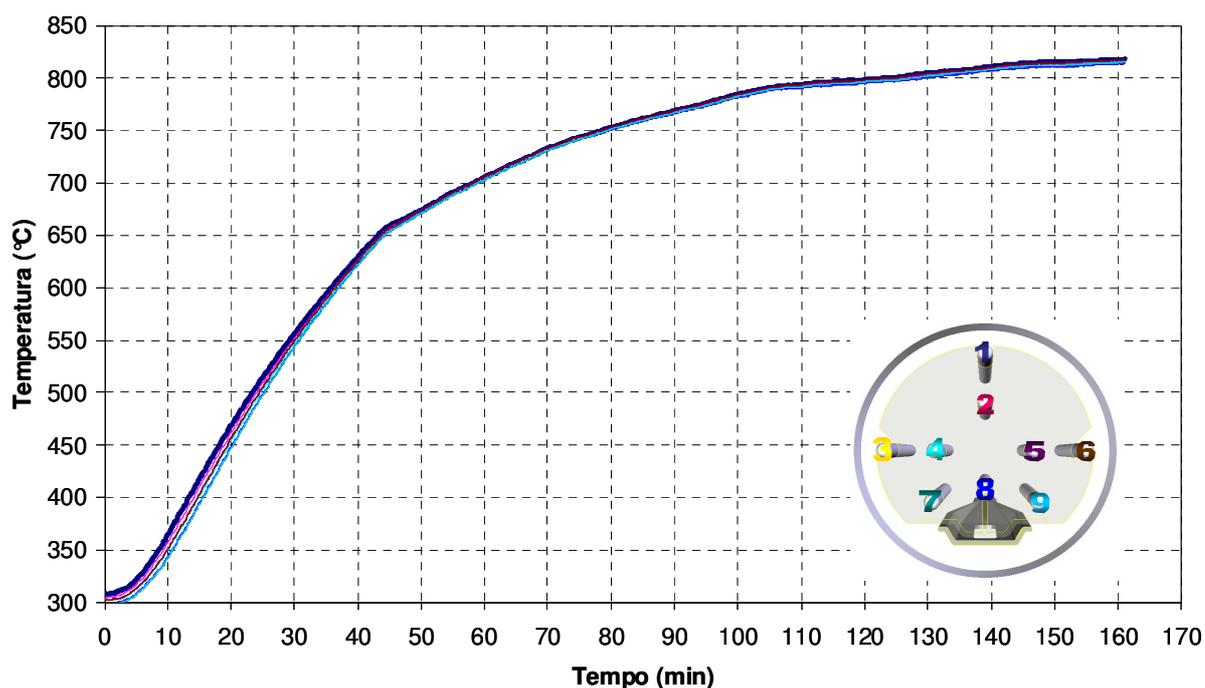


Figura 6.15. Curvas de aquecimento de 300 °C para 800 °C; temperaturas ajustadas nos controladores. Medição realizada a 1200 mm do início do conjunto de resistores elétricos.

Ambos os gráficos das curvas de aquecimento apresentam duas regiões com $\Delta T/\Delta t$ distintos. Para o gráfico da Figura 6.14 pode-se definir a relação da variação da temperatura em função de um intervalo de tempo em aproximadamente 8,6 °C/min, para a região do gráfico compreendida entre 6,5 e 45 minutos. Para a região compreendida entre 47 e 64 minutos este $\Delta T/\Delta t$ é de aproximadamente 3,18 °C/min. No intervalo de tempo compreendido entre 7 e 43 minutos do gráfico da Figura 6.15, verifica-se um $\Delta T/\Delta t$ de aproximadamente 8,5 °C/min. No intervalo de 46 a 104 minutos deste mesmo gráfico o $\Delta T/\Delta t$ verificado foi de aproximadamente 2,2 °C/min.

As curvas relativas às rampas de aquecimento apresentadas foram medidas com os termopares do sistema de caracterização posicionados a 1200 mm do início do conjunto de resistores elétricos. Nesta região do forno os valores lidos pelos termopares posicionados no interior do tubo são bastante próximos aos valores de temperatura ajustados no controlador da região central. Isto, considerando-se ainda uma diferença entre as temperaturas lidas no interior do tubo e em sua parede externa.

Observa-se claramente na Figura 6.14 que ao atingir a estabilidade na leitura dos controladores das regiões central e posterior da câmara, a temperatura medida no interior do tubo se torna estável, para esta faixa de temperatura aplicada. A Tabela 6.1 relaciona os valores apresentados pelos controladores ao final desta medição.

O pico que antecede a estabilização térmica, observado aos 70 minutos na Figura 6.14, ocorre devido às características de funcionamento do forno, pois o controle do aquecimento envia pulsos de corrente até que os valores ajustados nos controladores sejam atingidos. Atingindo-se estes valores, a corrente elétrica é interrompida e/ou aumentada apenas para manutenção da temperatura. Entretanto, há o fator inércia no aumento de temperatura após os controladores interromperem o fornecimento de energia, sendo esta inércia térmica representada pelo pico observado.

Tabela 6.1 Relação dos valores ajustados e lidos nos controladores para o levantamento do gráfico apresentado na Figura 6.14.

Zona Térmica	Carregamento	Central	Admissão de Gases
<i>Temperatura Ajustada</i>	700 °C	725 °C	700 °C
<i>Temperatura Lida no Controlador</i>	519 °C	726 °C	703 °C

Na Figura 6.15 é demonstrada a dificuldade do sistema de aquecimento em atingir a estabilidade para valores de temperatura muito elevados com o sistema de carregamento do forno semiaberto. A Tabela 6.2 mostra a relação dos valores apresentados pelos controladores ao final desta medição.

Outro aspecto que pode ser observado nestas curvas é o comportamento da uniformidade térmica radial no interior do tubo. Analisando o início do gráfico, antes da ascensão da curva de aquecimento, nota-se que em um intervalo de estabilidade

térmica a 300 °C, a variação máxima da temperatura radial é de aproximadamente 12 °C. Esta variação é reduzida para aproximadamente 4 °C na situação de uma estabilização térmica acima de 700 °C.

Tabela 6.2 Relação dos valores ajustados e lidos nos controladores para o levantamento do gráfico apresentado na Figura 6.15.

Zona Térmica	Carregamento	Central	Admissão de Gases
<i>Temperatura Ajustada</i>	773 °C	800 °C	773 °C
<i>Temperatura Lida no Controlador</i>	655 °C	800 °C	777 °C

6.4.2. Rampas de Resfriamento

O resfriamento do forno ocorre de forma natural, ou seja, durante este processo o sistema de aquecimento simplesmente interrompe o fornecimento de energia elétrica ao conjunto de resistores. O comportamento do forno em processos de resfriamento é mostrado nas Figuras 6.16 e 6.17. A Figura 6.16 corresponde à curva de resfriamento de 725 °C para 300 °C, temperaturas ajustadas nos controladores. Da mesma forma, a Figura 6.17 mostra a curva de resfriamento de 850 °C para 300 °C. Observa-se que o comportamento se mantém para diferentes temperaturas iniciais aplicadas. Além disto, se observa que para temperaturas abaixo de 400 °C a diferença na distribuição térmica radial se acentua e se mantém constante até que o forno atinja a temperatura final. O mesmo foi verificado no início das curvas de aquecimento apresentadas no item 6.4.1. A temperatura de 300 °C é usual para a manutenção do forno quando o mesmo não está sendo utilizado em processos. Esta temperatura pode ser maior (por exemplo, 500 °C) quando o uso do forno em processos é mais freqüente.

Estas curvas foram medidas com os termopares posicionados a 1200 mm do início do conjunto de resistores elétricos, como nas curvas de aquecimento.

Nas referidas curvas é possível visualizar e determinar o tempo de resfriamento do forno, o qual se apresenta como um processo bastante lento. Este período pode vir a ser reduzido com a passagem de gases no interior do tubo, processo não aplicado a estes testes em virtude de que o objetivo nesta etapa é determinar as características térmicas do forno sem a influência de agentes externos. Entretanto, durante os processos para a fabricação de células solares são utilizados constantemente gases com fluxos a serem determinados em virtude de cada aplicação ou objetivo específico.

A variação de temperatura em função do tempo para as curvas de resfriamento apresentadas nas Figuras 6.16 e 6.17, podem ser obtidas na região de maior linearidade dos gráficos. Com isto, no intervalo de tempo compreendido entre 10 minutos e 240 minutos na Figura 6.16 o valor de $\Delta T/\Delta t$ verificado foi de aproximadamente 1,5 °C/min. Para o intervalo de tempo entre 5 e 220 minutos na Figura 6.17 o valor $\Delta T/\Delta t$ verificado foi de aproximadamente 1,8 °C/min.

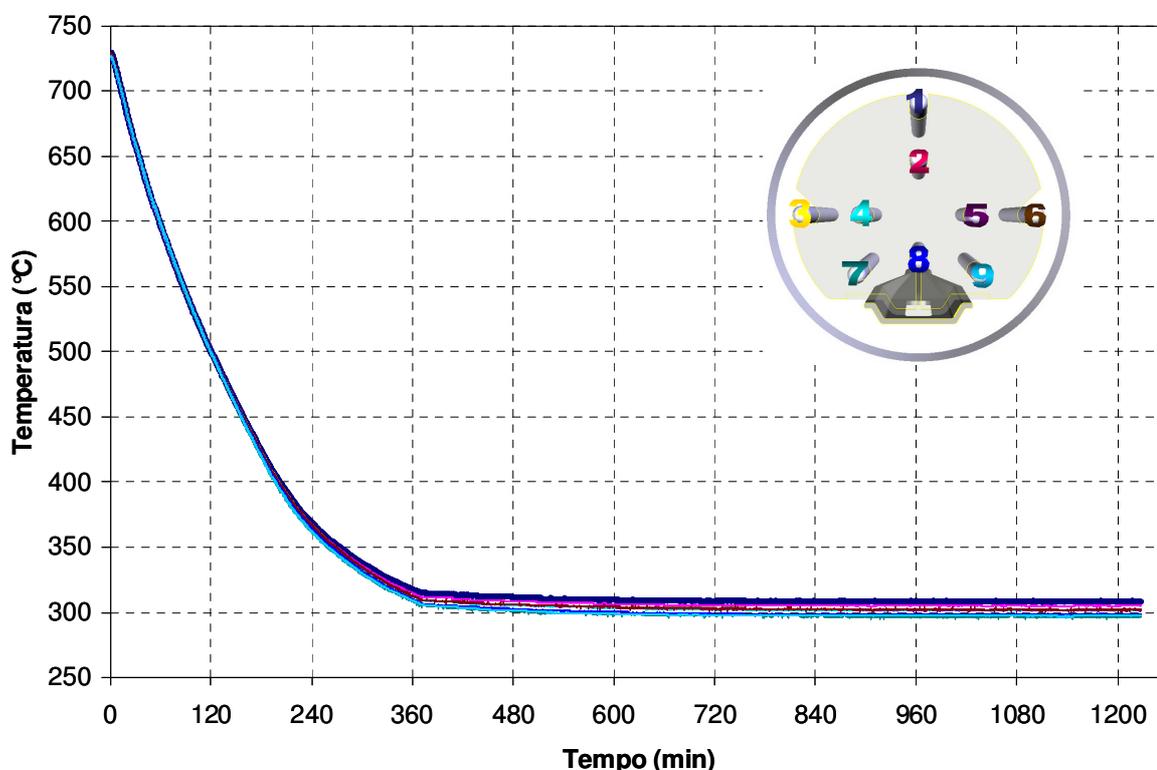


Figura 6.16. Curvas de resfriamento de 725 °C para 300 °C; temperaturas ajustadas nos controladores. Medição realizada a 1200 mm do início do conjunto de resistores elétricos.

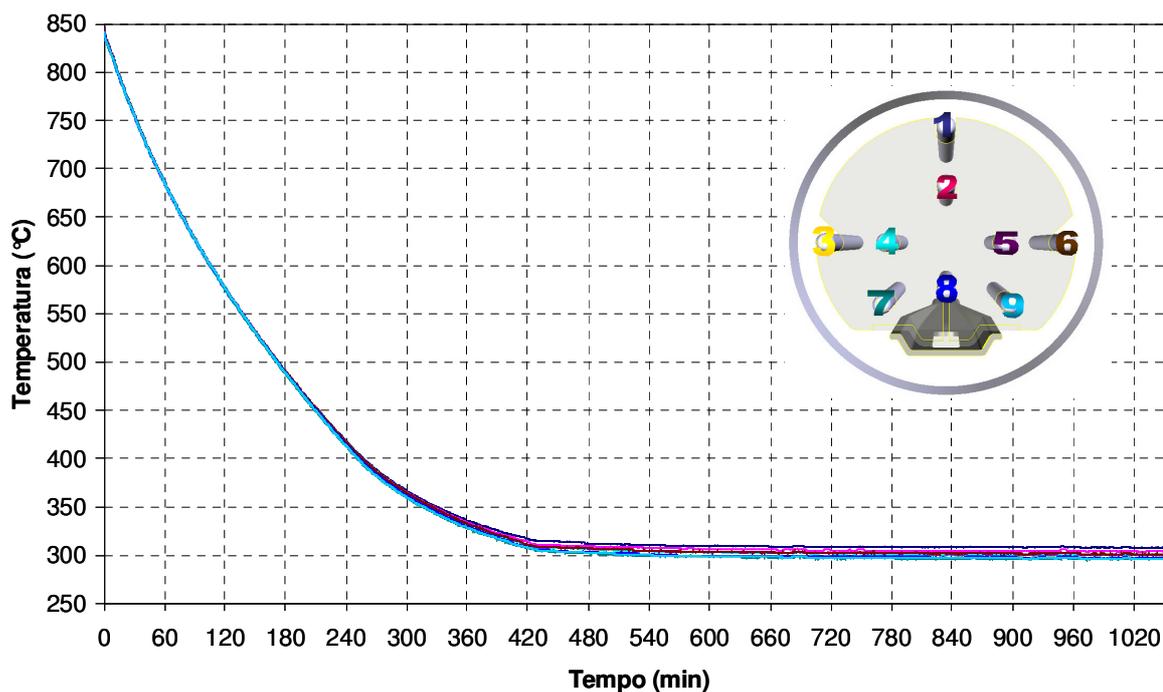


Figura 6.17. Curvas de resfriamento de 850 °C para 300 °C; temperaturas ajustadas nos controladores. Medição realizada a 1200 mm do início do conjunto de resistores elétricos.

6.4.3. Perfil Térmico do Forno

O perfil térmico da câmara de aquecimento do forno corresponde ao resultado obtido com medições realizadas em diferentes posições do interior do tubo em relação ao seu eixo longitudinal. A curva apresentada na Figura 6.18 ilustra este teste com uma temperatura ajustada no controlador em 650 °C. Nesta figura o eixo das abscissas corresponde aos intervalos de tempo entre as medidas realizadas em diferentes posições, ou seja, cada espaço delimitado pelos intervalos de tempo está relacionado a uma posição na qual os termopares permaneceram durante cada ciclo de medidas.

O perfil térmico do forno indica que as zonas de estabilização aplicam temperaturas inferiores à região central, para o PID utilizado. Neste perfil há uma brusca queda de temperatura a partir dos 700 mm, centro da câmara de processamento. Isto ocorre devido ao fato de o forno estar sendo aberto a medida que se aproxima da posição 0 mm. Este efeito foi observado anteriormente no forno Bruce do Laboratório de Células Solares do NT-Solar, mas neste caso, tal efeito foi

minimizado em função do menor diâmetro e maior comprimento do tubo de quartzo [33]. Na posição 800 mm o primeiro disco de quartzo que apóia os termopares começa a deixar o interior do tubo fazendo com que não haja mais o bloqueio que esta peça estabelece para a saída do ar quente. Além disto, nas posições medidas abaixo de 700 mm a uniformidade térmica radial apresenta maiores diferenças entre os valores medidos. Atribui-se este fato principalmente a condição de que o ar quente da câmara de processamento tende a sair da mesma em um fluxo ascendente, como mostra a Figura 6.19. Com isto, tende a ter maior influência sobre os termopares posicionados na parte superior da estrutura.

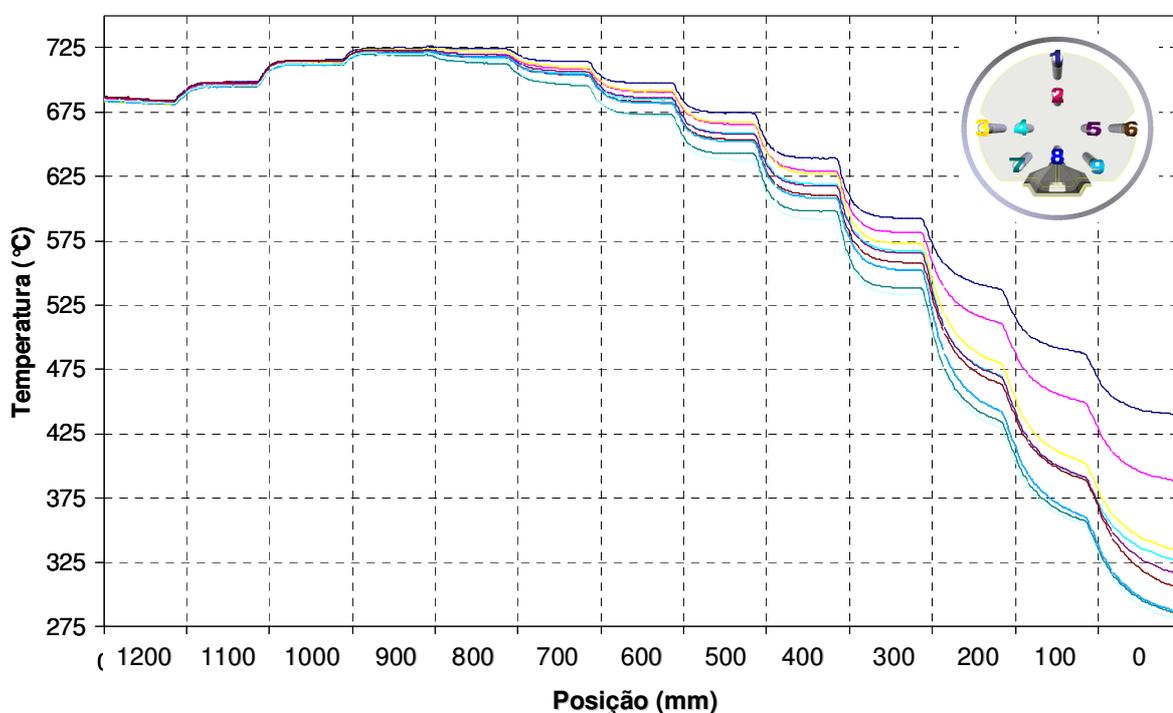


Figura 6.18. Perfil térmico do forno para uma temperatura de 650 °C, ajustada nos controladores, resultando em uma temperatura máxima com características de ZP de 725 °C.

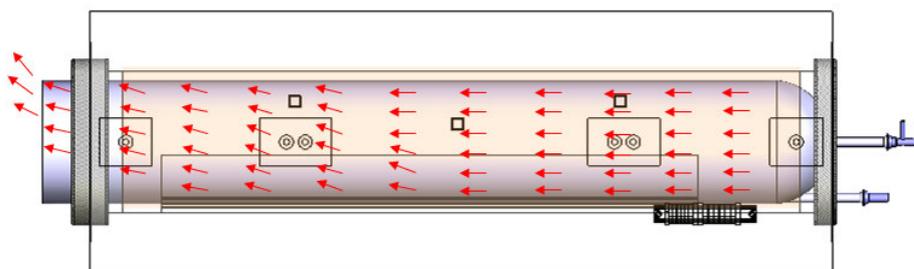


Figura 6.19. Representação do comportamento da saída do ar quente formado no interior do tubo de quartzo devido ao aquecimento do forno.

Pode-se determinar que as características de ZP apresentadas na Figura 6.18 são verificadas na posição 900 mm. Estas características se estendem para a posição 800 mm, sendo que nesta já se observa a interferência da abertura do forno. Contudo, a posição 700 mm corresponde ao centro da câmara de aquecimento, e havendo uma simetria da potência dissipada em torno deste ponto pode também haver uma simetria térmica nesta região para a situação do forno fechado. Assim, a ZP do forno poderia estender-se pelo menos de 900 a 600 mm. Esta verificação poder ser feita pela introdução de um *profile*, termopar permanente instalado no interior do forno, ou com a realização de processos de difusão em lâminas de Si e posterior análise da uniformidade de resultados. Se necessário podem ainda ser introduzidas peças de isolamento térmico sobre a espátula, com a finalidade de restringir termicamente a região central do forno.

O intervalo de tempo aplicado para a estabilização da temperatura em cada posição foi de dez minutos. Pode-se verificar na Figura 6.18 que a partir dos cinco minutos a temperatura já se apresenta estável, em razão disto, o intervalo de tempo de cinco minutos foi adotado para as medições seguintes.

A Figura 6.20 apresenta o perfil térmico do forno para um ajuste de 745 °C no controlador, resultando uma ZP com temperatura de 800 °C. O intervalo de tempo de cinco minutos para cada posição deixa mais saliente o leve aumento de temperatura entre as posições 900 mm e 800 mm, com uma variação máxima de 4 °C. Novamente entre 700 mm e 600 mm a abertura do forno começa a ter influência sobre os valores medidos, causando uma brusca queda de temperatura e aumentando a variação de temperatura radial. O fato de o forno ter sido projetado para o processamento de lâminas quadradas com aresta de até 150 mm, fazendo com que o diâmetro interno do tubo fosse dimensionado com 250 mm, tem grande influência no comportamento do perfil térmico medido entre as posições 700 mm e 0 mm devido a grande área de abertura do forno.

A Tabela 6.3 apresenta os valores verificados nos controladores para a posição 1200 mm, início do processo de medição.

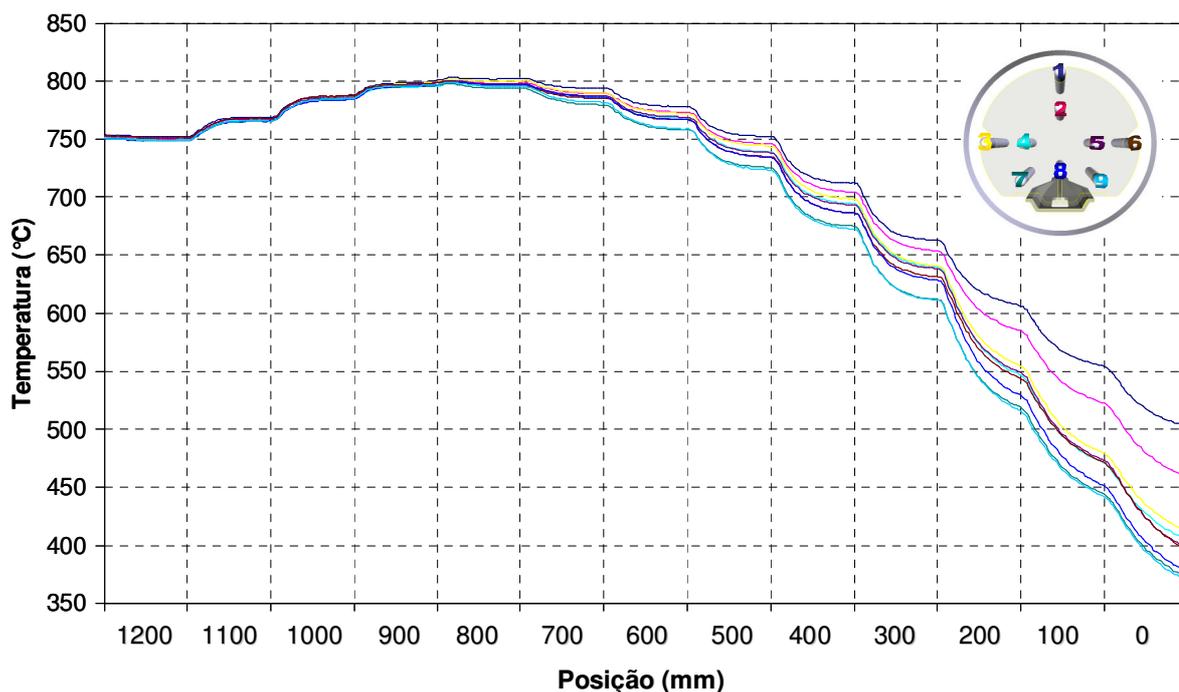


Figura 6.20. Perfil térmico do forno para uma temperatura de 745 °C, ajustada nos controladores, resultando em uma temperatura máxima com características de ZP de 800 °C.

Tabela 6.3 Relação dos valores ajustados e lidos nos controladores para o levantamento do gráfico apresentado na Figura 6.20 com os termopares posicionados em 1200 mm.

Zona Térmica	Carregamento	Central	Admissão de Gases
Temperatura Ajustada	718 °C	745 °C	719 °C
Temperatura Lida no Controlador	572 °C	745 °C	721 °C

Na Figura 6.21 é apresentado o gráfico do perfil térmico do forno para uma temperatura ajustada no controlador em 800 °C. Isto resultou em uma temperatura máxima na região da ZP de 875 °C, temperatura adotada para os processos típicos de difusão de fósforo. Confirmando as curvas apresentadas anteriormente, a temperatura máxima é atingida em torno da posição 800 mm e o comportamento térmico segue o mesmo padrão visualizado anteriormente. Nas Tabelas 6.4 e 6.5 são apresentados os valores verificados nos controladores para as posições 1200

mm, início deste processo de medição, e 0 mm, final deste processo, respectivamente.

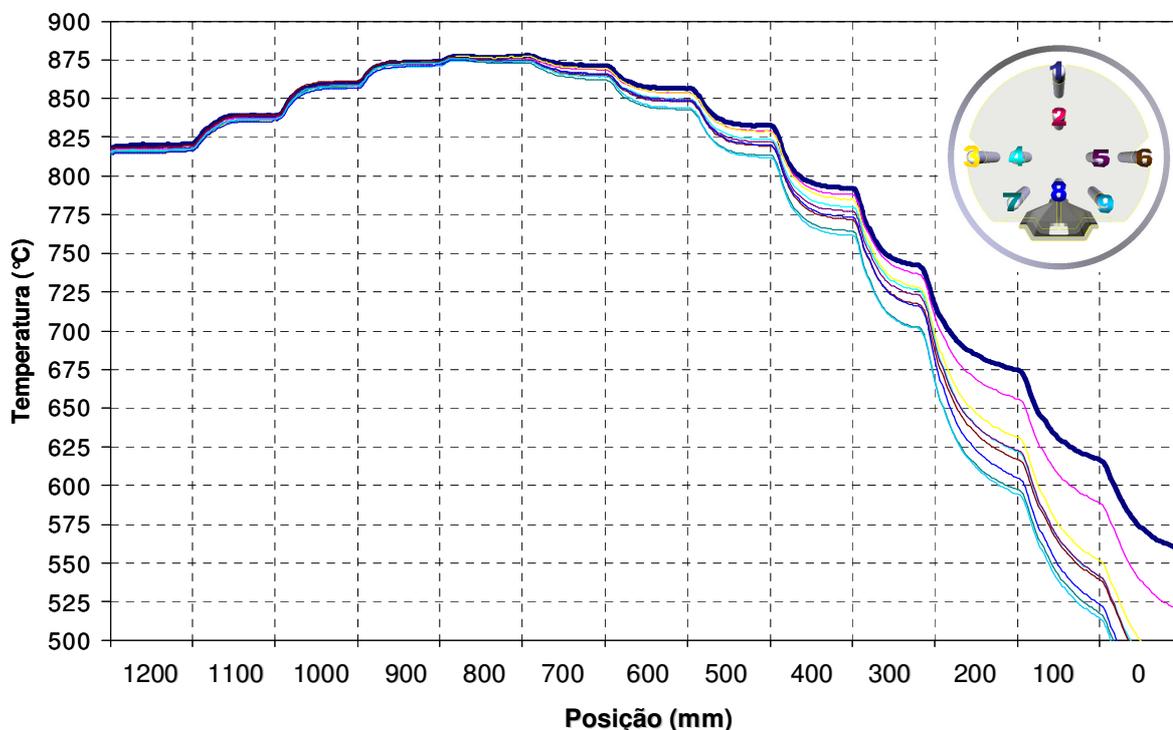


Figura 6.21. Perfil térmico do forno para uma temperatura de 800 °C, ajustada nos controladores, resultando em uma temperatura máxima com características de ZP de 875 °C.

Tabela 6.4 Relação dos valores ajustados e lidos nos controladores para o levantamento do gráfico apresentado na Figura 6.21 com os termopares posicionados em 1200 mm.

Zona Térmica	Carregamento	Central	Admissão de Gases
<i>Temperatura Ajustada</i>	775 °C	800 °C	775 °C
<i>Temperatura Lida no Controlador</i>	671 °C	801 °C	775 °C

O resultado do levantamento do perfil térmico do forno para uma temperatura ajustada no controlador em 850 °C é apresentado na Figura 6.22. Neste processo verificou-se que a temperatura máxima atingida foi de 965 °C na posição 800 mm, com uma variação de aproximadamente 6 °C entre as posições que a cercam.

Os valores observados nos controladores no momento do início deste processo de medição são apresentados na Tabela 6.6. Neste procedimento observou-se que as temperaturas nas regiões centrais e de admissão de gases ficaram estáveis nos controladores, mesmo não atingindo o valor ajustado. Este fato foi observado quando temperaturas muito elevadas foram ajustadas com o forno aberto.

Tabela 6.5 Variação dos valores lidos nos controladores, apresentados no Quadro 6.5, para o sistema de medição posicionado em 0 mm.

Zona Térmica	Carregamento	Central	Admissão de Gases
<i>Temperatura Ajustada</i>	752 °C	800 °C	752 °C
<i>Temperatura Lida no Controlador</i>	660 °C	780 °C	755 °C

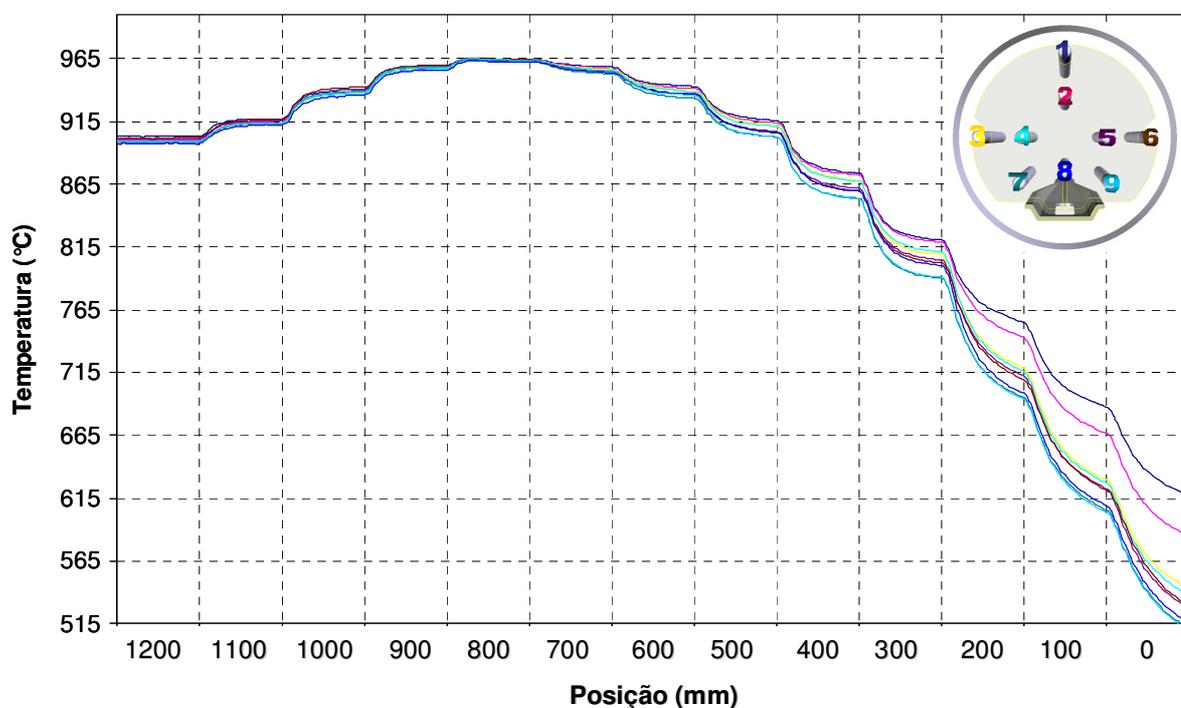


Figura 6.22. Perfil térmico do forno para uma temperatura de 850 °C, ajustada nos controladores, resultando em uma temperatura máxima com características de ZP de 965 °C.

Tabela 6.6 Valores observados nos controladores referentes ao gráfico apresentado na Figura 6.22.
Posição dos termopares em 1200 mm.

Zona Térmica	Carregamento	Central	Admissão de Gases
<i>Temperatura Ajustada</i>	809 °C	850 °C	809 °C
<i>Temperatura Lida no Controlador</i>	809 °C	840 °C	820 °C

7. CONCLUSÕES

Foi projetado e construído um forno para processamento de células solares. Os módulos de carregamento e de processamento térmico bem como o armário de gases foram desenvolvidos.

O sistema de aquecimento, composto pelo conjunto de resistores elétricos e sistema de comando e alimentação, foi confeccionado e testado. A estrutura do conjunto de resistores demonstrou-se robusta, garantindo a forma helicoidal dos fios de resistência elétrica e o isolamento térmico. Utilizando um sistema de alimentação com tensão de 220 V, o sistema de potência do forno foi projetado com características compactas sendo comandado por três controladores programáveis.

Os componentes de quartzo foram desenhados no desenvolvimento deste projeto e posteriormente fabricados no exterior. O resultado da fabricação se mostrou em plena concordância com o projeto, sendo que o objetivo da aplicação de cada componente foi satisfeito com a montagem completa do conjunto da câmara de processamento e acessórios. A espátula fabricada em SiC, componente importado, atingiu as expectativas de projeto, uma vez que suas dimensões foram definidas no desenvolvimento do conjunto dos sistemas de aquecimento e carregamento.

A estrutura, projetada e fabricada com perfis de alumínio, se mostrou versátil e adequada para a disposição dos módulos do forno. Sendo as etapas de projeto e montagem parte das atividades desenvolvidas, ajustes dimensionais foram necessários principalmente quanto à instalação do sistema de carregamento. A utilização de um sistema telescópico para movimentar a unidade de fluxo laminar permite que a estrutura mantenha o seu aspecto compacto quando este não estiver sendo utilizado.

A alimentação da câmara de processamento do forno com misturas de gases exigiu o cumprimento de duas etapas. A primeira está relacionada à extensão instalada do painel de gases até a estrutura do forno com tubos de aço inoxidável 316 L. A segunda etapa constitui o projeto e montagem do armário de gases, que também inclui a seleção dos seus componentes. O armário de gases foi montado e a calibração dos MFCs foi executada com a utilização de um calibrador primário, estando este módulo do forno em condições de utilização.

O sistema de carregamento do forno foi desenhado e montado. Utilizando um sistema com blocos sobre guias lineares e um fuso de esferas para a movimentação, este sistema foi automatizado com a utilização de um motor de indução com rotação ajustável por um painel de comando próprio. A estrutura de fixação da espátula permite o ajuste do posicionamento da mesma além do alinhamento com o tubo de quartzo, sendo esta característica comprovada com a montagem e utilização do conjunto de caracterização do forno.

Um módulo de fluxo laminar foi adquirido e acoplado a estrutura do forno. Sua alimentação, proveniente do sistema de potência do forno permite seu controle por meio do painel de comando geral. Instalado em um sistema telescópico e incorporado à estrutura de alumínio, o mesmo pode ser considerado como um componente integrante do forno.

O sistema de exaustão instalado no forno permite a sucção da mistura de gases proveniente da câmara de processamento, purgando-a para a rede de extração geral da sala limpa. O principal componente deste sistema é a câmara de exaustão projetada e fabricada em aço inoxidável 304 para ser conectada na parte frontal da estrutura do conjunto de resistores elétricos.

O sistema de controle instalado permite o acionamento manual de todos os módulos do forno por meio de um painel geral de comando, com a possibilidade de futura conexão a um sistema integrado de controle por meio da utilização da interface RS-485 entre os equipamentos.

A estrutura para caracterização térmica do forno, fabricada em quartzo, foi instalada permitindo o uso de nove termopares tipo K para a medição de temperatura. Os demais componentes da instrumentação aplicada permitiram a medição e aquisição de dados. Verificou-se a grande influência do diâmetro de 250 mm dimensionado para este forno. Com esta dimensão, as perdas de calor em função da abertura do forno são consideravelmente mais significantes, o que pode ser visualizado na brusca queda de temperatura observada nos perfis térmicos apresentados. Foi possível determinar a distribuição térmica real nos sentidos radial e longitudinal nas regiões central e posterior do tubo, identificando também a relação entre a temperatura lida nos controladores (termopares externos ao tubo) e a temperatura medida no interior do tubo com características de ZP.

O forno foi analisado para as temperaturas de 725 °C, 800 °C, 875 °C e 965 °C no interior do tubo e os resultados obtidos mostram as características do forno quanto às curvas de aquecimento e resfriamento, além do perfil térmico longitudinal ao tubo. Nas curvas de aquecimento foram identificadas duas regiões lineares com as correspondentes taxas de aquecimento de aproximadamente 8,5 °C/min e 3,2 °C/min, anteriores a faixa de estabilização. Nas curvas de resfriamento uma taxa média de aproximadamente 1,6 °C/min foi observada na região linear da curva, anterior a estabilização. Os perfis térmicos medidos mostraram que, com o PID aplicado, a região central da câmara de aquecimento apresenta uma faixa de temperatura superior às regiões de estabilização, zona de admissão de gases e zona de carregamento. Com isto, as características de ZP foram observadas principalmente nas posições 900 mm e 800 mm. Entre a posição 700 mm (centro do forno) e 0 mm, a temperatura apresenta uma elevada queda e desuniformidade na distribuição radial, isto, em função da abertura constante do forno à medida que o sistema de carregamento retira os termopares do tubo. Contudo, em 875 °C verificou-se uma ZP de aproximadamente 200 mm como uma variação de até 5 °C no sentido longitudinal e até 4 °C no sentido radial.

8. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento deste trabalho é um ponto de partida para adicionar a fabricação de células solares com dimensões de 150 mm x 150 mm aos processos do NT-Solar. Contudo, muitos outros estudos podem ser realizados para complementar o desenvolvimento do forno e em vista ao seu uso e aplicação. Com isto, alguns tópicos considerados relevantes são listados abaixo:

- integrar o sistema de controle dos módulos do forno em uma unidade central programável;
- adicionar termopares de referência (tipo S) no interior da câmara de processamento em diferentes pontos ao longo do mesmo e correlacionar as leituras destes com os termopares atuais no controle térmico do forno;
- realizar processos de medição de temperatura com fluxo de gases;
- realizar e avaliar resultados de processos de oxidação com diferentes tipos e tamanhos de lâminas de Si;
- realizar e avaliar resultados de processos de difusão de fósforo a partir de POCl_3 com diferentes tipos e tamanhos de lâminas de Si;
- fabricar células solares no forno desenvolvido e caracterizá-las.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PEREIRA, O. S.; CARVALHO, K.; ALLATTA, E. Análise comparativa da regulação internacional referente às energias renováveis. **Coletânea de Artigos Energias Solar e Eólica – CRESESB - CEPEL**, v. 2, p. 79-89, 2005.
- [2] MOEHLECKE, A.; ZANESCO, I. Mercado, Física e Processamento de Células Solares – A Tecnologia de Silício Cristalino é Líder no Mercado Mundial. **Metalurgia e Materiais**, p. 394-397, 2005.
- [3] GORIS, M. J. A. A.; WEEBER, A. W.; JOOSS, W.; HUSTER, F. Comparison of Emitters Diffused Using an IR Belt Furnace and a POCl₃ System. In: **17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition**: 2001, Munich. Proceedings of the International Conference. Munich, Germany, Oct. 2001, v. 22-26. p. 1535-1538.
- [4] GREEN, A. M. **Solar Cells: Operating Principles, Technology e System Applications**. Sydney: UNSW, 1992. 274p.
- [5] MARTÍ, A. In: **Fundamentos de la Conversión Fotovoltaica: La Célula Solar**. Fundamentos, Dimensionado y Aplicaciones de la Energia Solar Fotovoltaica. Madri, 1995, p. 1.1-1.27.
- [6] HONSBURG, C.; BOWDEN, S. Photovoltaics CDROM. Disponível em: <<http://www.udel.edu/igert/pvcdrom/index.html>>. Acesso em: dez. 2007.

[7] EAGER, S.; MASON, N.; BRUTON, T.; SHERBORNE, J.; RUSSELL, R. Buried Contact Cell Technology-New Manufacturing Processes with Safety and Environmental Benefits. Disponível em: <<http://www.bp.com/extendedgenericarticle.do?categoryId=9016226&contentId=7037312>>. Acesso em: dez. 2007.

[8] Energia Solar Fotovoltaica. Disponível em: <<http://www.bp.com/>>. Acesso em: dez. de 2007.

[9] Células Solares e Módulos Fotovoltaicos. Disponível em: <<http://www.sunpowercorp.com/>>. Acesso em: dezembro 2007.

[10] SWART, J. W. **Materiais Elétricos Fundamentos e Semicondutores. Campinas.** UNICAMP: São Paulo, 2003. 388p.

[11] WHYTE, W. **Cleanroom Technology - Fundamentals of Design Testing and Operation.** University of Glasgow: John Wiley & Sons, 2001. 309p.

[12] TORREIRA, R. P. **Salas Limpas – Projeto, Instalação & Manutenção.** Brasil: Hemus Editora LTDA, s.d. 318p.

[13] BALBUENA, M. A. Fabricacion de Células y Módulos de Silicio Monocristalino y Multicristalino. In: **Fundamentos, Dimensionado y Aplicaciones de la Energia Solar Fotovoltaica.** Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Universidad Politecnica de Madrid, Editorial Ciemat, 1995, p. 3.3-3.21.

[14] LY, M. **Desenvolvimento e Análise de Filme Anti-Reflexo de Sulfeto de Zinco para Células Solares.** Porto Alegre. 2007. 66p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia dos Materiais). PGETEMA, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil.

- [15] LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. Chichester, England: John Wiley & Sons, 2003. 1179p.
- [16] EBERHARDT, D. **Desenvolvimento de um Sistema Completo para Caracterização de Células Solares**. Porto Alegre. 2005. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia dos Materiais). PGETEMA, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil.
- [17] CALLISTER, W. D Jr. **Materials Science and Engineering an Introduction**. 5^a ed. New York: John Wiley & Sons, 2000, 871p.
- [18] MAY, G. S.; SZE, S. M. **Fundamentals of Semiconductor Fabrication**. John Wiley & Sons, 2004. 305p.
- [19] MOEHLECKE, A. **Conceptos Avanzados de Tecnologia para Células Solares com Emisores p⁺ Dopados com Boro**. Madrid. 1996. 202 p. Tese (Doutorado em Engenharia) Escola Técnica Superior de Engenheiros de Telecomunicação, Universidade Politécnica de Madri, Espanha.
- [20] GHANDI, S. K. **VLSI Fabrication Principles-Silicon and Gallium Arsenide**. Rensselaer Polytechnic Institute: John Wiley & Sons, 1983. 665p.
- [21] WOLF, S.; TAUBER, R. N. **Silicon Processing for the VLSI Era**. Califorina: Sunset Beach, 2000, 890p.
- [22] FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 5^a ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2001. 504p.
- [23] WANG, LANG, Y.; CHUNG, T.; YU, J. Y.; CHU, H. Estados Unidos da América. Conical baffle for semiconductor furnaces. 5.792,701. 11 ago. 1998. Taiwan Semiconductor Manufacturing Company.

[24] PREU, R.; EMANUEL, G.; UNTIEDT, D.; KLAPPERT, S.; SCHMIDHUBER, H.; BIRO, D.; VOYER, C.; WOLKE, W.; SCHNEIDERLOCHNER, E. Innovate and Efficient Production Processes for Silicon Solar Cells and Modules – Solpro IV. In: **19 th European Photovoltaic Solar Energy Conference**: 2004, Paris. Proceedings of the International Conference. France, June 2004. v. 7-11, p. 978-981.

[25] Thermal Processing Equipment by MRL. Disponível em: <<http://www.mrlind.com>>. Acesso em: set. 2007.

[26] Equipment for Solar Cell Production. Disponível em: <<http://crystec.com/crysolae.htm>>. Acesso em: set. 2007.

[27] PETERS, S.; BALLIF, C.; BORCHERT, D.; RADT, V.; SCHINDLER, R.; WARTA, W.; WILLEKE, G.; HASSLER, C.; LAUINGER, T. Improving the Efficiency of Silicon Ribbon Solar Cells Using Rapid Thermal Processing. In: **17 th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition**: 2001, Munich. Proceedings of the International Conference. Munich, Germany, Oct. 2001, v. 22-26, p. 1319-1322.

[28] HORZEL, J.; CHOULAT, P.; SZLUFCHIK, J.; NIJS, J.; VOLK, P.; REICHART, J.; PIECHULL, A.; HAASE, J.; MOLLER, R.; WANDEL, G.; WAHL, G.; SCHOMANN, F.; SCHMIDT, W. High Throughput Diffusion for Industrial Solar Cell Production. In: **17 th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition**: 2001, Munich. Proceedings of the International Conference. Munich, Germany, Oct. 2001, v. 22-26, p. 1367-1370.

[29] MUNZER, K. A.; EISENRITH, K. H.; FROITZHEIM, A.; SCHLOSSER, R. E.; TOLLER, R.; WINSTEL, M. G. High Throughput Industrial In-line Boron BSF Diffusion. In: **20 th European Photovoltaic Solar Energy Conference**: 2005, Barcelona. Proceedings of the International Conference. Barcelona, Spain, June 2005, v. 6-8, p. 777-780.

- [30] MALLMANN, A. **Metalização Serigráfica de Células Solares Bifaciais Fabricadas por Processos Térmicos Rápidos**. Porto Alegre. 2006. 94p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia dos Materiais). PGETEMA, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil.
- [31] VOYER, C.; BIRO, D.; EMANUEL, G.; PREU, R.; KORIATH, J.; WANKA, H. Evaluation of Dopant Sources and Deposition Methods Suitable for In-line Diffusion in the PV Industry. In: **19 th European Photovoltaic Solar Energy Conference: 2004**, Paris. Proceedings of the International Conference. Paris, France, June 2004, v. 7-11, p. 848-851.
- [32] EBONG, A.; YELUNDUR, V.; UPADHYAYA V.; ROUNSAVILLE, B.; UPADHYAYA, A.; TATE, K; ROHATGI, A.; KALEJS, J. A Comprehensive Study of the Performance of Silicon Screen-Printed Solar Cells Fabricated with Belt Furnace Emitters. In: **20 th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition: 2005**, Barcelona, Proceedings of the International Conference. Barcelona, Espanha, June 2005, v. 6-10.
- [33] EBERHARDT, D.; GARCIA, S. B. Caracterização do Forno Bruce. Porto Alegre: PUCRS, 2007. 35p (Relatório Técnico Interno–NT-Solar/CB-Solar/ PUCRS. N° 0053/2007).
- [34] KYOTO, K. H. Estados Unidos da América. Method of Uniformly Diffusing Impurities into Semiconductor Wafers: 5.401,686. 28 mar. 1995. Rohm Co., Ltd, Kyoto, Japão.
- [35] Crystar Components - A business of Saint-Gobain Semiconductor Components Group. Disponível em: <<http://www.crystar.com/>>. Acesso em: set. 2007.
- [36] Gwin, Jon A. Estados Unidos da América. Semiconductor device produced by a single furnace cycle diffusion and oxidation process. 5.786,605. 28 jul. 1998. Japan Sony Corporation.

- [37] HEYNES, M. S. R.; WIKERSON, J. T. Phosphorus Diffusion in Silicon Using POCI₃. **Electrochemical Technology**. v. 5, n. 9-10, p. 464 - 470, 1967.
- [38] BELO, I. Apresentação e Detalhamento de Controladores de Vazão Mássico Térmicos - Equipamentos, Sistema e Acessórios. 2007. 37p. (Relatório Técnico Brooks Instrument).
- [39] QUANTIM® - A Melhor Exatidão em Medição e Controle para Baixas Vazões através da Tecnologia Coriolis. 2008. 6p. (Datasheet. B-QM-Port 1/08, Brooks Instrument).
- [40] CUEVAS; A. A Good Recipe to Make Silicon Solar Cells. In: **22 th IEEE Spec. Conference**: 1991, Las Vegas. Proceedings of the Spec. Conference, Las Vegas, 1991.
- [41] Performance Materials Quartz, Disponível em: <<http://www.quartz.com/gedata.html>>. Acesso em: abril 2008.
- [42] SAGRILLO, P. D. V. **Estruturas Cristalinas de Cerâmicas**. Cefet-ES.
- [43] MITCHELL, S. B. **An Introduction to Materials Engineering and Science for Chemical and Materials Engineers**. Wiley-Interscience: New Jersey, 2004. 954p.
- [44] Disponível em: <<http://www.zaiko.kyushuu.ac.jp/~watanabe/SemiconSS/SCStruct03/Image58jpg>>. Acesso em: nov. 2008.
- [45] Disponível em: <http://217.172.161.215/products/index.php?id_ctg=117>. Acesso em: nov. 2008
- [46] AGEM. Ultra High Purity Silicon Carbide. Disponível em: <www.agem-usa.com>. Acesso em: nov. 2008

[47] BROOKS INSTRUMENT. Bulletin No. S 1162 - SLA Series vs. "e" and "i", 2008.

[48] MOEHLECKE, A; CASSOL, T. S. Processo de Oxidação. Porto Alegre: PUCRS, 2007. (Relatorio Tecnico Interno NT-Solar/ CB-Solar/PUCRS).

[49] Transceivers and Repeaters Meeting the EIA RS-485 Interface Standard. National semiconductor . Application Note 409. 1998. 8p.

[50] Gaugeable Tube Fittings and Adapter Fittings. Disponível em:<<http://www.swagelok.com/>>. Acesso em: abril 2008.

[51] Bios Met Lab Series - ML-500 User Manual. 2007. 20p. (Manual. MK01 - 32 Rev. C, Bios International Corporation).

[52] Basic DryCal Application and Calibration Guide. 2003. 10p. (Guide. MK01 - 13 Rev. A, Bios International Corporation).

[53] Informação de Produto - Fan Filter Unit FFT - I-BR/FFT/P/OO. 2003. 5p. (Datasheet. Trox do Brasil Ltda).

ANEXOS

A.1 Análise Termográfica

Com vista a permitir uma análise qualitativa do comportamento térmico do forno em regiões externas a câmara de processamento, algumas imagens termográficas de pontos considerados críticos são apresentadas nas figuras a seguir. Para tal, foi usada uma câmera Fluke, modelo Ti30, do CE-Eólica da PUCRS.

A Figura A.1 mostra o forno praticamente aberto, onde se observa claramente os efeitos do ar quente que sai da câmara de processamento tornando mais clara a imagem logo acima da abertura do forno.

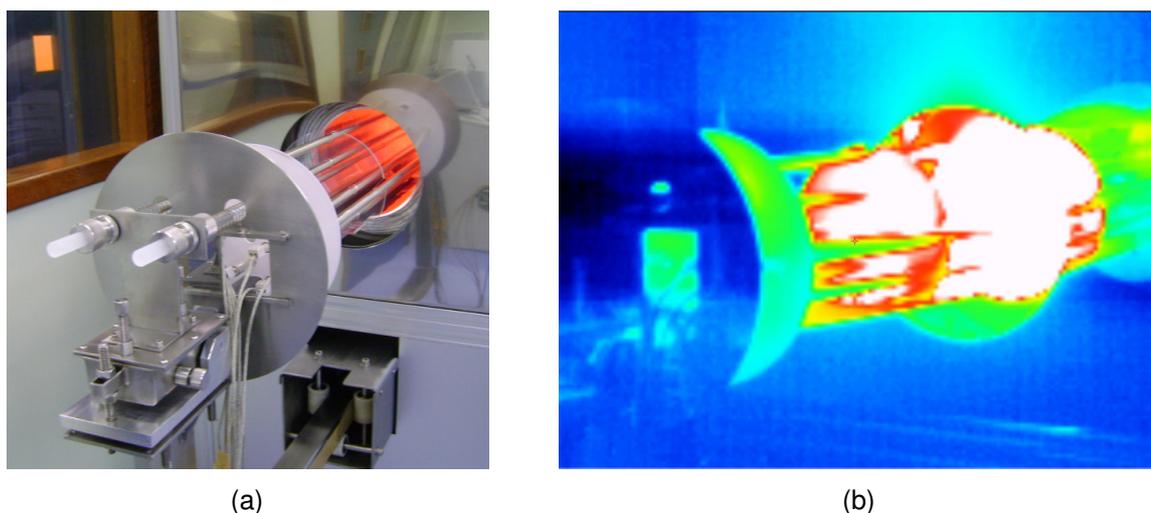


Figura A.1. Forno aberto destacando os termopares e (b) imagem termográfica do sistema.

Na Figura A.2, uma vista de um ângulo similar apresenta o forno com uma abertura mínima em seu sistema de carregamento. Uma comparação entre os

efeitos do ar quente que sai do forno totalmente e parcialmente aberto é apresentada na Figura A.3, respectivamente nos itens (a) e (b). Nesta, visualiza-se claramente que a zona de carregamento sofre elevadas perdas de temperatura quando o forno encontra-se aberto. As manchas claras, visualizadas logo acima da abertura do forno, indicam a saída do ar quente. Salienta-se que nestas imagens o sistema de exaustão do forno encontra-se desligado. Para a situação do sistema de exaustão ligado, toda a massa de ar quente proveniente da câmara de processamento é sugada, evitando assim, a sua total saída para o ambiente do laboratório.

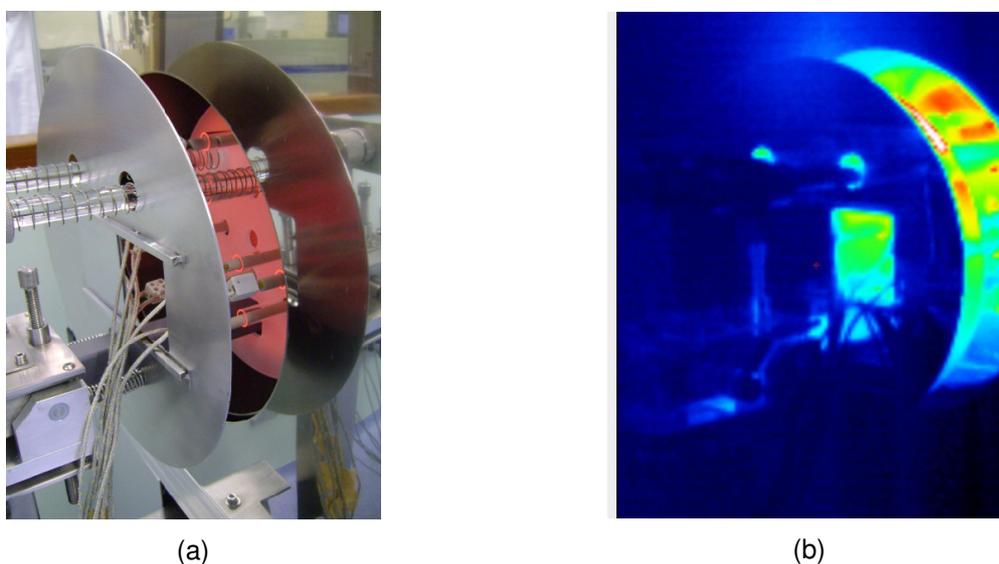


Figura A.2. Forno parcialmente aberto e (b) imagem termográfica da mesma situação.

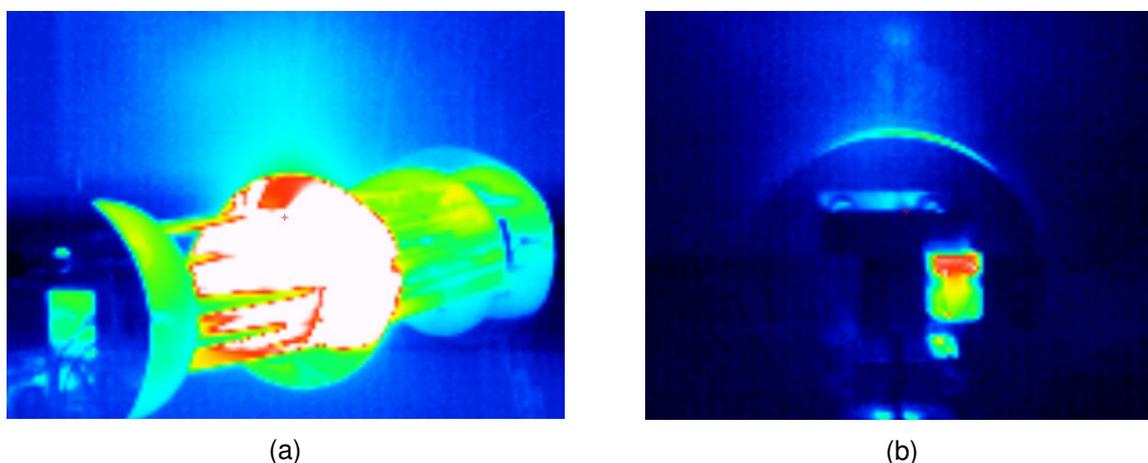
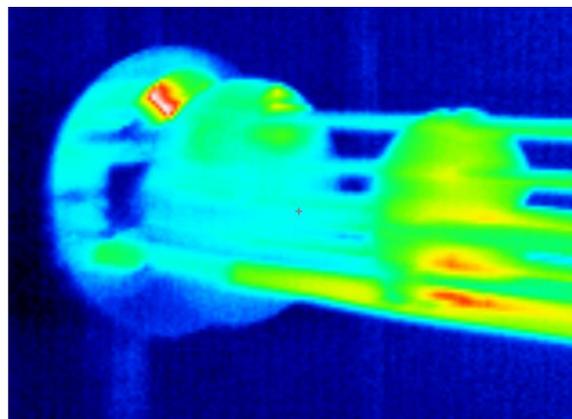


Figura A.3. Imagens termográficas do forno totalmente aberto (a) vista lateral e (b) vista frontal.

A Figura A.4 ilustra os efeitos do aquecimento no sistema de carregamento e caracterização para a situação de abertura do forno.



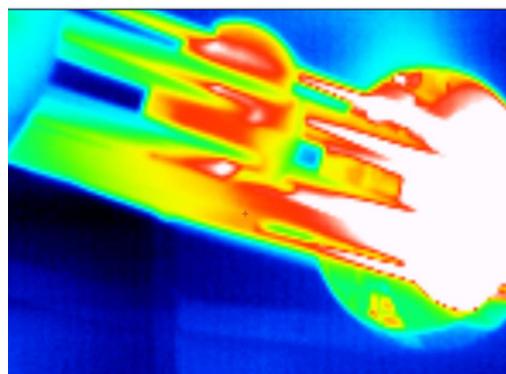
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura A.4. (a) e (c) mostram o sistema de carregamento e termopares e (b) e (d) as respectivas imagens termográficas.

A Figura A.5 apresenta a dissipação de calor no interior da estrutura do forno na estação de processamento térmico. Nesta, observa-se claramente os pontos de fuga do ar quente proveniente da câmara de aquecimento. Esta dissipação de calor pode vir a ser minimizada com o funcionamento da exaustão ou com o acréscimo de mantas de isolamento térmico sobre as regiões mais quentes.

A Figura A.6 apresenta os acessos para admissão de gases do tubo de quartzo, que se encontram voltados para o interior do armário de gases do forno. O item (b) salienta a região de maior temperatura onde não há recobrimento metálico, com apenas o disco de ALF envolvendo a parte posterior do tubo.

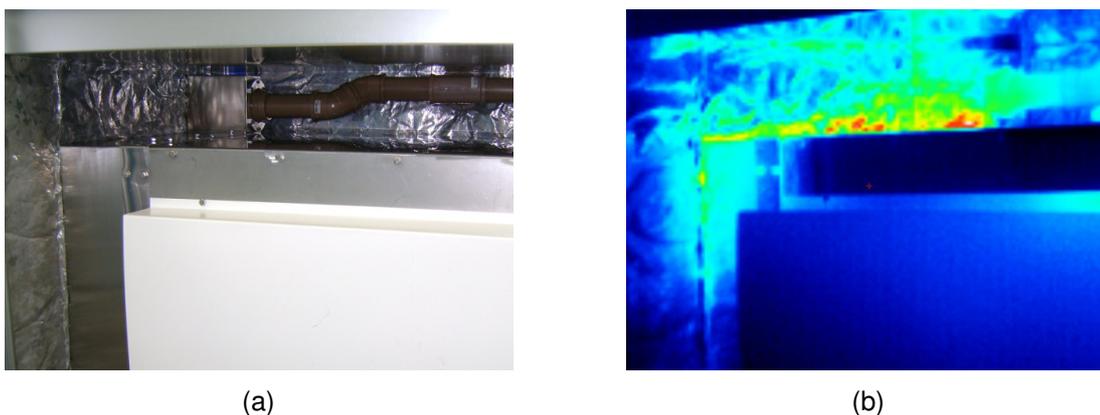


Figura A.5. (a) Interior da estrutura do forno e (b) imagem termográfica.

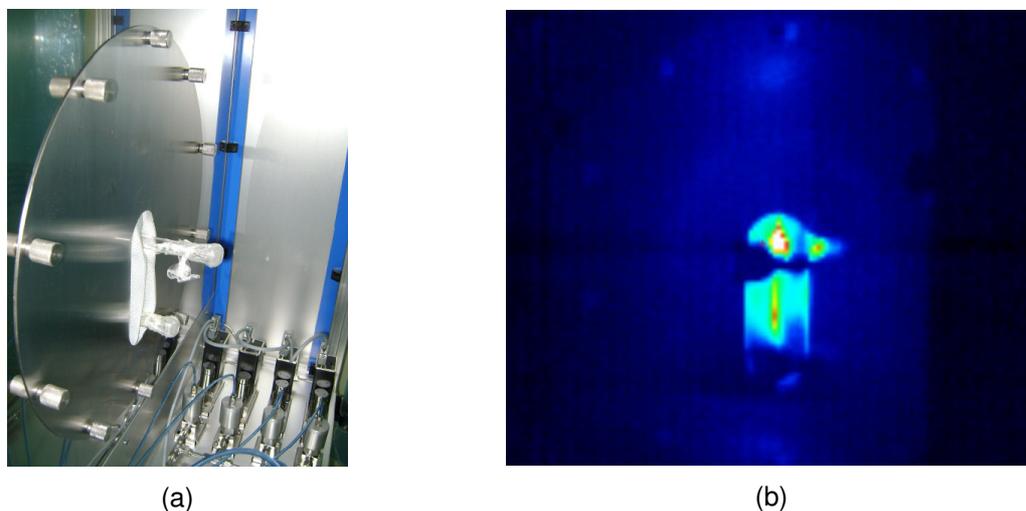


Figura A.6. Detalhe do armário de gases e (b) imagem termográfica (visão posterior do módulo de processamento térmico).

Salienta-se que todas as imagens foram obtidas com o forno ajustado para temperaturas superiores a 700 °C. Neste contexto, as imagens são representações qualitativas uma vez que a capacidade do termovisor Fluke Ti30 é de medições até a faixa de 250 °C, com uma incerteza de $\pm 2\%$ ou 2 K.

A.2 Parâmetros de Projeto

Este tópico apresenta e ilustra alguns parâmetros do projeto do forno de difusão ressaltando as considerações mais relevantes inerentes ao desenvolvimento deste equipamento, com destaque aos sistemas de aquecimento e carregamento. A Figura A.7 apresenta os diferentes módulos presentes na composição do forno com foco na câmara de processamento térmico do mesmo.

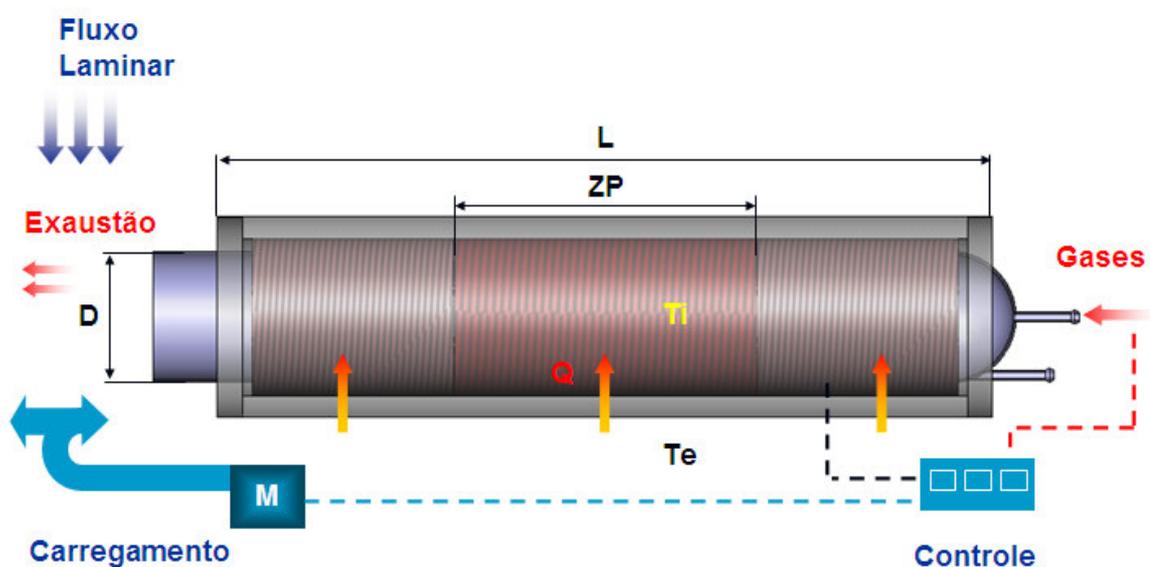


Figura A.7. Relação dos parâmetros de projeto do forno.

Dentre os principais parâmetros relativos ao projeto do forno de difusão relacionados na Figura A.7, salienta-se que no projeto da câmara de aquecimento do forno foram inicialmente priorizados os comprimentos total (L) e da zona plana (ZP) além do diâmetro interno (D), em relação aos quesitos dimensionais. Sendo uma condição inicial atingir valores de temperatura interna (T_i) na câmara de processamento superiores a 1100 °C mantendo a temperatura externa (T_e) próxima a 60 °C (máx.), foi dimensionado pela empresa interveniente neste projeto um conjunto de resistores elétricos capaz de fornecer uma quantidade de energia térmica (Q) suficiente para este fim. Desta forma, utilizando um conjunto de três resistores elétricos em forma helicoidal associados em série tem-se três zonas com controles de temperatura distintos.

No desenho e dimensionamento dos elementos resistivos bobinados ou em espiral com a utilização de fios redondos, Figura A.8, é relevante além da determinação do diâmetro interno (D) e do comprimento do elemento (x), a definição do fio. Outros parâmetros que envolvem a construção do elemento resistivo são: o tipo de material do fio e o espaçamento entre bobinas, que está relacionado com o comprimento do fio.

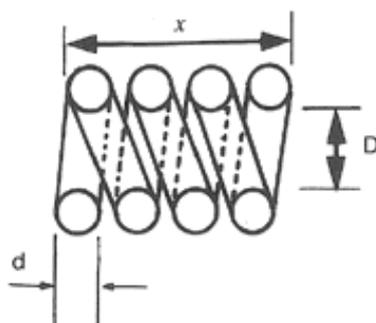


Figura A.8. Resistor de fio de seção circular em formato espiral. D é o diâmetro interno do helicóide e d é o diâmetro do fio usado no resistor.

A Figura A.9 apresenta uma visão geral dos elementos envolvidos no sistema de transferência de calor do forno, onde T_p corresponde à temperatura de processamento a ser atingida no interior da câmara. O projeto deste sistema foi realizado pela empresa Irmãos Sanchis Ltda. (interveniente neste projeto) com a utilização do aplicativo Calpo33, desenvolvido na própria empresa.

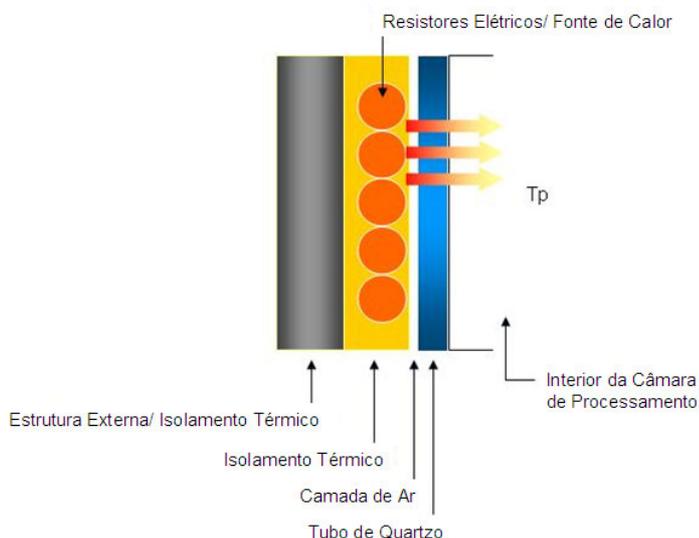


Figura A.9. Elementos atuantes no sistema de transferência de calor.

Em relação ao sistema de carregamento, a utilização de uma espátula de SiC, engastada em apenas uma de suas extremidades, como base de apoio aos elementos a serem introduzidos no forno, implica em uma predeterminação das cargas envolvidas. Uma vez determinada a carga máxima de 10,75 kg, a conseqüente deflexão máxima calculada pelo fabricante será de 6,16 mm, onde 65% desta deflexão ocorre na pá da espátula. Esta situação corresponde ao momento fletor máximo a ser exigido do sistema de carregamento.

O sistema mecânico de movimentação apoiado sobre blocos em guias lineares está submetido ao conjunto de cargas e momentos apresentados na Figura A.10.

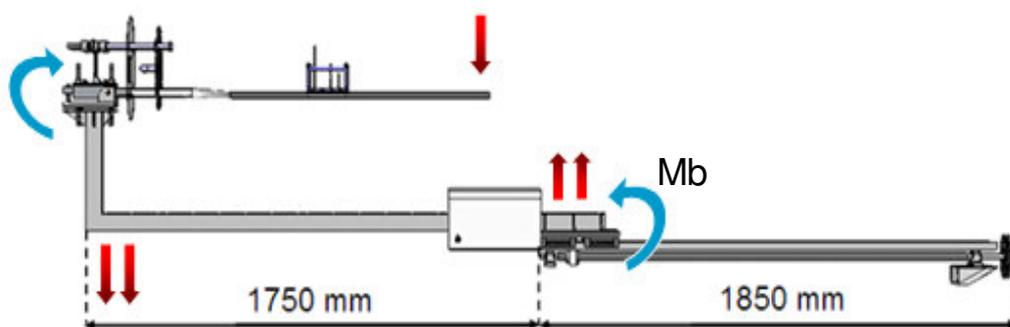


Figura A.10. Indicação das cargas atuantes sobre os componentes do sistema de carregamento do forno.

A utilização de quatro blocos sobre duas guias lineares, mostrados na Figura A.11, evita que haja um desequilíbrio lateral da estrutura. A carga crítica para o dimensionamento dos blocos corresponde à soma da resistência ao arranque dos blocos das guias, ou seja, o momento máximo (M_b) ao qual estes podem estar submetidos, conforme apresentado na Figura A.10.

Para acionar o sistema de movimentação desenvolvido foi utilizado um motor elétrico de indução com a rotação controlada por meio de um inversor. A determinação das características dos componentes mecânicos em função dos parâmetros de entrada do projeto segue o esquema apresentado na Figura A.12.

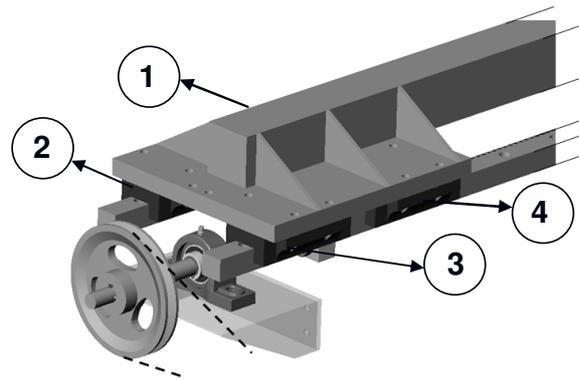


Figura A.11. Indicação da distribuição física dos blocos sobre as guias lineares.

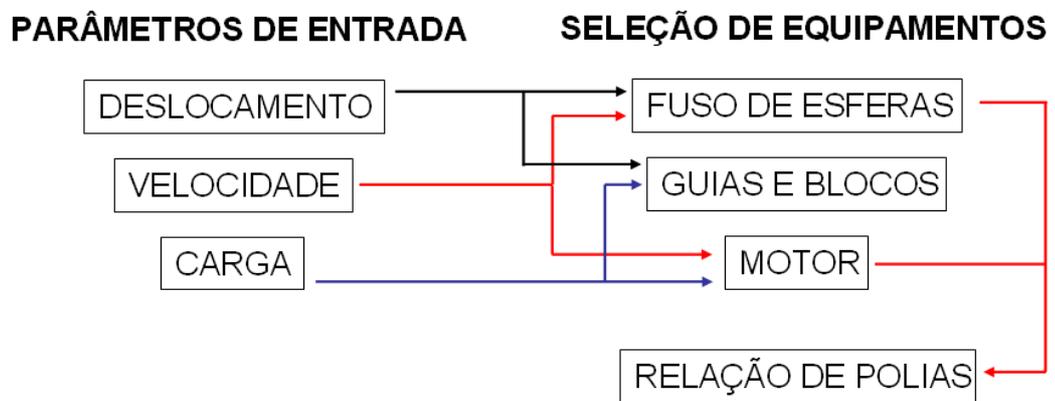


Figura A.12. Elementos de projeto do sistema de carregamento do forno.