

ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS
MESTRADO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

FÁBIO ANDRÉ BIAZETTO

**OTIMIZAÇÃO DAS REGIÕES ALTAMENTE DOPADAS DE CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS
BASE N E ANÁLISE DA PASSIVAÇÃO**

Porto Alegre
2019

PÓS-GRADUAÇÃO - *STRICTO SENSU*



Pontifícia Universidade Católica
do Rio Grande do Sul



OTIMIZAÇÃO DAS REGIÕES ALTAMENTE DOPADAS DE CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS BASE N E ANÁLISE DA PASSIVAÇÃO

FÁBIO ANDRÉ BIAZETTO
LICENCIADO E BACHAREL EM FÍSICA

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

Porto Alegre

Março, 2019



OTIMIZAÇÃO DAS REGIÕES ALTAMENTE DOPADAS DE CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS BASE N E ANÁLISE DA PASSIVAÇÃO

FÁBIO ANDRÉ BIAZETTO

LICENCIADO E BACHAREL EM FÍSICA

ORIENTADOR: Profa. Dra. Izete Zanescó

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Adriano Moehlecke

Dissertação de mestrado 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.

Porto Alegre

Março, 2019

Ficha Catalográfica

B579o Biazetto, Fábio André

Otimização das Regiões Altamente Dopadas de Células Solares Bifaciais Base N e Análise da Passivação / Fábio André Biazetto . – 2019.

117 p.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS.

Orientadora: Profa. Dra. Izete Zanescó.

Co-orientador: Prof. Dr. Adriano Moehlecke.

1. Células Solares Bifaciais. 2. Lâminas de Silício Tipo n. 3. Emissor. 4. Campo Retrodifusor. 5. Passivação. I. Zanescó, Izete. II. Moehlecke, Adriano. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da PUCRS
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bibliotecária responsável: Salete Maria Sartori CRB-10/1363



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

Otimização das Regiões Altamente Dopadas de Células Solares Bifaciais Base n e Análise da Passivação

CANDIDATO: FÁBIO ANDRÉ BIAZETTO

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

DRA. IZETE ZANESCO - ORIENTADORA

DR. ADRIANO MOEHLECKE - CO-ORIENTADOR

BANCA EXAMINADORA

DRA. ANTONIA SONIA ALVES CARDOSO DINIZ - INSTITUTO POLITÉCNICO - PUCMINAS

DRA. ELEANI MARIA DA COSTA - PGETEMA - PUCRS

PUCRS

Campus Central
Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 32 - Sala 505 - CEP: 90619-900
Telefone: (51) 3353.4059 - Fax: (51) 3320.3625
E-mail: engenharia.pg.materiais@pucrs.br
www.pucrs.br/politecnica

*Comece fazendo o que é
necessário, depois o que é
possível, e de repente você estará
fazendo o impossível.*

(São Francisco de Assis)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Cecília e Valmir, pela dedicação, ajuda e carinho.

AGRADECIMENTOS

A palavra gratidão tem sua origem no latim *gratia*, significando graça. Indica um sentimento de reconhecimento a uma ação e/ou benefício recebido de alguém. O termo também é proferido pelo homem que crê. Embora muitas vezes possa ter fraquejado na minha fé, a Deus devo muita gratidão. Um sentimento de agradecimento perante Sua grandiosidade que se fez em todos os momentos, em especial aqueles de grandes aflições e tribulações.

Seria injusto não agradecer as pessoas que, de um modo ou de outro, contribuíram para que esta etapa fosse concluída. À frente desta lista, meus pais Anfiloquia Cecília da Silva Biazetto e Valmir André Biazetto, a quem também dedico este trabalho. Reconhecimento pelo amor e carinho que os pais têm pelos filhos.

Gratidão à todos colegas do Núcleo de Tecnologia em Energia Solar (NT-Solar), laboratório de pesquisa vinculado à Escola de Ciências da PUCRS, em especial: Vanessa Alves Gonçalves, Jéssica de Aquino e Moussa Ly. Pessoas que estiveram presentes durante a realização deste trabalho e contribuíram para que este se concretizasse.

Agradecimentos não poderiam ser dispensados aos professores Dra. Izete Zanesco (orientadora) e Dr. Adriano Moehlecke (co-orientador) pela oportunidade, orientação e paciência que dedicaram no decorrer do curso de mestrado.

Por fim, agradeço pela concessão da bolsa de estudos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), outorgada por meio do Programa de Suporte à Pós-Graduação de Instituições Comunitárias de Educação Superior (PROSUC), e à ITAIPU BINACIONAL, LAR, C.VALE, COPACOL, SEBRAE/PR e OCEPAR no âmbito do projeto de P&D intitulado “Implantação de Unidades de Geração Distribuída de Energia Elétrica a Partir de Sistemas Fotovoltaicos em Propriedades Rurais”, Convênio nº 4500040746.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	25
1.1. Justificativas.....	25
1.2. Objetivos	28
2. CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS	29
2.1. Células Monofaciais e Bifaciais	29
2.2. Aplicações de Células Solares Bifaciais	35
2.3. Células Solares Bifaciais Base n	38
2.4. Passivação de Superfície	40
2.4.1. Dióxido de Silício.....	43
2.4.2. Dióxido de Titânio	44
2.4.3. Nitreto de Silício	44
2.4.4. Óxido de Alumínio.....	45
2.4.5. Óxidos Condutores Transparentes	45
3. METODOLOGIA	46
3.1. Processo de Fabricação	46
3.2. Etapas do Processo de Fabricação	50
3.2.1. Texturação	50
3.2.2. Limpeza Química	51
3.2.3. Difusão de Boro e Oxidação na Mesma Etapa Térmica	51
3.2.4. Difusão de Fósforo.....	53
3.2.5. Oxidação para Passivação	53
3.2.6. Deposição de Filme Antirreflexo	54
3.2.7. Processo de Metalização por Serigrafia.....	55
3.3. Técnicas de Caracterização de Células Solares.....	56
3.3.1. Resistência de Folha.....	56
3.3.2. Eficiência Quântica Interna	58
3.3.3. Parâmetros Elétricos.....	59
4. DESENVOLVIMENTO DE CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS BASE N	63
4.1. Análise da Resistência de Folha.....	63
4.1.1. Difusão de Boro	63
4.1.2. Difusão de Fósforo.....	66
4.2. Avaliação da Temperatura de Difusão de Boro	67
4.2.1. Temperatura de Difusão de Boro de 960 °C	67
4.2.2. Temperatura de Difusão de Boro de 970 °C	72
4.2.3. Temperatura de Difusão de Boro de 980 °C	76

4.2.4. Temperatura de Difusão de Boro de 990 °C	80
4.2.5. Temperatura de Difusão de Boro de 1.000 °C	84
4.3. Avaliação da Temperatura de Difusão de Fósforo	88
4.3.1. Temperatura de Difusão de Fósforo de 835 °C.....	88
4.3.2. Temperatura de Difusão de Fósforo de 845 °C.....	92
4.3.3. Temperatura de Difusão de Fósforo de 855 °C.....	96
4.4. Desenvolvimento da Passivação com Dióxido de Silício	99
4.5. Comparação das Células Solares com Maior Eficiência	104
5. CONCLUSÕES E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	106
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1. Esquema representativo das bandas de condução, proibida e de valência para os materiais condutores, isolantes e semicondutores. Fonte: Adaptado de Callister (2002). 30
- Figura 2.2. Ligação eletrônica para o Si cristalino intrínseco: (a) antes e (b) após a excitação que origina o par elétron-lacuna. Adaptado de Callister (2002). 31
- Figura 2.3. Silício dopado com (a) boro e (b) fósforo. Adaptado de Callister (2002). 31
- Figura 2.4. Junção pn entre o material tipo p e o tipo n. Adaptado de Callister (2002). 32
- Figura 2.5. Estrutura de uma célula solar industrial em substrato de silício onde destaca-se a base, contatos posterior e frontal, filme antirreflexo, emissor e BSF. Adaptado de Honsberg. 33
- Figura 2.6. Perfil da estrutura de uma célula solar bifacial base n. São mostrados a base do dispositivo, contatos metálicos, camada de passivação, camadas dopadas com impurezas e filme antirreflexo. Adaptado em Yu *et al.* (2016). 34
- Figura 2.7. Diagrama de uma célula solar convencional e seu funcionamento. Fonte: Sobre volta, batatas e fótons (Galli, 2003). 35
- Figura 2.8. Esquema das partes que compõem um módulo fotovoltaico com células solares monofaciais. Adaptado de DuPont. 36
- Figura 2.9. Diagrama de um módulo bifacial com face posterior com superfície branca refletora. Fonte: Adaptado de Moehlecke (Moehlecke *et al.*, 2013). 37
- Figura 2.10. (a) Módulo fotovoltaico concentrador estático com células solares bifaciais e (b) diagrama esquemático do perfil do concentrador e da trajetória de um raio solar incidindo na superfície refletora interna e células solares. Fonte: Adaptado de Zanesco *et al.* (2001). 37
- Figura 3.1. Diagrama representando as etapas de fabricação e caracterização da célula solar bifacial. 47
- Figura 3.2. Estrutura p^+nn^+ das células solares bifaciais de silício: base de silício tipo n, regiões altamente dopadas p^+ (emissor) e n^+ (BSF), passivação com SiO_2 , filme AR e contatos metálicos. 48

Figura 3.3. Equipamento <i>spinner</i> utilizado na técnica de <i>spin-on</i> para deposição do líquido com boro PBF20 sobre as lâminas de silício.	52
Figura 3.4. Diagrama de forno convencional para difusão de fósforo, a partir de POCl_3 , em substrato de silício. Fonte: Garcia (2009).	53
Figura 3.5. Sistema planetário do equipamento para deposição de filme AR de TiO_2 nas faces das célula solares.	55
Figura 3.6. Ilustração do conjunto plataforma-lâmina-tela e rodo distribuindo pasta metálica sobre a máscara. Fonte Garcia (2016).	55
Figura 3.7. Secagem e queima das pastas de metalização em forno de esteira.	56
Figura 3.8. Diagrama representativo da sonda de quatro pontas: (a) destaque para d indicando sua dimensão e S o espaçamento entre os eletrodos; (b) I e V , respectivamente, indicam a corrente e tensão elétrica, a , b e W , representando largura, comprimento e espessura de uma lâmina fina, S , espaçamento das ponteiros. Fonte: Sze (2007).	57
Figura 3.9. Localização das regiões sobre a superfície da lâmina onde foram medidos os valores de resistência de folha.	58
Figura 3.10. Corrente elétrica gerada em função da tensão aplicada, obtida em condições padrão de medição. Fonte: Zanesco e Moehlecke (2003). ...	60
Figura 3.11. Simulador solar para caracterização das células solares para obtenção de parâmetros elétricos: base para apoio e contato elétricos da célula solar	61
Figura 4.1. Resistência de folha da face dopada com boro em função da temperatura de difusão.	64
Figura 4.2. Resistência de folha na face dopada com boro em função da temperatura de difusão antes (em azul) e após a difusão de fósforo (em vermelho). 66	
Figura 4.3. Resistência de folha para a região fósforo em função da temperatura de difusão.	67
Figura 4.4. Densidade de corrente elétrica em função da tensão elétrica das células solares bifaciais com maior eficiência para diferentes temperaturas de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de $960\text{ }^\circ\text{C}$ medida na (a) face do emissor e na (b) face do campo retrodifusor (BSF).	69
Figura 4.5. Refletância das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão de fósforo e $T_B =$	

960 °C, medida na (a) face do emissor e (b) face do campo retrodifusor (BSF).....	70
Figura 4.6. Refletância média para as superfícies do emissor e campo retrodifusor na temperatura de difusão de boro a 960 °C.....	71
Figura 4.7. Eficiência quântica interna das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferente temperatura de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 960 °C medida com iluminação na (a) face com o emissor e (b) face com o campo retrodifusor (BSF).	72
Figura 4.8. Densidade de corrente elétrica em função da tensão elétrica das células solares bifaciais com maior eficiência para diferentes temperaturas de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 970 °C medida na (a) face do emissor e na (b) face do campo retrodifusor (BSF).....	74
Figura 4.9. Refletância das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão de fósforo e $T_B = 970$ °C, medida na (a) face do emissor e (b) face do campo retrodifusor (BSF).....	74
Figura 4.10. Refletância média para as superfícies do emissor e campo retrodifusor na temperatura de difusão de boro a 970 °C.....	75
Figura 4.11. Eficiência quântica interna das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferente temperatura de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 970 °C medida com iluminação na (a) face com o emissor e (b) face com o campo retrodifusor (BSF).	76
Figura 4.12. Densidade de corrente elétrica em função da tensão elétrica das células solares bifaciais com maior eficiência para diferentes temperaturas de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 980 °C medida na (a) face do emissor e na (b) face do campo retrodifusor (BSF).....	78
Figura 4.13. Refletância média para as superfícies do emissor e campo retrodifusor na temperatura de difusão de boro a 980 °C.....	79
Figura 4.14. Refletância das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão de fósforo e $T_B = 980$ °C, medida na (a) face do emissor e (b) face do campo retrodifusor (BSF).....	79
Figura 4.15. Eficiência quântica interna das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferente temperatura de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 980 °C medida com iluminação na (a) face com o emissor e (b) face com o campo retrodifusor (BSF).	80

- Figura 4.16. Densidade de corrente elétrica em função da tensão elétrica das células solares bifaciais com maior eficiência para diferentes temperaturas de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 990 °C medida na (a) face do emissor e na (b) face do campo retrodifusor (BSF)..... 82
- Figura 4.17. Refletância das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão de fósforo e $T_B = 990$ °C, medida na (a) face do emissor e (b) face do campo retrodifusor (BSF)..... 83
- Figura 4.18. Eficiência quântica interna das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferente temperatura de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 990 °C medida com iluminação na (a) face com o emissor e (b) face com o campo retrodifusor (BSF). 83
- Figura 4.19. Refletância média para as superfícies do emissor e campo retrodifusor na temperatura de difusão de boro a 990 °C..... 84
- Figura 4.20. Densidade de corrente elétrica em função da tensão elétrica das células solares bifaciais com maior eficiência para diferentes temperaturas de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 1.000 °C medida na (a) face do emissor e na (b) face do campo retrodifusor (BSF)..... 86
- Figura 4.21. Refletância das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão de fósforo e $T_B = 1.000$ °C, medida na (a) face do emissor e (b) face do campo retrodifusor (BSF)..... 86
- Figura 4.22. Eficiência quântica interna das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferente temperatura de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 1.000 °C medida com iluminação na (a) face com o emissor e (b) face com o campo retrodifusor (BSF). . 87
- Figura 4.23. Refletância média para as superfícies do emissor e campo retrodifusor na temperatura de difusão de boro de 1.000 °C..... 87
- Figura 4.24. Densidade de corrente elétrica em função da tensão das células solares bifaciais com maior eficiência para diferentes temperaturas de difusão de boro e temperatura de difusão de fósforo a 835 °C medida na (a) face do emissor e na (b) face do campo retrodifusor (BSF)..... 90
- Figura 4.25. Refletância das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão e $T_P = 835$ °C, medida na (a) face do emissor e na (b) face do campo retrodifusor (BSF)..... 91
- Figura 4.26. Eficiência quântica interna das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferente temperatura de difusão de boro e

temperatura de difusão de fósforo de 835 °C medida com iluminação na (a) face com o emissor e na (b) face com o campo retrodifusor (BSF). .91

- Figura 4.27. Densidade de corrente elétrica em função da tensão das células solares bifaciais com maior eficiência para diferentes temperaturas de difusão de boro e temperatura de difusão de fósforo de 845 °C medida na (a) face do emissor e na (b) face do campo retrodifusor (BSF)..... 95
- Figura 4.28. Refletância das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão e $T_p = 845$ °C, medida na (a) face do emissor e na (b) face do campo retrodifusor (BSF)..... 95
- Figura 4.29. Eficiência quântica interna das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferente temperatura de difusão de boro e temperatura de difusão de fósforo de 845 °C medida com iluminação na (a) face com o emissor e na (b) face com o campo retrodifusor (BSF). .96
- Figura 4.30. Densidade de corrente elétrica em função da tensão das células solares bifaciais com maior eficiência para diferentes temperaturas de difusão de boro e temperatura de difusão de fósforo a 855 °C medida na (a) face do emissor e na (b) face do campo retrodifusor (BSF)..... 98
- Figura 4.31. Refletância das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão e $T_p = 855$ °C, medida na (a) face do emissor e na (b) face do campo retrodifusor (BSF)..... 98
- Figura 4.32. Eficiência quântica interna das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferente temperatura de difusão de boro e temperatura de difusão de fósforo de 855 °C medida com iluminação na (a) face com o emissor e na (b) face com o campo retrodifusor (BSF). .99
- Figura 4.33. Densidade de corrente elétrica em função da tensão das células solares bifaciais com maior eficiência nas diferentes temperaturas e tempo de oxidação para passivação: (a) face do emissor e (b) face do campo retrodifusor (BSF)..... 102
- Figura 4.34. Refletância das células solares bifaciais com maior eficiência em cada faixa de temperatura: (a) face do emissor e (b) face do campo retrodifusor (BSF)..... 102
- Figura 4.35. EQI das células solares bifaciais com maior eficiência em cada faixa de temperatura: (a) face do emissor e (b) face do campo retrodifusor (BSF).
..... 103

Figura 4.36. Eficiência quântica interna para comprimentos de onda menores que 500 nm das células solares bifaciais com maior eficiência com diferentes camadas de SiO ₂ para passivação do emissor.	103
Figura 4.37. Parâmetros elétricos da célula solar bifacial (a) Cel800 e (b) Cel860 desenvolvidas em Si-Cz tipo n e oxidação e difusão de boro no mesmo processo térmico.	105

LISTA DE TABELAS

- Tabela 3.1. Quantidade de células solares bifaciais e temperatura de difusão de boro (T_B) e de fósforo (T_P) em cada processo. 49
- Tabela 4.1. Valores médios da resistência de folha das células solares bifaciais desenvolvidas em Si-Cz tipo n, com oxidação e difusão de boro no mesmo processo térmico, em função da temperatura de difusão de boro e da temperatura de difusão fósforo. Medidas realizadas após a difusão dos dois dopantes e antes da oxidação para passivação. 64
- Tabela 4.2. Valores médios da resistência de folha das regiões p^+ das células solares bifaciais desenvolvidas em Si-Cz tipo n, com oxidação e difusão de boro no mesmo processo térmico, em função da temperatura de difusão de boro e de fósforo. Medidas realizadas antes e após a difusão de fósforo e anterior a oxidação para passivação. 65
- Tabela 4.3. Valores médios da resistência de folha das regiões n^+ das células solares bifaciais desenvolvidas em Si-Cz tipo n, com oxidação e difusão de boro no mesmo processo térmico, em função da temperatura de difusão de fósforo e de boro. Medidas realizadas após difusão de fósforo e antes da oxidação para passivação. 66
- Tabela 4.4. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais desenvolvidas em função da temperatura de difusão de fósforo para a temperatura de difusão de boro de 960 °C. Oxidação para passivação com temperatura de oxidação de 800 °C durante 45 min. 68
- Tabela 4.5. Eficiência das células solares medidas com iluminação no emissor e no campo retrodifusor processadas com a temperatura de difusão de boro de 960 °C em função da temperatura de difusão de fósforo e eficiência média ponderada das células solares bifaciais. 69
- Tabela 4.6. Refletância média ponderada para a superfície com o emissor e com o campo retrodifusor das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 960 °C. 71
- Tabela 4.7. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais desenvolvidas em função da temperatura de difusão de fósforo para a temperatura de difusão de boro de 970 °C. Oxidação para passivação com temperatura de oxidação de 800 °C durante 45 min. 73
- Tabela 4.8. Eficiência das células solares medidas com iluminação no emissor e no campo retrodifusor processadas com a temperatura de difusão de boro

de 970 °C em função da temperatura de difusão de fósforo e eficiência média ponderada das células solares bifaciais.	73
Tabela 4.9. Refletância média ponderada para a superfície com o emissor e com o campo retrodifusor das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 970 °C.....	75
Tabela 4.10. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais desenvolvidas em função da temperatura de difusão de fósforo para a temperatura de difusão de boro de 980 °C. Oxidação para passivação com temperatura de oxidação de 800 °C durante 45 min.	77
Tabela 4.11. Eficiência das células solares medidas com iluminação no emissor e no campo retrodifusor processadas com a temperatura de difusão de boro de 980 °C em função da temperatura de difusão de fósforo e eficiência média ponderada das células solares bifaciais.	77
Tabela 4.12. Refletância média ponderada para a superfície com o emissor e com o campo retrodifusor das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 980 °C.....	79
Tabela 4.13. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais desenvolvidas em função da temperatura de difusão de fósforo para a temperatura de difusão de boro de 990 °C. Oxidação para passivação com temperatura de oxidação de 800 °C durante 45 min.	81
Tabela 4.14. Eficiência das células solares medidas com iluminação no emissor e no campo retrodifusor processadas com a temperatura de difusão de boro de 990 °C em função da temperatura de difusão de fósforo e eficiência média ponderada das células solares bifaciais.	82
Tabela 4.15. Refletância média ponderada para a superfície com o emissor e com o campo retrodifusor das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 990 °C.....	84
Tabela 4.16. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais desenvolvidas em função da temperatura de difusão de fósforo para a temperatura de difusão de boro de 1.000 °C. Oxidação para passivação com temperatura de oxidação de 800 °C durante 45 min.....	85
Tabela 4.17. Eficiência das células solares medidas com iluminação no emissor e no campo retrodifusor processadas com a temperatura de difusão de boro de 1.000 °C em função da temperatura de difusão de fósforo e eficiência média ponderada das células solares bifaciais.	85

Tabela 4.18. Refletância média ponderada para a superfície com o emissor e com o campo retrodifusor das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 1.000 °C.....	87
Tabela 4.19. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais desenvolvidas em função da temperatura de difusão de boro para a temperatura de difusão de fósforo de 835 °C. Oxidação para passivação com temperatura de oxidação de 800 °C durante 45 min.	89
Tabela 4.20. Eficiência das células solares medidas com iluminação no emissor e no campo retrodifusor processadas com a temperatura de difusão de fósforo de 835 °C em função da temperatura de difusão de boro e eficiência média ponderada das células solares bifaciais.	90
Tabela 4.21. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais desenvolvidas em função da temperatura de difusão de boro para a temperatura de difusão de fósforo de 825 °C. Oxidação para passivação com temperatura de oxidação de 800 °C durante 45 min.	92
Tabela 4.22. Eficiência das células solares medidas com iluminação no emissor e no campo retrodifusor processadas com a temperatura de difusão de fósforo de 825 °C em função da temperatura de difusão de boro e eficiência média ponderada das células solares bifaciais.	92
Tabela 4.23. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais desenvolvidas em função da temperatura de difusão de boro para a temperatura de difusão de fósforo de 845 °C. Oxidação para passivação com temperatura de oxidação de 800 °C durante 45 min.	93
Tabela 4.24. Eficiência das células solares medidas com iluminação no emissor e no campo retrodifusor processadas com a temperatura de difusão de fósforo de 845 °C em função da temperatura de difusão de boro e eficiência média ponderada das células solares bifaciais.	94
Tabela 4.25. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais desenvolvidas em função da temperatura de difusão de boro para a temperatura de difusão de fósforo de 855 °C. Oxidação para passivação com temperatura de oxidação de 800 °C durante 45 min.	97
Tabela 4.26. Eficiência das células solares medidas com iluminação no emissor e no campo retrodifusor processadas com a temperatura de difusão de fósforo de 855 °C em função da temperatura de difusão de boro e eficiência média ponderada das células solares bifaciais.	97
Tabela 4.27. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais desenvolvidas em Si-Cz tipo n com oxidação e difusão de boro no mesmo processo térmico em função da oxidação para a temperatura de difusão de boro de 980	

°C, difusão de fósforo de 845 °C e diferentes temperaturas e tempos de oxidação. 100

Tabela 4.28. Eficiência das células solares medidas com iluminação no emissor e no campo retrodifusor processadas com a temperatura de difusão de boro de 980 °C e temperatura de difusão de fósforo de 845 °C e eficiência média ponderada das células solares bifaciais. 101

Tabela 4.29. Parâmetros elétricos e eficiência média ponderada da célula solar bifacial (a) Cel800 e (b) Cel860 desenvolvidas em Si-Cz tipo n e oxidação e difusão de boro no mesmo processo térmico. 104

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ALD	Deposição por camadas atômicas (<i>atomic layer deposition</i>)	
AM	Massa óptica de ar (<i>optical air mass</i>)	
APCVD	Deposição química em fase vapor a pressão atmosférica (<i>atmospheric pressure chemical vapor deposition</i>)	
BSF	Campo retrodifusor (<i>back surface field</i>)	
c	Velocidade da luz no vácuo	299.792.458 m/s
CIGS	Disseleneto de cobre, índio e gálio	
CIS	Disseleneto de cobre e índio	
Cz	Czochralski	
E _g	Energia de <i>gap</i>	eV
e-beam	Deposição física em fase vapor por feixe de elétrons (<i>electron beam physical vapor deposition</i>)	
EQE	Eficiência quântica externa	%
EQI	Eficiência quântica interna	%
FC	Fator de conversão	
FF	Fator de Forma	
G	Taxa de geração de portadores de carga	
h	Constante de Planck	$6,6260 \times 10^{-34} \text{ m}^2\text{kg/s}$
I	Corrente elétrica	A
I _{SC}	Corrente de curto-circuito (<i>short-circuit current</i>)	A
I _L	Corrente gerada pela irradiação solar	A
I _{MP}	Corrente no ponto de máxima potência	A
I _O	Corrente de saturação no escuro	A
k	Constante de Boltzmann	$1,380 \times 10^{-23} \text{ m}^2\text{kg/s}^2\text{K}$
L _N	Comprimento de difusão de elétrons	μm
L _P	Comprimento de difusão de lacunas	μm
PECVD	Deposição química em fase vapor aprimorada por plasma (<i>plasma enhanced chemical vapor deposition</i>)	
PERC	Célula com emissor e face posterior passivada (<i>passivated emitter and rear floating junction</i>)	
PERL	Célula solar com emissor passivado e difusão posterior localizada (<i>passivated emitter and rear locally diffused</i>)	

PERT	Célula com emissor passivado e região posterior totalmente difundida (<i>passivated emitter and rear totally diffused</i>)	
PESC	Célula solar com emissor passivado (<i>passivated emitter solar cell</i>)	
P_{IN}	Potência da radiação solar incidente	W
P_M	Potência máxima	W
R	Refletância	%
$R(\lambda)$	Refletância em função do comprimento de onda	%
RE	Resposta espectral	
R_{\square}	Resistência de folha	Ω/\square
SHJ	Célula solar de silício com heterojunção (<i>heterojunction silicon solar cell</i>)	
Si-a	Silício amorfo	
Si-c	Silício cristalino	
Si-Cz	Silício Czochralski	
Si-FZ	Silício Float Zone	
Si-m	Silício monocristalino	
Si-mc	Silício multicristalino	
SRH	<i>Shockley-Read-Hall</i>	
T_B	Temperatura de difusão de boro	$^{\circ}\text{C}$
T_P	Temperatura de difusão de fósforo	$^{\circ}\text{C}$
TCO	Óxido condutor transparente (<i>transparent conductive oxide</i>)	
V	Tensão elétrica	V
V_{MP}	Tensão no ponto de máxima potência	V
V_{OC}	Tensão de circuito aberto (<i>open-circuit voltage</i>)	V
α	Coeficiente de absorção	cm^{-1}
σ	Condutividade elétrica	$(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$
λ	Comprimento de onda	nm
η	Eficiência de conversão	%

RESUMO

BIAZETTO, Fábio André. **OTIMIZAÇÃO DAS REGIÕES ALTAMENTE DOPADAS DE CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS BASE N E ANÁLISE DA PASSIVAÇÃO.** Porto Alegre. 2019. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

As células solares bifaciais de silício são projetadas para que ambas as faces possam atuar como conversor da energia solar. As lâminas de Si tipo n possuem maior tolerância à impurezas não desejadas, apresentando maior tempo de vida dos portadores de carga minoritários, e não apresentam degradação quando expostas à radiação solar, devido a ausência de complexos boro-oxigênio. O objetivo deste trabalho foi otimizar experimentalmente o emissor e o campo retrodifusor de células solares bifaciais, base n, com estrutura $p^{+}nn^{+}$, bem como avaliar a passivação das superfícies com SiO_2 . Apoiou-se em trabalhos anteriores focados em células solares monofaciais, base p, com campo retrodifusor seletivo de boro e alumínio, e na patente BR 10 2012 030 606 9, com difusão de boro e oxidação na mesma etapa térmica. Foram utilizadas lâminas de Si-Cz, grau solar e, variou-se a temperatura de difusão de boro (T_B), que forma o emissor, de 960 °C a 1.000 °C. A temperatura de difusão de fósforo (T_P), que forma o campo retrodifusor, foi variada de 825 °C a 855 °C. Avaliou-se a resistência de folha, as características elétricas, a refletância e a eficiência quântica interna das células solares bifaciais. Foi avaliada e comparada a passivação com SiO_2 , crescido em oxidação seca, em ambas as faces e com diferentes espessuras. Foram obtidos valores baixos para o fator de forma no emissor, independente da T_P , para células solares processadas nas T_B de 960 °C e 970 °C. Com o aumento da T_B para 980 °C, $T_P = 845$ °C e $T_{OXID} = 860$ °C, se obteve, respectivamente, 15,9 % e 16 % de eficiência para o emissor e o BSF. O principal resultado foi o desenvolvimento de células solares bifaciais base n com processo industrial e eficiência de 15,5 % e de 16,6 %, respectivamente, no emissor e no campo retrodifusor. Este resultado foi obtido com $T_B = 990$ °C, $T_P = 835$ °C e $T_{OXID} = 800$ °C. Também se verificou que um óxido de Si fino não resultou em passivação de qualidade e a passivação com uma camada de SiO_2 da ordem de 50 – 60 nm resultou em um aumento de 0,6 % e 0,9 % (absoluto) na eficiência na face com o campo retrodifusor e emissor, respectivamente.

Palavras-Chaves: Células Solares Bifaciais; Lâminas de Silício Tipo n, Emissor, Campo Retrodifusor, Passivação.

ABSTRACT

BIAZETTO, Fábio André. **OPTIMIZATION OF HIGHLY DOPED REGIONS OF n-TYPE BIFACIAL SILICON SOLAR CELLS AND PASSIVATION ANALYSIS**. Porto Alegre. 2019. Master. Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

Bifacial silicon solar cells are designed to convert solar energy reaching on both faces. The n-type Si wafers have a higher tolerance to unwanted impurities, presenting a longer lifetime of the minority charge carriers, and do not present degradation when exposed to solar radiation due to the absence of boron-oxygen complexes. The objective of this work was to optimize experimentally the emitter and back surface field of n-type bifacial solar cells with p^+n^+ structure, as well as to evaluate the passivation of the surfaces with SiO_2 . The study was based on previous work focused on monofacial p-type solar cells with a selective boron and aluminum back surface field and patent BR 10 2012 030 606 9, with boron diffusion and oxidation in the same thermal step. Solar grade Si-Cz wafers were used and the boron diffusion temperature (T_B), which forms the emitter, was ranged from 960 °C to 1,000 °C. The phosphorus diffusion temperature (T_P), which forms the back surface field (BSF), was ranged from 825 °C to 855 °C. The sheet resistance, the electrical characteristics, the reflectance and the internal quantum efficiency of the bifacial solar cells were evaluated. The passivation with SiO_2 , grown in dry oxidation on both faces and with different thicknesses was evaluated and compared. Lower values of fill factor were obtained in the emitter, independent of T_P , from solar cells processed in T_B of 960 °C and 970 °C. With the increase of T_B at 980 °C, $T_P = 845$ °C and $T_{\text{OXID}} = 860$ °C, the efficiency of 15.9 % and 16 % were obtained, respectively, in the emitter and in the BSF. The main result was the development of n-type bifacial solar cells with industrial process and efficiency of 15.5% and 16.6%, respectively, in the emitter and back surface field. This result was obtained with $T_B = 990$ °C, $T_P = 835$ °C and $T_{\text{OXID}} = 800$ °C. A thinner Si oxide did not result in quality passivation and passivation with a SiO_2 layer in the range of 50-60 nm in the BSF resulted in an increase of 0.6% and 0.9% (absolute) in the efficiency when the device is illuminated on the back surface field and emitter, respectively.

Key-words: Bifacial Solar Cells; n-Type Silicon Wafers, Emitter, Back Surface Field, Passivation.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1. Justificativas

Em um mundo globalizado e com alto nível de desenvolvimento, como o que a sociedade se encontra atualmente, muitos são os desafios a serem enfrentados. Embora numerosos sejam os avanços alcançados em distintas áreas de atividade humana no último século e início deste, grandes também são os problemas que, com eles, vieram. Dentre os quais, se pode citar mudanças climáticas, que estão ocorrendo de forma acelerada nas últimas décadas, e o aumento da demanda energética, que se tornaram pontos cruciais a serem solucionados para que se possa manter um crescimento sustentável.

Nas suas mais distintas formas, a energia firmou-se como requisito essencial para o progresso humano. Combustíveis de origem fóssil (petróleo, gás natural e carvão), utilizados em larga escala no último século, e ainda hoje, foram tomados como indicadores de renda e prosperidade de nações, contribuindo para o avanço demográfico e socioeconômico, assim como mudanças tecnológicas. Contudo, o uso massivo destas fontes de energia tornou-se preocupante por serem fontes não renováveis e altamente poluentes. O seu emprego ao longo dos anos contribuiu com uma parcela significativa na rápida mudança climática do planeta, com sérias consequências ambientais. Dentre elas, está a elevação da temperatura ambiente média, devido a emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa, e poluição do ar. Com isto, políticas de impacto ambiental implementadas por governos, por meio de tratados internacionais, são de suma importância para que se possa manter um quadro de desenvolvimento sustentável (Rahman e Miah, 2017), (Sampaio e Gonzáles, 2017).

O crescimento industrial acelerado, aliado ao aumento populacional mundial das últimas décadas, com conseqüente expansão das atividades humanas, tem como resultado um incremento substancial quanto a demanda de energia elétrica. Das distintas formas de energia, a elétrica, com aplicação desde a simples iluminação de ambientes até o funcionamento de satélites na órbita terrestre, assume um papel de destaque na manutenção deste cenário. A incorporação de fontes alternativas e renováveis de energia (solar, eólica, geotérmica e biomassa) à matriz energética existente (hidroelétricas e combustíveis de origem fóssil) tem recebido a atenção de vários setores. A obtenção de energia elétrica, a partir da radiação solar com uso de sistemas fotovoltaicos, sobressaem-se neste meio (Kannan e Vakeesan, 2016), (Finnerty *et al.*, 2017), (Sampaio e Gonzáles, 2017).

Os sistemas fotovoltaicos destacam-se no mercado energético por serem uma solução prática para a demanda global por energia elétrica, mantendo um desenvolvimento sustentável e reduzindo a emissão de gases do efeito estufa. A tecnologia é modular, simples e adaptável, podendo ser implementada em fachadas, telhados e terraços de edificações, suprimindo total ou parcialmente as necessidades relativas à energia elétrica da edificação. Além disso, pode ser utilizada em centrais fotovoltaicas de grande escala. Possui potencial de proporcionar energia à geração atual de maneira a não comprometer necessidades e recursos de gerações futuras. A base desta tecnologia são as células solares como principal elemento, onde estas podem ser monofaciais ou bifaciais. Estes dispositivos, por meio do efeito fotovoltaico, convertem diretamente a radiação solar incidente sobre sua superfície em energia elétrica. Também apresentam outras vantagens como a não emissão de gases poluentes, ausência de ruídos, longa vida útil e grande confiabilidade (Cavallari *et al.*, 2017), (Jayathissa *et al.*, 2016), (Costa, 2013), (Honsberg).

As células solares bifaciais de silício, diferentemente das monofaciais, são projetadas e fabricadas de modo que ambas as faces possam atuar como conversor de energia solar. A radiação solar, direta e difusa, é coletada nas suas duas superfícies, frontal e posterior, e convertida em energia elétrica. Assim, os dispositivos têm sua área útil dobrada (Cavallari *et al.*, 2017), (Costa, 2013).

Pesquisadas desde a década de 1960, quando utilizadas pela indústria espacial para o fornecimento de energia elétrica em satélites, as células solares bifaciais apresentam diversas vantagens com relação as monofaciais. Devido a combinação de incidência da radiação solar nas superfícies frontal e posterior, melhoram a potência dos módulos fotovoltaicos. Como consequência, isto pode ter um aumento de até 50 % no que concerne a produção de energia elétrica por módulo fotovoltaico, utilizando um dispositivo de concentração permitindo o aumento na radiação de albedo (Lemus *et al.*, 2016), (Sahin *et al.*, 2017).

Células solares bifaciais fabricadas em lâminas de silício monocristalino, grau solar (99,999 % de pureza), crescido pelo método Czochralski (Si-Cz), tipo n, têm recebido grande atenção, especialmente do meio industrial. Quando comparado ao substrato tipo p, este tipo de lâminas de Si possui maior tolerância à impurezas (não desejadas) presentes na sua estrutura e, conseqüentemente, apresenta maior tempo de vida dos portadores de carga minoritários. Outra vantagem é a inexistência de degradação da célula solar quando exposta à radiação solar, devido a ausência de complexos boro-oxigênio (Barbato *et al.*, 2017), (Naber *et al.*, 2009), (Chen *et al.*, 2013), (Goyal *et al.*, 2015), (Lemus *et al.*, 2016), (Rothhardt *et al.*, 2014).

A fabricação de células solares envolve distintos passos em seu processo. Entre esses, encontra-se a difusão de dopantes (impurezas específicas), realizada em etapa térmica em forno a alta temperatura (700 °C a 1.100 °C), assim como a passivação das superfícies das lâminas do semicondutor. Sabe-se que estas etapas são extremamente importantes para o desenvolvimento do processo. A difusão permite a formação de regiões altamente dopadas nas superfícies da lâmina, implementando o emissor e o campo retrodifusor no dispositivo. O procedimento de passivação, por meio do crescimento de um filme dielétrico, possibilita completar as ligações químicas pendentes nas superfícies da lâmina. Portanto, tanto a passivação quanto as difusões afetam a eficiência dos dispositivos fotovoltaicos. Neste contexto, este trabalho visa, de forma experimental, analisar distintas temperaturas de difusão de boro e de fósforo na formação de células solares bifaciais, assim como diferentes processos de passivação com SiO₂.

1.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho foi otimizar experimentalmente o emissor e o campo retrodifusor de células solares bifaciais, processadas em lâminas de silício Czochralski (Si-Cz), tipo n, com estrutura p^+nn^+ bem como avaliar a passivação das superfícies.

Os objetivos específicos são:

- Otimizar experimentalmente a temperatura de difusão de **boro**, que forma o **emissor**, por meio da comparação da resistência de folha da região p^+ e das características elétricas e da eficiência quântica interna das células solares;
- Otimizar experimentalmente a temperatura de difusão de **fósforo**, que forma o **campo retrodifusor**, por meio da comparação da resistência de folha da região n^+ e das características elétricas e da eficiência quântica interna dos dispositivos;
- Avaliar e comparar a passivação por oxidação das células solares no emissor e no campo retrodifusor, produzida com dióxido de silício, crescido em oxidação seca.

O desenvolvimento deste trabalho apoiou-se em estudos anteriores realizados pela equipe do NT-Solar em células solares monofaciais base p. Como inovação deste estudo, para o desenvolvimento de células solares bifaciais base n, foi utilizada a solicitação de patente BR 10 2012 030 606 9 (Zanenco e Moehlecke, 2012), onde ocorre, na mesma etapa térmica, a difusão de boro e a oxidação para proteger a face dopada com boro da difusão de fósforo, que forma o campo retrodifusor. A avaliação da passivação em ambas as faces da célula solar com dióxido de silício é outro diferencial deste estudo.

2. CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS

2.1. Células Monofaciais e Bifaciais

O efeito fotovoltaico consiste na conversão direta da energia solar em energia elétrica. Foi observado pela primeira vez em 1839 por Alexandre Edmond Becquerel, quando realizava experimentos sobre eletroquímica, onde, em eletrodos submersos em solução eletrolítica e expostos à luz, originava-se uma diferença de potencial entre eles. Cerca de quatro décadas depois, no decênio de 1870, o efeito foi constatado em um material sólido, o selênio (Huen *et al.*, 2017), (Green, 1992).

Células solares convertem a radiação solar em energia elétrica mediante o efeito fotovoltaico e estão baseadas nas características físicas apresentadas por materiais semicondutores. A tecnologia de células solares que domina o mercado hoje está baseada em lâminas de silício cristalino. Isto ocorre pela abundância deste elemento na Terra, considerando-o como uma fonte inesgotável de matéria-prima, e pela vasta experiência que a indústria já possui trabalhando com este material (Huen *et al.*, 2017), (Ogbomo *et al.*, 2017), (Green, 1992).

Atualmente, também há o desenvolvimento de dispositivos fotovoltaicos fabricados em filmes finos. Estes são combinações de materiais distintos como telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre, índio, gálio e selênio (Cu[In,Ga]Se₂ ou CIGS), disseleneto de cobre e índio (CuInSe₂ ou CIS), e arsenieto de gálio (GaAs), com as camadas formando ligas e espessura da ordem de micrometros. Porém, possuem custo de fabricação elevado ou eficiência baixa.

Uma característica fundamental dos materiais sólidos é a sua condutividade elétrica. Esta, decorrente da estrutura eletrônica apresentada por seus átomos constituintes, indica a sua capacidade em conduzir corrente elétrica sob uma

determinada diferença de potencial aplicada. A classificação dos materiais entre condutores, semicondutores e isolantes está baseada na estrutura de bandas de cada um, representada na Figura 2.1. As bandas de valência e de condução são separadas pela banda proibida (*gap*). Se a energia do *gap* (E_g) for inferior a 3 eV, o material é classificado como semicondutor. Neste, a condutividade apresenta valores na faixa entre $10^{-6} (\Omega \cdot m)^{-1}$ a $10^4 (\Omega \cdot m)^{-1}$. O silício, do grupo 14 da tabela periódica, possui as bandas de valência e condução separadas por uma E_g da ordem de 1,1 eV e, em temperatura ambiente, a condutividade é igual a $4 \times 10^4 (\Omega \cdot m)^{-1}$ (Callister, 2002), (Smith, 2012).

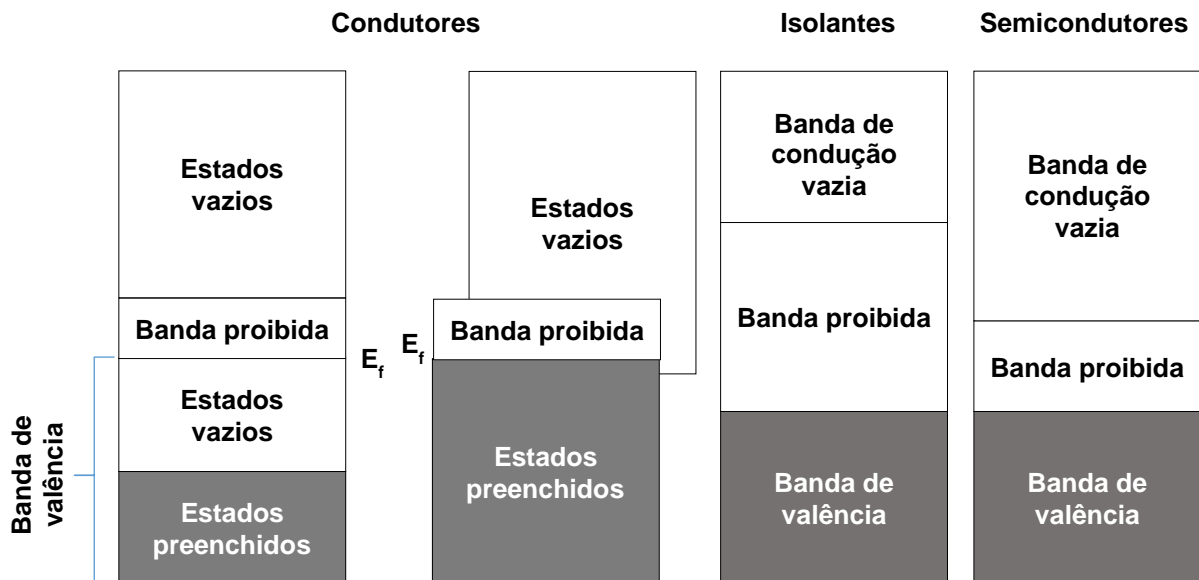


Figura 2.1. Esquema representativo das bandas de condução, proibida e de valência para os materiais condutores, isolantes e semicondutores. Fonte: Baseado em Callister (2002).

Possuindo quatro elétrons de valência, os átomos de silício, ao formar o sólido cristalino, unem-se por meio de ligações covalentes. Ao excitar um elétron da banda de valência para a de condução, este torna-se livre podendo mover-se pela rede cristalina e, em sua posição original, fica uma lacuna. Esta lacuna pode ser vista como uma partícula carregada positivamente. No par elétron-lacuna formado há uma igualdade entre o número de cargas elétricas positivas e negativas, isto é, para cada carga negativa que se torna livre, há somente uma lacuna. A Figura 2.2 apresenta um esquema das ligações e da formação do par elétron-lacuna. Porém, as características elétricas do semicondutor podem ser alteradas por meio da inserção de impurezas (Callister, 2002), (Smith, 2012).

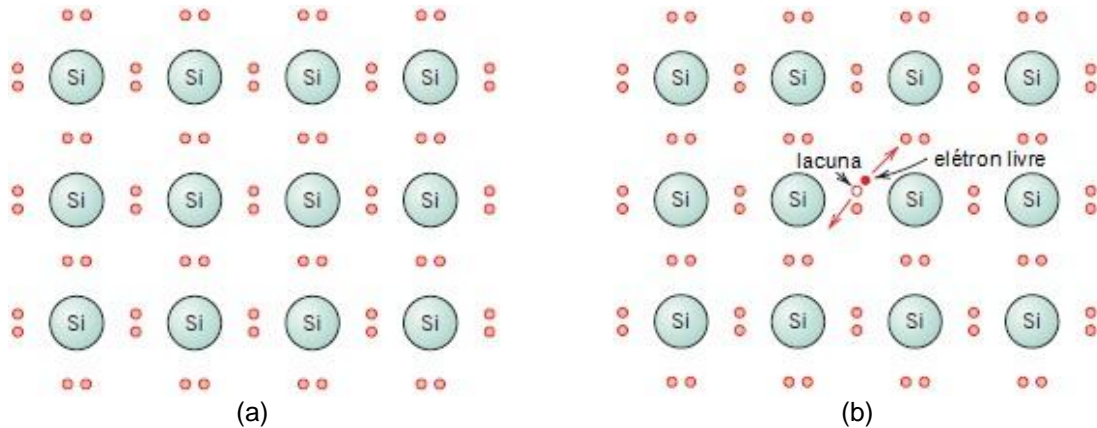


Figura 2.2. Ligação eletrônica para o Si cristalino intrínseco: (a) antes e (b) após a excitação que origina o par elétron-lacuna. Adaptado de Callister (2002).

Elementos pentavalentes, tais como o fósforo, arsênio ou antimônio são impurezas doadoras e, se presentes na estrutura cristalina do silício, ocasionam um excesso de elétrons livres nesta. Este excedente ocorre porque dos seus cinco elétrons de valência, apenas quatro estarão envolvidos nas ligações com os átomos vizinhos de silício. A quinta carga permanecerá fracamente ligada ao átomo de origem, podendo mover-se pelo material. Por outro lado, elementos trivalentes como boro, alumínio ou gálio, considerados impurezas receptoras, dispõem de três elétrons em seu último nível eletrônico. Estas cargas participarão das ligações químicas com os elementos da rede cristalina, e, devido à ausência de um quarto elétron, há a formação de uma lacuna. As inserções destas impurezas, mesmo em pequena quantidade, são suficientes para alterar o comportamento elétrico do material intrínseco. A Figura 2.3 mostra o silício dopado com boro e fósforo (Callister, 2002), (Smith, 2012).

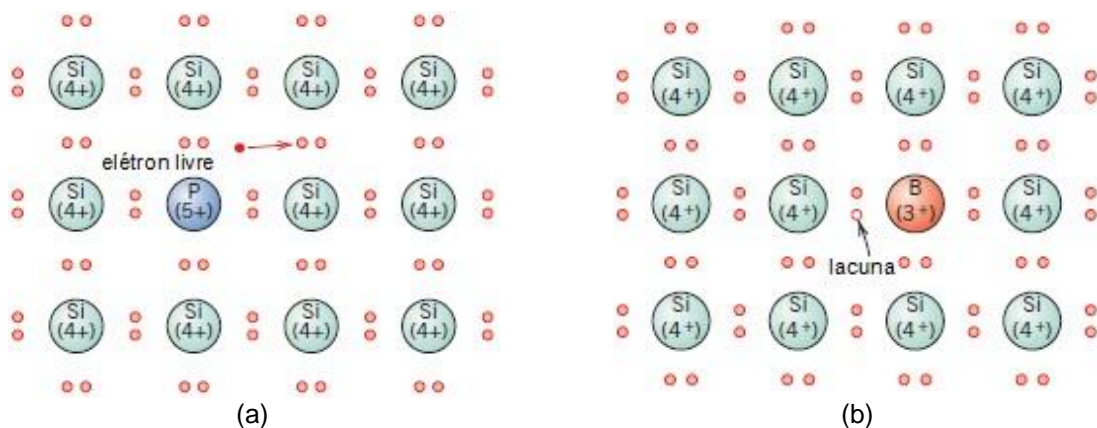


Figura 2.3. Silício dopado com (a) fósforo e (b) boro. Adaptado de Callister (2002).

Lâminas de silício tipo n e tipo p formam a base das células solares. Ao silício, durante o processo de crescimento da estrutura cristalina do semiconductor por meio das técnicas Czochralski (Si-Cz) ou fusão zonal flutuante (Si-FZ), são incorporadas impurezas doadoras ou aceitadoras em pequena quantidade. No processo de fabricação dos dispositivos fotovoltaicos, a partir de uma das superfícies da lâmina de silício, um dopante diferente daquele que forma a base é difundido para formar a junção pn, esquematizada na Figura 2.4. As lacunas são os portadores de carga majoritários no silício tipo p, enquanto que, no silício tipo n, os elétrons são os portadores de carga majoritários. Com isto, na localidade limítrofe entre regiões de diferentes dopantes, originasse um campo elétrico no sentido do silício tipo n para o silício tipo p (Callister, 2002), (Green, 1992).

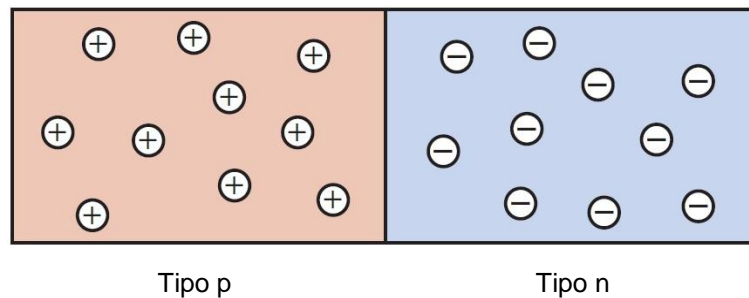


Figura 2.4. Junção pn entre o material tipo p e o tipo n. Adaptado de Callister (2002).

A difusão de elementos doadores, como o fósforo, em uma das faces da lâmina de silício tipo p forma o emissor, produzindo uma região altamente dopada n^+ e a formação da junção pn. Ocorre um desequilíbrio na quantidade de portadores de carga, com maior densidade de elétrons e baixa quantidade de lacunas. O mesmo princípio aplica-se, também, à base onde as lacunas predominam. Na face posterior, a dopagem com elementos aceitadores forma uma região altamente dopada p^+ que produz o campo retrodifusor (*back surface field*, BSF). A essência do BSF é refletir os portadores de cargas minoritários, lacunas no material tipo n e elétrons no tipo p, permitindo que estes tenham um tempo de vida maior antes da recombinação no interior da célula solar. Dessa forma, a estrutura fundamental das células solares em substrato de silício tipo p possui a estrutura n^+pp^+ (Green, 1992).

Em um dispositivo fotovoltaico base n, estudado no desenvolvimento deste trabalho, a junção pn é formada pela difusão de um elemento aceitador em uma das faces. Este dopante, altamente concentrado na superfície da lâmina, penetra

parcialmente na lâmina de silício, produzindo uma região altamente dopada p^+ , que forma o emissor. Na face posterior, um elemento doador forma a região altamente dopada n^+ , ou seja, o BSF. O campo retrodifusor tem o intuito de melhorar a tensão de circuito aberto do dispositivo, assim como a corrente elétrica. Isto ocorre pela diminuição na velocidade de recombinação dos portadores de carga minoritários nesta região (Green, 1992), (Luque e Hegedus, 2003). Assim, uma célula solar fabricada em este tipo de silício possui a estrutura p^+nn^+ . A Figura 2.5 mostra um esquema da seção transversal das estruturas n^+pp^+ e p^+nn^+ (Green, 1992).

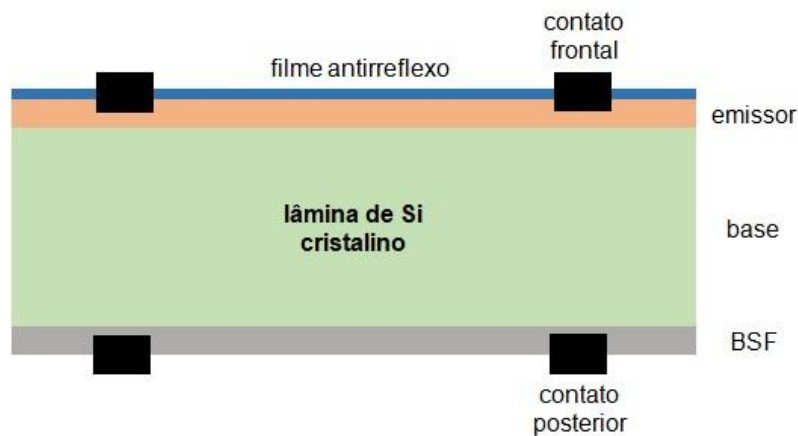


Figura 2.5. Estrutura de uma célula solar industrial em substrato de silício onde destaca-se a base, contatos posterior e frontal, filme antirreflexo, emissor e BSF. Adaptado de Honsberg.

Quando incide irradiância solar na célula solar, uma fração da radiação solar é refletida de volta para o meio e o restante penetra no dispositivo. A radiação solar que não é absorvida é transmitida. Os fótons com energia superior ao E_g do material ($h\nu > E_g$) podem ser absorvidos. Se a energia dos fótons for inferior a energia da banda proibida ($h\nu < E_g$), estes não contribuirão para a produção de tensão e corrente elétrica.

Enquanto que as células solares monofaciais geralmente possuem sua face posterior totalmente recoberta com uma pasta de alumínio, os dispositivos fotovoltaicos bifaciais são projetados de modo que a radiação solar pode ser absorvida nas duas faces. Para tanto, uma malha metálica similar àquela formada sobre a superfície frontal também é produzida na face posterior. O resultado é um ganho adicional na produção de energia elétrica com a mesma quantidade de material semiconductor (Yu *et al.*, 2016), (Lemus *et al.*, 2016).

Da mesma forma que as células solares monofaciais, as bifaciais podem ser produzidas a partir de uma lâmina de silício monocristalino ou multicristalino, tipo p ou tipo n, com a formação de uma junção pn e um campo retrodifusor. A Figura 2.6 mostra a estrutura de uma célula solar bifacial em substrato de silício tipo n, na qual destaca-se a base tipo n, as camadas contendo as difusões de impurezas doadoras e aceitadoras, assim como a camada de passivação, filme antirreflexo e contatos metálicos na face frontal e face posterior (Yu *et al.*, 2016), (Lemus *et al.*, 2016). Os materiais mais utilizados atualmente para a passivação das superfícies de células solares são o dióxido de silício e o nitreto de silício.

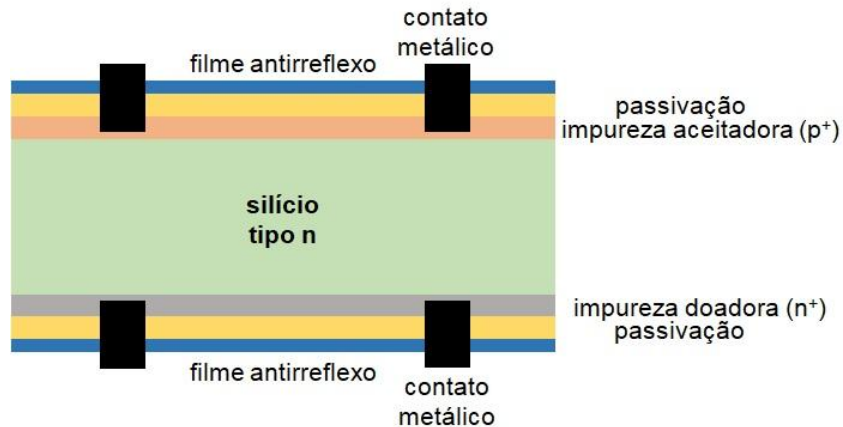


Figura 2.6. Perfil da estrutura de uma célula solar bifacial base n. São mostrados a base do dispositivo, contatos metálicos, camada de passivação, camadas dopadas com impurezas e filme antirreflexo. Adaptado em Yu *et al.* (2016).

Sob irradiação solar, as lacunas e elétrons foto gerados presentes, no material tipo n e no tipo p, permanecem separados por um curto período de tempo. O tempo de vida dos portadores de carga minoritários é definido como o tempo médio que o portador de carga minoritário demora para se recombinar depois do par elétron-lacuna ter sido gerado. Na junção pn, na estrutura da célula, existe um campo elétrico cuja finalidade é separar os pares elétron-lacuna, reduzindo a probabilidade de que se recombinem. Os portadores minoritários que são separados pelo campo elétrico antes da recombinação contribuem para que a célula solar produza energia elétrica (Luque e Hegedus, 2003). O diagrama apresentado na Figura 2.7 esquematiza de forma simplificada o funcionamento da célula solar, onde se pode ver a junção pn, as regiões altamente dopadas p^+ e n^+ e o par elétron-lacuna formado pela absorção de fótons entre outras partes do dispositivo.

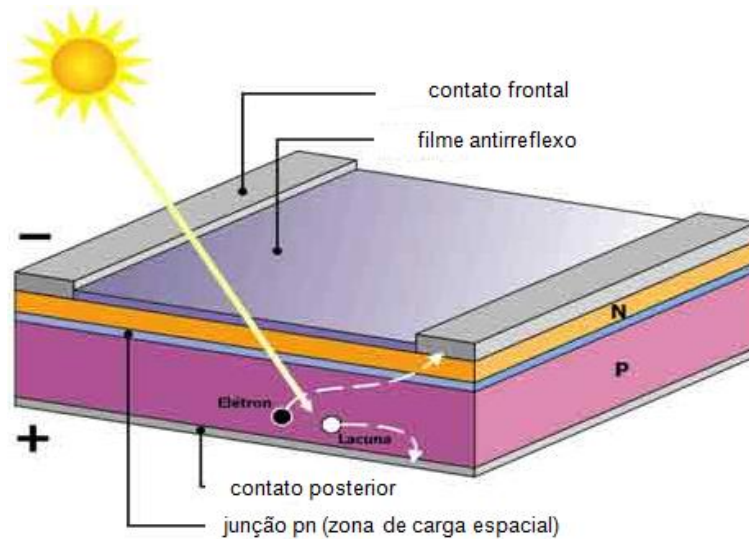


Figura 2.7. Diagrama de uma célula solar convencional e seu funcionamento.
Fonte: Zanesco e Moehlecke (2003).

2.2. Aplicações de Células Solares Bifaciais

As células solares de silício no mercado são extremamente finas, com espessuras da ordem 200 μm . Esta dimensão concede-lhes fragilidade que, para sua aplicabilidade na obtenção de energia elétrica, tornando necessário que seja proporcionado resistência mecânica e proteção contra as adversidades climáticas. Além disso, a potência de uma célula solar é baixa. Para tanto, são interligadas em série e/ou paralelo por intermédio de soldas e montadas em um módulo fotovoltaico de modo que, com este arranjo, a tensão e corrente elétricas, assim como a potência, de cada elemento seja aumentada (Pinho e Galdino, 2014), (Moehlecke e Zanesco, 2005).

O encapsulamento dos módulos fotovoltaicos ocorre com a utilização de uma série de materiais em distintas camadas: vidro temperado altamente transparente seguido por um filme de acetato de etil vinila (EVA – *ethylene-vinyl acetate*), células solares, uma nova camada de EVA e, por fim, um filme (combinação de polímeros). Ao redor deste invólucro, uma moldura de alumínio anodizado é colocada de modo a selar o conjunto, juntamente com a caixa de conexões elétricas. A Figura 2.8 esquematiza a montagem de um módulo fotovoltaico monofacial com seus diferentes elementos (Pinho e Galdino, 2014), (Moehlecke e Zanesco, 2005).

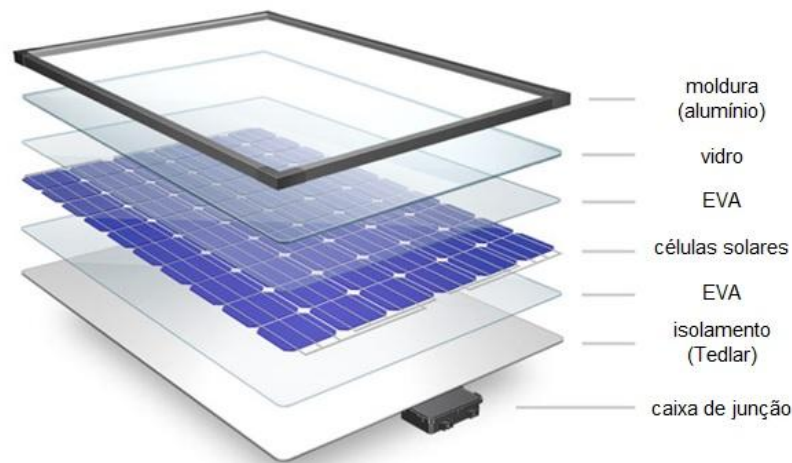


Figura 2.8. Esquema das partes que compõem um módulo fotovoltaico com células solares monofaciais. Adaptado de DuPont.

As células solares bifaciais, quando encapsuladas para a montagem de módulos fotovoltaicos, podem atuar como monofaciais ou bifaciais. Na primeira situação, seu encapsulamento será como a dos dispositivos monofaciais e passam a atuar como dispositivos fotovoltaicos monofaciais. Na segunda configuração, são encapsuladas para atuarem como dispositivos bifaciais. Não há a presença do filme polimérico branco, permitindo que a face posterior da célula solar fique exposta à radiação solar, e o conjunto do módulo assume arranjos diferentes (Lemus *et al.*, 2016).

Os módulos fotovoltaicos bifaciais compostos de vidro-vidro possuem ambos lados transparentes, permitindo que a célula receba radiação solar em suas duas superfícies. Neste arranjo, os módulos são montados com vidro altamente transparente em sua parte frontal e posterior, possibilitando que a radiação devido ao albedo incida sobre a face posterior das células solares bifaciais. Em uma montagem dos módulos fotovoltaicos bifaciais, similar à estrutura vidro-vidro, pode ser elaborada com refletor difuso ou especular alocado na parte posterior do módulo, ao invés de vidro, de modo que a radiação solar seja refletida e incida na superfície posterior das células solares. Na Figura 2.9 é possível ver um diagrama de um módulo bifacial com uma superfície branca atuando como superfície refletora difusa (Wei *et al.*, 2016), (Moehlecke *et al.*, 2013), (Lo *et al.*, 2013).

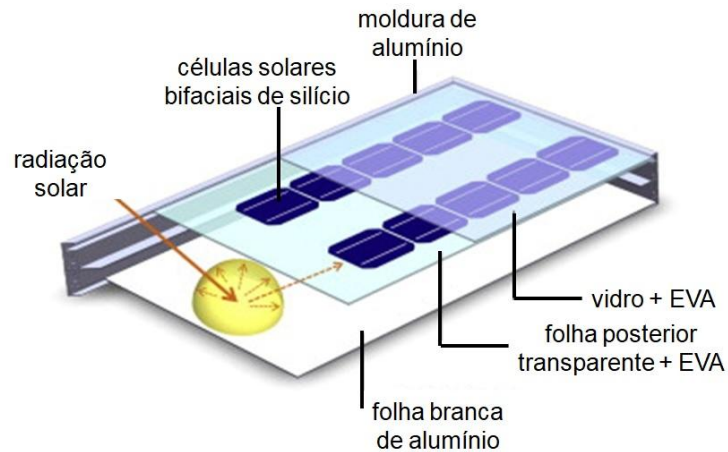
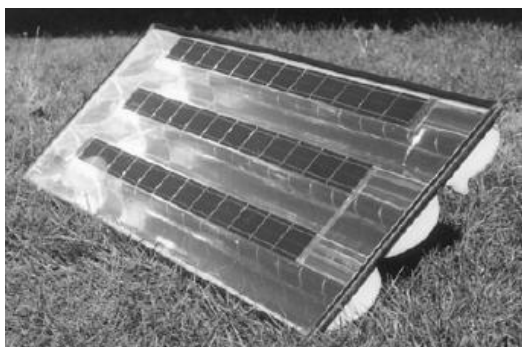
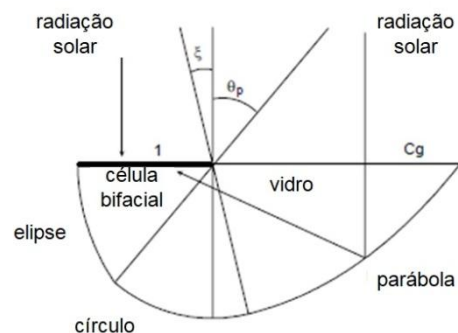


Figura 2.9. Diagrama de um módulo bifacial com face posterior com superfície branca refletora.
Fonte: Adaptado de Moehlecke *et al.* (2013).

Com relação a outros arranjos dos módulos fotovoltaicos bifaciais, um deles é o módulo concentrador que pode ser classificado como sistema de alta, média e baixa concentração. Sistemas de alta concentração requerem rastreamento em dois eixos e com elevada precisão. Os sistemas de média concentração podem ser do tipo parabólica com espelhos ou de lente de Fresnel. Sistemas de baixa concentração podem possuir um sistema de rastreamento em um eixo ou podem ser estáticos. A Figura 2.10 mostra um módulo concentrador estático com células bifaciais, assim como um esquema da seção transversal e de um raio solar incidindo sobre a superfície refletora interna (Zanesco, 1996), (Uematsu *et al.*, 2001), (Chemisana, 2011).



(a)



(b)

Figura 2.10. (a) Módulo fotovoltaico concentrador estático com células solares bifaciais e (b) diagrama esquemático do perfil do concentrador e da trajetória de um raio solar incidindo na superfície refletora interna e células solares. Fonte: Adaptado de Zanesco *et al.* (2001).

Os módulos fotovoltaicos bifaciais, com vidro em ambas as faces e sem concentração de radiação solar, com relação aos monofaciais, possuem o diferencial

de converter radiação solar em ambas as faces. Isto ocasiona um aumento de até 25 % na produção de energia elétrica em condições de alta irradiação solar. A performance do sistema para que atinja tais níveis possui correlação com alguns fatores distintos, tais como ocorre a incidência espacial da radiação de albedo na parte posterior do módulo, a altura do módulo em relação ao solo assim como o ângulo de inclinação (Yusufoglu *et al.*, 2015). Em situação de mais baixa irradiação solar, esta produção pode ser superior aos módulos convencionais em 15% (Grafulha, 2016). Estudos com sistemas de concentração e reflexão difusa constataram um aumento na irradiância de 10 % em relação a irradiância na face frontal (Silveira *et al.*, 2003).

2.3. Células Solares Bifaciais Base n

A fabricação de células solares em um processo industrial típico segue um procedimento básico. Tem início com a etapa de texturação das lâminas de silício, seguida por limpezas químicas, difusões de dopantes em fornos de alta temperatura, passivação de superfícies e deposição de filme antirreflexo. Na última etapa é realizada a metalização, na qual formam-se as malhas metálicas e, finalmente, as bordas são cortadas ou isoladas utilizando *laser* com o intuito de proporcionar o isolamento entre as regiões dopadas das faces frontal e posterior (Green, 1992), (Luque e Hegedus, 2003), (Lemus *et al.*, 2016). Nas células solares bifaciais, a região altamente dopada p^+ deve ser realizada pela difusão de boro, pois o alumínio produz uma superfície que reflete a radiação solar.

Distintos projetos para a estrutura das células solares foram concebidos. Entre eles, pode-se citar a célula solar com emissor passivado (*passivated emitter solar cell*, PESC), a célula solar com emissor passivado e difusão posterior localizada (PERL – *passivated emitter and rear locally diffuser*), a célula com emissor e face posterior passivada (PERC – *passivated emitter and rear contacts*), entre outras. A célula com emissor passivado e região posterior totalmente difundida (PERT – *passivated emitter and rear totally diffused*) e a célula solar de silício com heterojunção (SHJ – *heterojunction silicon solar cell*) estão sendo fabricadas pela indústria (Colville, 2016), (Sanyo, 2016), (Wenham e Green, 1996).

Dispositivos fotovoltaicos bifaciais em substrato de silício estão sendo desenvolvidos por distintos grupos de pesquisas. A passivação das superfícies das células solares, realizada no emissor e no BSF, constitui-se em uma etapa importante na sua fabricação. Este passo permite que se obtenha uma alta eficiência em ambas as faces da célula solar, reduzindo significativamente o número de recombinações superficiais dos portadores de carga minoritários (Lemus *et al.*, 2016).

Loic Tous *et al.* (2017) desenvolveram células bifaciais PERT com eficiência de 22,8% quando iluminada na face com o emissor. A eficiência na face com BSF não foi apresentada no artigo. Estas foram processadas em lâminas de Si-Cz, tipo n (n-PERT) e a metalização foi implementada por deposição química (sem contatos) de níquel e prata. O emissor foi passivado com uma camada composta por $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ e por radiação laser foram abertas as regiões para formar as trilhas metálicas. O BSF localmente dopado foi produzido por radiação laser. Da mesma forma, Wei *et al.* (2017) obtiveram a eficiência na face com o emissor e com o BSF, respectivamente, de 20,41% e 18,32% para células solares n-PERT fabricadas em Si-Cz monocristalino com processo de co-difusão de B/P e metalização por serigrafia.

Com área de $238,95 \text{ cm}^2$, as células solares bifaciais processadas em Si-Cz tipo n apresentadas por Guilin e colaboradores (Guilin *et al.*, 2017) possuem eficiência no emissor e no BSF, na devida ordem, de 20,89% e 18,45%. As regiões do emissor foram formadas a partir de boro difundido pelo composto tribrometo de boro (BBr_3) e implantação de íons de fósforo para formar o BSF. A metalização para formar os contatos foi realizada por serigrafia. Stodolny *et al.* (2016), aplicando a técnica de deposição química em fase vapor em baixa pressão (LPCVD – *low pressure chemical vapor deposition*) para passivar os contatos posteriores com polisilício formando uma camada polisilício/ SiO_x , em lâminas de Si-Cz tipo n e metalização por meio de serigrafia, obteve a eficiência de 20,7% quando a célula de 239 cm^2 foi iluminada pelo emissor. A eficiência na face com o BSF não foi apresentada.

Fellmeth *et al.* (2017), com processo de co-difusão de boro e fósforo depositados com a técnica de deposição química em fase vapor a pressão atmosférica (APCVD – *atmospheric pressure chemical vapor deposition*) e passivação da parte posterior utilizando nitreto de silício, apresentou uma célula solar bifacial PERT base p com 20,5% e 13,5 % de eficiência quando iluminada na face com o emissor e BSF, respectivamente. Peng e colaboradores (Peng *et al.*, 2016), desenvolveram células solares bifaciais n-PERT com processo industrial em lâminas de Si-Cz de 156 mm de lado e alcançaram a eficiência de 20,83% no emissor e 10,95 % no BSF. Texturaram somente a superfície frontal, onde foi formado o emissor do dispositivo (dopado com boro) e o BSF posterior seletivo foi produzido com implantação iônica de átomos de fósforo. A passivação do emissor foi realizada com uma camada composta por $\text{AlO}_x/\text{SiN}_x$ e o BSF seletivo foi passivado com SiN_x .

Células solares bifaciais n-PERT com eficiência de 20,3% quando iluminadas na face com o BSF seletivo foram apresentadas por Chen-Hsun Du e Shih-Peng Hsu (Du e Hsu, 2017). Processadas em lâminas de Si-Cz de 125 mm x 125 mm de área, apresentaram os melhores resultados de eficiência com o recozimento em fornos de alta temperatura com atmosfera rica em oxigênio antes da deposição de uma camada de Al_2O_3 sobre a face posterior dopada com boro a partir de BBr_3 . A eficiência de conversão na face com o emissor não foi apresentada.

2.4. Passivação de Superfície

Uma vez que as células solares encontram-se sob irradiância solar, pares elétron-lacuna são fotogerados na estrutura do dispositivo. Como consequência, ocorre um aumento no número de portadores de carga minoritários, assim como o excesso de portadores majoritários. O excedente de portadores minoritários possui a tendência de diminuir, atingindo o equilíbrio na condição de escuro, por meio de recombinações que ocasionam a sua redução. Tais processos de recombinação podem ser radioativos, Auger e *Shockley-Read-Hall* (SRH) e podem ocorrer no volume do dispositivo ou na superfície (Green, 1992), (Markvart e Castañer, 2006).

A recombinação radioativa, que ocorre quando um elétron, ocupando um estado energético mais elevado do que aquele em que se encontrava originalmente na situação de equilíbrio térmico, realiza a transição para um estado vazio cuja energia é inferior à do estado excitado (Green, 1992), (Markvart e Castañer, 2006).

O processo de recombinação Auger envolve três cargas, duas negativas e uma positiva. Um elétron, em um estado energético elevado, recombina-se com a lacuna e sua energia é transmitida a outro elétron que se encontra na banda de condução. Este, ao retornar para a banda de valência, emite fônons na rede cristalina do material (Green, 1992), (Markvart e Castañer, 2006).

Impurezas presentes na estrutura do semiconductor, assim como defeitos, permitem a existência de estados de energia dentro da banda proibida. A recombinação que ocorrem neste caso, também denominada de recombinação *Shockley-Read-Hall* (SRH), ocorre em duas etapas. No primeiro passo, um elétron (ou lacuna) salta da banda de condução para o nível de energia existente na banda proibida e, em um segundo momento, o portador de carga decai para o estado de energia que esteja vazio na região da banda de valência (Green, 1992), (Markvart e Castañer, 2006).

As superfícies da lâmina de silício ocasionam uma interrupção abrupta na periodicidade da estrutura cristalina do semiconductor. Há descontinuidade na estrutura de bandas do material e ligações químicas incompletas existem, tornando-se um local com elevado número de recombinações dos portadores de carga minoritários, que afeta a eficiência das células solares. A velocidade de recombinação em superfície (V_R), dada pela Eq. 2.1, prejudica diretamente a corrente de saturação no escuro e a eficiência quântica dos dispositivos (Markvart e Castañer, 2006), (Bonilla *et al.*, 2017).

$$V_R = \frac{1}{\Delta n_d} \frac{n_s n_p - n_i^2}{\frac{n_s - n_p}{S_{p0}} + \frac{p_s - n_i}{S_{n0}}} \quad (2.1)$$

Na Eq. 2.1, n_s e p_s representam, respectivamente, a concentração de elétrons e lacunas no regime permanente na superfície; Δn_d indica o excesso de

concentração de portadores de carga minoritários na borda da região de carga espacial; n_i a concentração intrínseca de portadores de carga e S_{n0} e S_{p0} as velocidades de recombinação de elétrons e de lacunas em superfície, respectivamente.

Para a redução destas recombinações, dois caminhos distintos podem ser seguidos. Um é relativo à redução na taxa de recombinação dos portadores minoritários na interface. Isso é efetuado diminuindo o número de portadores de carga e a probabilidade de captura (parâmetros S_{n0} e S_{p0}) na interface, completando as ligações pendentes por meio de uma camada dielétrica ou solução química (componente químico da passivação). O objetivo é alcançado com um campo elétrico, formado por uma densidade de cargas elétricas fixas no filme dielétrico na interface com o semiconductor. Uma carga de sinal oposto àquela contida no filme é criada na superfície da lâmina de Si. Assim, para diminuir a taxa com que ocorre tal procedimento, o segundo caminho é reduzir a quantidade de portadores de carga (n_s ou p_s) na superfície. Para isso, realiza-se a difusão de dopante do mesmo tipo que a base em elevada concentração próximo a superfície (Bonilla *et al.*, 2017).

Outra forma de passivar a superfície, onde há uma determinada quantidade de ligações incompletas, é por hidrogenação reduzindo de forma significativa o número de ligações incompletas.

Distintos filmes são empregados para passivação tais como o dióxido de silício (SiO_2) crescido termicamente, o nitreto de silício, o dióxido de titânio, óxido de alumínio e óxidos condutores transparentes. Estes são os principais materiais estudados e utilizados na fabricação de células solares de silício. Além destes, o nitreto de silício amorfo hidrogenado ($\text{SiN}_x\text{:H}$), silício amorfo hidrogenado entre outros são estudados (Cuevas *et al.*, 2018), (Yadav *et al.*, 2018), (Zanescio^(a) *et al.*, 2018).

As técnicas mais empregadas para a formação de filmes finos de passivação na superfície das lâminas de silício são: crescimento de dióxido de silício em oxidação seca ou úmida, deposição química em fase vapor a pressão atmosférica, deposição química em fase vapor aprimorada por plasma (PECVD – *plasma*

enhanced chemical vapor deposition), deposição por camadas atômicas (ALD – *atomic layer deposition*), deposição física a vapor por feixe de elétrons (*e-beam – electron beam physical vapor deposition*) entre outras.

2.4.1. Dióxido de Silício

O silício na forma cristalina, com suas ligações tetravalentes, é altamente estável e apresenta alta compatibilidade com o oxigênio. A formação de óxidos, assim como silicatos, nas interfaces entre a superfície do semicondutor e o ar ocorre de forma natural. Em temperaturas inferiores à 100 °C, o silício oxida-se e esta camada de óxido serve de proteção ao material, protegendo-o contra nova oxidação. (Luque e Hegedus, 2003).

A formação de um filme dielétrico sobre a superfície das lâminas de silício ocorre com uma ligação química covalente entre os átomos superficiais do semicondutor e os elementos de passivação (Cuevas *et al.*, 2018). Há dois métodos distintos para a etapa de oxidação: a oxidação seca e a úmida. O procedimento a seco, tomado como padrão, ocorre como uma etapa térmica em forno de tubo de quartzo e em alta temperatura (800 °C – 1.200 °C). As lâminas de silício, durante um determinado período de tempo, são expostas à uma atmosfera rica em oxigênio de elevada pureza. A oxidação úmida utiliza vapor de água circulando por tubos de quartzo. O processo a seco ocorre conforme a Eq. 2.2, enquanto que as reações na oxidação úmida são descritas pela Eq. 2.3 (Aberle, 1999), (Aberle, 2000).



Uma vez crescida a camada de SiO₂, a interface existente entre esse revestimento e o silício fica caracterizada por quatro parâmetros distintos: a densidade de cargas fixas no óxido, que são cargas positivas localizadas na proximidade da interface Si-SiO₂; a densidade de cargas móveis no óxido, as quais podem ter sua origem devido à íons alcalinos que devem ser evitadas; a densidade de estados de interfaces dentro da banda proibida que causam perdas por

recombinação e a densidade de carga associada com os estados de interface dentro da banda proibida do Si (Aberle, 1999).

2.4.2. Dióxido de Titânio

O dióxido de titânio, como material dielétrico, apresenta algumas propriedades de significativa importância que o levam a possuir grande aplicabilidade em células solares. Transparência ao espectro da radiação solar, baixa absorção e elevado índice de refração são características que permitem seu uso como filme antirreflexo nas superfícies das lâminas de Si. Seu emprego, tanto como passivador quanto filme antirreflexo (AR), resulta na redução da refletância do espectro solar incidente resultando no aumento do desempenho dos dispositivos fotovoltaicos (Thomson e McIntosh, 2012). Filmes finos de TiO_2 apresentam elevada resistência elétrica, possuindo valor de resistividade na ordem de $10^{14} \Omega\text{m}$.

2.4.3. Nitreto de Silício

As propriedades elétricas, ópticas, mecânicas e químicas do nitreto de silício dependem do método como são depositados ou crescidos os filmes dielétricos deste material sobre a superfície do silício cristalino. A técnica de deposição química em fase vapor aprimorada por plasma (PECVD), com temperaturas inferiores à $450 \text{ }^\circ\text{C}$ é a que possui o maior emprego na indústria fotovoltaica atualmente (Rahman e Khan, 2012), (Wan *et al.*, 2013)

Filmes finos dielétricos de SiN_x crescidos sobre uma face de lâminas de Si, aplicados para passivação desta, criam uma densidade de carga elétrica positiva fixa na camada dielétrica na interface entre o filme e a superfície da lâmina de silício. É um fator primordial nas propriedades de passivação superficial. A densidade de cargas elétricas cria um campo elétrico no sentido do filme para o interior da lâmina. Em substratos tipo n, este campo tem a finalidade de repelir as lacunas presentes na superfície do material semiconductor, aumentando o tempo de vida dos portadores de carga. Por esta razão, o SiN_x é ideal para passivação de superfícies de regiões altamente dopadas n^+ (Aberle, 2001).

2.4.4. Óxido de Alumínio

O óxido de alumínio, ao ser empregado na passivação de lâminas de silício, formando um filme fino sobre sua superfície, estabelece uma alta densidade de cargas elétricas negativas fixas na interface com o substrato. Esta alta densidade de cargas estabelece um campo elétrico com sentido do semicondutor para a camada passivadora. Caracteriza-se por apresentar melhores resultados ao ser aplicado na passivação de regiões altamente dopada p^+ . Em decorrência disto, ocorre uma diminuição na quantidade de portadores minoritários (elétrons) superficiais de tais regiões (Schmidt *et al.*, 2012), (Guilin *et al.*, 2017), (Sayonava *et al.*, 2013).

2.4.5. Óxidos Condutores Transparentes

Óxidos condutores transparentes (TCO – *transparent conductive oxides*) apresentam como características marcantes a alta transmitância e a baixa resistência elétrica na faixa do visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético. São semicondutores, na maioria tipo n, com elevada concentração de elétrons como portadores de carga. Isto ocorre devido a presença de oxigênio na estrutura do filme fino. Devido a composição química, possuem valores de banda proibida elevados. O óxido de zinco, por exemplo, em temperatura ambiente possui uma banda proibida igual a 3,37 eV. Os TCOs apresentam diversas aplicações como em sensores de gás, transdutores piezoelétricos e células solares. Em células solares com heterojunção geralmente são usados para formar o contato frontal altamente transparente e eficiente (Clatot *et al.*, 2011), (Cruz *et al.*, 2017). Porém, recentemente os TCOs estão sendo estudados como materiais para passivação da superfície de células solares de silício cristalino com homojunção (Zanescio *et al.*, 2018).

3. METODOLOGIA

Foram desenvolvidas células solares bifaciais, com estrutura p^+nn^+ , em lâminas de Si-Cz, tipo n. As regiões altamente dopadas p^+ e n^+ , foram implementadas com a difusão de boro e fósforo, respectivamente, originando o emissor e o BSF. Para formação das malhas metálicas utilizou-se a técnica de serigrafia e queima em forno de esteira.

3.1. Processo de Fabricação

O processo de fabricação das células solares bifaciais em lâminas de Si tipo n foi desenvolvido com base em trabalhos anteriores focados em células solares monofaciais com campo retrodifusor seletivo de boro e alumínio (base p) (Zanescio e Moehlecke, 2016), que resultou na célula solar com maior eficiência produzida no Brasil (Zanescio^(b) *et al.*, 2018). Constituiu-se basicamente na texturação superficial das lâminas de silício, deposição do líquido com boro por *spin-on*, passos térmicos para difusão dos dopantes e formação das regiões altamente dopadas p^+ e n^+ , passivação das superfícies com dióxido de silício crescido termicamente, limpezas químicas RCA e ataque em ácido fluorídrico, deposição de filme antirreflexo, deposição da malha metálica por serigrafia e queima das pastas metálicas e isolamento de bordas por meio do corte a *laser*. A Figura 3.1 apresenta um diagrama do processo desenvolvido, onde destacam-se as etapas do processo associadas à patente BR 10 2012 030 606 9 (Zanescio e Moehlecke, 2012) e de caracterização. Também se apresenta o intervalo de temperatura utilizado para a otimização experimental do emissor e do campo retrodifusor. Foram utilizadas lâminas de Si-Cz, tipo n, grau solar, com 100 mm de diâmetro, espessura da ordem de 200 μm , orientação dos planos cristalinos {100} e resistividade de base entre 1 $\Omega\cdot\text{cm}$ e 20 $\Omega\cdot\text{cm}$. Após o corte ou marcação com radiação laser, produziram-se células solares bifaciais de 61,58 cm^2 .

1	Lâmina tipo n Si-Cz monocristalino $\varnothing = 100 \text{ mm}$, $x = 200 \mu\text{m}$	6	Ataque em HF e limpeza química RCA	11	Deposição de filme AR de TiO_2 por <i>e-beam</i>
2	Texturação	7	Ataque em HF e limpeza química RCA	12	Metalização por serigrafia
3	Limpeza química RCA	8	Ataque em HF e limpeza química RCA	13	Queima das pastas metálicas em forno de esteira
4	Deposição de líquido com boro por <i>spin-on</i>	9	Medição da resistência de folha	14	Isolamento das bordas <i>Laser</i>
5	Difusão de boro e oxidação TDIF = $960 \text{ }^\circ\text{C}$ até $1.000 \text{ }^\circ\text{C}$ $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$	10	Oxidação para passivação	15	Medição da Curva I-V, resposta espectral e refletância

Figura 3.1. Diagrama indicando as etapas de fabricação e caracterização das células solares bifaciais.

Para o desenvolvimento das células solares bifaciais com estrutura p^+nn^+ , representada na Figura 3.2, primeiramente as lâminas de Si foram submetidas ao processo de texturação. Em seguida, uma limpeza RCA foi implementada para prepará-las para a difusão do dopante que forma o emissor, região p^+ , com boro como agente dopante. Da mesma forma, a região n^+ foi realizada com dopagem de fósforo, no próximo passo térmico. A técnica de *spin-on* foi utilizada para difundir o primeiro elemento. Esta consiste na deposição de um líquido contendo boro na superfície da lâmina de silício cristalino, resultando em uma camada rica do elemento. Foi depositado por *spin-on* o líquido contendo boro PBF20, da Filmtronics. Após a secagem, as lâminas de Si foram inseridas no forno de quartzo convencional para a difusão de boro e oxidação para proteger a face dopada com boro da difusão de fósforo. Na face oposta, o fósforo foi difundido nas lâminas de silício ao ser criada uma atmosfera rica em oxiclreto de fósforo (POCl_3) em elevada temperatura em um forno de quartzo (Rothhardt *et al.*, 2014), (Singha e Solanki, 2017). O processo de difusão dos dopantes em ambas as faces com redução de etapas térmicas e limpezas químicas está sendo patenteado (Zanesco e Moehlecke, 2012).

Uma nova limpeza química RCA foi realizada para preparar as lâminas de silício para a oxidação seca para passivação das duas superfícies. Após esta etapa, foi depositado o filme antirreflexo (AR) de TiO_2 no emissor e no campo retrodifusor

por evaporação com feixe de elétrons. O filme AR foi ajustado conforme a espessura da camada de dióxido de silício em cada face.

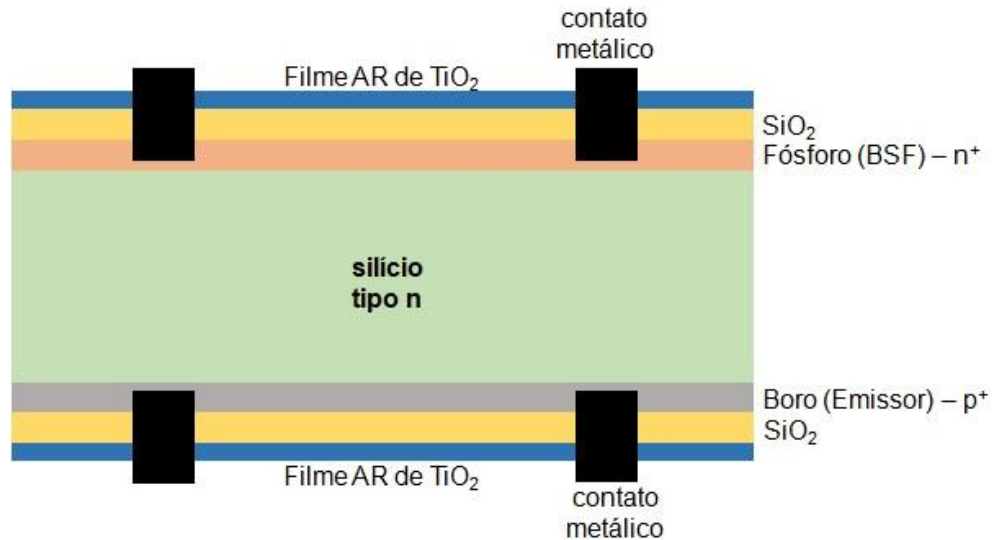


Figura 3.2. Estrutura p^+nn^+ das células solares bifaciais de silício: base de silício tipo n, regiões altamente dopadas p^+ (emissor) e n^+ (BSF), passivação com SiO_2 , filme AR e contatos metálicos.

Foi formada a malha metálica em ambas as faces por serigrafia. Para formar a malha metálica na face frontal, utilizou-se a pasta de prata PV17A, da Dupont. Na face posterior, a malha metálica foi formada com a pasta de prata e alumínio, PV3N1, também da Dupont. Após a secagem das pastas metálicas, no forno de esteira, foi implementado o processo de queima das mesmas.

No desenvolvimento deste trabalho, produziram-se 68 células solares bifaciais. E, para tanto, as lâminas de silício cristalino foram divididas em grupos e submetidas à diferentes temperaturas de difusão de boro e fósforo, conforme resume a Tabela 3.1, que apresenta também a quantidade de lâminas de silício cristalino em cada processo.

As temperaturas empregadas para difusão de boro (T_B), com aumento de 10 °C em 10 °C, situaram-se no intervalo de 960 °C a 1.000 °C (Crestani *et al.*, 2018) e, para a difusão de fósforo (T_P), foram aplicadas quatro temperaturas distintas no intervalo de 835 °C a 855 °C, exceto para a temperatura de difusão de boro de 990 °C. Essas temperaturas foram estabelecidas com base em trabalhos anteriores desenvolvidos para o processamento de células solares monofaciais de silício tipo p.

Tais etapas serão discutidas com mais detalhes nas seções 3.2.3 e 3.2.5, respectivamente. Para caracterizar as regiões altamente dopadas, mediu-se a resistência de folha do emissor de boro e do campo retrodifusor de fósforo, em 13 regiões da lâmina de silício.

Todas as células solares fabricadas foram caracterizadas por meio da medição da corrente elétrica em função da tensão aplicada (curva I-V) com auxílio de um simulador solar, sob condições padrão de medição: temperatura da célula solar de 25 °C, irradiância de 1.000 W/m² e espectro AM1,5G. Utilizou-se, como padrão, uma célula solar calibrada no CalLab – FhG-ISE (*Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme*), Alemanha. Para comparar a eficiência das células solares bifaciais determinou-se a eficiência média ponderada, na qual se considera que a incidência de irradiância solar na face posterior é 20 % do valor que chega na face frontal (Yusufoglu, 2015), (Grafulha, 2016). Considerou-se como face frontal, o lado da célula solar com maior eficiência, que neste caso foi a região com o campo retrodifusor de fósforo nn⁺. Portanto, a eficiência média ponderada (η_w) foi determinada da seguinte forma:

$$\eta_w = \frac{\eta_{BSF} * 1 + \eta_{EMISSOR} * 0,2}{1 + 0,2} \quad (3.1)$$

Tabela 3.1. Quantidade de células solares bifaciais e temperatura de difusão de boro (T_B) e de fósforo (T_P) em cada processo.

T _B (°C)	T _P (°C)	Quantidade de Células
960	835	4
	845	3
	855	3
970	835	4
	845	3
	855	3
980	835	4
	845	16
	855	2
990	825	6
	835	4
	845	6
	855	2
1.000	835	4
	845	4
Total		68

Para avaliar a passivação das superfícies foram produzidas células solares com oxidação a 800 °C durante 45 minutos e 7 minutos e 860 °C durante 30 minutos (Razera *et al.*, 2017), (ZanESCO *et al.*, 2018), (ZanESCO e Moehlecke, 2015) e sem oxidação para verificar o efeito do filme de dióxido de titânio. Neste caso, o filme AR de TiO₂ foi ajustado para cada espessura de dióxido de silício. Para comparar a passivação na superfície mediu-se a resposta espectral e a refletância para obter a eficiência quântica interna (EQI) das células solares com maior eficiência.

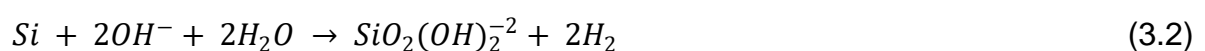
3.2. Etapas do Processo de Fabricação

3.2.1. Texturação

O silício cristalino apresenta uma alta refletância em sua superfície, com cerca de 33 % da radiação solar incidente na interface meio-semicondutor sendo refletida para o meio. A refletância influenciará, de forma direta, no desempenho das células solares. Com o processo de texturação, a refletância pode ser reduzida até aproximadamente 11 % (Green, 1992).

A texturação foi executada por meio de ataque químico em solução alcalina em ambas as faces da lâmina de Si. A ação é anisotrópica, ocorrendo de maneira mais rápida em uma direção específica da estrutura cristalina do semicondutor, isto é, na direção dos planos {100}. Os planos (111) ficam expostos e resultam em micropirâmides de base quadrada, que permitem aumentar o aprisionamento da radiação solar e, conseqüentemente, a eficiência da célula solar (Green, 1992), (Lemus *et al.*, 2016).

A texturação da superfície da lâmina de Si, além de diminuir a refletância, visa também remover danos (microfissuras) ocasionados no processo de corte do lingote para formar a lâmina. A solução química alcalina empregada é composta de hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH), álcool isopropílico e água deionizada (H₂O_{DI}). O processo de ataque ocorre, conforme descrito pela Eq. 3.2, em uma faixa de temperatura entre 80 °C e 90 °C (Neuhaus e Münzer, 2007).



O processo representado na Eq. 3.2 ocorre em três etapas. Inicia com a oxidação do silício, seguida da formação de um sal solúvel e, finaliza, com a decomposição deste último em água (Neuhaus e Münzer, 2007).

3.2.2. Limpeza Química

A presença de impurezas, excetuando-se os dopantes, são indesejadas junto às superfícies das lâminas de silício, visto que podem ser introduzidas na rede cristalina do semicondutor, durante etapas de difusão, e contaminar os dispositivos processados. Estas impurezas têm sua origem tanto no processo de corte das lâminas a partir do lingote de Si, como em cada etapa do processo de fabricação da célula solar. A remoção destes elementos e resíduos ocorre por intermédio de diferentes limpezas, entre as quais a limpeza química recebe destaque por extrair as impurezas na superfície sem que ocorram danos a superfície do substrato (Kern, 1993).

A limpeza química RCA foi a utilizada durante as etapas deste trabalho. Desenvolvida pela empresa *Radio Corporation of America*, EUA, durante a década de 1970, sua formulação oxida a superfície do silício por intermédio de um agente oxidante. Impurezas são capturadas nos óxidos, assim como íons metálicos reativos. Como agente oxidante, foi empregado peróxido de hidrogênio (H_2O_2). A limpeza RCA completa ocorre em duas partes: RCA1 e RCA2. A primeira visa a remoção de material orgânico, assim como alguns metais, enquanto que a segunda se destina somente a retirada de metais (Kern, 1993).

3.2.3. Difusão de Boro e Oxidação na Mesma Etapa Térmica

A difusão é um fenômeno físico que, realizado em processos térmicos de alta temperatura, ocorre a transferência de matéria para o interior do sólido. De um ponto de vista atômico, ocorre a translação de átomos no sentido da fonte (líquida, gasosa ou sólida) para a rede cristalina do material semicondutor (Callister, 2002).

Neste trabalho foi utilizado o boro como o elemento para formação do emissor (região p^+) nas células solares de silício. A técnica de deposição do dopante adotada foi o *spin-on*. O procedimento resume-se na deposição do líquido com o dopante PBF-20, da Filmtronics, solução líquida contendo boro e solventes, sobre uma das superfícies da lâmina do semiconductor. Objetivando distribuir uniformemente o dopante sobre a face, o substrato foi colocado sobre a plataforma do equipamento *spinner*, ilustrado pela Figura 3.3, e foi posto a girar durante 30 segundos, o que resultou em uma película fina sobre a superfície. Após, a evaporação dos solventes ocorreu em estufa térmica, no período de 20 minutos, a uma temperatura de 200 °C.

A difusão de boro ocorreu posteriormente à secagem dos solventes, seguida de uma etapa de oxidação. A difusão de boro e oxidação foram realizadas em forno convencional com tubo de quartzo, na mesma etapa térmica (Zanesco e Moehlecke, 2012). Foram utilizadas diferentes temperaturas de difusão de boro, sendo elas: 960 °C, 970 °C, 980 °C, 990 °C e 1.000 °C.

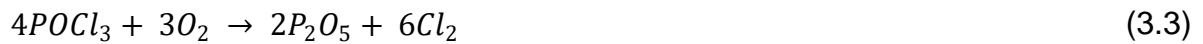


Figura 3.3. Equipamento *spinner* utilizado na técnica de *spin-on* para deposição do líquido com boro PBF20 sobre as lâminas de silício.

O processo de difusão de boro e oxidação na mesma etapa térmica foi realizado com base na solicitação de patente BR 10 2012 030 606 9 (Zanesco e Moehlecke, 2012), e visa a redução de etapas térmicas e de limpezas químicas. Desta forma, além de reduzir o tempo de processamento e o custo, evitam-se dois passos térmicos a alta temperatura que degradam o substrato de Si grau solar.

3.2.4. Difusão de Fósforo

A região altamente dopada n^+ nas células solares foi formada a partir da difusão de fósforo nas lâminas de silício. As moléculas de oxiclreto de fósforo (POCl_3) foram transportadas do recipiente que o contém para o tubo de quartzo por meio de arraste utilizando nitrogênio (N_2), um gás classificado como portador. Com a inserção de nitrogênio e oxigênio no ambiente há a constituição do composto pentóxido de fósforo (P_2O_5). Uma vez em contato com a superfície exposta do semiconductor, ocorre a difusão de fósforo no silício. As reações químicas descritas são apresentadas abaixo na Eq. 3.3 e 3.4 (Bentzen, 2006):



A Figura 3.4 esquematiza a câmara de processamento das reações químicas e difusão de fósforo nas lâminas de silício, assim como elementos pertencentes ao forno.

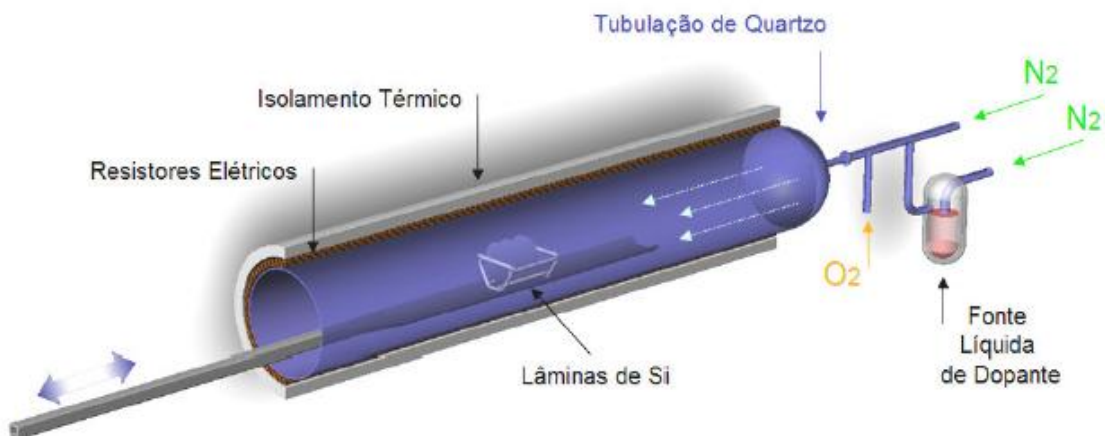


Figura 3.4. Diagrama de forno convencional para difusão de fósforo, a partir de POCl_3 , em substrato de silício. Fonte: Garcia (2009).

3.2.5. Oxidação para Passivação

Após a difusão de boro e de fósforo, as lâminas de silício foram expostas à uma atmosfera rica em oxigênio para o crescimento de óxido de silício em ambas as faces, visando a passivação destas superfícies. A oxidação ocorreu por meio de

oxidação seca em forno convencional de difusão com tubo de quartzo, com temperaturas de 800 °C e tempo de 7 e 45 minutos e 860 °C e tempo de 30 minutos. Para a oxidação a 800 °C durante 45 minutos e 860 °C durante 30 minutos, na face do emissor de boro, a espessura da camada de dióxido de silício foi de 10 nm e na face dopada com fósforo a camada de óxido foi de aproximadamente 50 nm (Zanesco *et al.*, 2018). Quando a oxidação foi realizada na temperatura de 800 °C durante 7 minutos, a camada de SiO₂ na face dopada com fósforo foi de 7 a 10 nm, medida com um elipsômetro (Zanesco e Moehlecke, 2015). Também foram produzidos dispositivos sem oxidação para passivação para avaliar a passivação com dióxido de titânio.

3.2.6. Deposição de Filme Antirreflexo

O emprego de filme antirreflexo visa aumentar a eficiência de conversão das células solares, reduzindo mais a refletância da superfície do silício após a texturação e, conseqüentemente aumentando a eficiência. O material utilizado foi o dióxido de titânio. Esse foi depositado em ambas as faces das lâminas do semicondutor, com diferentes espessuras.

A técnica empregada para a deposição do filme AR foi a evaporação do TiO₂ em alto vácuo, por meio de feixes de elétrons, utilizando o equipamento da empresa Temescal, modelo FC-2000. A Figura 3.5 mostra as lâminas sendo colocadas no sistema planetário do equipamento para deposição do filme AR.

O filme AR foi ajustado conforme a espessura da camada de dióxido de silício em cada face. Foi depositado o filme antirreflexo de TiO₂ no emissor e no campo retrodifusor por evaporação com feixe de elétrons, com espessura de 55 nm e 25 nm, respectivamente, nos dispositivos com passivação para oxidação realizada na temperatura e tempo de 800 °C – 45 min e 860 °C – 30 min (Zanesco e Moehlecke, 2016). Para a oxidação realizada na temperatura de 800 °C durante 7 minutos a espessura do filme AR foi de 60 nm na face dopada com fósforo. Nas células solares sem filme de passivação foi depositada o filme AR de 70 nm em ambas as faces.

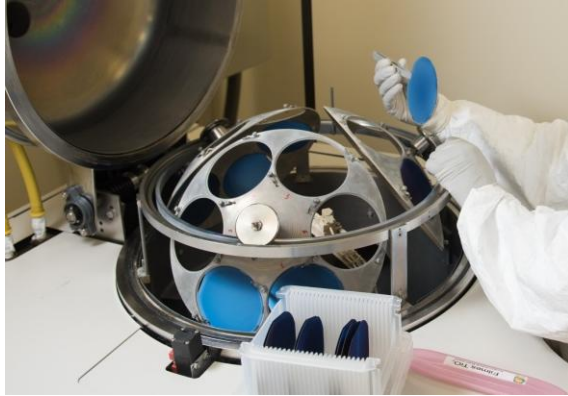


Figura 3.5. Sistema planetário do equipamento para deposição de filme AR de TiO_2 nas faces das célula solares.

3.2.7. Processo de Metalização por Serigrafia

A metalização das células solares foi implementada com a técnica de serigrafia. O processo consiste em posicionar uma lâmina na parte superior de uma plataforma com sistema de vácuo, seguida da deposição de uma pasta metálica sobre uma tela perfurada com o desenho da malha metálica.

Uma vez o conjunto plataforma-lâmina-máscara estando posicionado, um rodo desloca-se horizontalmente no sentido da direita para a esquerda exercendo uma pressão sobre a máscara. Esse movimento distribui uniformemente a pasta metálica, fazendo com que esta atravesse a região porosa da máscara serigráfica e depositando-a sobre a lâmina. Esse processo está ilustrado na Figura 3.6.

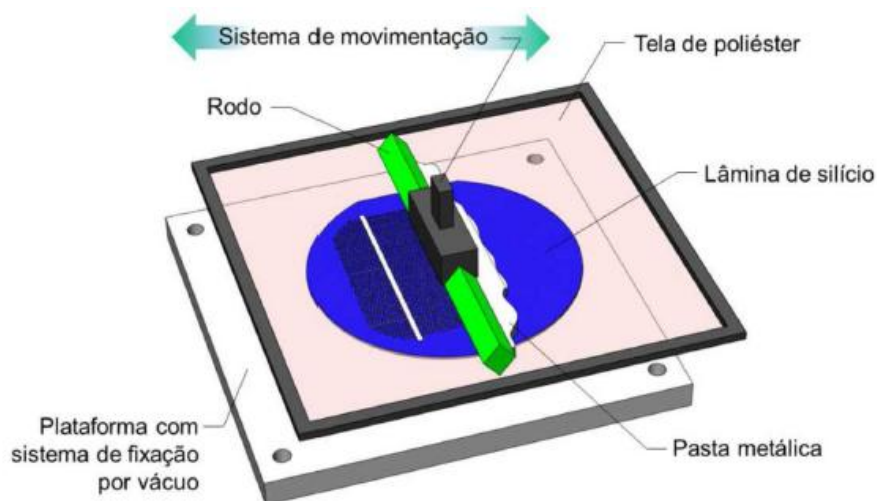


Figura 3.6. Ilustração do conjunto plataforma-lâmina-tela e rodo distribuindo pasta metálica sobre a máscara. Fonte Garcia (2016).

Após a etapa de metalização, as lâminas seguiram para o forno de esteira, mostrado na Figura 3.7, para secagem das pastas e evaporação dos solventes contidos nessa, assim como para a formação de contato com o semicondutor.

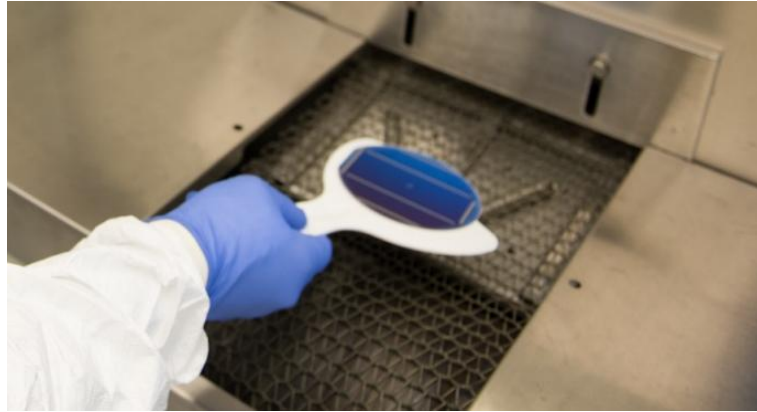


Figura 3.7. Secagem e queima das pastas de metalização em forno de esteira.

Durante a passagem das lâminas pelo forno, estas passam por três zonas distintas de temperatura, onde lâmpadas de alta potência são responsáveis pela emissão de radiação eletromagnética nas faixas do visível e infravermelho.

Em um último estágio de fabricação, antes de sua caracterização, as células solares passam pela etapa de isolamento das bordas. Este processo consiste na utilização de radiação *laser* para o corte de seu contorno, de modo que ficam com a forma pseudo-quadrada e área de $61,58 \text{ cm}^2$.

3.3. Técnicas de Caracterização de Células Solares

3.3.1. Resistência de Folha

A medida da resistência de folha (R_{\square}) permite realizar uma avaliação quanto à difusão do dopante no semicondutor e a sua unidade é expressa como ohm por quadrado (Ω/\square). Pontos medidos que apresentam valores elevados evidenciam uma baixa dopagem naquela região, assim como valores baixos estão relacionados com uma alta concentração da impureza naquela posição.

Os valores das medidas são obtidos com a técnica de quatro pontas. A técnica está baseada em instrumentos que utilizam ponteiras, ou seja, quatro eletrodos, igualmente espaçados e com uma disposição linear. Uma corrente elétrica é aplicada entre os eletrodos das extremidades e as duas ponteiras centrais medem uma tensão elétrica. A Figura 3.8 mostra um diagrama do sistema de medição denominado de quatro pontas (Sze e Ng, 2007).

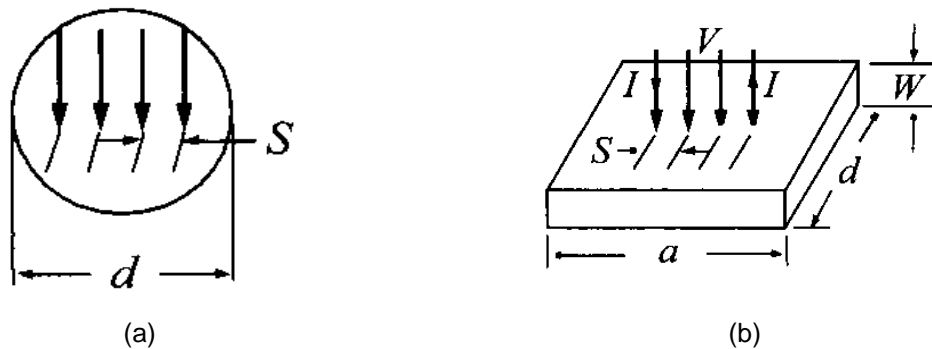


Figura 3.8. Diagrama representativo da sonda de quatro pontas: (a) destaque para d indicando sua dimensão e S o espaçamento entre os eletrodos; (b) I e V , respectivamente, indicam a corrente e tensão elétrica, a , b e W , representando largura, comprimento e espessura de uma lâmina fina, S , espaçamento das ponteiras. Fonte: Sze (2007).

Para uma lâmina fina, com dimensões muito inferiores as dimensões dadas por a ou d , a resistência de folha é fornecida pela Eq. 3.5 (adaptada de Sze, 2007):

$$R_{\square} = FC \cdot \frac{V}{I} \quad (3.5)$$

Os termos na equação acima são, na ordem que aparecem, a resistência de folha (R_{\square}), o fator de correção (FC), a corrente elétrica aplicada (I) e a tensão elétrica medida (V).

Para cada temperatura de difusão, previamente foram selecionadas lâminas com o objetivo de medir as resistências de folha. Após a conclusão das etapas térmicas, as lâminas foram limpas, separadas e medidas em cada face. A Figura 3.9 apresenta a localização de cada ponto onde foram realizadas as 13 medidas.

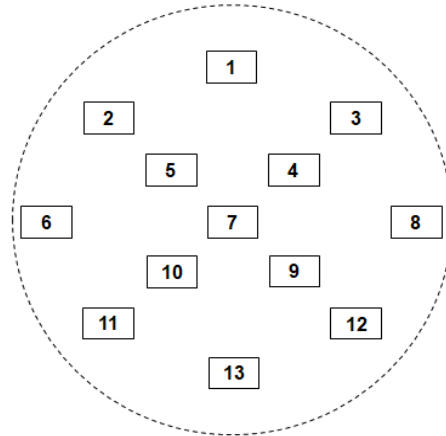


Figura 3.9. Localização das regiões sobre a superfície da lâmina onde foram medidos os valores de resistência de folha.

3.3.2. Eficiência Quântica Interna

Em condições de irradiação, uma fração da radiação solar que incide sobre o dispositivo é refletida de volta para o meio e, a maior parte, transmitida para o semicondutor. A corrente elétrica gerada, em condições de curto-circuito, por unidade de potência da radiação solar incidente é uma função do comprimento de onda (λ) da radiação. Este parâmetro é denominado de resposta espectral.

Os pares elétrons-lacunas fotogerados pela radiação solar monocromática possuem uma distribuição espacial no semicondutor dada pela Eq. 3.6 (Green, 1992):

$$G = (1 - R)\alpha N e^{-\alpha x} \quad (3.6)$$

Nesta equação, a fração refletida da radiação (refletância) está representada por R, enquanto N indica o fluxo de fótons que atinge o dispositivo e α o coeficiente de absorção (Green, 1992), (Yang *et al.*, 2008), (Honsberg).

A eficiência quântica externa (EQE) das células solares é uma razão entre o número de portadores de carga que o dispositivo coleta e a quantidade de fótons associados à radiação solar monocromática incidente, isto é, a quantidade de pares elétron-lacuna gerados e coletados em relação a incidência de fótons sobre o dispositivo. A eficiência quântica interna (EQI) é definida como sendo a razão entre o número de portadores de carga minoritários que realmente participam na corrente de

curto-circuito (I_{sc}) e a quantidade de fótons que são transmitidos para o semicondutor (Yang *et al.*, 2008), (Honsberg).

A resposta espectral tem seu cálculo dado pela Equação 3.7, com q representando a carga do elétron, h a constante de Planck e c a velocidade da luz no vácuo (Yang *et al.*, 2008), (Honsberg), como segue:

$$RE(\lambda) = \frac{q\lambda}{hc} \cdot EQE \quad (3.7)$$

O valor da EQI é dado pela Eq. 3.8, onde $R(\lambda)$ representa refletância na superfície da célula em função do comprimento de onda:

$$EQI(\lambda) = \frac{1}{1 - R(\lambda)} \cdot \frac{hc}{q\lambda} \cdot RE \quad (3.8)$$

3.3.3. Parâmetros Elétricos

A radiação solar que chega à superfície da Terra é fortemente atenuada pela atmosfera do planeta. Possui graus distintos de atenuação conforme o ângulo com que penetra na atmosfera terrestre, percorrendo um maior ou menor caminho óptico até chegar ao solo. O caminho óptico dos raios solares é um dos parâmetros para a determinação da irradiância solar que incide sobre o dispositivo fotovoltaico. Quando o Sol encontra-se no zênite, com os raios solares incidindo à 90° sobre a superfície terrestre, tem-se o menor caminho óptico percorrido através da atmosfera (Green, 1992).

A radiação solar na superfície terrestre varia em intensidade de região para região no planeta, assim como a composição de seu espectro. O padrão adotado para medir a eficiência de células solares, independentemente da localidade, é o espectro solar AM1,5G com irradiância de 1.000 watts por metro quadrado (1 kW/m^2) (Green, 1992).

A medição da curva da corrente elétrica gerada em função da tensão aplicada (curva I-V) das células solares visa obter aos parâmetros elétricos do dispositivo e é

mostrada na Figura 3.10. Tais medidas são a tensão de circuito aberto (V_{OC}), corrente de curto-circuito (I_{SC}), fator de forma (FF), tensão no ponto de máxima potência (V_{MP}), corrente no ponto de máxima potência (I_{MP}), potência máxima (P_{MP}) e a eficiência (η).

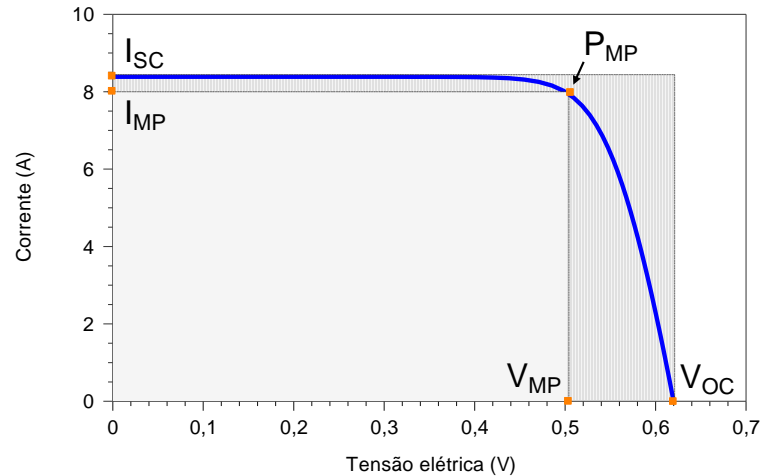


Figura 3.10. Corrente elétrica gerada em função da tensão aplicada, obtida em condições padrão de medição. Fonte: ZanESCO e Moehlecke (2003).

A eficiência de conversão da célula solar (η), calculada pela Eq. 3.9, é dependente de três parâmetros fundamentais que caracterizam o dispositivo, assim como da potência da radiação solar incidente (P_{IN}), ou seja, a irradiância solar multiplicada pela área da célula solar. Estes parâmetros são a tensão de circuito aberto, a corrente de curto-circuito e o fator de forma (Green, 1992).

$$\eta = \frac{V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF}{P_{IN}} \quad (3.9)$$

A curva da densidade de corrente elétrica gerada em função da tensão aplicada (curva J-V) das células solares foi medida com auxílio do simulador solar representado na Figura 3.11, equipamento fabricado pela empresa *PET – Photo Emission Tech., Inc.*, modelo CT150AAA. A densidade de corrente elétrica é a corrente elétrica dividida pela área da célula solar. A medição obedeceu as condições internacionais padronizadas, sendo estas: irradiância incidente de 1.000 W/m^2 , temperatura da célula solar mantida em $25 \text{ }^\circ\text{C}$ sobre a base de apoio e contato e espectro solar de AM1,5G (Green, 1992).

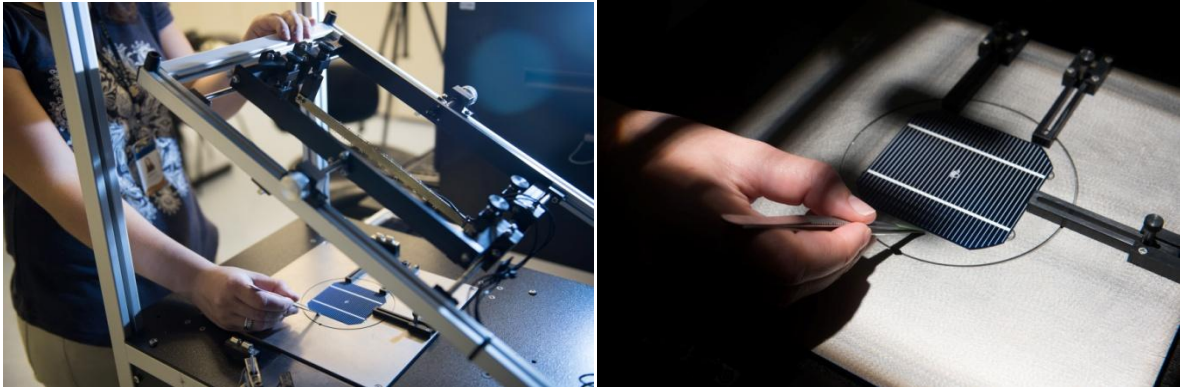


Figura 3.11. Simulador solar para caracterização das células solares para obtenção de parâmetros elétricos: base para apoio e contato elétricos da célula solar.

As células solares foram posicionadas sobre a base do equipamento, estabelecendo o contato elétrico entre ela e o sistema de medição. Simulando a radiação solar, uma lâmpada foi acionada de modo a iluminar o dispositivo fotovoltaico, originando uma corrente elétrica na mesma para diferentes valores da diferença de potencial elétrico aplicado e, com isto, obtiveram-se os dados necessários para caracterizá-la. Neste processo, primeiramente a face do BSF foi colocada em contato com a base, enquanto que a superfície do emissor, direcionada para cima, foi submetida a condições de iluminação. Em um segundo momento, a célula solar foi reposicionada, isto é, o emissor foi colocado em contato com a base e o BSF orientado para cima de modo a ser iluminado.

Uma célula fotovoltaica, não possuindo conexão com outros dispositivos, constituiu-se como um circuito elétrico aberto. A tensão de circuito aberto diz respeito a tensão elétrica quando não há corrente no dispositivo. Sua forma de cálculo é fornecida pela Eq. 3.10, onde I_L e I_0 são, respectivamente, a corrente gerada pela radiação solar e a corrente de saturação do diodo no escuro; k , T e q representam, nesta ordem, a constante de Boltzmann, a temperatura e a carga do elétron (Green, 1992).

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (3.10)$$

A corrente elétrica será proporcional ao fluxo de fótons contidos na radiação solar incidente, isto é, quanto mais intensa a radiação, maior o fluxo de fótons e maior a corrente, e vice-versa. A corrente de curto-circuito é a corrente elétrica que

passa pela célula quando esta encontra-se em uma tensão elétrica cujo valor é nulo. Para uma célula solar ideal, a grandeza I_{SC} é calculada pela Eq. 3.11, com q representando a carga elementar do elétron e G a taxa de geração de pares elétron-lacuna. Os comprimentos de difusão de elétrons e lacunas estão representados por L_N e L_P (Green, 1992), (Honsberg).

$$I_{SC} = q \cdot G \cdot (L_N + L_P) \quad (3.11)$$

A corrente elétrica de células solares possui relação com a área de sua superfície. Com isto, faz sentido mencionar a densidade de corrente (J_{SC}). Esta grandeza é calculada pela razão entre a corrente elétrica gerada no dispositivo pela sua área, conforme a Eq. 3.12.

$$J_{SC} = \frac{I_{SC}}{A} \quad (3.12)$$

O fator de forma, outro parâmetro importante na caracterização da célula, refere-se as características de saída do dispositivo. É uma medida da curva I-V e determinado pela Eq. 3.13 (Luque e Hegedus, 2003):

$$FF = \frac{V_{MP} \cdot I_{MP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \quad (3.13)$$

Onde V_{MP} e I_{MP} são a tensão elétrica e corrente elétrica no ponto de máxima potência.

4. DESENVOLVIMENTO DE CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS BASE N

4.1. Análise da Resistência de Folha

A resistência de folha é um parâmetro que serve para avaliar a difusão dos dopantes na lâmina de silício realizado para formar as regiões altamente dopadas p^+ e n^+ . A concentração superficial e a profundidade de difusão possuem relação com a temperatura e tempo de difusão.

No processamento das células solares, foram selecionadas lâminas em cada uma das diferentes temperaturas de difusão e, após a etapa térmica, mediu-se a resistência de folha. Na difusão dos dopantes na rede cristalina do silício, os átomos de boro e fósforo se difundem de modo substitucional, isto é, substituem átomos da rede cristalina e assumem sua posição. Calculou-se o valor médio e o desvio padrão. Nos tópicos abaixo, realiza-se uma análise da influência da temperatura de difusão do dopante na resistência de folha.

4.1.1. Difusão de Boro

Na Tabela 4.1 e na Figura 4.1 mostram-se os valores da resistência de folha medida em uma lâmina de Si para as diferentes temperaturas de difusão de boro (T_B). Como a difusão de boro é realizada antes da de fósforo, para avaliar se ocorre influência da temperatura de difusão de fósforo (T_P), mostram-se também os valores da temperatura de difusão de fósforo.

Nas temperaturas de difusão para o boro de 960 °C à 1.000 °C, os valores da resistência de folha obtidos variam de $(66 \pm 5) \Omega/\square$ para a temperatura mais baixa (960 °C) até $(33 \pm 1) \Omega/\square$ na mais elevada (1.000 °C). Na Tabela 4.1, as temperaturas de difusão de fósforo estão destacadas com cores para uma melhor

associação com a temperatura de difusão de boro, visto que, para cada grupo de lâminas na mesma T_B , estas foram divididas em subgrupos para difusão de fósforo.

Tabela 4.1. Valores médios da resistência de folha das células solares bifaciais desenvolvidas em Si-Cz tipo n, com oxidação e difusão de boro no mesmo processo térmico, em função da temperatura de difusão de boro e da temperatura de difusão de fósforo. Medidas realizadas após a difusão dos dois dopantes e antes da oxidação para passivação.

Processo	T_B (°C)	T_P (°C)	$R_{\square B}$ (Ω/\square)
B	960	835	66 ± 5
A		855	63 ± 3
B	970	835	56 ± 4
A1		845	57 ± 3
A2		855	52 ± 3
B	980	835	48 ± 3
A1		845	48 ± 3
D		845	48 ± 3
C		845	47 ± 4
A2		855	43 ± 2
D		825	40 ± 2
C1	990	835	40 ± 3
B1		845	42 ± 3
C2		845	37 ± 2
B2		855	39 ± 3
D1		1.000	835
D2	845		33 ± 1

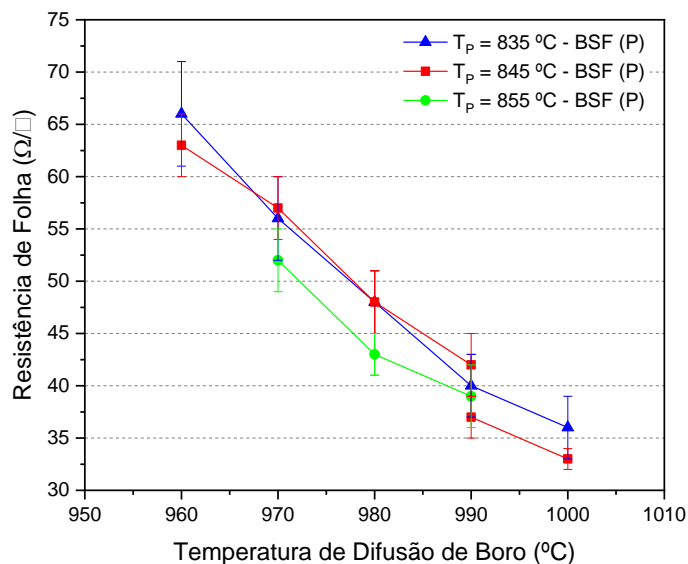


Figura 4.1. Resistência de folha da face dopada com boro em função da temperatura de difusão.

A difusão é um tratamento térmico que, através do qual, se introduz átomos de elementos químicos específicos na rede cristalina na qual se deseja alterar determinadas propriedades, como a elétrica. O boro, dopante tipo p em lâminas de silício cristalino, difunde-se da superfície para o interior da rede cristalina em

elevadas temperaturas. Esta dopagem altera a condutividade elétrica do silício, consequentemente modificando suas propriedades elétricas (Callister, 2002).

A etapa térmica de difusão é dependente de duas variáveis importantes: a temperatura de difusão e o tempo em que ocorre. Quanto maior for a dopagem com boro, menor será a resistência de folha.

Portanto, com o aumento de temperatura de difusão de boro, o valor da resistência de folha para o emissor p^+ diminui. No entanto, parece haver uma tendência da diminuição da resistência de folha da face com boro ($R_{\square B}$) com o aumento da temperatura de difusão de fósforo. Uma hipótese reside no fato de que, após a difusão de boro, as lâminas passam pela difusão de fósforo e a temperatura desta etapa, embora mais baixa, faz com que o boro no silicato continue se difundindo.

No processo D, como mostra a Tabela 4.1, após a difusão do boro e antes da difusão de fósforo, foi medida a resistência de folha na face com boro. Posteriormente, a esta última etapa térmica, a resistência de folha foi novamente medida. Os valores encontram-se na Tabela 4.2 e na Figura 4.2. Verifica-se uma tendência de aumento da $R_{\square B}$ após a difusão de fósforo, indicando que na difusão de fósforo ocorre a segregação de boro para o silicato ou ocorre uma leve difusão de fósforo na face com boro.

Tabela 4.2. Valores médios da resistência de folha das regiões p^+ das células solares bifaciais desenvolvidas em Si-Cz tipo n, com oxidação e difusão de boro no mesmo processo térmico, em função da temperatura de difusão de boro e de fósforo. Medidas realizadas antes e após a difusão de fósforo e anterior a oxidação para passivação.

Processo	T_B (°C)	T_P (°C)	$R_{\square B}$ (Ω/\square)	
			Antes da difusão de fósforo	Após a difusão de fósforo
D1	980	845	46 ± 1	48 ± 3
D2	990	825	37 ± 2	40 ± 2
D3	1.000	835	34 ± 2	36 ± 3
		845	31 ± 1	33 ± 1

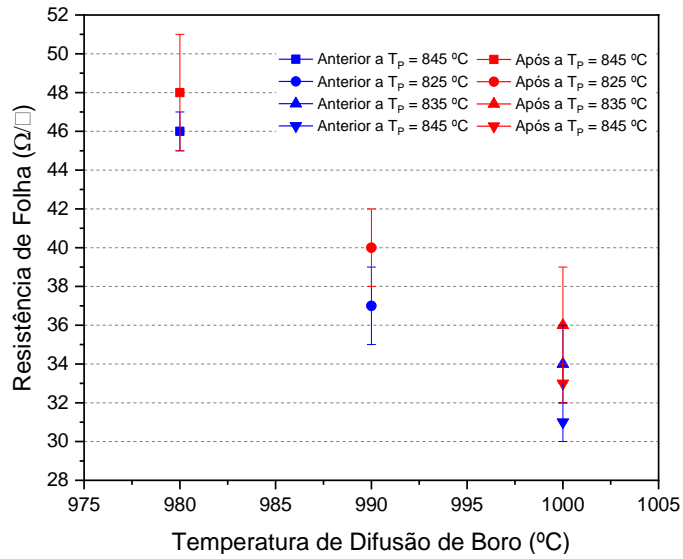


Figura 4.2. Resistência de folha na face dopada com boro em função da temperatura de difusão antes (em azul) e após a difusão de fósforo (em vermelho).

4.1.2. Difusão de Fósforo

A Tabela 4.3 e a Figura 4.3 apresentam as medidas referentes à resistência de folha para o campo retrodifusor n^+ de fósforo ($R_{\square P}$) onde foram obtidos valores entre $(54 \pm 2) \Omega/\square$ e $(94 \pm 6) \Omega/\square$ para o intervalo de temperatura de 825 °C à 855 °C. Também se mostram os valores da temperatura de difusão de boro para cada processo.

Tabela 4.3. Valores médios da resistência de folha das regiões n^+ das células solares bifaciais desenvolvidas em Si-Cz tipo n, com oxidação e difusão de boro no mesmo processo térmico, em função da temperatura de difusão de fósforo e de boro. Medidas realizadas após difusão de fósforo e antes da oxidação para passivação.

Processo	T _P (°C)	T _B (°C)	R _{□P} (Ω/□)
D	825	990	81 ± 4
B1	835	960	94 ± 6
B2		970	88 ± 5
B3		980	89 ± 6
C		990	86 ± 5
D2		1.000	82 ± 4
A1	845	970	66 ± 3
D1		980	67 ± 3
C1		980	66 ± 4
A2		980	65 ± 3
B		990	75 ± 4
C2		990	66 ± 3
D2		1.000	65 ± 3
A1	855	960	57 ± 2
A2		970	54 ± 2
A3		980	54 ± 3
B		990	56 ± 3

Os resultados expostos na Figura 4.3 mostram, como era esperado, que temperaturas mais elevadas para a difusão de fósforo resultam em resistência de folha com valores menores, ou seja, os valores de $R_{\square P}$ decrescem com o aumento da temperatura. Da Tabela 4.3 não se observa influência da temperatura de difusão de boro na $R_{\square P}$.

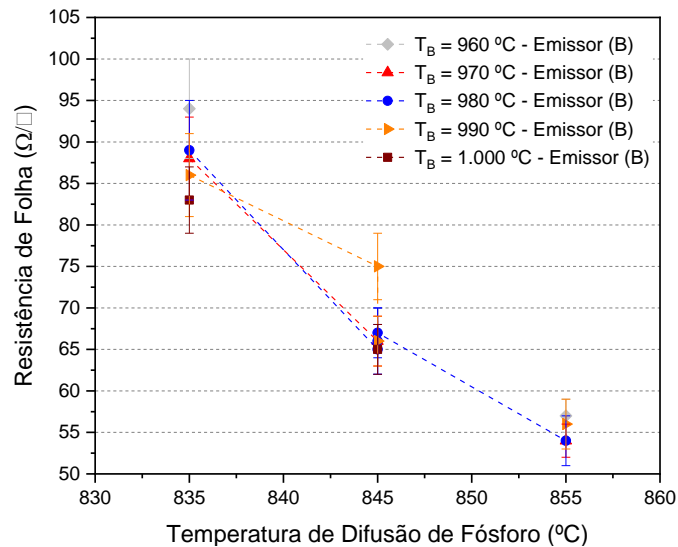


Figura 4.3. Resistência de folha para a região com fósforo em função da temperatura de difusão.

4.2. Avaliação da Temperatura de Difusão de Boro

4.2.1. Temperatura de Difusão de Boro de $960 \text{ }^\circ\text{C}$

Os parâmetros elétricos para as células solares com difusão de boro na temperatura de $960 \text{ }^\circ\text{C}$ são mostrados na Tabela 4.4. Com base em trabalhos anteriores (Zanesco *et al.*, 2017), nestes dispositivos, a oxidação para passivação foi realizada com temperatura de $800 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 45 min. A espessura do óxido de silício foi da ordem de 10 nm e de aproximadamente 50 nm, respectivamente, para a face com o emissor e campo retrodifusor. Salienta-se que a espessura da camada de passivação com SiO_2 na face dopada com fósforo varia um pouco para cada temperatura de difusão de fósforo (Ho e Plummer, 1979).

Na Tabela 4.4 são apresentados os valores da densidade de corrente elétrica de curto-circuito (J_{SC}), tensão de circuito aberto (V_{OC}), fator de forma (FF) e eficiência de conversão (η). Destacaram-se as células solares que apresentaram a maior eficiência para cada temperatura de difusão de fósforo. Para tanto, foram

consideradas as médias ponderadas entre as eficiências de conversão para ambas as faces do mesmo dispositivo, que estão expostas na Tabela 4.5.

Nas situações em que as médias ponderadas atingiram o mesmo valor, considerou-se o dispositivo com maior eficiência na face com o campo retrodifusor. A maior eficiência média ponderada (η_w), de 14,6 %, foi obtida para a $T_P = 845$ °C. Neste caso, a maior eficiência foi medida na face com o BSF e o valor foi de 14,7 %.

O fator de forma da célula solar está diretamente correlacionado ao formato da curva I-V do dispositivo fotovoltaico. Para a célula solar processada na T_B de 960 °C e T_P de 835 °C, o FF para o emissor de boro p^+ foi baixo, de 0,64. Da mesma forma, no BSF, o menor FF ocorreu para a menor T_P , afetando a eficiência. Em todos os processos, o fator de forma limitou a eficiência dos dispositivos em ambas as faces. O maior valor médio foi de somente 0,73, indicando que a temperatura de difusão de boro de 960 °C é baixa.

Tabela 4.4. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais desenvolvidas em função da temperatura de difusão de fósforo para a temperatura de difusão de boro de 960 °C. Oxidação para passivação com temperatura de oxidação de 800 °C durante 45 min.

Iluminação pelo Emissor p^+ Face Dopada com Boro								
Proc.	Quantidade de Células	T_P (°C)	$R_{\square B}$ (Ω/\square)	Cél	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF	η_B (%)
B	2	835	66 ± 5	2	34,3	594,8	0,640	13,1
				3	33,9	594,3	0,642	12,9
Média					34,10 ± 0,28	594,55 ± 0,35	0,641 ± 0,001	13,00 ± 0,14
A1	2	845	63 ± 3	2	34,0	591,5	0,722	14,5
				3	33,2	591,6	0,724	14,2
Média					33,60 ± 0,57	591,55 ± 0,07	0,723 ± 0,001	14,35 ± 0,21
A2	3	855	63 ± 3	4	33,4	591,1	0,723	14,3
				5	33,7	592,5	0,717	14,3
				6	33,3	592,8	0,723	14,3
Média					33,47 ± 0,21	592,13 ± 0,91	0,721 ± 0,003	14,30 ± 0,00
Iluminação pelo Campo Retrodifusor nn^+ Face Dopada com Fósforo								
Proc.	Quantidade de Células	T_P (°C)	$R_{\square B}$ (Ω/\square)	Cél	J_{sc} (mA/cm ²)	V_{oc} (mV)	FF	η_B (%)
B	2	835	66 ± 5	2	36,1	594,9	0,666	14,3
				3	35,6	594,5	0,676	14,3
Média					35,85 ± 0,35	594,70 ± 0,28	0,671 ± 0,007	14,30 ± 0,00
A1	2	845	63 ± 3	2	34,2	589,6	0,726	14,6
				3	34,2	591,6	0,727	14,7
Média					34,20 ± 0,00	590,60 ± 1,41	0,727 ± 0,001	14,65 ± 0,07
A2	3	855	63 ± 3	4	33,9	590,4	0,732	14,6
				5	33,9	591,5	0,727	14,6
				6	33,9	591,9	0,729	14,6
Média					33,90 ± 0,00	591,27 ± 0,78	0,729 ± 0,003	14,60 ± 0,00

Tabela 4.5. Eficiência das células solares medidas com iluminação no emissor e no campo retrodifusor processadas com a temperatura de difusão de boro de 960 °C em função da temperatura de difusão de fósforo e eficiência média ponderada das células solares bifaciais.

			Emissor p ⁺ n Face Dopada com Boro	Campo Retrodifusor nn ⁺ Face Dopada com Fósforo	Média Ponderada
Proc.	T _p (°C)	Cél.	η _B (%)	η _P (%)	η _w (%)
B	835	2	13,1	14,3	14,1
		3	12,9	14,3	14,1
		Média	13,00 ± 0,14	14,30 ± 0,00	14,10 ± 0,00
A1	845	2	14,5	14,6	14,6
		3	14,2	14,7	14,6
		Média	14,35 ± 0,21	14,65 ± 0,07	14,60 ± 0,00
A2	855	4	14,3	14,6	14,6
		5	14,3	14,6	14,5
		6	14,3	14,6	14,6
Média		14,30 ± 0,00	14,60 ± 0,00	14,57 ± 0,06	

Nas células solares com maior eficiência, mediu-se a refletância e a resposta espectral para o cálculo da eficiência quântica interna com incidência de irradiância em cada face. A curva J-V, a refletância e a EQI dos dispositivos com maior eficiência são apresentadas, respectivamente, na Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.7.

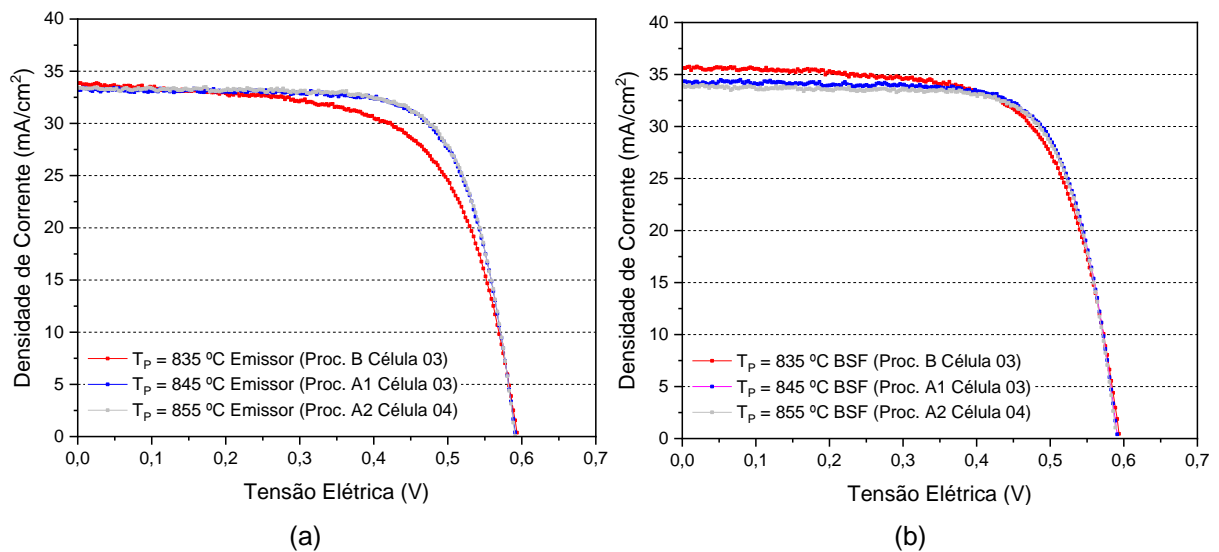


Figura 4.4. Densidade de corrente elétrica em função da tensão elétrica das células solares bifaciais com maior eficiência para diferentes temperaturas de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 960 °C medida na (a) face do emissor e na (b) face do campo retrodifusor (BSF).

Da Figura 4.4-a nota-se que ocorre a redução do FF do dispositivo fotovoltaico processado na T_p = 835 °C. Isto deve-se principalmente ao aumento da resistência em série, ocasionada pelo aumento da resistência de contato, devido a maior resistência de folha nesta temperatura.

Na Figura 4.5 verifica-se que a refletância é mais variável na face com o campo retrodifusor, provavelmente devido a diferentes espessuras da camada de SiO_2 .

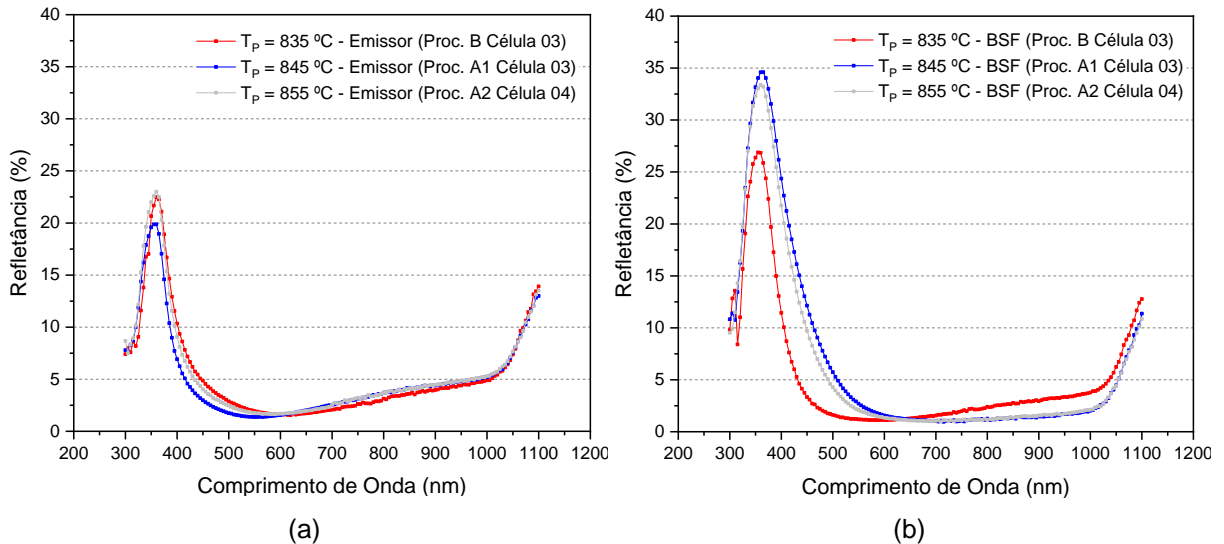


Figura 4.5. Refletância das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão de fósforo e $T_B = 960^\circ\text{C}$, medida na (a) face do emissor e (b) face do campo retrodifusor (BSF).

Em relação à face do campo retrodifusor, para a T_p de 845°C e 855°C , a superfície do emissor apresentou menor refletância no intervalo de 600 nm à 1.000 nm do espectro eletromagnético, indicando um filme AR mais espesso que o necessário. Para as demais refletâncias, o mínimo ocorreu no intervalo de comprimentos de onda de 550 nm a 600 nm e estes filmes possuem a espessura adequada. Como esperado, a maior refletância, em ambas as faces, ocorre em torno dos 350 nm. A passivação das superfícies das lâminas ocorreu pela oxidação térmica seca, com o crescimento do filme fino dielétrico de SiO_2 em ambas as faces. Para a superfície do BSF, a espessura da camada de SiO_2 variou para diferentes T_p e a camada menos espessa de TiO_2 foi aplicada igualmente em todas as células solares. A camada de passivação com SiO_2 atinge menor espessura para a superfície com boro (10 nm) e, nesta situação, a espessura do filme AR de TiO_2 foi compensada aumentando-se a espessura para 55 nm, o que resultou em uma menor refletância. A taxa com que o filme de SiO_2 cresce sobre a face dopada com fósforo é maior do que aquela em que foi dopada com boro, justificando a diferença na espessura dos filmes (HO e Plummer, 1979).

Foi calculada a refletância média ponderada (Zhao e Green, 1991), (Fagundes *et al.*, 2015) para ambas as superfícies das células solares com maior eficiência. O cálculo levou em consideração a refletância e a resposta espectral para um intervalo de comprimentos de onda entre 350 nm e 1.100 nm, com variação de 5 nm. Os dados são apresentados na Tabela 4.6. Verifica-se que a refletância ponderada variou de 4,6 % a 5,1 % no emissor e de 4,4 % a 5,8 % no BSF. Conforme mostra a Figura 4.6, a maior refletância ocorreu na face com BSF formado com T_p de 845 °C e 855 °C.

Tabela 4.6. Refletância média ponderada para a superfície com o emissor e com o campo retrodifusor das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 960 °C.

Proc.	T_p (°C)	Face	Refletância Média Ponderada (%)
B	835	Campo retrodifusor nn^+	4,4
		Emissor p^+n	5,0
A1	845	Campo retrodifusor nn^+	5,8
		Emissor p^+n	4,6
A2	855	Campo retrodifusor nn^+	5,3
		Emissor p^+n	5,1

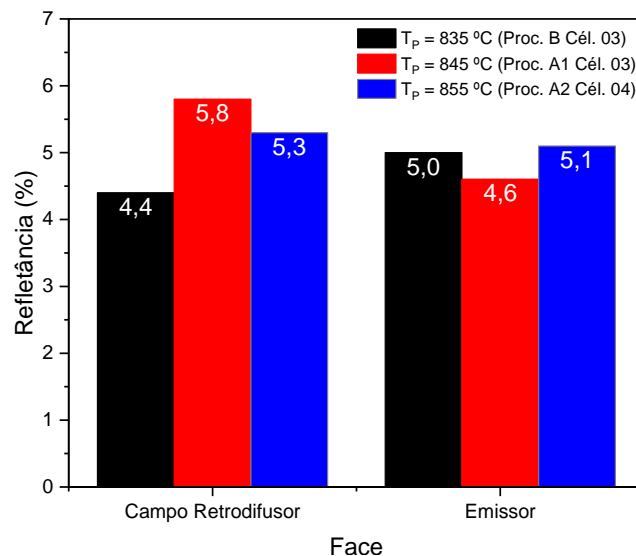


Figura 4.6. Refletância média para as superfícies do emissor e campo retrodifusor na temperatura de difusão de boro a 960 °C.

A eficiência quântica é afetada pelos processos de recombinação dos portadores de carga minoritários e a passivação dos dispositivos fotovoltaicos pode ser avaliada por meio das medidas de eficiência quântica interna. Com base nos dados da refletância e resposta espectral, foi calculada a EQI com iluminação em cada face das células solares no intervalo de 300 nm à 1.100 nm. Conforme mostra a Figura 4.7-a, o emissor p^+ apresentou baixa EQI para comprimentos de onda

curtos. No entanto, com iluminação no campo retrodifusor n^+ , a EQI foi maior em comprimentos de onda curtos devido a menor recombinação (SRH) na região próxima à superfície, ou seja no BSF de fósforo, como se pode ver na Figura 4.7-b.

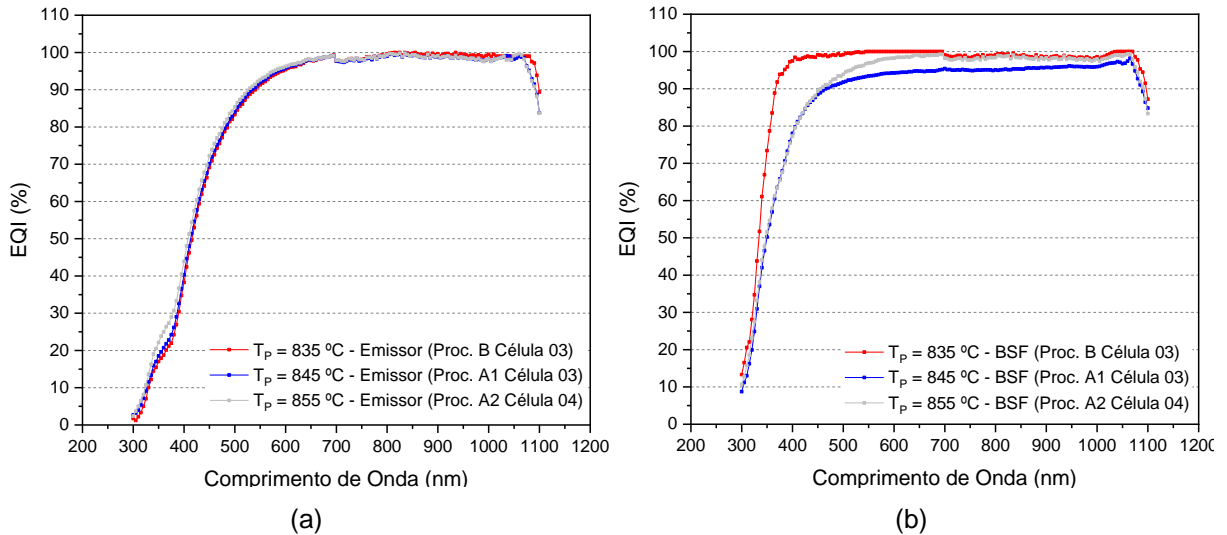


Figura 4.7. Eficiência quântica interna das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferente temperatura de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 960 °C medida com iluminação na (a) face com o emissor e (b) face com o campo retrodifusor (BSF).

4.2.2. Temperatura de Difusão de Boro de 970 °C

A Tabela 4.7 apresenta os parâmetros elétricos do grupo de células solares processadas com difusão de boro na temperatura de 970 °C e com variação da temperatura de fósforo. Conforme comentado anteriormente, estão realçadas aquelas com maior eficiência média ponderada, a qual é mostrada na Tabela 4.8. A eficiência média ponderada foi similar para as três temperaturas de difusão de fósforo avaliadas, com valor de 15 %. A maior eficiência, de 15,2 %, 15,1 % e 15,0 %, ocorre na face do campo retrodifusor, para T_P de 835 °C, 845 °C e 855 °C, respectivamente, devido a maior J_{SC} .

O fator de forma foi somente um pouco maior que o obtido com a temperatura de difusão de boro de 960 °C. Os maiores valores, de 0,74, foram obtidos com T_P de 845 °C e 855 °C. Da mesma forma que para os resultados obtidos com T_B de 960 °C, observa-se uma tendência de aumento do fator de forma com o aumento da T_P devido a redução da resistência de contato com o aumento da resistência de folha. Enquanto que a J_{SC} tende a diminuir, pois aumenta a recombinação SRH no BSF.

Tabela 4.7. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais desenvolvidas em função da temperatura de difusão de fósforo para a temperatura de difusão de boro de 970 °C. Oxidação para passivação com temperatura de oxidação de 800 °C durante 45 min.

Iluminação pelo Emissor p ⁺ n Face Dopada com Boro								
Proc.	Quantidade de Células	T _P (°C)	R _{□B} (Ω/□)	Cél.	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF	η _B (%)
B	4	835	56 ± 4	5	33,4	596,5	0,697	13,9
				6	33,8	596,0	0,671	13,5
				7	33,7	597,2	0,703	14,2
				8	33,6	598,7	0,701	14,1
Média					33,63 ± 0,17	597,10 ± 1,17	0,693 ± 0,015	13,93 ± 0,31
A1	3	845	57 ± 3	7	32,9	594,3	0,734	14,4
				8	33,3	594,6	0,723	14,3
				9	32,9	595,4	0,733	14,4
Média					33,03 ± 0,23	594,77 ± 0,57	0,730 ± 0,006	14,37 ± 0,06
A2	3	855	52 ± 3	10	32,9	595,3	0,741	14,5
				11	32,6	596,6	0,739	14,4
				12	32,7	596,6	0,742	14,5
Média					32,73 ± 0,15	596,17 ± 0,75	0,741 ± 0,002	14,47 ± 0,06
Iluminação pelo Campo Retrodifusor nn ⁺ Face Dopada com Fósforo								
Proc.	Quantidade de Células	T _P (°C)	R _{□B} (Ω/□)	Cél.	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF	η _B (%)
B	4	835	56 ± 4	5	35,5	597,1	0,725	15,4
				6	35,5	596,7	0,700	14,8
				7	35,5	597,6	0,722	15,3
				8	35,7	599,2	0,712	15,2
Média					35,55 ± 0,10	597,65 ± 1,10	0,715 ± 0,011	15,18 ± 0,26
A1	3	845	57 ± 3	7	34,6	594,6	0,731	15,0
				8	34,2	594,4	0,742	15,1
				9	34,6	595,3	0,737	15,2
Média					34,47 ± 0,23	594,77 ± 0,47	0,737 ± 0,006	15,10 ± 0,10
A2	3	855	52 ± 3	10	34,0	595,0	0,745	15,1
				11	33,9	596,2	0,735	14,9
				12	34,3	596,3	0,729	14,9
Média					34,07 ± 0,21	595,83 ± 0,72	0,736 ± 0,008	14,97 ± 0,12

Tabela 4.8. Eficiência das células solares medidas com iluminação no emissor e no campo retrodifusor processadas com a temperatura de difusão de boro de 970 °C em função da temperatura de difusão de fósforo e eficiência média ponderada das células solares bifaciais.

Proc.	T _P (°C)	Cél.	Emissor p ⁺ n Face Dopada com Boro	Campo Retrodifusor nn ⁺ Face Dopada com Fósforo	Média Ponderada
			η _B (%)	η _P (%)	η _w (%)
B	835	5	13,9	15,4	15,1
		6	13,5	14,8	14,6
		7	14,2	15,3	15,1
		8	14,1	15,2	15,0
Média			13,92 ± 0,31	15,18 ± 0,26	14,95 ± 0,24
A1	845	7	14,4	15,0	14,9
		8	14,3	15,1	14,9
		9	14,4	15,2	15,0
Média			14,37 ± 0,06	15,10 ± 0,10	14,93 ± 0,06
A2	855	10	14,5	15,1	15,0
		11	14,4	14,9	14,8
		12	14,5	14,9	14,9
Média			14,47 ± 0,06	14,97 ± 0,11	14,90 ± 0,10

Na Figura 4.8 apresentam-se as curvas J-V das células solares com maior eficiência. Tanto na face com o emissor, quanto na face com o campo retrodifusor a densidade de corrente de curto-circuito é maior para o dispositivo processado com T_p de 835 °C, pois a região n^+ é menos dopada que nos outros dois casos, e portanto, possui menos recombinação dos portadores de carga minoritários.

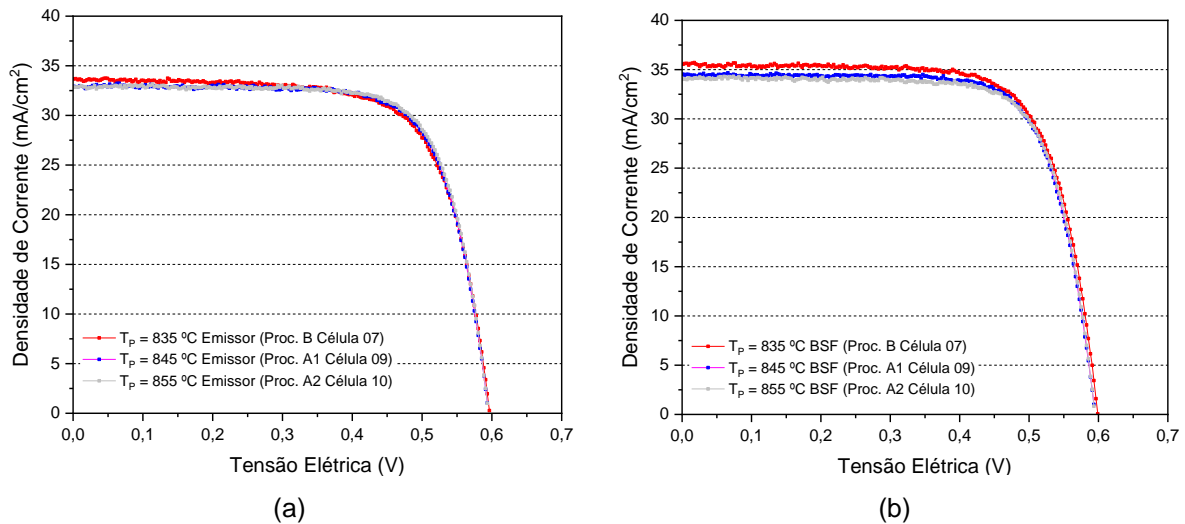


Figura 4.8. Densidade de corrente elétrica em função da tensão elétrica das células solares bifaciais com maior eficiência para diferentes temperaturas de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 970 °C medida na (a) face do emissor e na (b) face do campo retrodifusor (BSF).

A refletância das células solares é apresentada na Figura 4.9. Da mesma forma que para os resultados obtidos para a T_B de 960 °C, há maior variação da refletância na face com o campo retrodifusor, devido as diferentes espessuras da camada de SiO_2 .

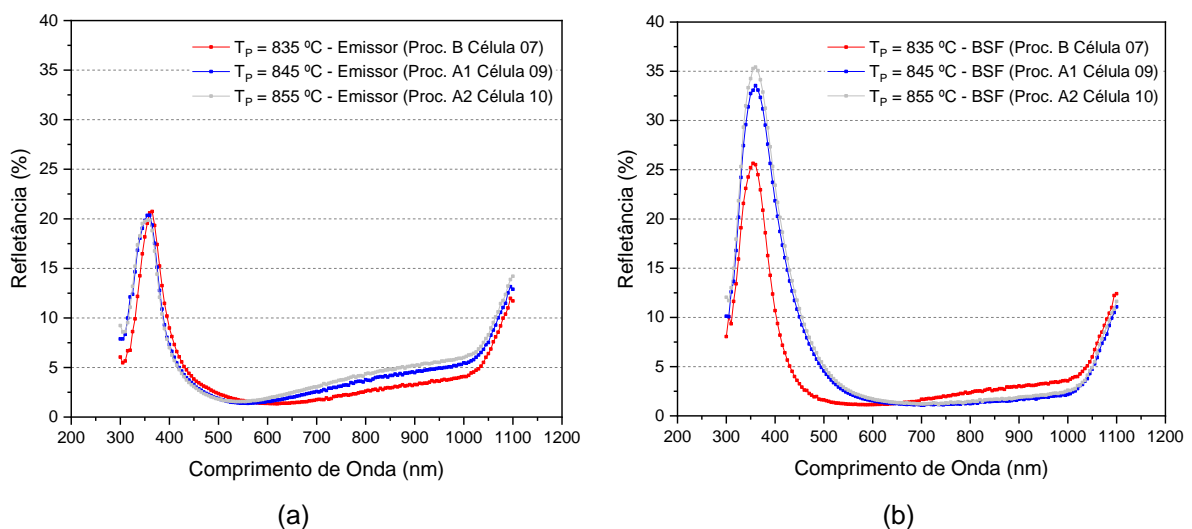


Figura 4.9. Refletância das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão de fósforo e $T_B = 970$ °C, medida na (a) face do emissor e (b) face do campo retrodifusor (BSF).

Na Tabela 4.9 e na Figura 4.10 mostra-se a refletância média ponderada em cada face das células solares com maior eficiência. Observa-se que a refletância é maior na face com o BSF de fósforo. Portanto, com a otimização da espessura do filme AR nesta face, é possível aumentar a J_{SC} .

Tabela 4.9. Refletância média ponderada para a superfície com o emissor e com o campo retrodifusor das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 970 °C.

Proc.	Cél.	Face	Refletância Ponderada Média (%)
B	07	Campo retrodifusor nn^+	4,3
		Emissor p^+n	4,3
A1	09	Campo retrodifusor nn^+	5,4
		Emissor p^+n	4,8
A2	10	Campo retrodifusor nn^+	5,8
		Emissor p^+n	5,1

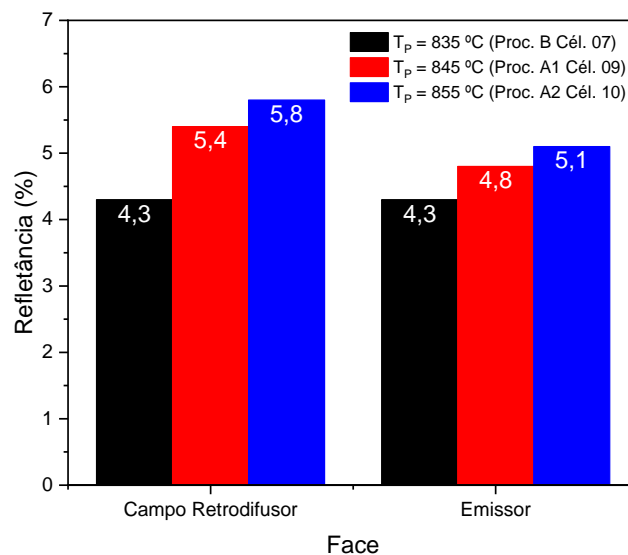


Figura 4.10. Refletância média para as superfícies do emissor e campo retrodifusor na temperatura de difusão de boro a 970 °C.

Na Figura 4.11 mostra-se a EQI para os dispositivos processados com T_B de 970 °C. Para os baixos comprimentos de onda, de 300 nm a 500 nm, correspondentes ao violeta, azul e verde do espectro solar visível, a face com o emissor apresentou baixa EQI visto que, neste intervalo, a radiação solar é absorvida bem próxima à superfície. Nesta situação há a influência da passivação e das recombinações na superfície. Portanto, a passivação com a fina camada de 10 nm de SiO_2 do emissor de boro não é efetiva ou o emissor tem alta recombinação dos portadores de carga minoritários.

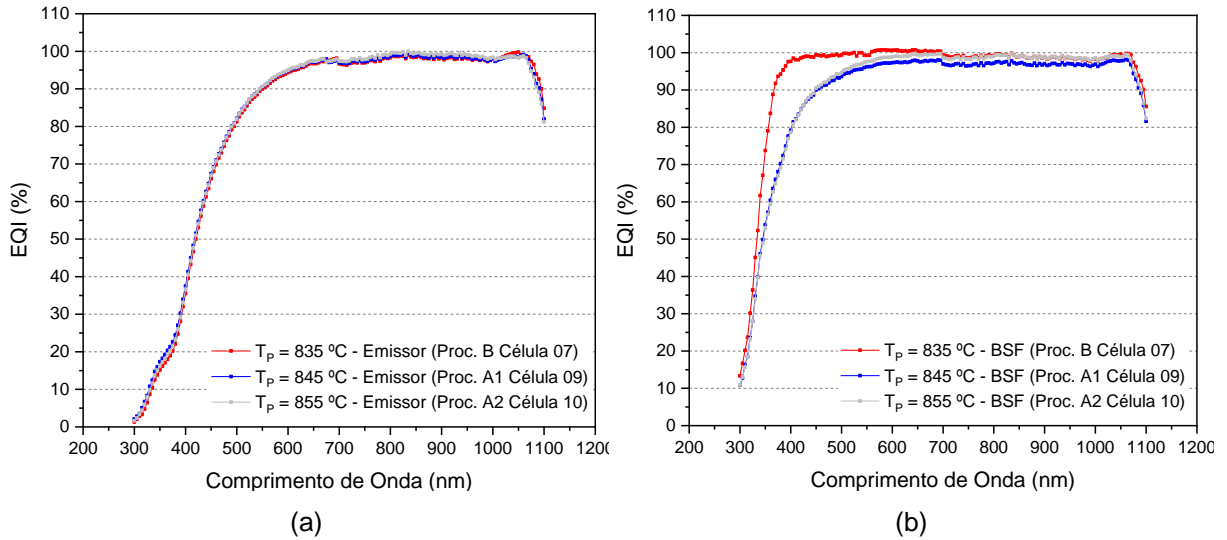


Figura 4.11. Eficiência quântica interna das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferente temperatura de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 970 °C medida com iluminação na (a) face com o emissor e (b) face com o campo retrodifusor (BSF).

Com relação à face com o campo retrodifusor, a célula solar processada na temperatura de 835 °C para difusão de fósforo a elevada EQI em baixos comprimentos de onda está relacionada com a baixa recombinação dos portadores minoritários em comprimentos de onda curtos, pois o BSF é pouco dopado.

4.2.3. Temperatura de Difusão de Boro de 980 °C

Os resultados das células solares com difusão de boro na temperatura de 980 °C também foi dividido em três grupos correspondentes a diferentes temperaturas de difusão de fósforo. Os parâmetros elétricos são apresentados na Tabela 4.10 e a eficiência média ponderada é mostrada na Tabela 4.11.

A maior eficiência média ponderada, de 15,3 %, foi obtida com T_P de 845 °C. Novamente, observa-se a redução da J_{SC} com o aumento da T_P , devido a maior recombinação no campo retrodifusor mais dopado. A maior η_w foi um pouco maior da obtida para $T_B = 970$ °C devido a maior eficiência média na face com o BSF, de 15,4 %.

Tabela 4.10. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais desenvolvidas em função da temperatura de difusão de fósforo para a temperatura de difusão de boro de 980 °C. Oxidação para passivação com temperatura de oxidação de 800 °C durante 45 min.

Iluminação pelo Emissor p ⁺ n Face Dopada com Boro								
Proc.	Quantidade de Células	T _P (°C)	R _{□B} (Ω/□)	Cél.	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF	η _B (%)
B	4	835	48 ± 3	9	33,5	598,6	0,704	14,1
				10	33,4	597,1	0,697	13,9
				11	33,1	598,1	0,705	14,0
				12	33,8	595,0	0,701	14,1
Média					33,45 ± 0,29	597,20 ± 1,59	0,702 ± 0,004	14,03 ± 0,10
A1	4	845	48 ± 3	13	33,0	599,1	0,739	14,6
				14	32,9	598,7	0,742	14,6
				15	32,9	600,0	0,738	14,6
				16	32,9	598,9	0,740	14,6
Média					32,93 ± 0,05	599,18 ± 0,57	0,740 ± 0,002	14,60 ± 0,00
A2	2	855	43 ± 2	17	32,8	593,4	0,723	14,1
				18	32,9	591,2	0,734	14,3
Média					32,85 ± 0,07	592,30 ± 1,56	0,729 ± 0,008	14,20 ± 0,14
Iluminação pelo Campo Retrodifusor nn ⁺ Face Dopada com Fósforo								
Proc.	Quantidade de Células	T _P (°C)	R _{□B} (Ω/□)	Cél.	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF	η _B (%)
B	4	835	48 ± 3	9	35,5	599,2	0,725	15,4
				10	35,4	597,8	0,719	15,2
				11	35,5	598,7	0,721	15,3
				12	34,6	593,5	0,709	14,6
Média					35,25 ± 0,44	597,30 ± 2,60	0,719 ± 0,007	15,13 ± 0,36
A1	4	845	48 ± 3	13	34,6	598,8	0,743	15,4
				14	34,7	598,5	0,739	15,4
				15	34,7	600,2	0,744	15,5
				16	34,4	598,6	0,749	15,4
Média					34,60 ± 0,14	599,03 ± 0,79	0,744 ± 0,004	15,43 ± 0,05
A2	2	855	43 ± 2	17	33,9	593,1	0,733	14,8
				18	33,4	589,7	0,736	14,5
Média					33,65 ± 0,35	591,40 ± 2,40	0,735 ± 0,002	14,65 ± 0,21

Tabela 4.11. Eficiência das células solares medidas com iluminação no emissor e no campo retrodifusor processadas com a temperatura de difusão de boro de 980 °C em função da temperatura de difusão de fósforo e eficiência média ponderada das células solares bifaciais.

		Emissor p ⁺ n Face Dopada com Boro		Campo Retrodifusor nn ⁺ Face Dopada com Fósforo	Média Ponderada
Proc.	T _P (°C)	Cél.	η _B (%)	η _P (%)	η _w (%)
B	835	9	14,1	15,4	15,2
		10	13,9	15,2	15,0
		11	14,0	15,3	15,1
		12	14,1	14,6	14,5
Média			14,03 ± 0,10	15,13 ± 0,36	14,95 ± 0,31
A1	845	13	14,6	15,4	15,3
		14	14,6	15,4	15,2
		15	14,6	15,5	15,3
		16	14,6	15,4	15,3
Média			14,60 ± 0,00	15,43 ± 0,05	15,28 ± 0,05
A2	855	17	14,1	14,8	14,6
		18	14,3	14,5	14,5
Média			14,20 ± 0,14	14,65 ± 0,21	14,55 ± 0,07

Para a T_B de 980 °C a célula solar bifacial com maior eficiência apresentou os seguintes parâmetros elétricos: $J_{SC} = 32,9 \text{ mA/cm}^2$ e $J_{SC} = 34,7 \text{ mA/cm}^2$; $V_{OC} = 600,0 \text{ mV}$ e $V_{OC} = 600,2 \text{ mV}$; $FF = 0,738$ e $FF = 0,744$; $\eta_B = 14,6 \%$ e $\eta_P = 15,5 \%$, respectivamente na face com o emissor e campo retrodifusor. Verifica-se que a principal diferença entre os parâmetros elétricos medidos com iluminação na face com o emissor e o BSF é a J_{SC} , $1,8 \text{ mA/cm}^2$ maior na face com o campo retrodifusor.

Este resultado é confirmado comparando a Figura 12-a com a Figura 12.b. Nesta última figura também se pode notar que há uma maior variação da J_{SC} no campo retrodifusor com a temperatura de difusão de fósforo.

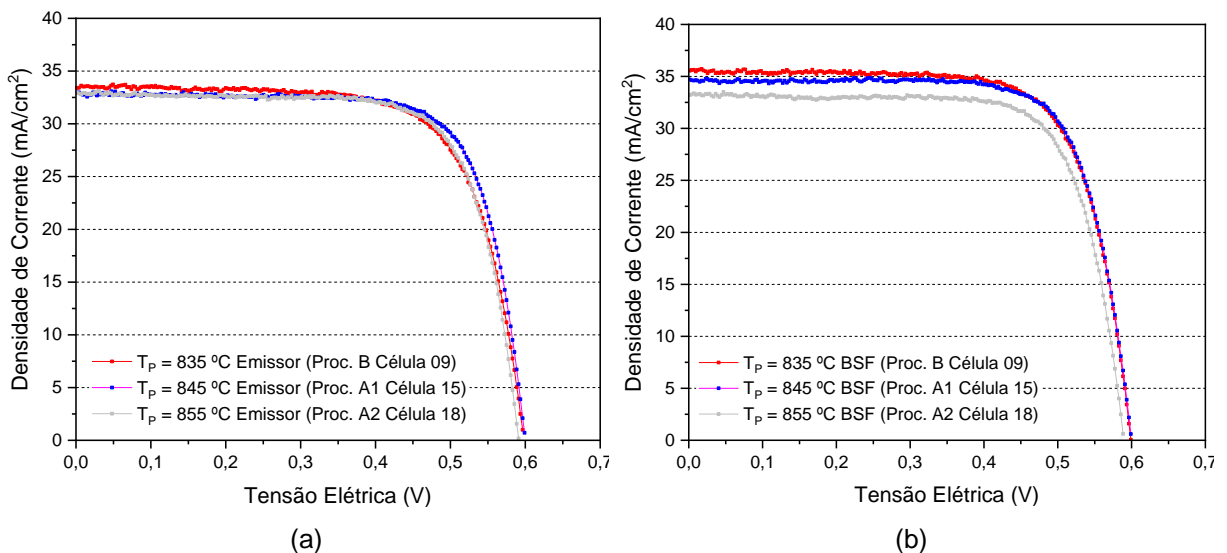


Figura 4.12. Densidade de corrente elétrica em função da tensão elétrica das células solares bifaciais com maior eficiência para diferentes temperaturas de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 980 °C medida na (a) face do emissor e na (b) face do campo retrodifusor (BSF).

A refletância e a eficiência quântica interna são mostradas na Figura 4.14 e Figura 4.15, respectivamente. A refletância apresenta o mesmo comportamento que nos casos anteriores.

Da Tabela 4.12 e Figura 4.13 nota-se que a maior variação da refletância média ponderada ocorre na face com o campo retrodifusor. A maior refletância média ponderada foi de 5,1 % na face com o BSF produzido com T_p de 845 °C.

Tabela 4.12. Refletância média ponderada para a superfície com o emissor e com o campo retrodifusor das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 980 °C.

Proc.	Cél.	Face	Refletância Ponderada Média (%)
A	09	Campo retrodifusor nn ⁺	4,0
		Emissor p ⁺ n	4,5
B1	15	Campo retrodifusor nn ⁺	5,1
		Emissor p ⁺ n	4,7
B2	18	Campo retrodifusor nn ⁺	5,0
		Emissor p ⁺ n	4,9

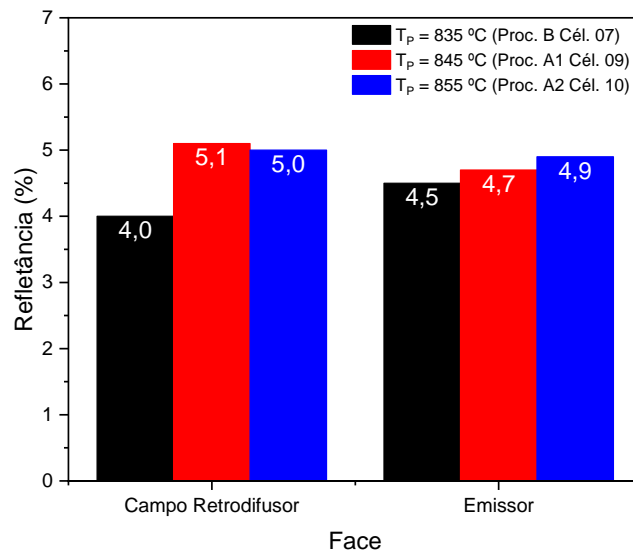


Figura 4.13. Refletância média para as superfícies do emissor e campo retrodifusor na temperatura de difusão de boro a 980 °C.

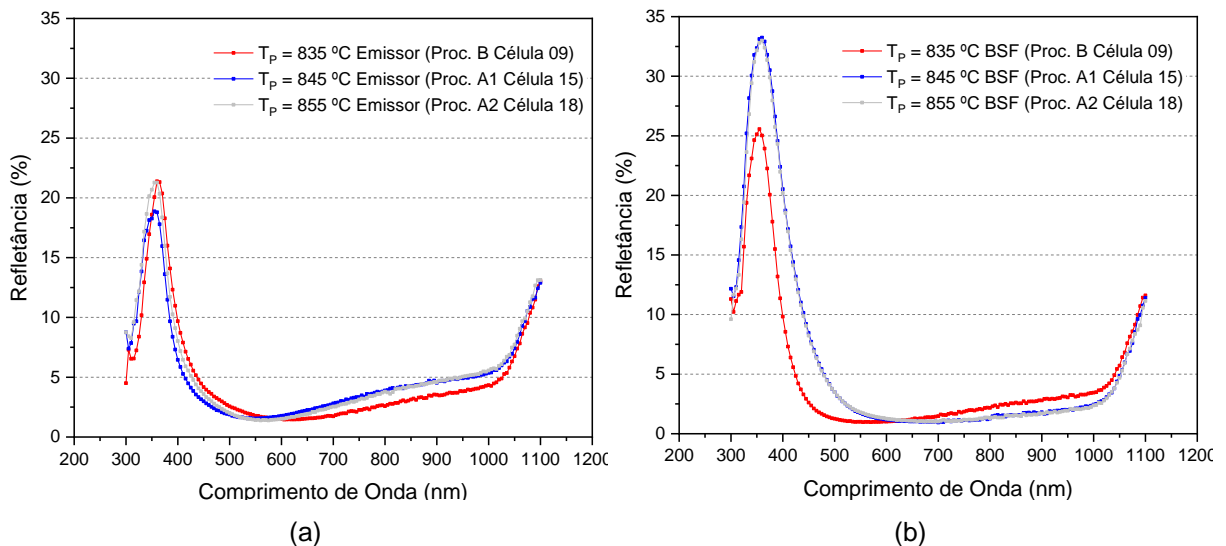


Figura 4.14. Refletância das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão de fósforo e $T_B = 980 \text{ °C}$, medida na (a) face do emissor e (b) face do campo retrodifusor (BSF).

Na Figura 4.15 pode-se comparar a EQI medida na face com o emissor e com o campo retrodifusor. Os resultados são similares aos anteriores, porém a EQI foi menor para a T_P de 855 °C na face com o campo retrodifusor.

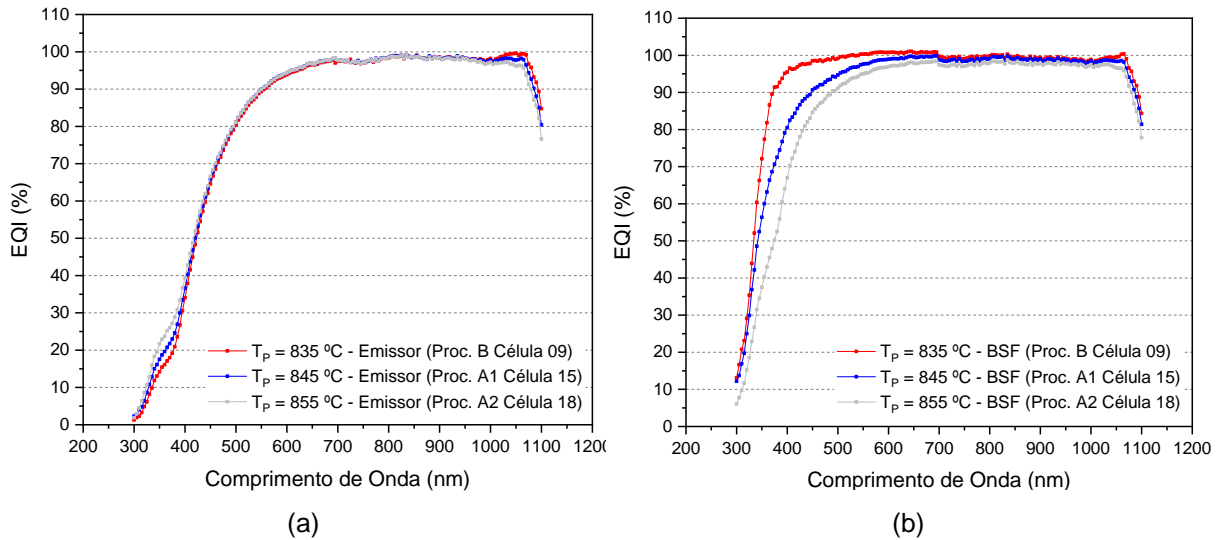


Figura 4.15. Eficiência quântica interna das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferente temperatura de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 980 °C medida com iluminação na (a) face com o emissor e (b) face com o campo retrodifusor (BSF).

4.2.4. Temperatura de Difusão de Boro de 990 °C

Na temperatura de difusão de boro de 990°C processaram-se células solares com quatro temperaturas distintas de difusão de fósforo. A Tabela 4.13 apresenta os resultados. Na face com o emissor nota-se um aumento da eficiência em relação aos resultados com temperatura de difusão de boro menor. A maior eficiência média nesta face foi de 15,4 % e ocorreu para T_P de 835 °C. Todos os parâmetros elétricos aumentaram. O fator de forma médio foi de 0,75.

Na face com o campo retrodifusor a eficiência média foi de 16,3 %. A J_{SC} é o parâmetro que provoca a diferença na eficiência, sendo 33,9 mA/cm² e 35,8 mA/cm² na face com o emissor e campo retrodifusor, respectivamente. A maior eficiência média ponderada foi de 16,1 %, como se pode ver na Tabela 4.14, e foi obtida com T_P de 835 °C.

A célula solar bifacial com maior eficiência apresentou os seguintes parâmetros elétricos: $J_{SC} = 34,1$ mA/cm² e $J_{SC} = 36,2$ mA/cm²; $V_{OC} = 606,0$ mV e V_{OC}

= 607,0 mV; FF = 0,750 e FF = 0,755; η_B = 15,5 % e η_P = 16,6 %, respectivamente, na face com o emissor e campo retrodifusor. Este dispositivo foi processado com temperatura de difusão de fósforo de 835 °C.

Tabela 4.13. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais desenvolvidas em função da temperatura de difusão de fósforo para a temperatura de difusão de boro de 990 °C. Oxidação para passivação com temperatura de oxidação de 800 °C durante 45 min.

Iluminação pelo Emissor p ⁺ n Face Dopada com Boro								
Proc.	Quantidade de Células	T _P (°C)	R _{□B} (Ω/□)	Cél.	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF	η _B (%)
D	4	825	81 ± 4	5	33,0	601,9	0,738	14,6
				6	33,0	603,4	0,730	14,5
				7	32,8	601,7	0,741	14,6
				8	32,2	601,4	0,744	14,4
Média					32,75 ± 0,38	602,10 ± 0,89	0,738 ± 0,006	14,53 ± 0,10
C1	3	835	40 ± 3	1	34,0	602,4	0,751	15,4
				3	34,1	606,0	0,750	15,5
				4	33,8	604,4	0,753	15,4
Média					33,97 ± 0,15	604,27 ± 1,80	0,751 ± 0,002	15,43 ± 0,06
C2	4	845	37 ± 2	5	33,4	606,2	0,762	15,5
				6	33,8	603,4	0,755	15,4
B1				13	33,5	600,7	0,719	14,5
				16	33,2	599,2	0,734	14,6
Média					33,48 ± 0,25	602,38 ± 3,09	0,743 ± 0,020	15,00 ± 0,52
B2	2	855	39 ± 3	17	33,0	601,2	0,709	14,1
				18	33,1	599,3	0,742	14,7
Média					33,05 ± 0,07	600,25 ± 1,34	0,726 ± 0,023	14,40 ± 0,42
Iluminação pelo Campo Retrodifusor nn ⁺ Face Dopada com Fósforo								
Proc.	Quantidade de Células	T _P (°C)	R _{□B} (Ω/□)	Cél.	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF	η _B (%)
D	4	825	81 ± 4	5	35,3	602,6	0,742	15,8
				6	35,2	604,3	0,749	15,9
				7	34,1	601,7	0,742	15,2
				8	35,2	601,9	0,744	15,8
Média					34,95 ± 0,57	602,63 ± 1,18	0,744 ± 0,003	15,68 ± 0,32
C1	3	835	40 ± 3	1	35,6	602,2	0,745	16,0
				3	36,2	607,0	0,755	16,6
				4	35,7	605,0	0,755	16,3
Média					35,83 ± 0,32	604,73 ± 2,41	0,752 ± 0,006	16,30 ± 0,30
C2	4	845	37 ± 2	5	35,5	606,8	0,764	16,5
				6	35,1	603,0	0,758	16,0
B1				13	34,7	600,3	0,746	15,6
				16	34,2	598,5	0,744	15,3
Média					34,88 ± 0,56	602,15 ± 3,61	0,753 ± 0,010	15,85 ± 0,52
B2	2	855	39 ± 3	17	34,5	600,8	0,731	15,2
				18	33,9	598,4	0,748	15,2
Média					34,20 ± 0,42	599,60 ± 1,70	0,740 ± 0,012	15,20 ± 0,00

Tabela 4.14. Eficiência das células solares medidas com iluminação no emissor e no campo retrodifusor processadas com a temperatura de difusão de boro de 990 °C em função da temperatura de difusão de fósforo e eficiência média ponderada das células solares bifaciais.

			Emissor p ⁺ n Face Dopada com Boro	Campo Retrodifusor nn ⁺ Face Dopada com Fósforo	Média Ponderada
Proc.	T _P (°C)	Cél.	η _B (%)	η _P (%)	η _w (%)
D	825	5	14,6	15,8	15,6
		6	14,5	15,9	15,7
		7	14,6	15,2	15,1
		8	14,4	15,8	15,5
Média			14,53 ± 0,10	15,68 ± 0,32	15,48 ± 0,26
C1	835	1	15,4	16,0	15,9
		3	15,5	16,6	16,4
		4	15,4	16,3	16,2
Média			15,43 ± 0,06	16,30 ± 0,30	16,17 ± 0,25
C2	845	5	15,5	16,5	16,3
		6	15,4	16,0	15,9
B1	845	13	14,5	15,6	15,4
		16	14,6	15,3	15,1
Média			15,00 ± 0,52	15,85 ± 0,52	15,68 ± 0,53
B2	855	17	14,1	15,2	15,0
		18	14,7	15,2	15,1
Média			14,40 ± 0,42	15,20 ± 0,00	15,05 ± 0,07

Da Figura 4.16 verifica-se que tanto na face do emissor quanto na face do BSF a redução do fator de forma para a maior e menor T_P deve-se a resistência em série. Para a temperatura de 825 °C, a resistência em série está relacionada a resistência de contato devido a elevada resistência de folha no BSF.

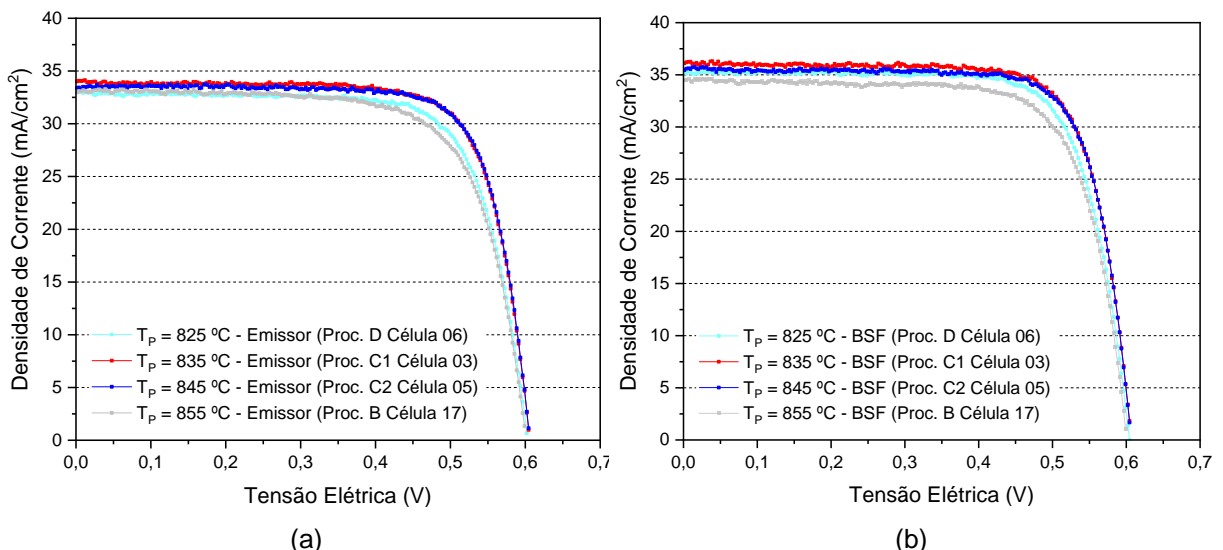


Figura 4.16. Densidade de corrente elétrica em função da tensão elétrica das células solares bifaciais com maior eficiência para diferentes temperaturas de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 990 °C medida na (a) face do emissor e na (b) face do campo retrodifusor (BSF).

A refletância e a eficiência quântica interna estão representadas, respectivamente, na Figura 4.17 e na Figura 4.18. Neste caso, verifica-se uma maior

uniformidade do filme de passivação e antirreflexo na face com o BSF. A refletância média ponderada, mostrada na Tabela 4.15 e Figura 4.19, é similar para todas as superfícies, variando de 4,4 % a 5 %.

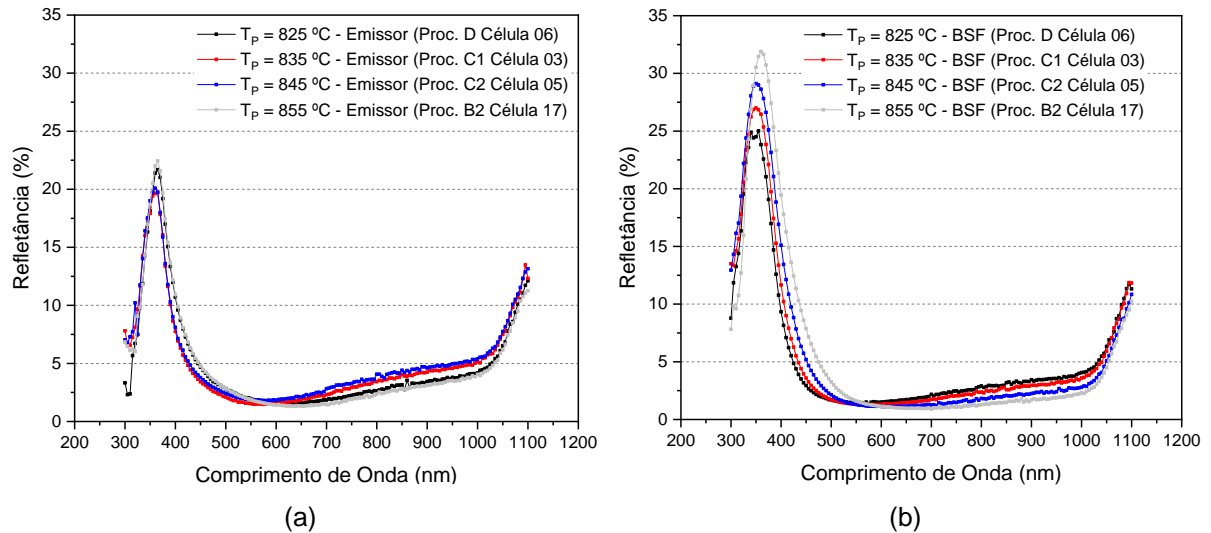


Figura 4.17. Refletância das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão de fósforo e $T_B = 990\text{ }^\circ\text{C}$, medida na (a) face do emissor e (b) face do campo retrodifusor (BSF).

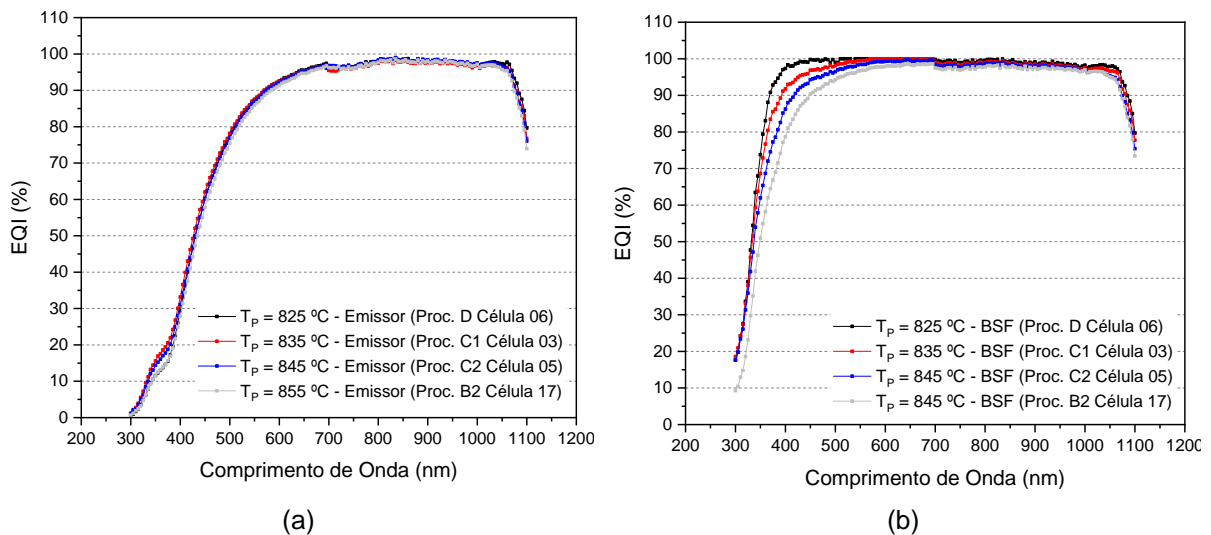


Figura 4.18. Eficiência quântica interna das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferente temperatura de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de $990\text{ }^\circ\text{C}$ medida com iluminação na (a) face com o emissor e (b) face com o campo retrodifusor (BSF).

Da comparação da EQI na Figura 4.18 observa-se que a difusão de fósforo afeta somente a resposta da célula solar na face com o BSF. Neste caso, nota-se uma redução da EQI nos menores comprimentos de onda com o aumento da T_P , devido ao aumento da recombinação com a diminuição da resistência de folha (maior concentração de dopantes).

Tabela 4.15. Refletância média ponderada para a superfície com o emissor e com o campo retrodifusor das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 990 °C.

Proc.	Cél.	Face	Refletância Ponderada Média (%)
D	06	Campo retrodifusor nn ⁺	4,4
		Emissor p ⁺ n	4,6
C1	03	Campo retrodifusor nn ⁺	4,4
		Emissor p ⁺ n	4,7
C2	05	Campo retrodifusor nn ⁺	4,4
		Emissor p ⁺ n	5,0
B2	17	Campo retrodifusor nn ⁺	4,8
		Emissor p ⁺ n	4,4

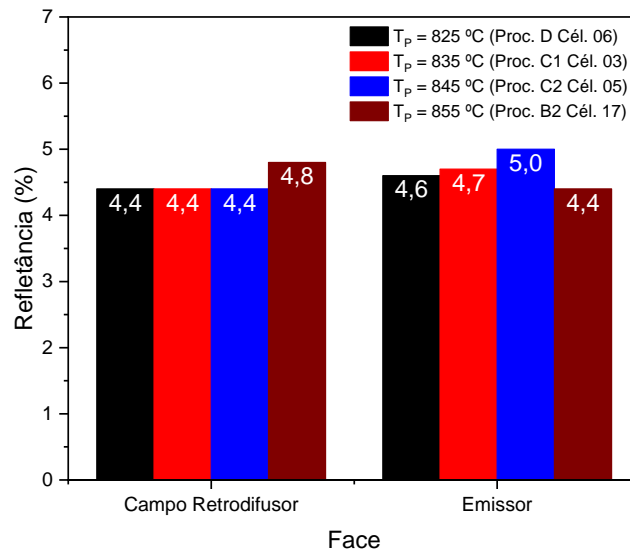


Figura 4.19. Refletância média para as superfícies do emissor e campo retrodifusor na temperatura de difusão de boro a 990 °C.

4.2.5. Temperatura de Difusão de Boro de 1.000 °C

Os parâmetros elétricos das células solares com difusão de boro na temperatura de 1.000 °C são mostrados na Tabela 4.16. Com o aumento da T_B a eficiência no emissor diminuiu. Embora o fator de forma médio tenha aumentado um pouco, mas a J_{SC} diminuiu. A eficiência média foi de 14,8 % independente da temperatura de difusão de fósforo. Na face com o BSF a eficiência média também diminuiu e o valor foi de 15,8 % – 15,9 %. Com a maior T_B avaliada obteve-se o maior fator de forma, de 0,76 – 0,77 e o menor desvio padrão na eficiência, tanto para iluminação pela face com o emissor quanto pela face com o BSF. Portanto, a eficiência média ponderada foi de 15,6 % – 15,7 % para as duas temperaturas de difusão de fósforo, como mostra a Tabela 4.17.

Tabela 4.16. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais desenvolvidas em função da temperatura de difusão de fósforo para a temperatura de difusão de boro de 1.000 °C. Oxidação para passivação com temperatura de oxidação de 800 °C durante 45 min.

Iluminação pelo Emissor p ⁺ n Face Dopada com Boro								
Proc.	Quantidade de Células	T _P (°C)	R _{□B} (Ω/□)	Cél.	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF	η _B (%)
D1	4	835	36 ± 3	9	32,5	604,1	0,754	14,8
				10	32,4	604,0	0,750	14,7
				11	32,3	603,8	0,768	15,0
				12	32,5	602,0	0,755	14,8
Média					32,43 ± 0,10	603,48 ± 0,99	0,757 ± 0,008	14,83 ± 0,13
D2	4	845	33 ± 1	13	32,4	603,8	0,76	14,8
				14	32,6	604,6	0,761	15,0
				15	32,4	604,0	0,760	14,9
				16	31,7	602,9	0,767	14,7
Média					32,28 ± 0,39	603,83 ± 0,70	0,762 ± 0,003	14,85 ± 0,13
Iluminação pelo Campo Retrodifusor nn ⁺ Face Dopada com Fósforo								
Proc.	Quantidade de Células	T _P (°C)	R _{□B} (Ω/□)	Cél.	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF	η _B (%)
D1	4	835	36 ± 3	9	34,9	604,7	0,756	15,9
				10	34,8	604,6	0,763	16,1
				11	33,7	603,7	0,764	15,6
				12	34,2	601,7	0,762	15,7
Média					34,40 ± 0,56	603,68 ± 1,39	0,761 ± 0,004	15,83 ± 0,22
D2	4	845	33 ± 1	13	34,5	604,0	0,764	15,9
				14	34,3	604,8	0,766	15,9
				15	34,7	604,3	0,762	16,0
				16	34,0	602,1	0,770	15,8
Média					34,38 ± 0,30	603,80 ± 1,18	0,766 ± 0,003	15,90 ± 0,08

Tabela 4.17. Eficiência das células solares medidas com iluminação no emissor e no campo retrodifusor processadas com a temperatura de difusão de boro de 1.000 °C em função da temperatura de difusão de fósforo e eficiência média ponderada das células solares bifaciais.

			Emissor p ⁺ n Face Dopada com Boro		Campo Retrodifusor nn ⁺ Face Dopada com Fósforo		Média Ponderada
Proc.	T _P (°C)	Cél.	η _B (%)	η _P (%)	η _P (%)	η _w (%)	
D1	835	9	14,8		15,9	15,8	
		10	14,7		16,1	15,8	
		11	15,0		15,6	15,5	
		12	14,8		15,7	15,5	
Média			14,83 ± 0,13		15,82 ± 0,23	15,65 ± 0,17	
D2	845	13	14,8		15,9	15,7	
		14	15,0		15,9	15,7	
		15	14,9		16,0	15,8	
		16	14,7		15,8	15,6	
Média			14,85 ± 0,13		15,90 ± 0,08	15,70 ± 0,08	

As curvas J-V das células solares com maior eficiência são representadas na Figura 4.20 e confirmam a similaridade dos parâmetros elétricos, independente da temperatura de difusão de fósforo, principalmente na face com o emissor. Este resultado deve-se ao emissor de boro profundo.

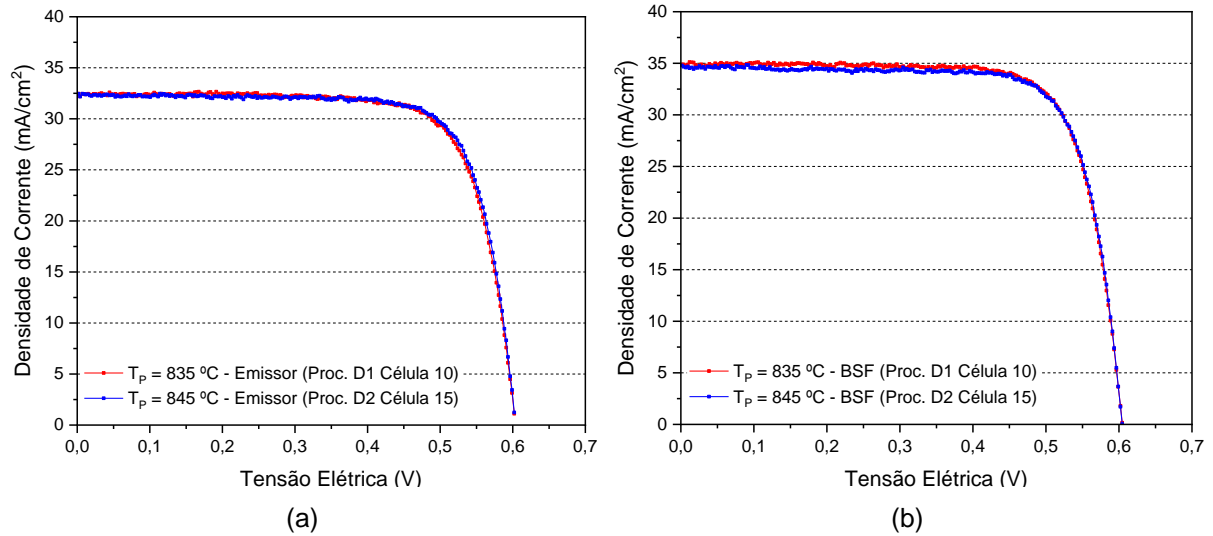


Figura 4.20. Densidade de corrente elétrica em função da tensão elétrica das células solares bifaciais com maior eficiência para diferentes temperaturas de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 1.000 °C medida na (a) face do emissor e na (b) face do campo retrodifusor (BSF).

A refletância e a eficiência quântica interna das células solares são mostradas na Figura 4.21 e Figura 4.22. Ao contrário dos casos anteriores, verifica-se uma maior variação da refletância na face do emissor, que pode estar associada com a não uniformidade do filme AR. Neste caso, a maior refletância média ponderada, de 7,4 %, ocorreu na face com o emissor e $T_p = 845$ °C, como se pode ver na Tabela 4.18 e Figura 4.23.

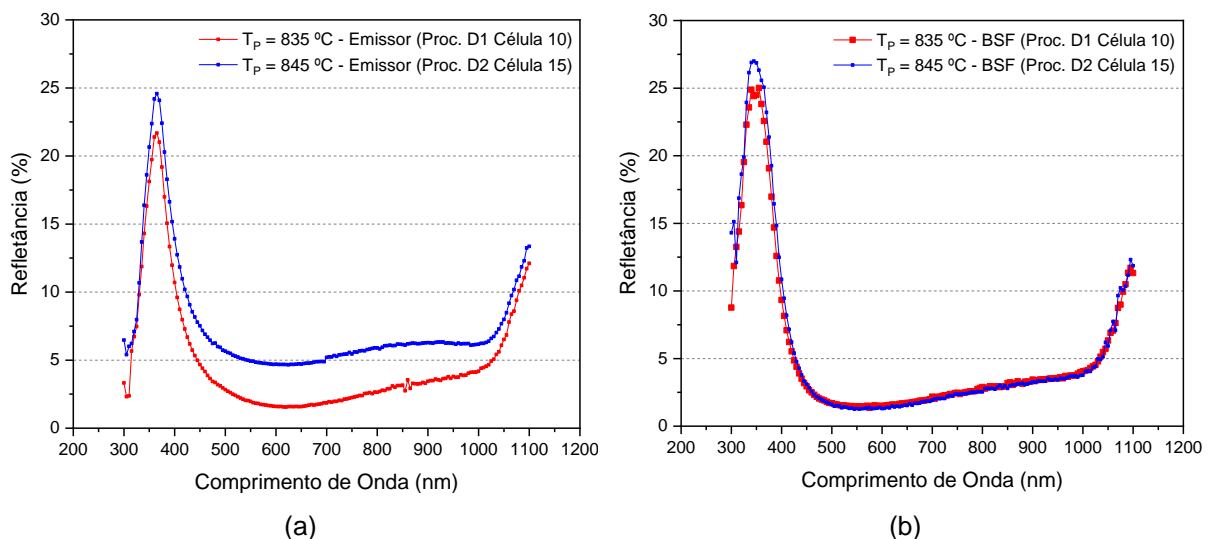


Figura 4.21. Refletância das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão de fósforo e $T_B = 1.000$ °C, medida na (a) face do emissor e (b) face do campo retrodifusor (BSF).

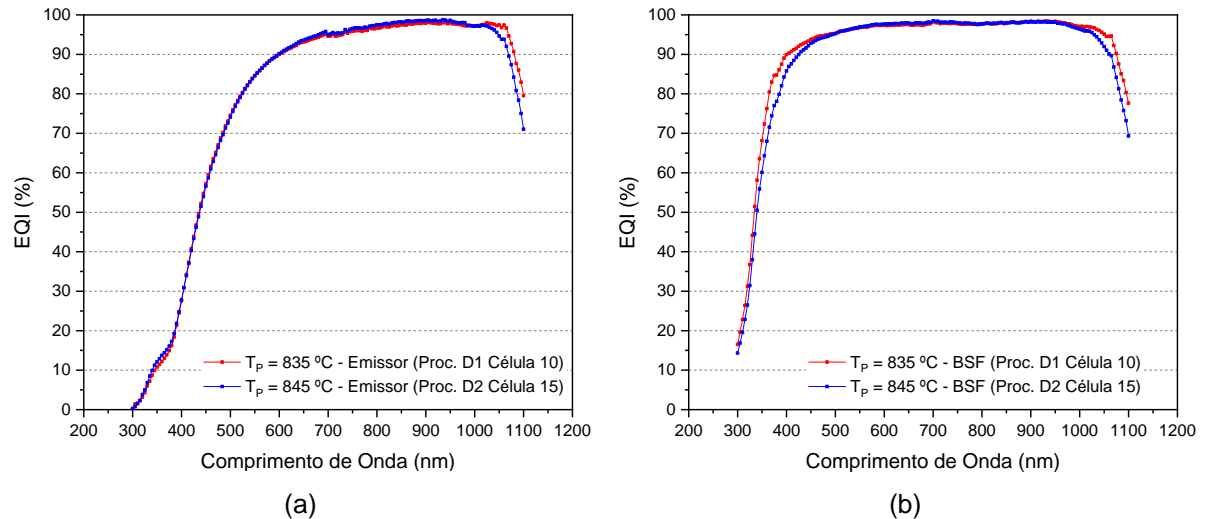


Figura 4.22. Eficiência quântica interna das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferente temperatura de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 1.000 °C medida com iluminação na (a) face com o emissor e (b) face com o campo retrodifusor (BSF).

Da comparação da eficiência quântica interna, da mesma forma que nos casos anteriores, observa-se que quando o dispositivo é iluminado pela face do campo retrodifusor, a EQI é maior para a célula solar processada com $T_p = 835\text{ °C}$ em comprimentos de onda mais curtos, próximos de 400 nm.

Tabela 4.18. Refletância média ponderada para a superfície com o emissor e com o campo retrodifusor das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão de fósforo e temperatura de difusão de boro de 1.000 °C.

Proc.	Cél.	Face	Refletância Ponderada Média (%)
D1	10	Campo retrodifusor nn^+	4,2
		Emissor p^+n	5,2
D2	15	Campo retrodifusor nn^+	4,5
		Emissor p^+n	7,4

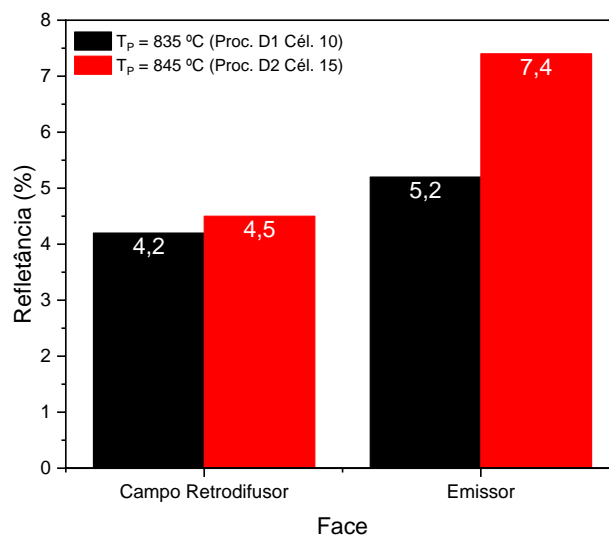


Figura 4.23. Refletância média para as superfícies do emissor e campo retrodifusor na temperatura de difusão de boro de 1.000 °C.

4.3. Avaliação da Temperatura de Difusão de Fósforo

4.3.1. Temperatura de Difusão de Fósforo de 835 °C

Manteve-se fixa a temperatura a difusão de fósforo em 835 °C e variou-se a temperatura de boro. Os resultados são apresentados na Tabela 4.19. Novamente, destacam-se os parâmetros elétricos das células solares com maior eficiência para cada T_B .

Em ambas as faces, a maior eficiência média ocorre para a temperatura de difusão de boro de 990 °C. O valor foi de 15,4 % e 16,3 % e, conforme indica a Tabela 4.20, a eficiência média ponderada foi de 16,1 %. Da Tabela 4.19, nota-se que se a T_B for aumentada para 1.000 °C, a J_{SC} cai, reduzindo a eficiência. Por outro lado, o aumento da T_B até 990 °C provoca o aumento do FF.

A célula solar com maior eficiência foi processada com a temperatura de difusão de boro de 990 °C e T_P de 835 °C. Para verificar se a redução da temperatura de difusão de fósforo aumenta a eficiência dos dispositivos bifaciais, foram processadas células solares com T_P de 825 °C.

Na Tabela 4.21 apresentam-se os parâmetros elétricos e na Tabela 4.22 mostram a eficiência média ponderada. Comparando a eficiência média do emissor mostrada na Tabela 4.21 com o resultado da Tabela 4.22 para T_B de 990 °C, constata-se que a eficiência diminuiu de 15,9 % para 14,6 %. O resultado foi similar a face com o BSF e a eficiência média caiu de 16,3 % para 15,7 %, reduzindo a eficiência média ponderada.

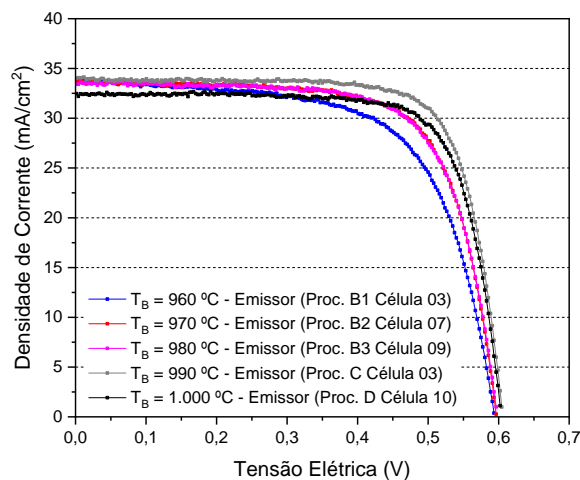
Na Figura 4.24 comparam-se as curvas J-V das células solares destacadas na Tabela 4.19, onde se pode confirmar o aumento do fator de forma com o aumento de T_B , que provoca a redução na resistência em série. Este resultado é observado na curva J-V medida com iluminação na face do emissor e do campo retrodifusor. Também se nota que a melhor eficiência foi obtida com $T_B = 990$ °C, tanto para a face com o emissor quanto para a face com o campo retrodifusor.

Tabela 4.19. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais desenvolvidas em função da temperatura de difusão de boro para a temperatura de difusão de fósforo de 835 °C. Oxidação para passivação com temperatura de oxidação de 800 °C durante 45 min.

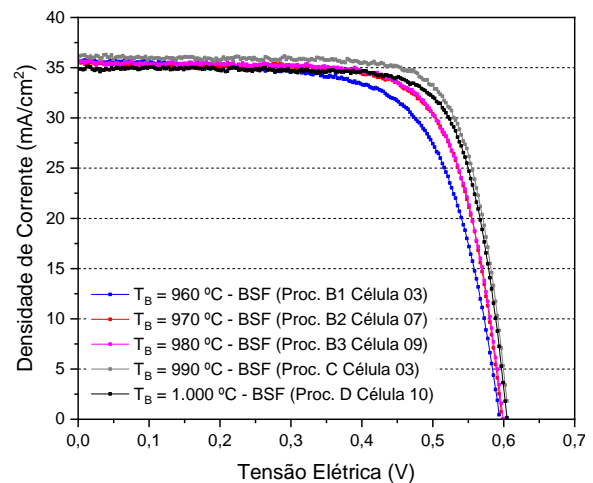
Iluminação pelo Emissor p ⁺ n Face Dopada com Boro								
Proc.	Quantidade de Células	T _P (°C)	R _{□B} (Ω/□)	Cél	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF	η _B (%)
B1	2	960	94 ± 6	2	34,3	594,8	0,640	13,1
				3	33,9	594,3	0,642	12,9
Média					34,10 ± 0,28	594,55 ± 0,35	0,641 ± 0,001	13,00 ± 0,14
B2	4	970	88 ± 5	5	33,4	596,5	0,697	13,9
				6	33,8	596,0	0,671	13,5
				7	33,7	597,2	0,703	14,2
				8	33,6	598,7	0,701	14,1
Média					33,63 ± 0,17	597,10 ± 1,17	0,693 ± 0,015	13,93 ± 0,31
B3	4	980	89 ± 6	9	33,5	598,6	0,704	14,1
				10	33,4	597,1	0,697	13,9
				11	33,1	598,1	0,705	14,0
				12	33,8	595,0	0,701	14,1
Média					33,45 ± 0,29	597,20 ± 1,59	0,702 ± 0,004	14,03 ± 0,10
C	3	990	86 ± 5	1	34,0	602,4	0,751	15,4
				3	34,1	606,0	0,750	15,5
				4	33,8	604,4	0,753	15,4
Média					33,97 ± 0,15	604,27 ± 1,80	0,751 ± 0,002	15,43 ± 0,06
D	4	1.000	82 ± 4	9	32,5	604,1	0,754	14,8
				10	32,4	604,0	0,750	14,7
				11	32,3	603,8	0,768	15,0
				12	32,5	602,0	0,755	14,8
Média					32,43 ± 0,10	603,48 ± 0,99	0,757 ± 0,008	14,83 ± 0,13
Iluminação pelo Campo Retrodifusor nn ⁺ Face Dopada com Fósforo								
Proc.	Quantidade de Células	T _P (°C)	R _{□B} (Ω/□)	Cél	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF	η _B (%)
B1	2	960	94 ± 6	2	36,1	594,9	0,666	14,3
				3	35,6	594,5	0,676	14,3
Média					35,85 ± 0,35	594,70 ± 0,28	0,671 ± 0,007	14,30 ± 0,00
B2	4	970	88 ± 5	5	35,5	597,1	0,725	15,4
				6	35,5	596,7	0,700	14,8
				7	35,5	597,6	0,722	15,3
				8	35,7	599,2	0,712	15,2
Média					35,55 ± 0,10	597,65 ± 1,10	0,715 ± 0,011	15,18 ± 0,26
B3	4	980	89 ± 6	9	35,5	599,2	0,725	15,4
				10	35,4	597,8	0,719	15,2
				11	35,5	598,7	0,721	15,3
				12	34,6	593,5	0,709	14,6
Média					35,25 ± 0,44	597,30 ± 2,60	0,719 ± 0,007	15,13 ± 0,36
C	3	990	86 ± 5	1	35,6	602,2	0,745	16,0
				3	36,2	607,0	0,755	16,6
				4	35,7	605,0	0,755	16,3
Média					35,83 ± 0,32	604,73 ± 2,41	0,752 ± 0,006	16,30 ± 0,30
D	4	1.000	82 ± 4	9	34,9	604,7	0,756	15,9
				10	34,8	604,6	0,763	16,1
				11	33,7	603,7	0,764	15,6
				12	34,2	601,7	0,762	15,7
Média					34,40 ± 0,56	603,68 ± 1,39	0,761 ± 0,004	15,83 ± 0,22

Tabela 4.20. Eficiência das células solares medidas com iluminação no emissor e no campo retrodifusor processadas com a temperatura de difusão de fósforo de 835 °C em função da temperatura de difusão de boro e eficiência média ponderada das células solares bifaciais.

			Emissor p ⁺ n Face Dopada com Boro	Campo Retrodifusor nn ⁺ Face Dopada com Fósforo	Média Ponderada
Proc.	T _B (°C)	Cél.	η _B (%)	η _P (%)	η _w (%)
B1	960	2	13,1	14,3	14,1
		3	12,9	14,3	14,1
		Média	13,00 ± 0,14	14,30 ± 0,00	14,10 ± 0,00
B2	970	5	13,9	15,4	15,1
		6	13,5	14,8	14,6
		7	14,2	15,3	15,1
		8	14,1	15,2	15,0
Média	13,93 ± 0,31	15,18 ± 0,26	14,95 ± 0,24		
B3	980	9	14,1	15,4	15,2
		10	13,9	15,2	15,0
		11	14,0	15,3	15,1
		12	14,1	14,6	14,5
Média	14,03 ± 0,10	15,13 ± 0,36	14,95 ± 0,31		
C	990	1	15,4	16,0	15,7
		3	15,5	16,6	16,4
		4	15,4	16,3	16,2
Média	15,43 ± 0,06	16,30 ± 0,30	16,10 ± 0,36		
D	1.000	9	14,8	15,9	15,8
		10	14,7	16,1	15,8
		11	15,0	15,6	15,5
		12	14,8	15,7	15,5
Média	14,83 ± 0,13	15,83 ± 0,22	15,65 ± 0,17		



(a)



(b)

Figura 4.24. Densidade de corrente elétrica em função da tensão das células solares bifaciais com maior eficiência para diferentes temperaturas de difusão de boro e temperatura de difusão de fósforo a 835 °C medida na (a) face do emissor e na (b) face do campo retrodifusor (BSF).

A refletância dos dispositivos com maior eficiência é mostrada na Figura 4.25. Nota-se que a refletância é similar para todos os dispositivos, porém a refletância na face como o emissor possui o mínimo próximo de 600 nm, enquanto que na face com o BSF, o mínimo ocorre em 500 – 550 nm. Este resultado deve-se a otimização do filme AR, considerando a resposta espectral em cada face (Zanescio e

Moehlecke, 2016). Na Figura 4.25 também observa-se que a refletância aumenta a partir de comprimentos de onda de aproximadamente 1.050 nm.

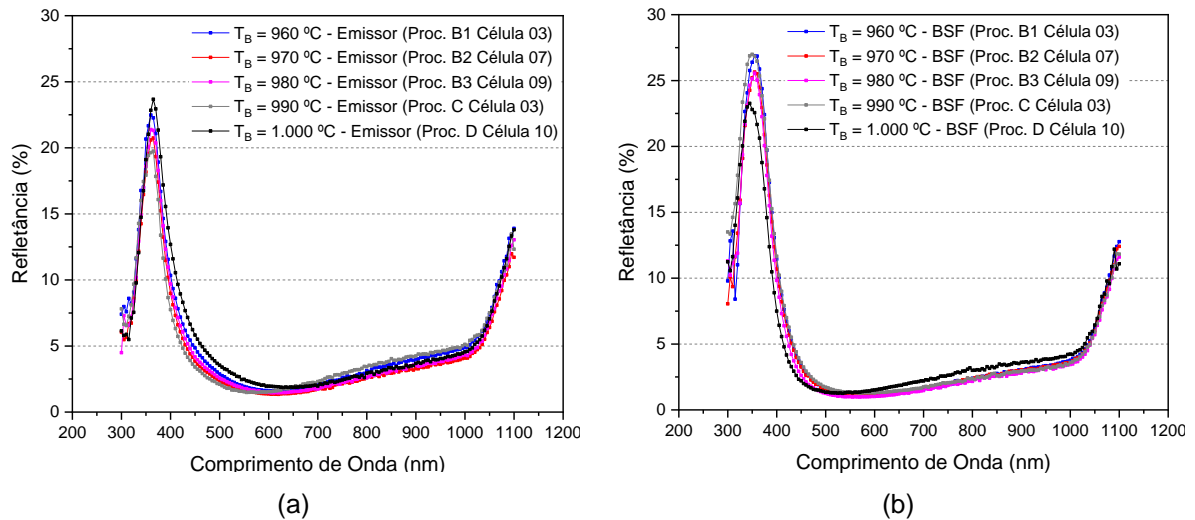


Figura 4.25. Refletância das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão e $T_P = 835 \text{ }^\circ\text{C}$, medida na (a) face do emissor e na (b) face do campo retrodifusor (BSF).

A eficiência quântica interna é comparada na Figura 4.26. Na face com o emissor (Figura 4.26-a), a EQI diminui com o aumento da temperatura de difusão de boro para comprimentos de onda (λ) menores que 600 nm. Também se observa que para λ maiores que este valor, os dispositivos processados com a maior T_B apresentam menor EQI, indicando que o aumento desta temperatura diminui o tempo de vida dos minoritários na base. O mesmo resultado é observado para a EQI associada ao BSF para λ próximos a 400 nm: o aumento da T_B diminui a EQI.

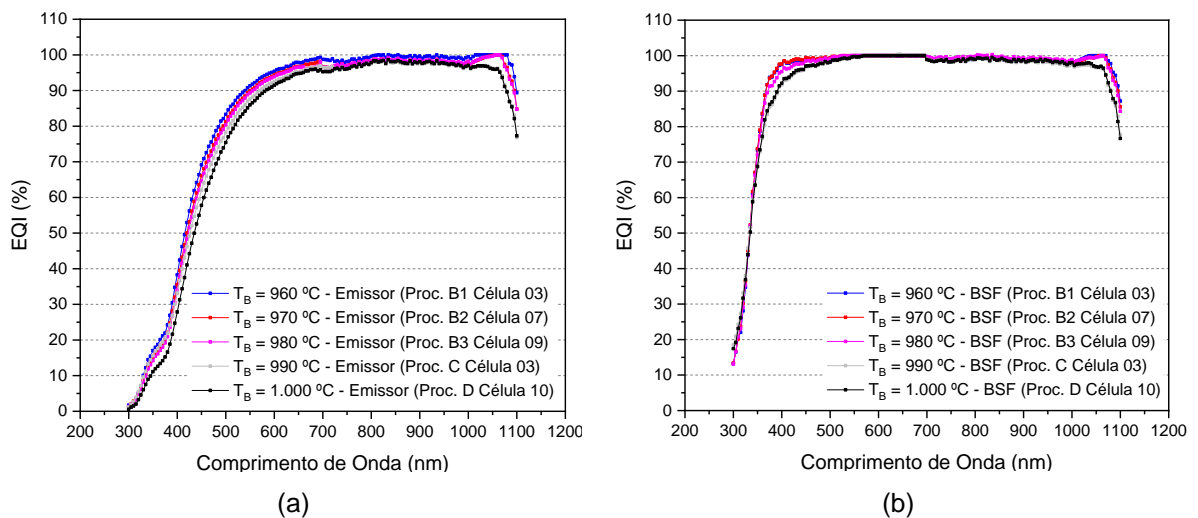


Figura 4.26. Eficiência quântica interna das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferente temperatura de difusão de boro e temperatura de difusão de fósforo de $835 \text{ }^\circ\text{C}$ medida com iluminação na (a) face com o emissor e na (b) face com o campo retrodifusor (BSF).

Tabela 4.21. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais desenvolvidas em função da temperatura de difusão de boro para a temperatura de difusão de fósforo de 825 °C. Oxidação para passivação com temperatura de oxidação de 800 °C durante 45 min.

Iluminação pelo Emissor p ⁺ n Face Dopada com Boro								
Proc.	Quantidade de Células	T _P (°C)	R _{□B} (Ω/□)	Cél	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF	η _B (%)
D	4	990	81 ± 4	5	33,0	601,9	0,738	14,6
				6	33,0	603,4	0,730	14,5
				7	32,8	601,7	0,741	14,6
				8	32,2	601,4	0,744	14,4
Média					32,75 ± 0,38	602,10 ± 0,89	0,738 ± 0,006	14,53 ± 0,10
Iluminação pelo Campo Retrodifusor nn ⁺ Face Dopada com Fósforo								
Proc.	Quantidade de Células	T _P (°C)	R _{□B} (Ω/□)	Cél	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF	η _B (%)
D	4	990	81 ± 4	5	35,3	602,6	0,742	15,8
				6	35,2	604,3	0,749	15,9
				7	34,1	601,7	0,742	15,2
				8	35,2	601,9	0,744	15,8
Média					34,95 ± 0,57	602,63 ± 1,18	0,744 ± 0,003	15,68 ± 0,32

Tabela 4.22. Eficiência das células solares medidas com iluminação no emissor e no campo retrodifusor processadas com a temperatura de difusão de fósforo de 825 °C em função da temperatura de difusão de boro e eficiência média ponderada das células solares bifaciais.

			Emissor p ⁺ n Face Dopada com Boro	Campo Retrodifusor nn ⁺ Face Dopada com Fósforo	Média Ponderada
Proc.	T _B (°C)	Cél.	η _B (%)	η _P (%)	η _w (%)
D	990	5	14,6	15,8	15,6
		6	14,5	15,9	15,7
		7	14,6	15,2	15,1
		8	14,4	15,8	15,5
Média			14,53 ± 0,10	15,68 ± 0,32	15,48 ± 0,26

4.3.2. Temperatura de Difusão de Fósforo de 845 °C

A Tabela 4.23 apresenta os valores dos parâmetros elétricos das células solares desenvolvidas na temperatura de 845°C para a difusão de fósforo em função da temperatura de difusão de boro.

Na face com o emissor, a maior eficiência média, de 14,9 %, foi obtida com T_B = 990 °C, porém o valor foi próximo do obtido com T_B = 1.000 °C. Na face com o BSF, a eficiência média de 15,9 % foi obtida com T_B = 1.000 °C e este valor é somente 0,1 % (absoluto) maior que a eficiência para T_B = 900 °C.

Tabela 4.23. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais desenvolvidas em função da temperatura de difusão de boro para a temperatura de difusão de fósforo de 845 °C. Oxidação para passivação com temperatura de oxidação de 800 °C durante 45 min.

Iluminação pelo Emissor p ⁺ n Face Dopada com Boro								
Proc.	Quantidade de Células	T _P (°C)	R _{□B} (Ω/□)	Cél	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF	η _B (%)
A1	2	960	94 ± 6	2	34,0	591,5	0,722	14,5
				3	33,2	591,6	0,724	14,2
Média					33,60 ± 0,57	591,55 ± 0,07	0,723 ± 0,001	14,35 ± 0,21
A2	3	970	66 ± 3	7	32,9	594,3	0,730	14,4
				8	33,3	594,6	0,723	14,3
				9	32,9	595,4	0,733	14,4
Média					33,04 ± 0,23	594,76 ± 0,55	0,729 ± 0,005	14,37 ± 0,06
A3	4	980	65 ± 3	13	33,0	599,1	0,739	14,6
				14	32,9	598,7	0,742	14,6
				15	32,9	600,0	0,738	14,6
				16	32,9	598,9	0,740	14,6
Média					32,93 ± 0,05	599,18 ± 0,57	0,740 ± 0,002	14,60 ± 0,00
B	4	990	75 ± 4	13	33,5	600,7	0,719	14,5
				16	33,2	599,2	0,734	14,6
C				5	33,4	606,2	0,762	15,5
				6	33,8	603,4	0,755	15,4
Média					33,48 ± 0,25	602,38 ± 3,09	0,743 ± 0,020	15,00 ± 0,52
D	4	1.000	33 ± 1	13	32,4	603,8	0,760	14,8
				14	32,6	604,6	0,761	15,0
				15	32,4	604,0	0,760	14,9
				16	31,7	602,9	0,767	14,7
Média					32,28 ± 0,39	603,83 ± 0,70	0,762 ± 0,003	14,85 ± 0,13
Iluminação pelo Campo Retrodifusor nn ⁺ Face Dopada com Fósforo								
Proc.	Quantidade de Células	T _P (°C)	R _{□B} (Ω/□)	Cél	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF	η _B (%)
A1	2	960	94 ± 6	2	34,2	589,6	0,726	14,6
				3	34,2	591,6	0,727	14,7
Média					34,20 ± 0,00	590,60 ± 1,41	0,727 ± 0,001	14,65 ± 0,07
A2	3	970	66 ± 3	7	34,6	594,6	0,731	15,0
				8	34,2	594,4	0,742	15,1
				9	34,6	595,3	0,737	15,2
Média					34,45 ± 0,22	594,77 ± 0,47	0,737 ± 0,006	15,10 ± 0,10
A3	4	980	65 ± 3	13	34,6	598,8	0,743	15,4
				14	34,7	598,5	0,739	15,4
				15	34,7	600,2	0,744	15,5
				16	34,4	598,6	0,749	15,4
Média					34,60 ± 0,14	599,03 ± 0,79	0,744 ± 0,004	15,43 ± 0,05
B	4	990	75 ± 4	13	34,7	600,3	0,746	15,6
				16	34,2	598,5	0,744	15,3
C				5	35,5	606,8	0,764	16,5
				6	35,1	603,0	0,758	16,0
Média					34,88 ± 0,56	602,15 ± 3,61	0,753 ± 0,010	15,85 ± 0,52
D	4	1.000	33 ± 1	13	34,5	604,0	0,764	15,9
				14	34,3	604,8	0,766	15,9
				15	34,7	604,3	0,762	16,0
				16	34,0	602,1	0,770	15,8
Média					34,38 ± 0,30	603,80 ± 1,18	0,766 ± 0,003	15,90 ± 0,08

A eficiência média diminuiu com o aumento da temperatura de difusão de fósforo, em ambas as faces, devido principalmente a redução no fator de forma, porém todos os parâmetros elétricos diminuíram. Na face com o campo retrodifusor, e $T_B = 990 \text{ }^\circ\text{C}$, a redução na eficiência média foi provocada pela redução da J_{SC} e V_{OC} . Consequentemente, a eficiência média ponderada das células solares bifaciais caiu de 16,1 % para 15,7 %, como mostra a Tabela 4.24.

Tabela 4.24. Eficiência das células solares medidas com iluminação no emissor e no campo retrodifusor processadas com a temperatura de difusão de fósforo de $845 \text{ }^\circ\text{C}$ em função da temperatura de difusão de boro e eficiência média ponderada das células solares bifaciais.

			Emissor p ⁺ n Face Dopada com Boro	Campo Retrodifusor nn ⁺ Face Dopada com Fósforo	Média Ponderada
Proc.	T _B (°C)	Cél.	η _B (%)	η _P (%)	η _w (%)
A1	960	2	14,5	14,6	14,6
		3	14,2	14,7	14,6
		Média	14,35 ± 0,21	14,65 ± 0,07	14,60 ± 0,00
A2	970	7	14,4	15,0	14,9
		8	14,3	15,1	14,9
		9	14,4	15,2	15,0
Média	14,37 ± 0,06	15,10 ± 0,10	14,93 ± 0,06		
A3	980	13	14,6	15,4	15,3
		14	14,6	15,4	15,2
		15	14,6	15,5	15,3
		16	14,6	15,4	15,3
Média	14,60 ± 0,00	15,43 ± 0,05	15,28 ± 0,05		
B	990	13	14,5	15,6	15,4
		16	14,6	15,3	15,1
C	990	5	15,5	16,5	16,3
		6	15,4	16,0	15,9
Média	15,00 ± 0,52	15,85 ± 0,52	15,68 ± 0,53		
D	1.000	13	14,8	15,9	15,7
		14	15,0	15,9	15,7
		15	14,9	16,0	15,8
		16	14,7	15,8	15,6
Média	14,85 ± 0,13	15,90 ± 0,08	15,70 ± 0,08		

A Figura 4.27 apresenta as curvas J-V das células solares para cada T_B avaliada. Como no caso de $T_P = 835 \text{ }^\circ\text{C}$, verifica-se que o aumento da temperatura de difusão de boro aumenta o fator de forma e que, para esta T_P , a célula solar com a maior eficiência foi processada com $T_B = 990 \text{ }^\circ\text{C}$.

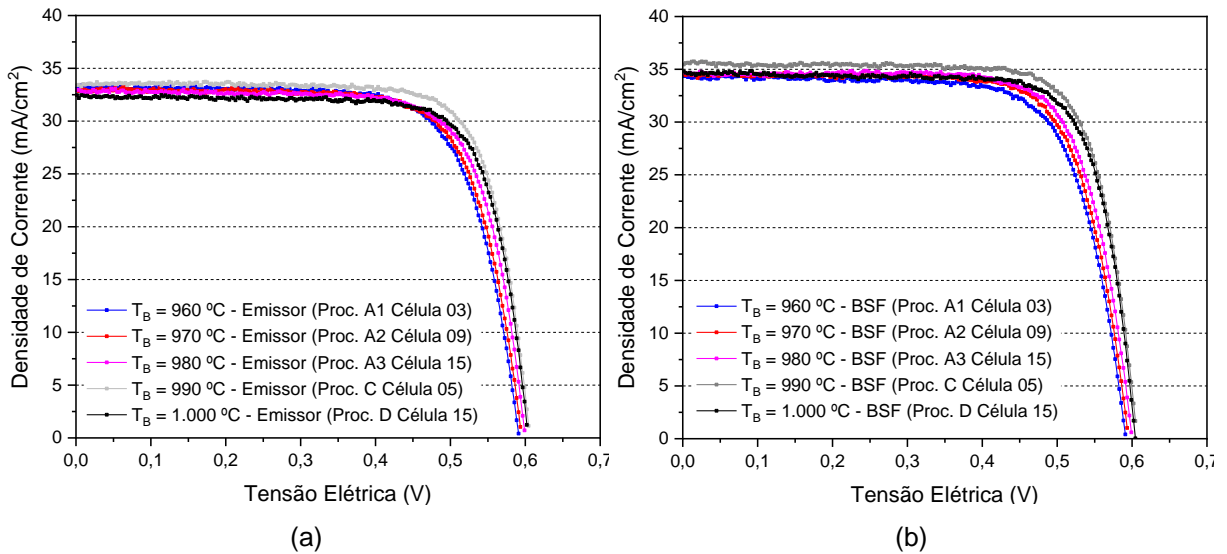


Figura 4.27. Densidade de corrente elétrica em função da tensão das células solares bifaciais com maior eficiência para diferentes temperaturas de difusão de boro e temperatura de difusão de fósforo de 845 °C medida na (a) face do emissor e na (b) face do campo retrodifusor (BSF).

Na Figura 4.28 mostra-se a refletância das células solares processadas com $T_P = 845$ °C. Com exceção da refletância do dispositivo processado a 1.000 °C, a refletância é uniforme. Da mesma forma que no caso anterior, o mínimo da refletância ocorre em menores comprimentos de onda no campo retrodifusor.

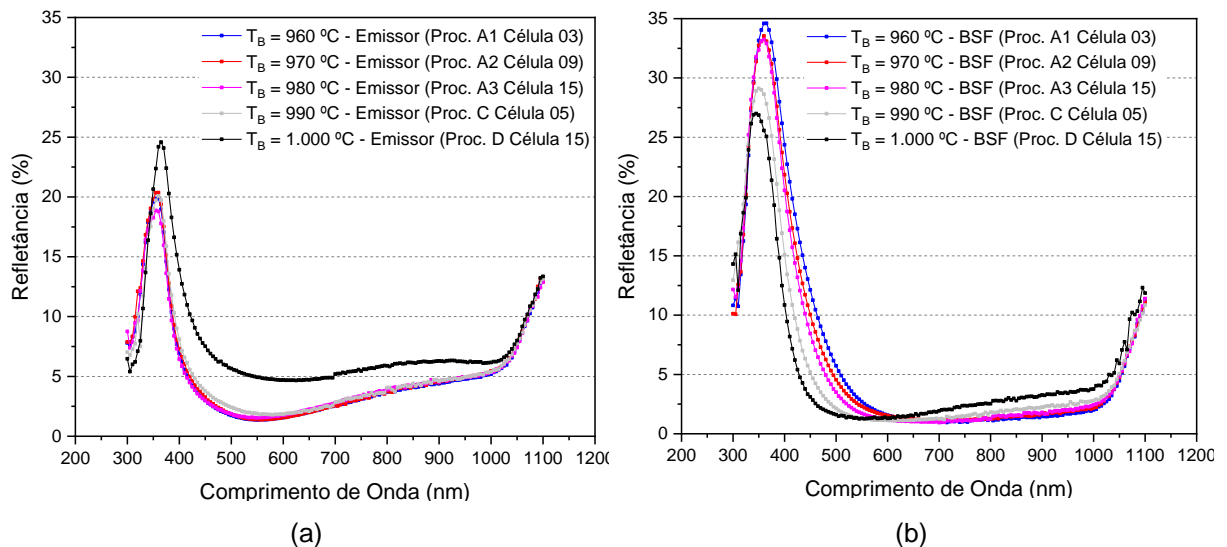


Figura 4.28. Refletância das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão e $T_P = 845$ °C, medida na (a) face do emissor e na (b) face do campo retrodifusor (BSF).

A eficiência quântica interna apresentada na Figura 4.29 confirma os resultados obtidos para $T_P = 835$ °C. No emissor, o aumento da T_B reduz a EQI em

comprimentos de onda curtos. Porém, quando a EQI é medida com iluminação na face com o BSF, o comportamento é contrário ao observado na Figura 4.26.

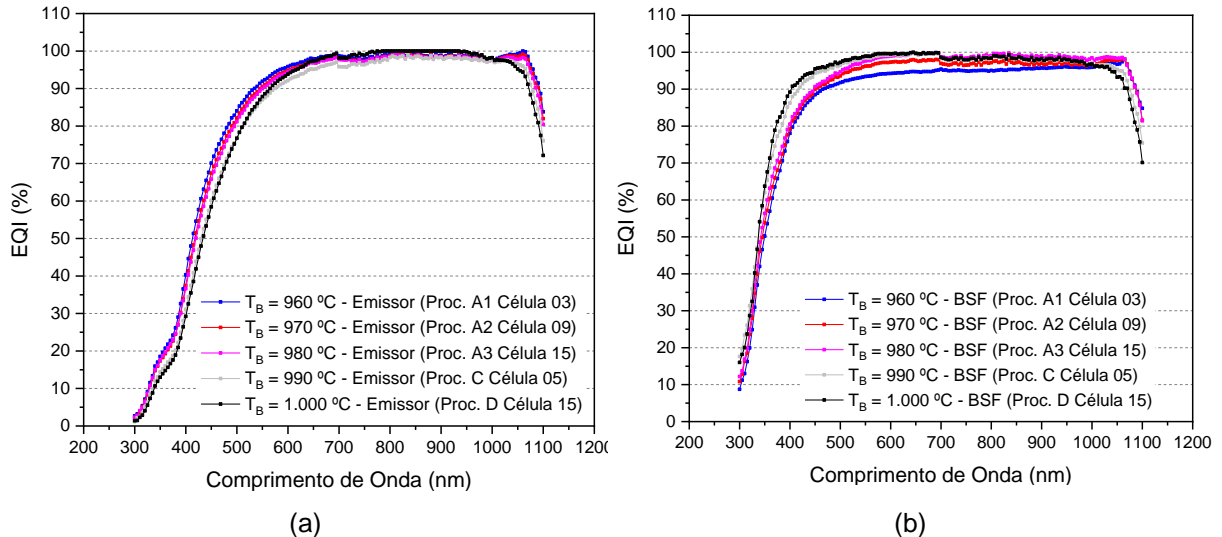


Figura 4.29. Eficiência quântica interna das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferente temperatura de difusão de boro e temperatura de difusão de fósforo de 845 °C medida com iluminação na (a) face com o emissor e na (b) face com o campo retrodifusor (BSF).

4.3.3. Temperatura de Difusão de Fósforo de 855 °C

As células solares em que o fósforo foi difundido na temperatura de 855 °C passaram pela difusão de boro em quatro distintas temperaturas. A Tabela 4.25 apresenta os parâmetros elétricos destes dispositivos fotovoltaicos e a Tabela 4.26 mostra a eficiência média ponderada.

Na face com o emissor, a maior eficiência média foi obtida para a T_B de 970 °C e 990 °C e na face do campo retrodifusor o melhor resultado foi obtido em 990 °C. No entanto, com o aumento da temperatura de difusão de fósforo, a eficiência média ponderada diminuiu. Da Tabela 4.26, para a T_P de 855 °C, conclui-se que a η_w foi de 15,0 %.

Tabela 4.25. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais desenvolvidas em função da temperatura de difusão de boro para a temperatura de difusão de fósforo de 855 °C. Oxidação para passivação com temperatura de oxidação de 800 °C durante 45 min.

Iluminação pelo Emissor p ⁺ n Face Dopada com Boro								
Proc.	Quantidade de Células	T _P (°C)	R _{□B} (Ω/□)	Cél	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF	η _B (%)
A1	3	960	57 ± 2	4	33,4	591,1	0,723	14,3
				5	33,7	592,5	0,717	14,3
				6	33,3	592,8	0,723	14,3
Média					33,47 ± 0,21	592,13 ± 0,91	0,721 ± 0,003	14,30 ± 0,00
A2	3	970	54 ± 2	10	32,9	595,3	0,741	14,5
				11	32,6	596,6	0,739	14,4
				12	32,7	596,6	0,742	14,5
Média					32,73 ± 0,15	596,17 ± 0,75	0,741 ± 0,002	14,47 ± 0,06
A3	2	980	54 ± 3	17	32,8	593,4	0,723	14,1
				18	32,9	591,2	0,734	14,3
Média					32,85 ± 0,07	592,30 ± 1,56	0,729 ± 0,008	14,20 ± 0,14
B	2	990	56 ± 3	17	33,0	601,2	0,709	14,1
				18	33,1	599,3	0,742	14,7
Média					33,05 ± 0,07	600,25 ± 1,34	0,726 ± 0,023	14,40 ± 0,42
Iluminação pelo Campo Retrodifusor nn ⁺ Face Dopada com Fósforo								
Proc.	Quantidade de Células	T _P (°C)	R _{□B} (Ω/□)	Cél	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF	η _B (%)
A1	3	960	57 ± 2	4	33,9	590,4	0,732	14,6
				5	33,9	591,5	0,727	14,6
				6	33,9	591,9	0,729	14,6
Média					33,90 ± 0,00	591,27 ± 0,78	0,729 ± 0,003	14,60 ± 0,00
A2	3	970	54 ± 2	10	34,0	595,0	0,745	15,1
				11	33,9	596,2	0,735	14,7
				12	34,3	596,3	0,729	14,9
Média					34,07 ± 0,21	595,83 ± 0,72	0,736 ± 0,008	14,90 ± 0,20
A3	2	980	54 ± 3	17	33,9	593,1	0,733	14,8
				18	33,4	589,7	0,736	14,5
Média					33,65 ± 0,35	591,40 ± 2,40	0,735 ± 0,002	14,65 ± 0,21
B	2	990	56 ± 3	17	34,5	600,8	0,731	15,2
				18	33,9	598,4	0,748	15,2
Média					34,20 ± 0,42	599,60 ± 1,70	0,740 ± 0,012	15,20 ± 0,00

Tabela 4.26. Eficiência das células solares medidas com iluminação no emissor e no campo retrodifusor processadas com a temperatura de difusão de fósforo de 855 °C em função da temperatura de difusão de boro e eficiência média ponderada das células solares bifaciais.

			Emissor p ⁺ n Face Dopada com Boro	Campo Retrodifusor nn ⁺ Face Dopada com Fósforo	Média Ponderada
Proc.	T _B (°C)	Cél.	η _B (%)	η _P (%)	η _w
A1	960	4	14,3	14,6	14,6
		5	14,3	14,6	14,5
		6	14,3	14,6	14,6
Média			14,30 ± 0,00	14,60 ± 0,00	14,57 ± 0,06
A2	970	10	14,5	15,1	15,0
		11	14,4	14,9	14,8
		12	14,5	14,9	14,9
Média			14,47 ± 0,06	14,97 ± 0,12	14,90 ± 0,10
A3	980	17	14,1	14,8	14,6
		18	14,3	14,5	14,5
Média			14,20 ± 0,14	14,65 ± 0,21	14,55 ± 0,07
B	990	17	14,1	15,2	15,0
		18	14,7	15,2	15,1
Média			14,40 ± 0,42	15,20 ± 0,00	15,05 ± 0,07

Ao contrário do observado nas Figuras 4.24 ($T_P = 835 \text{ }^\circ\text{C}$) e 4.27 ($T_P = 845 \text{ }^\circ\text{C}$), na Figura 4.30 verifica-se que para os dispositivos processados com temperatura de difusão de fósforo de $855 \text{ }^\circ\text{C}$, os parâmetros elétricos são similares, para os dispositivos medidos com iluminação na face com o emissor e com o campo retrodifusor.

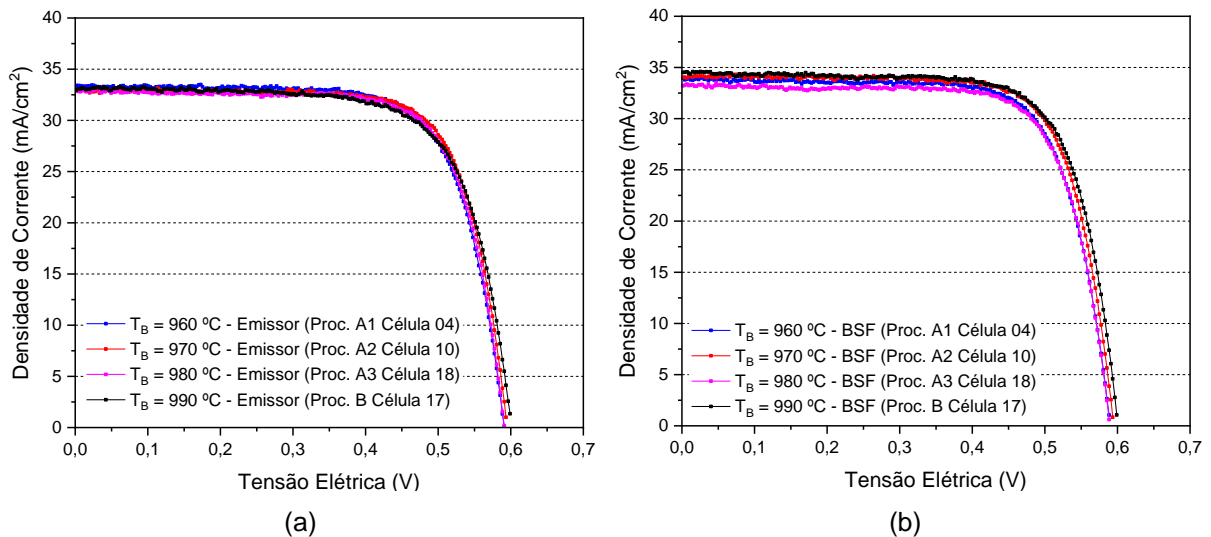


Figura 4.30. Densidade de corrente elétrica em função da tensão das células solares bifaciais com maior eficiência para diferentes temperaturas de difusão de boro e temperatura de difusão de fósforo a $855 \text{ }^\circ\text{C}$ medida na (a) face do emissor e na (b) face do campo retrodifusor (BSF).

Da refletância, representada na Figura 4.31, verifica-se que o filme constituído por uma camada de SiO_2 , para passivação, e uma camada de TiO_2 , para reduzir a refletância, é uniforme, em ambas as faces.

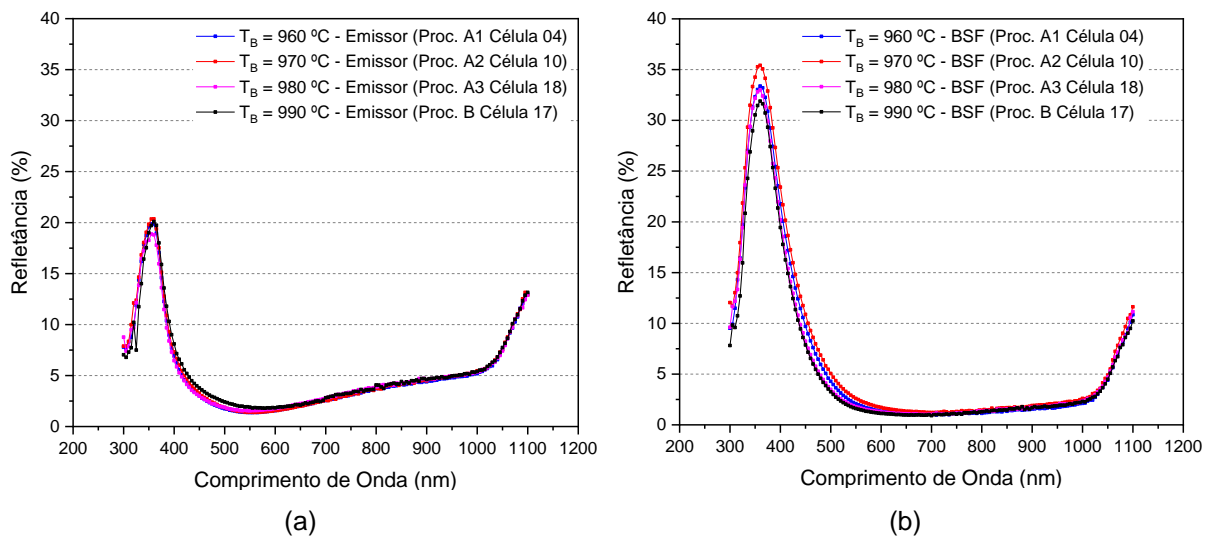


Figura 4.31. Refletância das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferentes temperaturas de difusão e $T_P = 855 \text{ }^\circ\text{C}$, medida na (a) face do emissor e na (b) face do campo retrodifusor (BSF).

A eficiência quântica interna é apresentada na Figura 4.32. Para a EQI medida com iluminação pelo emissor, confirma-se a maior recombinação dos portadores de carga minoritários na região do emissor com a maior dopagem com boro, isto é, com a menor resistência de folha. Na face com o campo retrodifusor as EQI são similares, com exceção do resultado para o dispositivo processado com T_B de 980 °C.

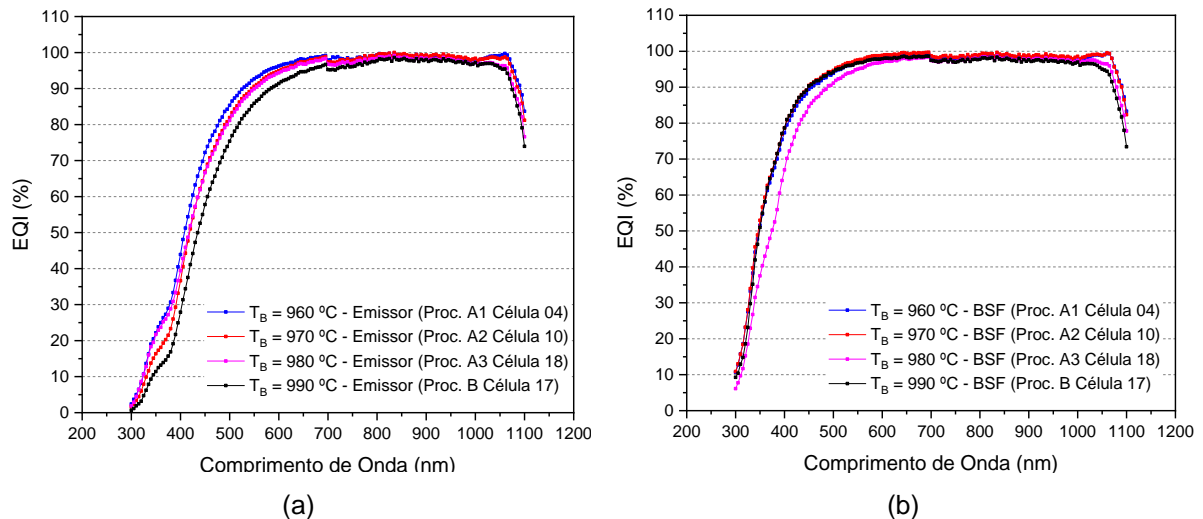


Figura 4.32. Eficiência quântica interna das células solares bifaciais com maior eficiência processadas com diferente temperatura de difusão de boro e temperatura de difusão de fósforo de 855 °C medida com iluminação na (a) face com o emissor e na (b) face com o campo retrodifusor (BSF).

4.4. Desenvolvimento da Passivação com Dióxido de Silício

Neste trabalho, a otimização experimental do emissor de boro e do campo retrodifusor de fósforo das células solares bifaciais base n foi realizada com a passivação das superfícies implementada com oxidação seca na temperatura de 800 °C com tempo de oxidação de 45 minutos. Com base em trabalhos anteriores (Zanesco *et al.*, 2017), para avaliar a influência da passivação do filme de SiO_2 , em ambas as faces, variou-se a temperatura (T_{OXI}) e o tempo (t_{OXI}) de oxidação como mostra a Tabela 4.27.

A Tabela 4.27 apresenta os parâmetros elétricos das células solares processadas com temperaturas de difusão de boro e fósforo, respectivamente, de 980 °C e 845 °C. Também se mostra a espessura dos filmes finos de passivação (Zanesco *et al.*, 2017). Para comparação também constam as características

elétricas de células que não passaram pela etapa de passivação, isto é, somente com filme AR de TiO_2 .

Tabela 4.27. Parâmetros elétricos das células solares bifaciais desenvolvidas em Si-Cz tipo n com oxidação e difusão de boro no mesmo processo térmico em função da oxidação para a temperatura de difusão de boro de 980 °C, difusão de fósforo de 845 °C e diferentes temperaturas e tempos de oxidação.

Iluminação pelo Emissor p ⁺ n Face Dopada com Boro								
Proc.	T _{oxi} (°C) / t (min)	Espessura do óxido (nm)	R _{□B} (Ω/□)	Cél.	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF	η _B (%)
A	800 / 45	10	65 ± 3	13	33,0	599,1	0,739	14,6
				14	32,9	598,7	0,742	14,6
				15	32,9	600,0	0,738	14,6
				16	32,9	598,9	0,740	14,6
Média					32,93 ± 0,05	599,18 ± 0,57	0,740 ± 0,002	14,60 ± 0,00
C1	860 / 30	14	47 ± 4	7	34,6	605,0	0,748	15,6
				8	34,7	604,4	0,750	15,7
				10	34,8	605,8	0,752	15,9
D1				17	31,7	604,9	0,760	14,6
				18	33,4	604,1	0,749	15,1
Média					33,84 ± 1,32	604,84 ± 0,65	0,752 ± 0,005	15,38 ± 0,53
D2	800 / 7	≤ 3	48 ± 3	3	33,0	596,8	0,737	14,5
				4	33,1	599,2	0,729	14,5
Média					33,05 ± 0,07	598,00 ± 1,70	0,733 ± 0,006	14,50 ± 0,00
C2	Sem oxidação			14	33,5	591,8	0,734	14,5
D3				2	32,0	592,1	0,736	13,9
Média					32,75 ± 1,06	591,95 ± 0,21	0,735 ± 0,001	14,20 ± 0,42
Iluminação pelo Campo Retrodifusor nn ⁺ Face Dopada com Fósforo								
Proc.	T _{oxi} (°C) / t (min)	Espessura do óxido (nm)	R _{□B} (Ω/□)	Cél.	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (mV)	FF	η _B (%)
A	800 / 45	53	65 ± 3	13	34,6	598,8	0,743	15,4
				14	34,7	598,5	0,739	15,4
				15	34,7	600,2	0,744	15,5
				16	34,4	598,6	0,749	15,4
Média					34,60 ± 0,14	599,03 ± 0,79	0,744 ± 0,004	15,43 ± 0,05
C1	860 / 30	58	47 ± 4	7	35,0	604,8	0,755	16,0
				8	34,6	603,5	0,758	15,8
				10	35,3	605,0	0,748	16,0
D1				17	32,6	605,4	0,767	15,2
				18	34,5	604,3	0,754	15,7
Média					34,40 ± 1,06	604,60 ± 0,73	0,756 ± 0,007	15,74 ± 0,33
D2	800 / 7	12	48 ± 3	3	33,9	596,0	0,745	15,1
				4	34,2	598,9	0,741	15,2
Média					34,05 ± 0,21	597,45 ± 2,05	0,743 ± 0,003	15,15 ± 0,07
C2	Sem oxidação			14	34,6	593,9	0,742	15,3
D3				2	33,4	593,8	0,742	14,7
Média					34,00 ± 0,85	593,85 ± 0,07	0,742 ± 0,000	15,00 ± 0,42

Na face com o emissor, nota-se que a passivação com SiO_2 tende a aumentar a eficiência média, com o aumento da V_{oc} e da J_{sc} . A maior eficiência média, de 15,4 %, foi obtida com a temperatura de oxidação de 860 °C, devido a tendência de

produzir uma camada de SiO₂ mais espessa na superfície com o emissor de boro. Na face com o campo retrodifusor, a camada de óxido fina, da ordem de 12 nm, praticamente não influenciou os parâmetros elétricos. Neste caso, somente observou-se um pequeno aumento na V_{OC}. Somente as camadas de óxidos espessas melhoraram a eficiência das células solares. A maior eficiência média, de 15,7 %, foi alcançada com a T_{OxI} de 860 °C.

Portanto, como mostra a Tabela 4.28, as células solares bifaciais com maior eficiência média ponderada foram produzidas com a temperatura de oxidação de 860 °C durante 30 minutos. O valor de η_w foi de 15,7 %. A célula solar com maior eficiência apresentou os seguintes parâmetros elétricos: J_{SC} = 34,8 mA/cm², V_{OC} = 605,8 mV, FF = 0,75 e η = 15,9 % e J_{SC} = 35,3 mA/cm², V_{OC} = 605,0 mV, FF = 0,75 e η = 16,0 %, na face com o emissor e campo retrodifusor, respectivamente. Salienta-se que os parâmetros elétricos desta célula solar são similares, comparando-se a face do emissor e com o campo retrodifusor.

Tabela 4.28. Eficiência das células solares medidas com iluminação no emissor e no campo retrodifusor processadas com a temperatura de difusão de boro de 980 °C e temperatura de difusão de fósforo de 845 °C e eficiência média ponderada das células solares bifaciais.

			Emissor p ⁺ n Face Dopada com Boro	Campo Retrodifusor nn ⁺ Face Dopada com Fósforo	Média Ponderada
Proc.	T _{OxI} (°C) / t (min)	Cél.	η_B (%)	η_P (%)	η_w (%)
A	800 / 45	13	14,6	15,4	15,3
		14	14,6	15,4	15,3
		15	14,6	15,5	15,4
		16	14,6	15,4	15,3
Média			14,60 ± 0,00	15,43 ± 0,05	15,33 ± 0,05
C1	860 / 30	7	15,6	16,0	15,9
		8	15,7	15,8	15,8
		10	15,9	16,0	16,0
D1	860 / 30	17	14,6	15,2	15,1
		18	15,1	15,7	15,6
Média			15,38 ± 0,53	15,74 ± 0,33	15,68 ± 0,36
D2	800 / 7	3	14,5	15,1	15,0
		4	14,5	15,2	15,1
Média			14,50 ± 0,00	15,15 ± 0,07	15,05 ± 0,07
C2	não	14	14,5	15,3	15,2
D3	oxidadas	2	13,9	14,7	14,6
Média			14,20 ± 0,42	15,00 ± 0,42	14,90 ± 0,42

Na Figura 4.33 apresentam-se as curvas J-V dos dispositivos com maior eficiência destacados na Tabela 4.27. Verifica-se que as curvas J-V das melhores

células solares são similares na face com o campo retrodifusor e que a passivação afeta principalmente a J_{SC} e V_{OC} da face com o emissor.

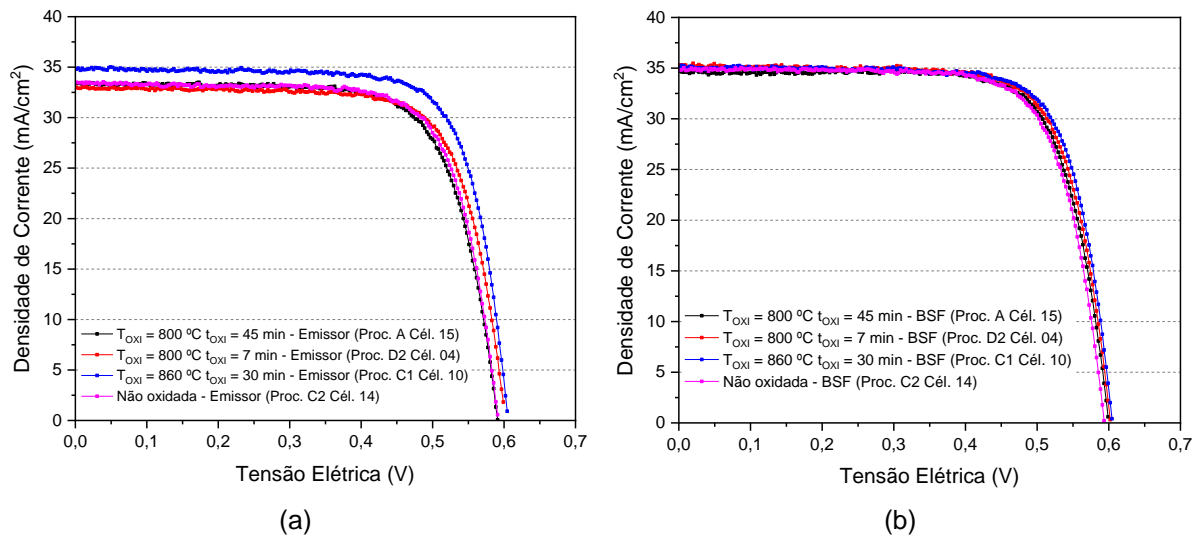


Figura 4.33. Densidade de corrente elétrica em função da tensão das células solares bifaciais com maior eficiência nas diferentes temperaturas e tempo de oxidação para passivação: (a) face do emissor e (b) face do campo retrodifusor (BSF).

A refletância é mostrada na Figura 4.34 e verifica-se uma maior variação no filmes de passivação/antirreflexo principalmente na face com o emissor, apesar da camada de SiO_2 ser mais fina. Este resultado indica que o filme de SiO_2 na face dopada com boro pode apresentar variação da espessura de uma célula solar para outra. Na face com o BSF, nota-se que a camada de óxido mais espessa aumenta a refletância nos comprimentos de onda curtos.

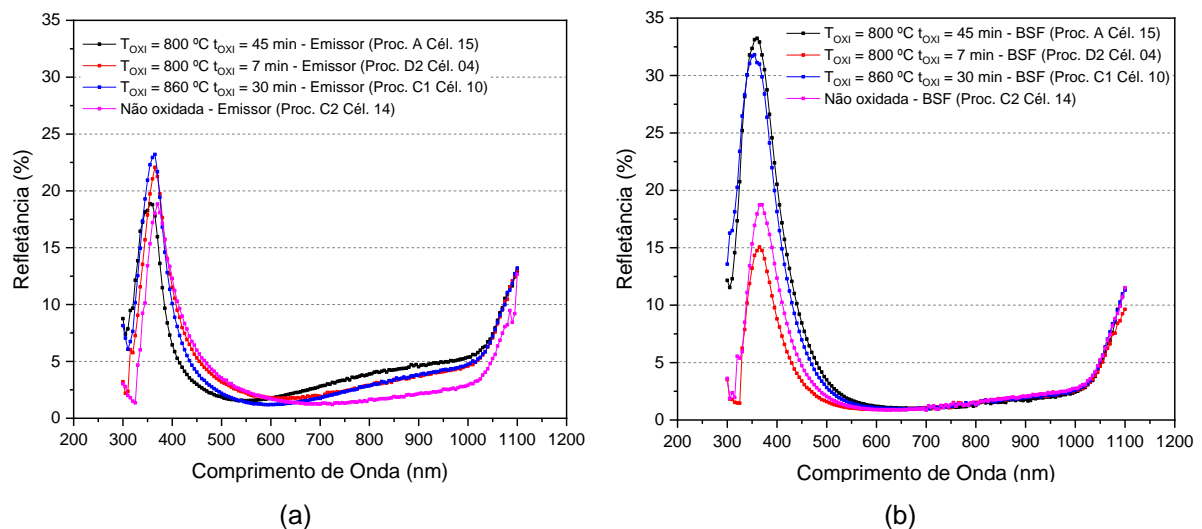


Figura 4.34. Refletância das células solares bifaciais com maior eficiência em cada faixa de temperatura: (a) face do emissor e (b) face do campo retrodifusor (BSF).

A eficiência quântica interna das células solares com maior eficiência é comparada na Figura 4.35. Tanto na face com o emissor, quanto na face com o campo retrodifusor, nota-se que a camada de SiO_2 melhora a EQI em comprimentos de onda curtos. Para analisar este efeito, na Figura 4.36 compara-se a EQI na face com o emissor de boro somente em comprimentos de onda menores que 500 nm. Verifica-se claramente o aumento da passivação no emissor de boro com o aumento da espessura da camada de dióxido de silício.

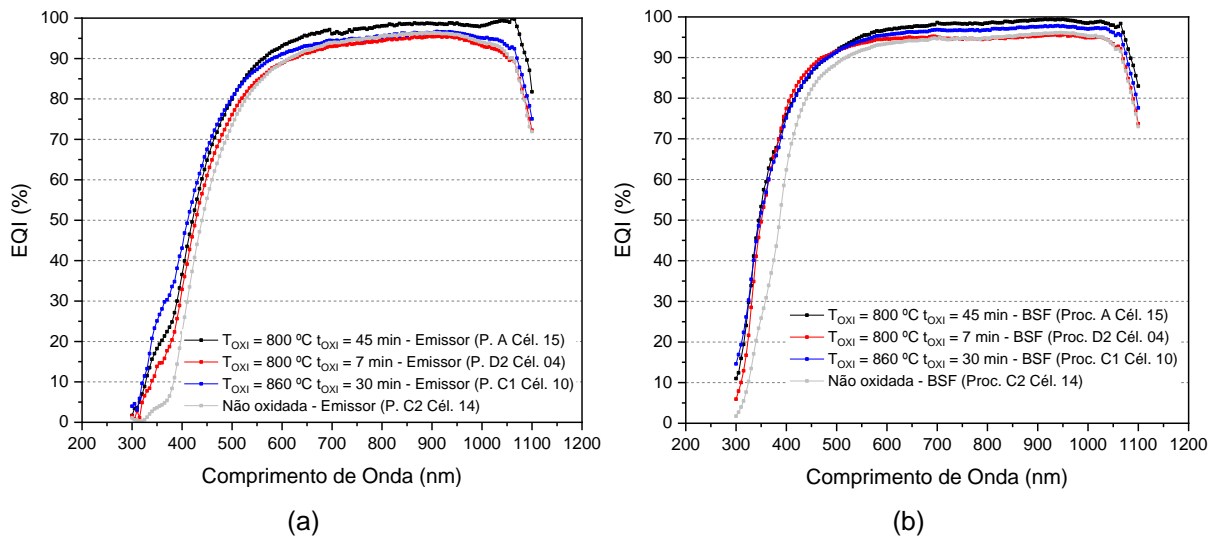


Figura 4.35. EQI das células solares bifaciais com maior eficiência em cada faixa de temperatura: (a) face do emissor e (b) face do campo retrodifusor (BSF).

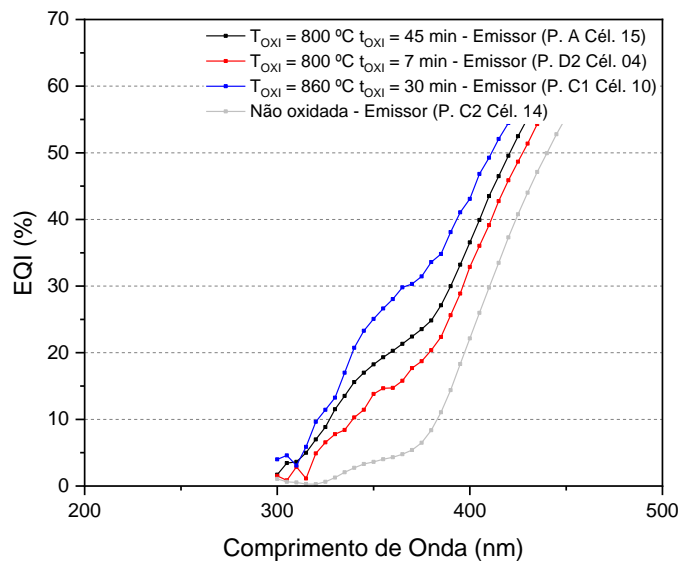


Figura 4.36. Eficiência quântica interna para comprimentos de onda menores que 500 nm das células solares bifaciais com maior eficiência com diferentes camadas de SiO_2 para passivação do emissor.

Para as células solares bifaciais Si-Cz desenvolvidas neste trabalho, em quase sua totalidade, foi depositado filme AR de TiO_2 sobre a camada dielétrica de SiO_2 utilizada para passivação das lâminas do substrato. Em apenas dois dispositivos fotovoltaicos, o filme AR teve sua aplicação diretamente sobre o semicondutor sem a camada de oxidação. Mesmo a amostra ocorrendo em um pequeno número (Proc. C2 Cél. 14 e Proc. D3 Cel. 04), os valores dos parâmetros elétricos apresentados por esta são similares a aqueles das células solares oxidadas. Porém, a eficiência de conversão de ambas as faces se mostram um pouco inferiores aos dispositivos oxidados.

4.5. Comparação das Células Solares com Maior Eficiência

Na Tabela 4.29 comparam-se os parâmetros elétricos das duas células solares com maior eficiência média ponderada. A célula solar (Cel800) processada com: $T_B = 990 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_P = 835 \text{ }^\circ\text{C}$ e $T_{\text{OXI}} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ alcançou a eficiência média ponderada de 16,4 %. O dispositivo (Cel860) processado com $T_B = 980 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_P = 845 \text{ }^\circ\text{C}$ e $T_{\text{OXI}} = 860 \text{ }^\circ\text{C}$ e eficiência média ponderada de 16,0 %, apresentou parâmetros elétricos similares nas duas faces, como se pode ver na Figura 4.37. Portanto, o dispositivo Cel860 é mais adequado para uso em concentradores solares, onde pode incidir irradiância similar em ambas as faces. Porém, se as células solares forem utilizadas em módulos fotovoltaicos sem concentração, somente com vidro ou material transparente na face posterior e baixa incidência de irradiância na face posterior, o dispositivo Cel800 pode ser mais adequado.

Tabela 4.29. Parâmetros elétricos e eficiência média ponderada da célula solar bifacial (a) Cel800 e (b) Cel860 desenvolvidas em Si-Cz tipo n e oxidação e difusão de boro no mesmo processo térmico.

Célula	Proc.	Face	J_{sc} (mA/cm^2)	V_{oc} (mV)	FF	η (%)	η_w (%)
Cel800	$T_B = 990 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_P = 835 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{OXI}} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$	Emissor	34,1	606,0	0,750	15,5	16,4
		BSF	36,2	607,0	0,755	16,6	
Cel860	$T_B = 980 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_P = 845 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_{\text{OXI}} = 860 \text{ }^\circ\text{C}$	Emissor	34,8	605,8	0,752	15,9	16,0
		BSF	35,3	605,0	0,748	16,0	

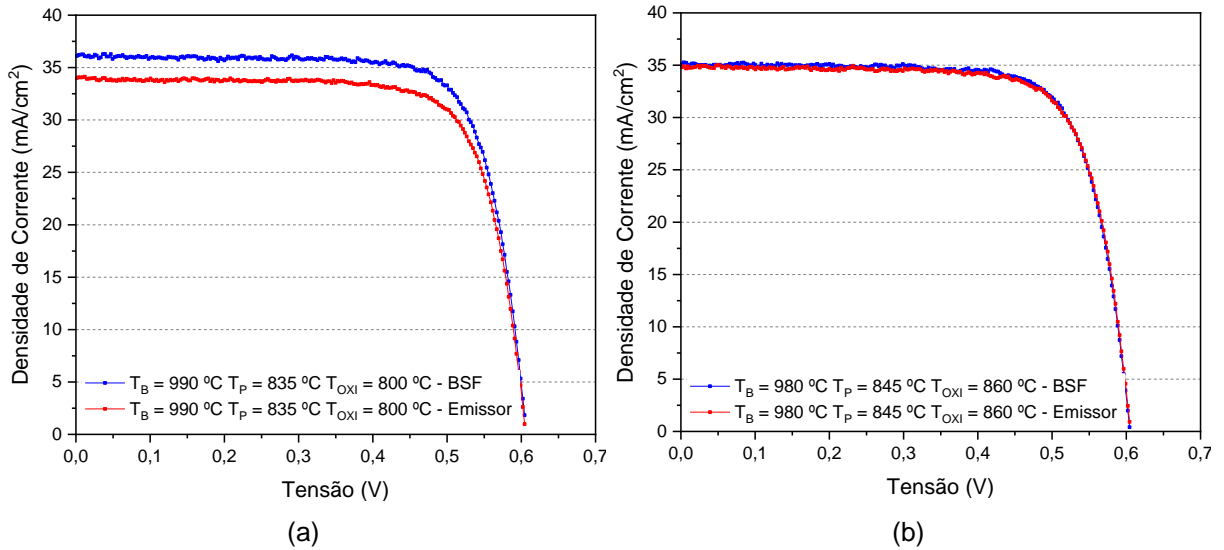


Figura 4.37. Parâmetros elétricos da célula solar bifacial (a) Cel800 e (b) Cel860 desenvolvidas em Si-Cz tipo n e oxidação e difusão de boro no mesmo processo térmico.

O dispositivo Cel800 apresenta um emissor mais profundo, o que acarreta em uma J_{SC} menor. Porém, com respeito ao campo retrodifusor, este mostrasse menos dopado determinando uma densidade de corrente mais elevada para esta face. A célula solar Cel860, para ambas as faces, possui uma camada de passivação mais espessa. Isto justifica a densidade de corrente similar nas duas superfícies.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foram desenvolvidas células solares bifaciais, processadas em lâminas de silício monocristalino Czochralski (Si-Cz), tipo n, com estrutura p^+nn^+ . Teve como objetivo otimizar experimentalmente o emissor p^+ , formado pela difusão de boro, e o campo retrodifusor n^+ , constituído por meio da difusão de fósforo, bem como avaliar a passivação das superfícies com dióxido de silício.

Na primeira parte da avaliação, referente à resistência de folha, verificou-se que a etapa térmica de difusão de fósforo, que ocorreu após a de boro, exerceu influência nesta última, constatada através de um pequeno aumento no valor da resistência de folha do emissor. As temperaturas mais baixas utilizadas para a formação do emissor, de 960 °C e 970 °C, resultaram em eficiências médias ponderadas iguais ou inferiores a 15 %. Os dispositivos fotovoltaicos processados nestas temperaturas apresentaram medidas do fator de forma e tensão de circuito-aberto inferiores, respectivamente, à 0,7 e 600 mV, sendo o valor do FF relativamente baixo. Concluiu-se, então, que essas temperaturas não são adequadas para a difusão de boro. Aumentando-se a temperatura de difusão de boro para 980 °C, combinando com as diferentes temperaturas de difusão de fósforo na face oposta, ocorreu um decréscimo na densidade de corrente de curto-circuito na face do emissor. Para a situação do campo retrodifusor mais dopado, oriundo das temperaturas de difusão de fósforo mais elevadas, há maior número de recombinações dos portadores de carga minoritários nesta região.

Os melhores valores no fator de forma (0,76 – 0,77) com o menor desvio padrão na medida, foram obtidos com a difusão de boro na temperatura de 1.000 °C. Porém, resultou na redução da eficiência média em ambas faces. Na temperatura de difusão de boro de 990 °C foi obtida a maior eficiência média no emissor, de 15,4 %,

com a temperatura de difusão de fósforo de 835 °C. Verificou-se que os parâmetros elétricos aumentaram e o fator de forma médio foi de 0,75. Na face com o campo retrodifusor a eficiência média foi de 16,3 %. A maior eficiência média ponderada foi obtida com estas temperaturas de difusão e foi de 16,1 %. Portanto, estas temperaturas de difusão são as mais adequadas para a passivação das superfícies com temperatura e tempo de oxidação de 800 °C e 45 minutos, respectivamente.

A temperatura de difusão de fósforo de 845 °C apresentou decréscimo na eficiência média de conversão em ambas as faces, devido principalmente a redução no fator de forma e demais parâmetros elétricos. O mesmo ocorrendo para a eficiência média ponderada na temperatura de 855 °C, onde os há similaridade nos parâmetros elétricos. Para a T_P de 845 °C, a temperatura de 980 °C para a difusão de boro e passivação nas condições de temperatura e tempo de oxidação de 860 °C e 30 minutos, respectivamente, obteve eficiência ponderada maior que para a T_P de 835 °C. Neste caso, a eficiência ponderada foi de 16 %, com eficiências de conversão de 15,9 % e 16 % para o emissor e o BSF, respectivamente.

Da análise da passivação com SiO_2 , na face com o emissor, concluiu-se que a passivação tende a aumentar a eficiência média, com o aumento da V_{OC} e da J_{SC} . A maior eficiência média no emissor, de 15,4 %, foi obtida com a temperatura de oxidação de 860 °C. Na face com o campo retrodifusor, a camada de óxido fina, da ordem de 12 nm, praticamente não influenciou os parâmetros elétricos. Neste caso, somente observou-se um pequeno aumento na V_{OC} . Somente as camadas de óxidos espessas melhoraram a eficiência das células solares. A maior eficiência média, de 15,7 % para o BSF, foi alcançada com a T_{OXI} de 860 °C.

Tanto na face com o emissor, quanto na face com o campo retrodifusor, notou-se que a camada de SiO_2 melhora a eficiência quântica interna em comprimentos de onda curtos. Verificou-se que a passivação melhorou no BSF de fósforo com o aumento da espessura da camada de dióxido de silício, proporcionado pelo aumento do tempo de oxidação de 7 minutos para 45 minutos.

Como continuidade deste trabalho, sugere-se otimizar a passivação com SiO_2 em ambas as faces das células solares bifaciais base n, variando os parâmetros do processo de oxidação seca, tais como tempo, temperatura, vazão de nitrogênio e outros gases. Também se sugere avaliar a passivação proporcionada por outros materiais dielétricos como SiN_x , Al_2O_3 ou outros métodos de deposição do TiO_2 .

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABERLE, A. G. Surface passivation of crystalline silicon solar cells: a review. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 8, n. 5, p. 473-487, 2000.

ABERLE, A. G. Overview on SiN surface passivation of crystalline silicon solar cells. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 65, p. 239-248, 2001.

ABERLE, A. G. **Crystalline silicon solar cells: Advanced surface passivation and analysis**. 1st. ed. Sdney: Centre for Photovoltaic Engineering, University of New South Wales, 1999.

BARBATO, M. *et al.* Potential induced degradation of N-type bifacial silicon solar cells: An investigation based on electrical and optical measurements. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 168, p. 51-61, 2017.

BENTZEN, A. **Phosphorus diffusion and gettering in silicon solar cells**. Oslo. 2006. 271p. Tese de Doutorado. Universidade de Oslo, Noruega.

BONILLA, R. S. *et al.*, Dielectric surface passivation for silicon solar cells: A review. **Physics Status Solidi A 214**. n. 7, 1700293, 2017 [DOI 10.1002/pssa.201700293].

CAVALLARI, N. *et al.* Low temperature deposition of bifacial CIGS solar cells on Al-doped Zinc Oxide back contacts. **Applied Surface Science**, v. 412, p. 52-57, 2017.

CALLISTER Jr., W. D. (2002). *Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução*. (5 ed.). Rio de Janeiro, RJ: LTC Editora.

CHEMISANA, D. Building integrated concentrating photovoltaics: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 603-611, 2011.

CHEN, C. C. *et al.* High efficiency on boro emitter n-type Cz silicone bifacial cells with industrial process. **Energy Procedia**, v. 38, p. 416-422, 2013.

CLATOT, J. *et al.* Room temperature transparent conducting oxides based on zinc oxide thin films. **Applied Surface Science**, v. 257, p. 5181-5184, 2011.

COLVILLE, F. PERC solar cell production to exceed 15 GW in 2017. Disponível em: < <http://www.pv-tech.org/editors-blog/perc-solar-cell-production-to-exceed-15gw-in-2017> >. Acesso em: 14 de junho 2018.

COSTA, R. C. **Desenvolvimento e Comparação de Células Solares Bifaciais Industriais com Deposição de Dopante com Boro por *Spin-On***. Porto Alegre. 2013. 113p. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia de Materiais). PGETEMA, PUCRS, Brasil.

CRESTANI, T. *et al.* Análise do perfil de boro para produção de células solares base p com redução de etapas térmicas. **Acta de la XLI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente**. Vol. 6, pp. 03.159-03.170, 2018. Impreso en la Argentina.

CRUZ, L. R. *et al.* Análise comparative das propriedades de óxidos transparentes condutores para aplicação em células solares de filmes finos de CdTe. **Revista Matéria**, v. 22, n. 1, 2017.

CUEVAS, A. *et al.* Carrier population control and surface passivation in solar cells. **Solar Energy Material and Solar Cells**, v. 184, p. 38-47, 2018.

DuPont. Líder global em agricultura, ciência dos materiais e produtos especiais. Disponível em < <http://www.dupont.com/products-and-services/solar-photovoltaic-materials/what-makes-up-solar-panel.html> >. Acesso 12 junho 2018.

DU, C. H.; HSU, S. P. N-PERT solar cell using oxidation etch-back selective-BSF process. **Energy Procedia**, v. 124, p. 406-411, 2017.

FAGUNDES, R. S. *et al.* Comparação de filmes antirreflexo de TiO₂ depositados por diferentes técnicas para células solares de silício. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 6, p. 27-36, 2015.

FELLMETH, T. *et al.* Co-difused bi-facial PERT solar cells. **Energy Procedia**, v. 124, p. 875-880, 2017.

Ferrotec Solutions. Disponível em < <https://temescal.ferrotec.com/systems/fcbjd-2000/> >. Acesso em 08 julho 2018.

FINNERTY, N. *et al.* Development of a global energy management system for non-energy intensive multi-site industrial organisations: A methodology. **Energy**, v. 136, p. 16-31, 2017.

GALLI, C. (2003). **Sobre Volta, Batatas e Fótons**. 1 Ed. Porto Alegre, RS: EDIPUCRS. 136p.

GARCIA, S. B. **Projeto e construção de um forno para processamento de células solares**. Porto Alegre. 2009. 181p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil.

GARCIA, S. B. **Desenvolvimento e comparação de células solares p⁺nn⁺ com emissor seletivo e homogêneo**. Porto Alegre. 2016. 198p. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia de Materiais). PGETEMA. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil.

GOYAL, P. *et al.* Boron doped SiO_x dielectrics for bifacial n-type and p-type silicon solar cells. **Energy Procedia**, v. 77, p. 470-477, 2015.

GREEN, M. A. **Solar cells: operating principles, technology e system applications**. Sydney: UNSW Photovoltaics, 1992. 274 p.

GUILIN, L. *et al.* Thin Al₂O₃ passivated boron emitter of n-type bifacial c-Si solar cells with industrial process. **Progress in Photovoltaics: Reserch and Applications**. 2017, p. 280-290. Published online 16 January in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). [DOI: 10.1002/pipi.2859].

HO, C. P., PLUMMER, J. D. Si/SiO₂ interface oxidation kinetics: A physical model for the influence of high substrate doping levels, **Journal of the Electrochemical Society**, v. 126, n. 9, p.1523-1530, 1979.

HONSBURG, C.; BOWDEN, S. Photovoltaics CDROM. Disponível em: < <http://www.pveducation.org/pvcdrom> >. Acesso em: 01 mar. 2018.

HUEN, P.; DAOUD, W. A. Advances in hybrid solar photovoltaic and thermoelectric generators. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 1295-1302, 2017.

JAYATHISSA, P. *et al.* Life cycle assessment of dynamic building integrated photovoltaics. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 156, p. 75-82, 2016.

KANNAN, N.; VAKEESAN, D. Solar energy for future world: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 1092-1105, 2016.

KERN, W. **Handbook of semiconductor wafer cleaning technology: science, technology and applications**. New York: Noyes Publications, 1993. 623.

LEMUS, R. G. *et al.* Bifacial solar photovoltaics – A technology review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 1533-1549, 2016.

LO, C. K.; LIM, Y. S.; KEE, S. Y. (2013) Improvement of bifacial solar panel efficiency using passive concentrator and reflector system. **International Conference on Renewable Energy Reserch and Applications**. p. 20-23.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. John Wiley & Sons, England. 2003. 1179 p.

MARKVART, Tomas; CASTAÑER, Luis. **Solar cells: materials, manufacture and operation**. Oxford: Elsevier, 2006. 569 p.

MOEHLECKE, A.; ZANESCO, I. **Mercado, física e processamento de células solares**. *Metalurgia e Materiais*, v. 61, n. 557, p. 394-397, 2005.

MOEHLECKE, A.; FEBRAS, F. S.; ZANESCO, I. Electrical performance analysis of PV modules with bifacial silicon solar cells and white diffuse reflector. **Solar Energy**, v. 6, p. 253-262, 2013.

NABER, R. C. B. *et al.* ECN n-type silicon solar cell technology: an industrial process that yield 18,5%. **Photovoltaic Specialists Conference**, 2009, 34th, IEEE p. 990-993.

NEUHAUS, D. H.; MÜNZER, A. Industrial Silicon Wafer Solar Cells. Hindawi Publishing Corporation *Advances in OptoElectronics*, v. 2007, p. 1-15, 2007.

OGBOMO, O. O. *et al.* A Review of photovoltaic module technologies for increased performance in tropical climate. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 1225-1238, 2017.

PENG, Z. W. *et al.* Toward 21% efficiency nPERT solar cells with selective back surface field technique. **Energy Procedia**, v. 92, p. 702-707, 2016.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A.. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Edição revisada e atualizada. Rio de Janeiro: CEPEL – CRESESB, 2014. 530p.

RAHMAN, S. M.; MIAH, M. D.. The impact of sources of energy production on globalization: Evidence from panel data analysis. **Renewable and Sustainable**

Energy Reviews, v. 74, p. 110-115, 2017.

RAHMAN, M. Z.; KHAN, S. I. Advances in surface passivation of c-Si solar cells. **Mater Renew Sustain Energy**, v. 1, p. 1-11, 2012.

ROTHHARDT, P. *et al.* Codiffused bifacial n-type solar cells (CoBiN). **Energy Procedia**, v. 55, p. 287-294, 2014.

SAHIN, G. *et al.* Performance of conversion efficiency of a bifacial silicon solar cell with particle irradiation. **Chinese Journal of Physics**, v. 55, p. 203-210, 2017

SAMPAIO, P. G. V; GONZÁLES, M. O. A. Photovoltaic solar energy: conceptual framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 590-601, 2017.

SANYO Energy. HIT Photovoltaic Module Power 205, USA. 2009. Disponível em: < http://solar.ypsi.com/repository/documents/cityhall/Sanyo_HIT_Power_205_Data_Sheet.pdf > Acesso em: 12 julho 2018.

SAYNOVA, D. S. *et al.* Al₂O₃ passivation on c-Si surfaces for low temperature solar cell application. **Energy Procedia**, v. 38, p. 872-880, 2013. [DOI: 10.1016/j.egypro.2013.07.359].

SCHMIDT, J. *et al.* Advances in the surface passivation of silicon solar cells. **Energy Procedia**. v. 15, p. 30-39, 2012.

SILVEIRA, H.; ZANESCO, I.; MOEHLECKE, A. Otimização do Módulo Fotovoltaico Concentrador Estático Plano Modificado. In: 5th Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission, 2003, São Paulo. 5th Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission, 2003. v. 1. p. 1-10.

SINGHA, B.; SOLANKI, C. S. Boron-rich layer properties formed formed by boron spin on dopant diffusion in n-type silicone. **Materials Science in Semiconductor Processing**, v. 57, p. 83-89, 2017.

SMITH, W. F., & HASHEMI, J. (2012). **Fundamentos de engenharia e ciências dos materiais**. Porto Alegre, RS: AMGH Editora Ltda.

STODOLNY, M. K. *et al.* N-Type polysilicon passivating contact for industrial bifacial n-type solar cells. **Solar Energy Material & Solar Cells**, v. 158, p. 24-28, 2016.

SZE, M. S., & Ng, KWOK K. (2007). **Physics of semiconductor devices** (3 ed.). New Jersey, USA: John Wiley & Sons.

THOMSON, A. F., MCINTOSH, K. R., 2012. Light-enhanced surface passivation of TiO₂ – coated silicon. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 20, n. 3, pp. 343-349.

TOUS, L. *et al.* 22,4% bifacial n-PERT cells with Ni/Ag co-plated contacts and V_{OC} ~691 mV. **Energy Procedia**, v. 124, p. 922-929, 2017.

YADAV, T. S. *et al.* Low-cost and low-temperature chemical oxide passivation process for large area single crystalline silicon solar cells. **Solar Energy**, v. 169, p. 270-276, 2018.

YANG, W. J. *et al.* Internal quantum efficiency for solar cells. **Solar Energy**, v. 82, p. 106-110, 2008.

YU, B. *et al.* A study on electrical performance of N-type bifacial PV modules. **Solar Energy**, v. 137, p. 129-133, 2016.

YUSUFOGLU, U. A. *et al.* Analysis of the anual performance of bifacial modules and optimization methods. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 5, n. 1, p. 320-328, 2015.

UEMATSU, T. *et al.* Static concentrator photovoltaic module with prism array. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 67, p. 415-423, 2001.

WAN, Y. *et al.* A low surface recombination velocity by low absorption silicon nitride on c-Si. **IEEE Journal of Photovoltaics**, v. 3, p. 554-559, 2013.

WEI, Q. *et al.* The glass-glass module using n-type bifacial solar cell with PERT structure and its performance. **Energy Procedia**, v. 92, p. 750-754, 2016.

WEI, Q. *et al.* High efficiency n-PERT solar cells by B/P co-diffusion method. **Energy Procedia**, v. 124, p. 700-705, 2017.

WENHAM, S. R.; GREEN, M. A. Silicon solar cells. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 4, p. 3-33, 1996.

RAZERA, R. A. Z., ZANESCO, I., MOEHLECKE, A., BOUDINOV, H. Passivation Analysis of the Emitter and Selective Back Surface Field of Silicon Solar Cells. In: **32nd Symposium on Microelectronics Technology and Devices**, 2017, Fortaleza. Proceedings of 32nd Symposium on Microelectronics Technology and Devices, 2017. p. 1-4.

ZHAO, J.; GREEN, M. Optimized antireflection coatings for high-efficiency silicon solar cells. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 38, n. 8, p. 1925-1934.

ZANESCO, I. **Concentradores Estáticos con Células Bifaciales para Sistemas Fotovoltaicos Autônomo**. Madri. 1996. 155p. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidad Politécnica de Madrid.

ZANESCO^(a), I.; CRUZ, L. R.; MEDEIRO, R. A.; MOEHLECKE, A.; LY, M. Passivação das regiões altamente dopadas n⁺ e p⁺ em células solares de silício cristalino com filmes de ZnO:Al. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, 2018, Gramado, RS. Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. São Paulo, SP: Associação Brasileira de Energia Solar, 2018. p.1-7.

ZANESCO^(b), I.; CRESTANI, T.; MOEHLECKE, A.; AQUINO, J.; RAZERA, R. A. Z.; MODEL, J. C. M.; LY, M.; GONCALVES, V. A. Desenvolvimento da célula solar com maior eficiência no Brasil com processo industrial. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar**, 2018, Gramado, RS. Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. São Paulo, SP: Associação Brasileira de Energia Solar, 2018. p.1-9.

ZANESCO, I., & MOEHLECKE, A. (2003). Energia Elétrica para o Terceiro Milênio: A Conversão Fotovoltaica. In: C. Galli; A. Moehlecke; D. Basso; . Catelli; I. ZanESCO; J. B. R. Filho; L. M. Scolari; M. Salami. (Orgs.). *Sobre Volta, Batatas e Fótons*. (pp. 95-120). Porto Alegre, RS: EDIPUCRS.

ZANESCO, I; MOEHLECKE, A. Analysis of the silicon dioxide passivation and forming gas annealing in silicon solar cells. In: ISES Solar World Congress 2015, 2016, Daegu. Proceedings of the ISES Solar World Congress 2015, 2015. p. 1-9.

ZANESCO, I., MOEHLECKE, A. (2012). Processo de difusão de dopantes em lâminas de silício para a fabricação de células solares, BR Patent PI12 030 606, BR 10 2012 030 606 9.

ZANESCO, I., MOEHLECKE, A. 2016. Desenvolvimento de Processos Industriais para Fabricação de Células Solares com pasta de Al e Passivação, Relatório de Projeto de P&D, Convênio ELETROSUL nº 1110140010, 379 p.

ZANESCO, I.; MOEHLECKE, A; SEVERO, T. C. Static concentrator PEC-44D optimized for stand-alone systems in Brazil. **17th European Photovoltaic Solar Energy Conference**, Munich, Germany, 22-26 October 2001.

ZANESCO, I.; RAZERA, R. A. Z.; MOEHLECKE, A. Análise da passivação com SiO₂ na face posterior e frontal de células solares com campo retrodifusor seletivo, **Matéria**-Rio de Janeiro, v. 22, p. 11924-9, 2017.