



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

FACULDADE DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

**DESENVOLVIMENTO DE CÉLULAS SOLARES COM CONTATOS
POSTERIORES FORMADOS POR RADIAÇÃO LASER E ANÁLISE
DA PASSIVAÇÃO NA FACE POSTERIOR**

DANIEL AUGUSTO KRIEGER COUTINHO

ENGENHEIRO QUÍMICO

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

Porto Alegre

Janeiro, 2015



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

FACULDADE DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS

DESENVOLVIMENTO DE CÉLULAS SOLARES COM CONTATOS POSTERIORES FORMADOS POR RADIAÇÃO LASER E ANÁLISE DA PASSIVAÇÃO NA FACE POSTERIOR

DANIEL AUGUSTO KRIEGER COUTINHO

ENGENHEIRO QUÍMICO

ORIENTADORA: Profa. Dra. Izete Zanescó

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Adriano Moehlecke

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

Trabalho vinculado ao Projeto “Células Solares de Alta Eficiência com Emissores Seletivos”, contrato CEEE-D/9942400, subvencionado pela Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica.

Porto Alegre

Janeiro, 2015

*Electric power is everywhere,
present in unlimited quantities
and can drive the world's
machinery without the need of
coal, oil, gas, or any other of the
common fuels.*

(Nikola Tesla).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, em especial minha mãe Cristina Luisa pelo apoio incondicional em todas as horas.

Agradeço à minha orientadora Izete Zanescó e co-orientador Adriano Moehlecke pelo apoio e ajuda que me providenciaram durante todos os meus anos no NT-Solar.

Agradeço à todo o grupo do NT-Solar, em especial à Angélica Cenci, ao Sérgio Boscato Garcia e Vanessa Alves Gonçalves pela ajuda na criação dessa dissertação e ao Moussa Ly pela metalização de minha primeira lâmina de silício.

Agradeço a todos os demais que me ajudaram, meus amigos e minha namorada Liziane Rafaela Brasil, que me motivou nos últimos meses do projeto.

Também agradeço as faculdades de Física e Engenharia da PUCRS.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| AGRADECIMENTOS | 4 |
| SUMÁRIO | 5 |
| LISTA DE FIGURAS | 7 |
| LISTA DE TABELAS | 10 |
| LISTA DE SÍMBOLOS | 14 |
| RESUMO | 15 |
| ABSTRACT | 16 |
| 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS | 17 |
| 1.1. Considerações Iniciais | 17 |
| 1.2. Objetivos | 22 |
| 2. CÉLULAS SOLARES COM CONTATOS FORMADOS POR RADIAÇÃO LASER... | 24 |
| 2.1. A Célula Solar | 24 |
| 2.2. Processo de Fabricação de Células Solares | 28 |
| 2.3. Células Solares com Deposição de Alumínio por Evaporação | 32 |
| 2.4. Células Solares com Deposição de Pasta de Alumínio por Serigrafia | 35 |
| 3. METODOLOGIA | 37 |
| 3.1. Processo de Fabricação | 37 |
| 3.1. Texturação | 39 |
| 3.2. Processos de Limpeza | 40 |
| 3.3. Deposição de Resina e Ataque do Óxido | 41 |
| 3.4. Oxidação e Difusão de Fósforo | 41 |
| 3.5. Deposição de Filme Antirreflexo e Alumínio | 42 |
| 3.6. Metalização e Recozimento | 42 |
| 3.7. Formação do Contato e Difusão em Pontos por Radiação Laser | 43 |
| 3.8. Caracterização das Lâminas de Silício e Células Solares | 44 |

| | |
|---|-----------|
| 4. DESENVOLVIMENTO DE CÉLULAS SOLARES COM CONTATOS POSTERIORES FORMADOS POR RADIAÇÃO LASER E ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PASSIVAÇÃO | 46 |
| 4.1. Otimização experimental da Potência e da Frequência do Sistema Laser . | 46 |
| 4.2. Influência da Temperatura de Recozimento | 51 |
| 4.3. Influência da Velocidade de Esteira Durante o Recozimento..... | 54 |
| 4.4. Influência da Distância entre Pontos..... | 61 |
| 4.5. Influência da Área do Contato..... | 64 |
| 4.6. Substrato de Alta Qualidade | 69 |
| 4.6.1. Temperatura de Difusão de Fósforo de 855 °C | 69 |
| 4.6.2. Temperatura de Difusão de Fósforo de 865 °C | 72 |
| 4.6.3. Temperatura de Difusão de Fósforo de 875 °C | 73 |
| 4.6.4. Temperatura de Difusão de Fósforo de 885 °C | 76 |
| 4.6.5. Análise do Tempo de Vida dos Portadores de Carga Minoritários..... | 79 |
| 4.7. Análise da Passivação na Face Posterior | 82 |
| 4.7.1. Influência da Espessura do Óxido na Face Posterior | 82 |
| 4.7.2. Comparação da Passivação com SiO ₂ e TiO ₂ em Substrato de PV-Si-FZ83 | |
| 4.7.3. Comparação da Passivação com SiO ₂ e TiO ₂ em Substrato de Si-Cz | 86 |
| 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE | 89 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 91 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Previsão de produção de energia elétrica por meio de centrais hidroelétricas [3]. | 19 |
| Figura 2 - Produção de energia por meios de centrais eólicas até 2050 [4]. | 20 |
| Figura 3 – Produção de energia elétrica por meio de sistemas fotovoltaicos até 2050 [8]. | 21 |
| Figura 4 - Célula PERL [12]. | 22 |
| Figura 5 – (a) Módulo fotovoltaico constituído de células solares e (b) módulos fotovoltaicos formando o painel [5]. | 25 |
| Figura 6 - Estrutura básica de uma célula solar de silício [1]. | 26 |
| Figura 7 - Curva I-V identificando a tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito [16]. | 27 |
| Figura 8 - Curva I-V demonstrando o fator de forma [16]. | 28 |
| Figura 9 - Influência da (a) resistência em série e (b) resistência em paralelo nas células solares [19]. | 29 |
| Figura 10 – Comparação do método com fotolitografia e o método LFC para o processamento de células solares com região posterior passivada [21]. | 30 |
| Figura 11 – Esquema da estrutura PERL [22]. | 31 |
| Figura 12 - Visão lateral do corpo de teste para o processo LFC [24]. | 32 |
| Figura 13 – Vista (a) externa e (b) interna do sistema laser utilizado para produzir o contato/difusão na face posterior das células solares. | 38 |
| Figura 14 - Célula solar desenvolvida com contato/difusão de alumínio em pontos formados por radiação laser. | 38 |
| Figura 15 - Superfície da lâmina de silício monocristalino, após texturação com KOH com aumento de (a) 730 e (b) 2500 vezes. | 40 |
| Figura 16 - Lâminas de silício na evaporadora utilizada para a deposição do filme AR e do alumínio. | 42 |

| | |
|---|----|
| Figura 17 - Representação da malha de pontos formada pelo laser..... | 43 |
| Figura 18 - Sistema automatizado utilizado na medição das células solares..... | 44 |
| Figura 19 - Equipamento WCT-120 utilizado para medição do tempo de vida dos portadores de carga minoritários..... | 45 |
| Figura 20 - Representação Ilustrativa da posição das células solares na lâmina de silício. | 46 |
| Figura 21 - Curvas da densidade de corrente em função da tensão aplicada das melhores células solares para cada potência, e respectivas frequências para a temperatura de recozimento de 300 °C..... | 48 |
| Figura 22 - Curvas J-V das melhores células solares para cada potência e com temperatura de recozimento de 350 °C..... | 49 |
| Figura 23 – Fotos dos pontos formados por laser de duas células solares com (a) 13 W e 80 kHz e com (b) 15 W e 80 kHz, obtidas com o microscópio óptico..... | 50 |
| Figura 24 - Curva J-V das melhores células solares para cada potência e frequência com temperatura de recozimento de 400 °C..... | 52 |
| Figura 25 - Curva J-V com as melhores células solares para temperatura de recozimento, em potência de 15 W e frequência de 80 kHz | 54 |
| Figura 26 - Valores médios da (a) V_{oc} , (b) J_{sc} , (c) FF e (d) η em função da temperatura de recozimento..... | 55 |
| Figura 27 - Curva J-V das melhores células solares para as diferentes velocidades de esteira e temperatura de recozimento de 350 °C, potência de 13 W e frequência de 80 kHz. | 56 |
| Figura 28 - Valores médios da (a) V_{oc} , (b) J_{sc} , (c) FF e (d) η em função da velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 350 °C, potência de 13 W e frequência de 80 kHz..... | 57 |
| Figura 29 - Curva J-V das melhores células solares para velocidade de esteira, em temperatura de recozimento de 350 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz | 59 |
| Figura 30 - Valores da (a) V_{oc} , (b) J_{sc} , (c) FF e (d) η em função da velocidade de recozimento das melhores células solares, para V_E de 350 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz. | 60 |

- Figura 31 - Curva J-V com as melhores células solares para altas temperaturas de queima sem laser.61
- Figura 32 - Curva J-V das melhores células solares para diferentes distâncias entre pontos, e temperatura de recozimento de 350 °C, potência de 13 W e frequência de 80 kHz.63
- Figura 33 - (a) V_{oc} , (b) J_{sc} , (c) FF e (d) η em função na distância entre pontos, para as melhores células solares do processo 07..... 64
- Figura 34 – Valores médios da (a) V_{oc} , (b) J_{sc} , (c) FF e (d) η para as variações na distância entre pontos para o processo 12, quando foi usado um silício Cz de menor qualidade. 65
- Figura 35 – Refletância da camada passivadora de SiO_2 e do filme antirreflexo de TiO_266
- Figura 36 - Área de contato formada por laser com potência de 13 W de (a) 2423 μm^2 , (b) 5627 μm^2 e (c) 6895 μm^2 . Imagens obtidas com o microscópio óptico.....66
- Figura 37 - Área de contato formada por laser com potência de 15 W de (a) 2900 μm^2 , (b) 7230 μm^2 e (c) 10432 μm^2 . Imagens obtidas com o microscópio óptico.....66
- Figura 38 - Valores médios da (a) V_{oc} , (b) J_{sc} , (c) FF e (d) η para diferentes áreas de contato formadas com a potência de 13 W.68

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Melhores resultados para células solares PERC processadas com o método LFC, comparadas com células de referência processadas com fotolitografia [24]. | 33 |
| Tabela 2 – Comparação dos resultados de células solares de silício com a técnica LFC e com o processo convencional PERC com ataque químico [21]. | 34 |
| Tabela 3 – Características elétricas de células solares processadas em Si-FZ e Si multicristalino [30]. | 36 |
| Tabela 4 - Resumo dos parâmetros variados para lâminas Si-Cz e PV-Si-FZ. | 40 |
| Tabela 5 – Parâmetros elétricos das células solares em função da potência e da frequência do sistema laser, sem recozimento no forno de esteira. | 47 |
| Tabela 6 - Parâmetros elétricos das células solares em função da potência e da frequência do sistema laser, após o recozimento a temperatura de 300 °C e melhora relativa da eficiência após o recozimento ($\Delta\eta$). | 47 |
| Tabela 7 - Parâmetros elétricos das células solares sem recozimento no forno de esteira. | 48 |
| Tabela 8 - Parâmetros elétricos das células solares em função da potência e da frequência do sistema laser, após recozimento a 350 °C e melhora relativa da eficiência após o recozimento ($\Delta\eta$). | 49 |
| Tabela 9 - Parâmetros elétricos das células solares sem recozimento no forno. | 51 |
| Tabela 10 - Parâmetros elétricos das células solares em função da potência e da frequência do sistema laser, na temperatura de recozimento de 400 °C e melhora relativa da eficiência após o recozimento ($\Delta\eta$). | 51 |
| Tabela 11 – Parâmetros elétricos das células solares em função da temperatura de recozimento do forno de esteira, na potência de 15 W e frequência de 80 kHz. | 53 |
| Tabela 12 – Parâmetros elétricos das células solares em função da velocidade de esteira para a temperatura de recozimento de 350 °C, potência de 13 W e frequência de 80 kHz. | 56 |
| Tabela 13 - Parâmetros elétricos das células solares em função da velocidade de esteira na temperatura de recozimento de 350 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz. | 58 |

- Tabela 14 - Parâmetros elétricos das células solares sem processamento com laser para a temperatura de queima da malha frontal de 650 °C, 700 °C e 750 °C. 60
- Tabela 15 - Parâmetros elétricos das células solares em função da distância entre os pontos, para a temperatura de recozimento de 350 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz. 62
- Tabela 16 - Parâmetros elétricos das células solares em função da distância entre pontos, na temperatura de recozimento de 350 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz para lâminas Si-Cz de pior qualidade. 63
- Tabela 17 – Refletância média ponderada e espessura da camada passivadora de SiO₂ e do filme antirreflexo. 65
- Tabela 18 - Parâmetros elétricos das células solares em função da área de contato para temperatura de recozimento de 350 °C, V_E de 70 cm/min, potência de 13 W e frequência de 80 kHz. 67
- Tabela 19 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 350 °C, temperatura de difusão de 855 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz. 70
- Tabela 20 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 400 °C, temperatura de difusão de 855 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz. 70
- Tabela 21 - Parâmetros elétricos das células solares em função da velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 450 °C, temperatura de difusão de 855 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz. 71
- Tabela 22 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 350 °C, temperatura de difusão de 865 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz. 72
- Tabela 23 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 400 °C, temperatura de difusão de 865 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz. 73
- Tabela 24 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 450 °C, temperatura de difusão de 865 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz. 74
- Tabela 25 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 300 °C, temperatura de difusão de 875 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz. 74

- Tabela 26 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 400 °C, temperatura de difusão de 875 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz. 75
- Tabela 27 - Parâmetros elétricos das células solares em função da velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 450 °C, temperatura de difusão de 875 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz. 75
- Tabela 28 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 350 °C, temperatura de difusão de 885 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz para o processo 15..... 76
- Tabela 29 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 400 °C, temperatura de difusão de 885 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz para o processo 15..... 77
- Tabela 30 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 450 °C, temperatura de difusão de 885 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz para o processo 15..... 77
- Tabela 31 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 350 °C, temperatura de difusão de 885 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz para o processo 18..... 78
- Tabela 32 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 400 °C, temperatura de difusão de 885 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz para o processo 18..... 78
- Tabela 33 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 450 °C, temperatura de difusão de 885 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz para o processo 18..... 79
- Tabela 34 - Resistência de folha e tempo de vida dos portadores de carga minoritários medidos em lâminas de PV-Si-FZ após diferentes etapas de processamento e temperatura de difusão de fósforo (T_D). 80
- Tabela 35 – Comparação dos resultados da resistência de folha e do tempo de vida dos portadores de carga minoritários em PV-Si-FZ e Si-Cz, processadas com o mesmo método de fabricação. 81

- Tabela 36 – Comparação dos resultados da resistência de folha e do tempo de vida dos portadores de carga minoritários para o mesmo método de fabricação de Si-Cz. 82
- Tabela 37 - Parâmetros elétricos das células solares em função do tempo de oxidação para a temperatura de recozimento de 350 °C, velocidade de recozimento de 65 cm/min, potência de 15 W e frequência de 80 kHz. . 83
- Tabela 38 - Parâmetros elétricos das células solares com passivação na face posterior com SiO₂, TiO₂ depositado sobre o SiO₂ e TiO₂, processadas com temperatura de recozimento de 350 °C e velocidade de recozimento de 75 cm/min..... 84
- Tabela 39 - Parâmetros elétricos das células solares com passivação na face posterior com SiO₂, TiO₂ depositado sobre o SiO₂ e TiO₂, processadas com temperatura de recozimento de 400 °C e velocidade de recozimento de 75 cm/min..... 85
- Tabela 40 - Parâmetros elétricos das células solares com passivação na face posterior com SiO₂, TiO₂ depositado sobre o SiO₂ e TiO₂, processadas com temperatura de recozimento de 450 °C e velocidade de recozimento de 75 cm/min..... 85
- Tabela 41 - Parâmetros elétricos das células solares com passivação na face posterior com SiO₂, TiO₂ depositado sobre SiO₂ e TiO₂, processadas com temperatura de recozimento de 350 °C..... 86
- Tabela 42 - Parâmetros elétricos das células solares com passivação na face posterior com SiO₂, TiO₂ depositado sobre o SiO₂ e TiO₂, processadas com temperatura de recozimento de 400 °C..... 87
- Tabela 43 - Parâmetros elétricos das células solares com passivação na face posterior com SiO₂, TiO₂ depositado sobre o SiO₂ e TiO₂, processadas com temperatura de recozimento de 450 °C..... 88

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--|--------------------|
| 2DS – <i>Two degree system</i> – Sistema de dois graus | |
| AM1,5G – <i>Air mass 1,5 global</i> – Massa de Ar 1,5 espectro solar global | |
| BSF – <i>Back surface field</i> – Campo retrodifusor | |
| D _P – Distância entre pontos | mm |
| FF – Fator de forma | |
| I _{MP} – Corrente no ponto de máxima potência | mA |
| I _{SC} – Corrente de curto-circuito | mA |
| J – Densidade da corrente elétrica | mA/cm ² |
| J _{SC} – Densidade de corrente de curto-circuito | mA/cm ² |
| LFC – <i>Laser fired contacts</i> – Contatos formados por laser | |
| P _{MP} – Potência máxima | W |
| PECVD – <i>Plasma enhanced chemical vapour deposition</i> – Deposição química de vapor aprimorada por plasma | |
| PERC – <i>Passivated emitter and rear cell</i> - Célula solar com emissor passivado e face posterior passivada | |
| PERL – <i>Passivated emitter with rear locally diffused</i> - Emissor passivado e com difusão posterior localizada | |
| QSSPC – <i>Quasi-steady-state photoconductance</i> – Regime quase-permanente da fotocondutância | |
| R _P – Resistência em paralelo | Ω |
| R _S – Resistência em série | Ω |
| R _□ – Resistência de folha | Ω/□ |
| RCA – <i>Radio Corporation of America</i> | |
| T _D – Temperatura de Difusão de Fósforo | °C |
| t _o – Tempo de Oxidação | min |
| T _Q – Temperatura de Queima | °C |
| T _R – Temperatura de recozimento | °C |
| V _E – Velocidade de esteira | cm/min |
| V _{MP} – Tensão no ponto de máxima potência | mV |
| V _{OC} – Tensão de circuito aberto | mV |
| η – Eficiência | % |
| τ – Tempo de vida dos portadores de carga minoritários | μs |

RESUMO

COUTINHO, D.A.K. **Desenvolvimento de Células Solares com Contatos Posteriores Formados por Radiação Laser e Análise da Passivação na Face Posterior.** Porto Alegre. 2015. 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.

Neste trabalho foram desenvolvidas células solares de silício com contatos formados por radiação laser e passivação na face posterior. Para isso, foram desenvolvidos processos para produção de células solares a partir de lâminas de silício tipo p de dois tipos diferentes de substrato. O objetivo foi desenvolver um processo de fabricação de células solares com contato e difusão posterior formado em pontos por radiação laser e alumínio depositado por evaporação bem como avaliar a passivação na face posterior. Em lâminas de Si-Cz, a difusão de fósforo foi realizada a 865 °C. Da otimização experimental da potência e da frequência do sistema laser em lâminas de Si-Cz, constatou-se que a eficiência de 13,1 % foi obtida com a potência de 15 W e frequência de 80 kHz. Obteve-se a eficiência de 14,5 % para a temperatura de recozimento 350 °C e a velocidade de esteira de 66 cm/min. A otimização experimental da distância entre pontos e da área dos pontos de contato, resultou na eficiência de 14,1 %, para a distância entre pontos de 0,5 mm e área dos pontos de contato de 7230 μm^2 . Para substratos de PV-Si-FZ, a melhor temperatura de difusão de fósforo foi de 875 °C e obteve-se a eficiência de 14,0 %. Constatou-se que a eficiência foi similar para células solares processadas em lâminas de Si-Cz e PV-Si-FZ, devido o baixo tempo de vida dos portadores de carga minoritários. A deposição de um filme de TiO_2 na face posterior resultou em um aumento no fator de forma e da eficiência, porém o aumento da camada de óxido de silício reduziu a eficiência dos dispositivos.

Palavras-Chaves: Células solares, contato posterior por laser, passivação posterior.

ABSTRACT

COUTINHO, D.A.K. **Development of Solar Cells with Laser Fired Contacts and Analysis of the Back Surface Passivation Analysis.** Porto Alegre. 2015. Dissertation. Post-Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

This work was focused on the development of silicon solar cells with laser fired contacts and rear face passivation. Several processes were developed based on two different p-type silicon substrates. The objective was to develop a solar cell manufacturing process with laser fired contacts and aluminum deposited by evaporation, as well as to assess the rear passivation. In Si-Cz wafers, the phosphorus diffusion was performed at 865 °C. From the power and the frequency experimental optimization in Si-Cz wafers, it was found that the efficiency of 13.1 % was obtained with 15 W of power and 80 kHz of frequency. The efficiency of 14.5 % was achieved from the annealing temperature of 350 °C and belt speed of 66 cm/min. The experimental optimization of the distance between the dots and the contact area of the dots resulted on 14.1 % efficiency, for the distance between dots of 0.5 mm and the dot area contact of 7230 μm^2 . For the PV-Si-FZ substrate, with the best diffusion temperature of 875 °C, the efficiency of 14.0 % was obtained. It was found that the efficiency for Si-Cz and Si-FZ solar cell was similar, due to the low minority charge carrier lifetime. The deposition of a TiO₂ film on the rear side resulted in an increase of the fill factor and efficiency, however the increase of the silicon oxide layer reduced the efficiency of the devices.

Key-words: Solar cells, laser fired contact, rear cell passivation.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1. Considerações Iniciais

Energia é a fonte de toda a atividade humana. A energia movimenta nossos corpos, cozinha nossa comida, aquece nossas casas, etc. Um adulto em geral precisa de 2600 quilocalorias por dia para sobreviver, o que equivale a 1100 kWh por pessoa por ano. Entretanto, o consumo global de energia por pessoa por ano é em torno de 18500 kWh, quase 17 vezes mais que o necessário para a sua sobrevivência, comprovando que o ser humano é um grande consumidor de energia. Mundialmente, 80 % de toda a energia utilizada é de origem fóssil, e sua grande exploração impõe uma ameaça ao meio ambiente. Além disso, o mercado industrializado utiliza 80 vezes a energia necessária para a África subsaariana. Um quarto da população mundial utiliza três quartos da energia mundial. Os problemas observados pelo sistema de energia atual tornou-o inadequado para o desenvolvimento de longo prazo [1].

Muitas previsões sobre reservas de petróleo recuperáveis sugerem que a produção de petróleo deve estagnar nas primeiras décadas deste século, gradualmente caindo em um período de escassez de suprimentos e altos preços. As reservas de gás devem durar mais de 200 anos e as de carvão em torno de 3000 anos, considerando as taxas de consumo atuais. Com essas estimativas conclui-se que é necessária uma política de conservação do petróleo imediatamente [2].

Considerando os riscos de poluição, o gás é consideravelmente mais limpo que outros combustíveis, como o petróleo e o carvão, um dos mais poluentes. Estas fontes de energia causam três problemas de poluição atmosférica: aquecimento global, poluição do ar e acidificação do meio ambiente. Alguns dos mais ricos conglomerados industriais podem possuir a capacidade econômica e

tecnológica para tratar de tais problemas, mais a maioria dos países não a possui. Esses problemas estão se espalhando particularmente em regiões tropicais e subtropicais, mas as consequências econômicas, sociais e políticas ainda não são consideradas nestas sociedades. Com a exceção do gás carbônico, os componentes de combustíveis fósseis que poluem o ar podem ser removidos com custos menores que os custos causados pelo dano que provocam. Mesmo assim, os riscos de aquecimento global demonstram o quão problemático é o grande uso e dependência dos combustíveis fósseis [2].

Fontes de energia renováveis podem, em teoria, suprir até 13 TWh, o atual consumo anual de energia. Hoje em dia estas fontes de energia disponibilizam 2 TWh anualmente, representando em torno de 21 % da energia consumida mundial, da qual 15 % é a energia provinda da biomassa e 6 % de hidroelétrica. Entretanto, a maior parte da biomassa é na forma de madeira para combustível e de dejetos da agricultura e de animais. A utilização mundial de energias renováveis cresce mais de 10 % ao ano desde 1970, mas levará muito tempo antes que represente uma porção significativa da distribuição energética mundial [2].

As centrais hidroelétricas vêm se expandindo a quase 4 % anualmente, e mesmo que centenas de milhares de megawatts de energia tenham sido obtidos de tal maneira, o potencial energético restante é imenso, podendo revolucionar o suprimento de energia de países da África [2]. Esse tipo de energia pode dobrar sua contribuição até 2050, como mostra a Figura 1, alcançando a produção de 2000 GW em nível global. Neste período, prevê-se a emissão de até três bilhões de toneladas de CO₂ resultantes do uso de combustíveis fósseis [3].

A energia eólica é utilizada há séculos, principalmente para bombear água. Seu uso tem crescido rapidamente em regiões como a Califórnia e a Escandinávia. Nestes casos, turbinas eólicas são usadas para produzir energia elétrica. Vários países possuem essa tecnologia, mas grande parte do potencial energético eólico não é utilizado [4].

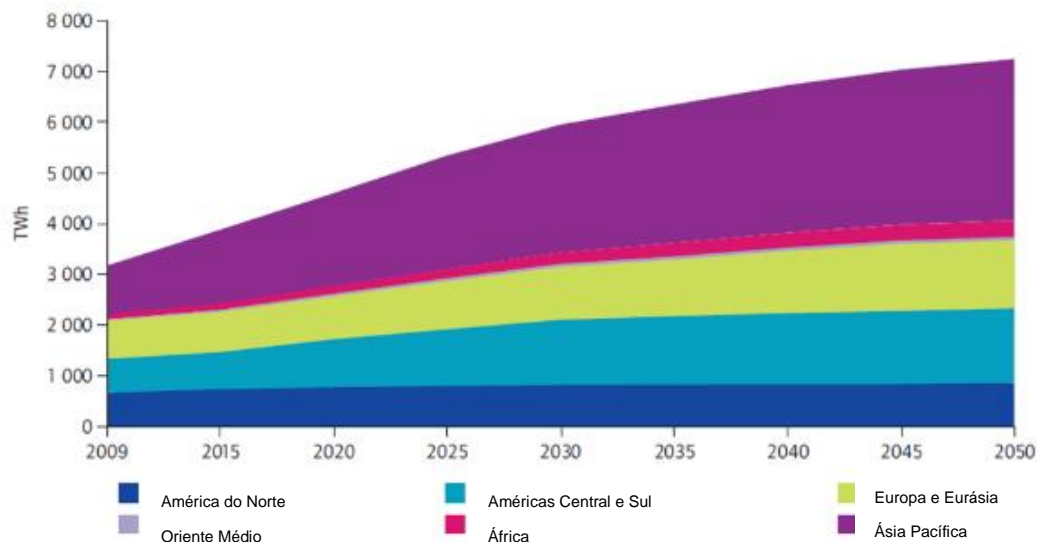


Figura 1 – Previsão de produção de energia elétrica por meio de centrais hidroelétricas [3].

Mesmo assim, a energia eólica demonstrou grande crescimento no início do século, gerando 238 GW em nível global no final de 2011, ao contrário dos 18 GW no fim de 2000. Nos últimos anos, essa energia tem sido mais explorada na Ásia, e não na Europa e América do Norte, onde sua utilização era inicialmente maior. A China tornou-se a líder global em termos de infraestrutura eólica em um curto período de tempo, passando dos Estados Unidos em 2010. Uma estimativa do crescimento da energia eólica até 2050 pode ser vista na Figura 2. O sistema 2DS (*two degree system*) considera que até 2050 há uma estimativa de 80% de que a temperatura média global aumentará em 2 °C, levando em conta as emissões de CO₂. O sistema 2DS-hiRen, que é similar ao 2DS, considera o desenvolvimento de energia nuclear mais lento [2].

O Sol distribui a energia necessária para a vida em nosso planeta. Em uma hora, a Terra recebe energia suficiente do Sol para suprir suas necessidades energéticas por quase um ano, ou seja, em torno de 5000 vezes a quantidade de energia proveniente de todas as outras fontes de energia [5].

A utilização de células solares para a produção de energia elétrica vem crescendo nas últimas décadas. A simplicidade e a característica modular dos sistemas fotovoltaicos permitem o uso em diversas aplicações e em diversos ambientes, como utilização em telhados de edifícios e casas [6].

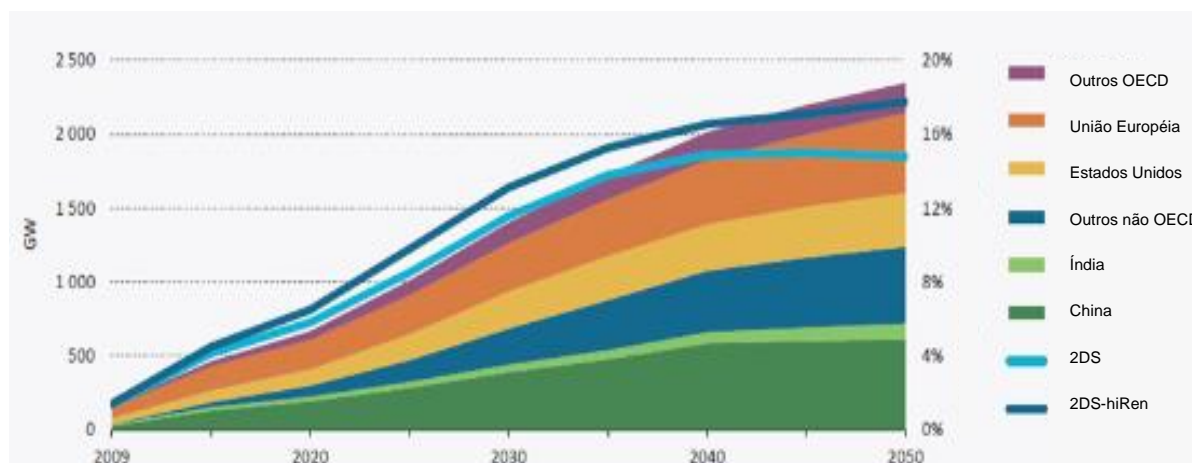


Figura 2 - Produção de energia por meios de centrais eólicas até 2050 [4].

A grande maioria das células solares usadas em sistemas fotovoltaicos são baseadas no silício cristalino. Avanços continuam nas tecnologias baseadas em silício mono e multicristalino, visando a redução de custos e obtenção de maiores eficiências. Dispositivos baseados em filmes finos alcançaram a produção em larga escala, mas somente um percentual pequeno do mercado é ocupado por sistemas fotovoltaicos com módulo de filmes finos [6].

Entre 2000 e 2011, a energia solar fotovoltaica foi a fonte de energia renovável com o maior crescimento mundial, chegando a produzir 65 GW no final de 2011, comparado com apenas 1,5 GW em 2000. Em 2011, a Alemanha e a Itália representaram mais da metade do potencial global de sistemas fotovoltaicos instalados, seguidos pelo Japão, Espanha, Estados Unidos e China [7]. Em 2013, a capacidade instalada em sistemas fotovoltaicos foi de 37 GW, com crescimento de 35 % em relação a 2012. A potência total instalada no mundo é de 136,7 GW, que corresponde a quase 10 vezes a potência da central hidrelétrica de Itaipu [8]. Estima-se que até 2050, os sistemas fotovoltaicos poderão suprir 11 % da energia global requerida e evitar a emissão de 2,3 bilhões de toneladas de gás carbônico por ano. Na Figura 3 apresenta-se a estimativa da produção de energia elétrica por meio de sistemas fotovoltaicos [9].

Os sistemas fotovoltaicos residenciais e comerciais podem atingir paridade com a rede elétrica até 2020 em diversas regiões, isto é, o custo do kWh será similar ao custo do kWh consumido nas residências. Neste caso, a tecnologia

torna-se competitiva nas regiões mais ensolaradas do planeta até 2030 e poderá prover 5 % da energia utilizada no mundo [8].

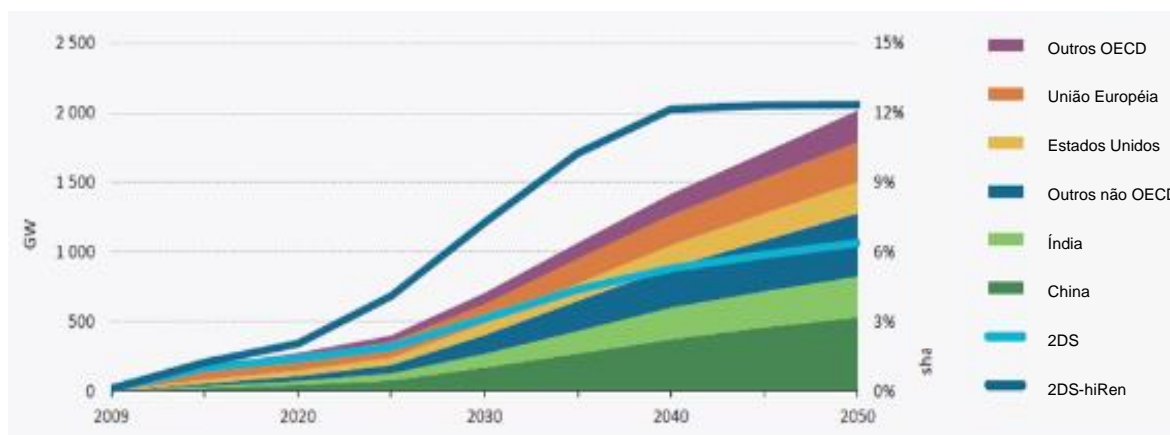


Figura 3 – Produção de energia elétrica por meio de sistemas fotovoltaicos até 2050 [8].

Atualmente, silício multi ou monocristalino é a matéria prima mais utilizada para a produção de células solares. Utilizando lâminas de silício, a indústria oferece módulos fotovoltaicos por 4-5 US\$ por watt. A eficiência de conversão energética de células solares de silício está entre 11 % e 17 %. Infelizmente, a energia gerada por células solares de silício ainda é mais cara que energia elétrica convencional, limitando sua aplicação em larga escala [9].

A indústria de células solares de silício está baseada em dispositivos com campo retrodifusor posterior de alumínio (Al-BSF) formado por metalização por serigrafia com pasta de alumínio depositada em substratos tipo p, crescidos pelo método Czochralski (Si-Cz). A eficiência média de células solares industriais é de 16,5 % [10]. A tecnologia de passivação por Al-BSF limita a eficiência, especialmente em substratos finos [11]. A pasta de alumínio depositada causa abaulamento na lâmina, mas, para evitar esse problema, um método de fabricação de células solares é baseado na passivação da face posterior e formação do contato e difusão de dopante em pontos.

Com estas características, a célula solar de 25 % apresentada por Green [12], foi produzida com emissor passivado e com difusão posterior localizada, denominada de PERL (*passivated emitter with rear locally diffused*), que é apresentada na Figura 4. Esta eficiência é elevada, quando comparada com a

primeira célula solar, que foi fabricada em 1941, que tinha menos de 1 % de eficiência.

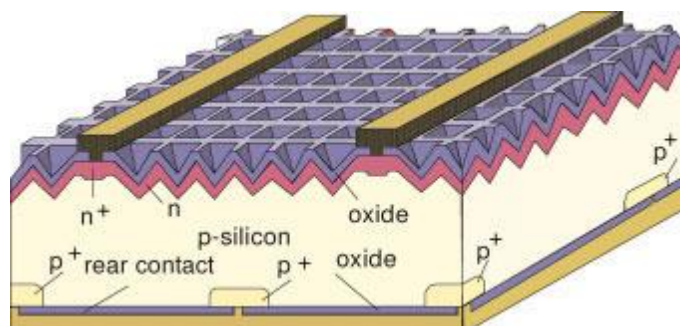


Figura 4 - Célula PERL [12].

Para se obter uma célula solar de silício com alta eficiência (maior ou igual a 20 %) é importante passivar ambas as faces da célula. A passivação consiste em diversos métodos que têm como objetivo reduzir a recombinação dos portadores de carga minoritários. Com boa passivação das superfícies, o comprimento de difusão dos portadores de carga minoritários na célula solar excede a espessura da lâmina de silício [12].

1.2. Objetivos

O objetivo desta dissertação foi desenvolver um processo para produção de células solares com passivação na face posterior com contato e difusão realizados por radiação laser em pontos bem como avaliar a influência da passivação na face posterior. A malha metálica na face frontal será formada pela metalização por serigrafia, típica da indústria de células solares.

Os objetivos específicos foram:

- Desenvolver um processo de fabricação de células solares com contato e difusão posterior formados por radiação laser e alumínio depositado por evaporação;
- Otimizar experimentalmente a potência e a frequência do sistema laser;
- Otimizar experimentalmente a temperatura e a velocidade de esteira durante o recozimento;

- Avaliar a influência da distância entre pontos e da área dos pontos de contato posteriores nos parâmetros elétricos das células solares;
- Otimizar a temperatura de difusão de fósforo para células solares processadas em silício crescido pela técnica da fusão zonal flutuante, específico para células solares (PV-Si-FZ);
- Comparar células solares desenvolvidas em substrato de Si-Cz, grau solar e em lâminas de silício PV-Si-FZ;
- Comparar células solares com passivação da face posterior com óxido de silício com diferentes espessuras e com óxido de titânio.

2. CÉLULAS SOLARES COM CONTATOS FORMADOS POR RADIAÇÃO LASER

2.1. A Célula Solar

A conversão da energia solar (radiação eletromagnética) em energia elétrica é um fenômeno físico conhecido como o efeito fotovoltaico. Quando materiais semicondutores são expostos à radiação solar, os fótons incidentes podem transferir sua energia para os elétrons de valência do material. Sempre que um fóton quebra uma ligação, um elétron se liberta, deixando uma lacuna na rede cristalina. As lacunas comportam-se como partículas similares aos elétrons, mas com carga positiva. A separação das lacunas e dos elétrons em um material semiconductor produz uma corrente elétrica e uma diferença de potencial. A separação dos portadores de carga é realizada por meio de um campo elétrico, e desta forma, evita-se que os elétrons e as lacunas formadas se recombinem. Porém, antes da separação sempre há probabilidade de recombinação dos portadores de carga.

Considerando-se o semiconductor silício, uma das regiões, denominada tipo n, é dopada com fósforo, que possui cinco elétrons de valência. Como o fósforo possui um elétron a mais que o silício na última camada, a região dopada possui uma concentração de elétrons maior que a concentração de lacunas. A outra região, denominada tipo p, é dopada com boro, possuindo um elétron a menos que o silício na última camada, ou seja, a concentração de lacunas é maior que a de elétrons. Entre as regiões tipo p e tipo n forma-se um campo elétrico direcionado da região tipo n para a região tipo p [1].

Uma célula fotovoltaica típica da indústria produz da ordem de 4 a 5 watts com aproximadamente 0,5 – 0,6 V [13], em tensão contínua, sendo necessárias

várias células solares associadas em um sistema série-paralelo, como esquematizado na Figura 5(a). Associando-se eletricamente as células solares e proporcionando a devida proteção às intempéries, obtém-se o módulo fotovoltaico, com a potência desejada (de 10 W a 350 W). O conjunto de módulos fotovoltaicos forma o painel fotovoltaico, como se pode ver na Figura 5(b).

Como os módulos fotovoltaicos produzem energia somente quando incide radiação solar, nos sistemas fotovoltaicos isolados emprega-se um sistema de armazenamento de energia. Baterias são os dispositivos mais comuns para essa tarefa. Porém, os sistemas interligados à rede elétrica, não necessitam de um sistema de armazenamento de energia e utilizam a rede elétrica para injetar energia, quando há radiação solar, e obter energia durante a noite ou quando o consumo é maior que a produção [5].

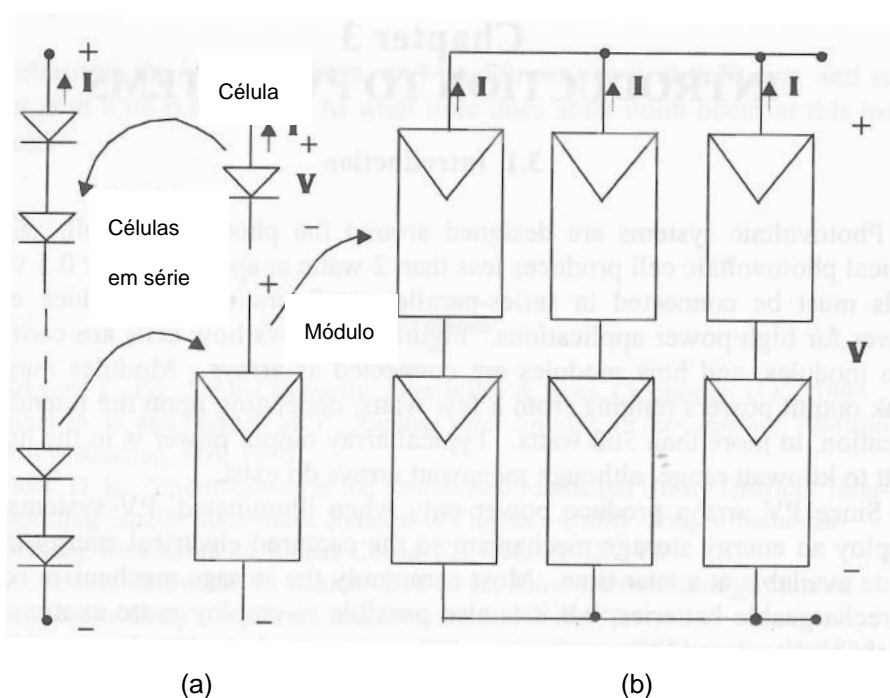


Figura 5 – (a) Módulo fotovoltaico constituído de células solares e (b) módulos fotovoltaicos formando o painel [5].

A estrutura da célula solar de silício é composta por uma base de silício dopado, o emissor, o campo retrodifusor, eletrodos metálicos nas duas faces da célula solar e uma camada de filme antirreflexo para diminuir a reflexão da radiação solar, como é apresentado na Figura 5 [14].

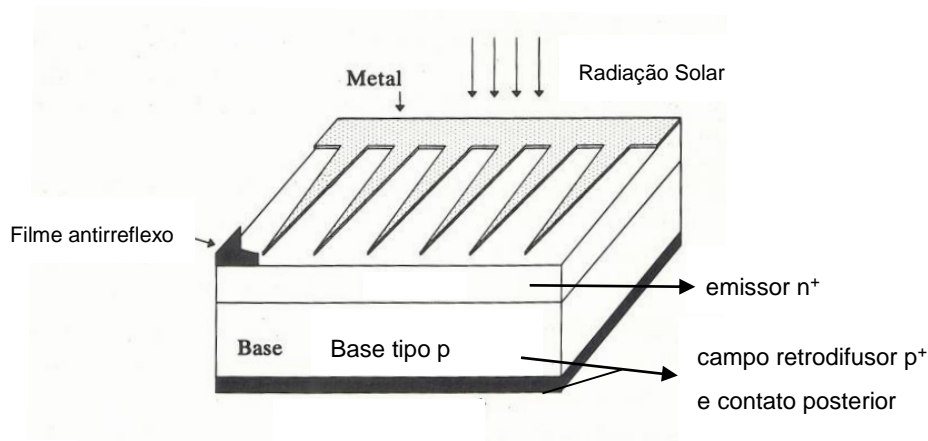


Figura 6 - Estrutura básica de uma célula solar de silício [1].

A curva característica de uma célula solar (curva I-V) é obtida aplicando uma diferença de potencial variável, enquanto é medida a corrente elétrica gerada pela mesma, resultando em um gráfico da corrente elétrica (I) em função da tensão aplicada (V). As condições padrão para a obtenção da curva I-V são: irradiância de 1 kW/m^2 , espectro solar AM1,5G e temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ da célula solar. A partir da curva I-V se obtém os valores de tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente de curto-circuito (I_{sc}), tensão no ponto de máxima potência (V_{MP}), corrente no ponto de máxima potência (I_{MP}), potência máxima (P_{MP}), fator de forma (FF) e eficiência (η). Há outra maneira de representar o gráfico, podendo ser da densidade da corrente elétrica (J) em função da tensão aplicada. A densidade de corrente de curto-circuito (J_{sc}) representa a razão entre a corrente elétrica de curto-circuito e a área da célula solar [15].

A tensão de circuito aberto, destacada na Figura 7, representa a máxima tensão disponível da célula solar, sem corrente elétrica. Influenciada pela corrente de saturação no escuro e pela corrente fotogerada assim como pela temperatura da célula solar, a V_{oc} está diretamente relacionada com a recombinação dos portadores de carga minoritários no dispositivo. A corrente de curto-circuito, também identificada na Figura 7, é a corrente que flui através da célula solar quando a tensão na mesma é zero. A I_{sc} ocorre devido à geração e coleta dos portadores de carga gerados pela incidência de radiação solar. Em uma célula solar ideal, a I_{sc} e a corrente fotogerada são iguais. A I_{sc} é o maior valor de corrente gerada pela célula solar [16].

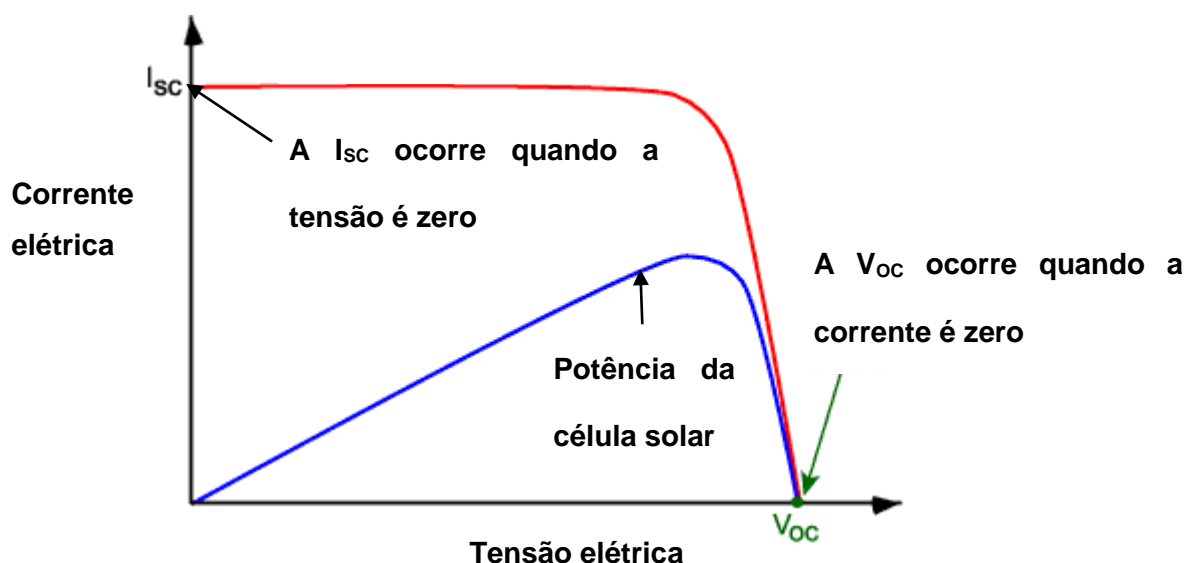


Figura 7 - Curva I-V identificando a tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito [16].

A V_{oc} e I_{sc} são os valores máximos de tensão elétrica e corrente elétrica, respectivamente, de uma célula solar, mas a potência nos dois pontos é zero. O fator de forma, indicado na Figura 8, em conjunto com a V_{oc} e I_{sc} , determina a potência máxima de uma célula solar. O fator de forma é a razão da potência máxima da célula solar pelo produto de V_{oc} e I_{sc} . A eficiência da célula solar é definida como a razão entre a energia elétrica produzida pela célula e a energia solar incidente. A eficiência depende do espectro da radiação solar e da temperatura da célula solar, sendo necessário fixar tais parâmetros para comparar células solares [16].

Além dos parâmetros já mencionados, pode-se mencionar as resistências em série (R_s) e em paralelo (R_p). A resistência em série é causada por cinco fatores: resistência lateral do emissor, as resistências de contato frontal e posterior, a resistência das trilhas metálicas e a resistência do metal da barra coletora [17].

A R_s reduz o fator de forma, mas valores muito altos também reduzem o valor da corrente de curto-circuito, como pode ser observado na Figura 9(a) [16].

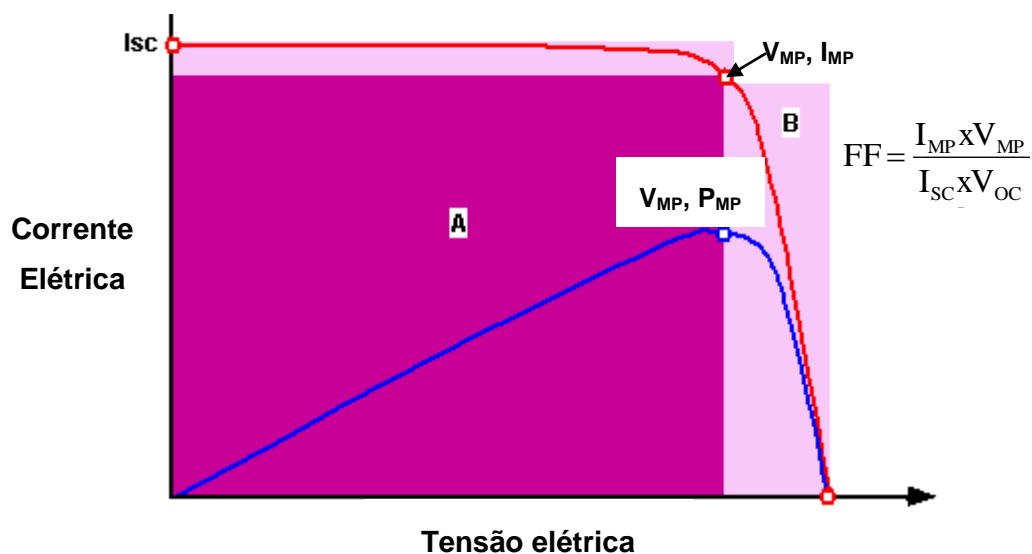


Figura 8 - Curva I-V demonstrando o fator de forma [16].

A resistência em paralelo ocorre devido a fatores como fuga de corrente pelas bordas da célula, difusões ao longo de discordâncias ou contornos de grãos, pequenos curtos-circuitos metálicos, etc. Baixa resistência em paralelo provoca perda de potência nas células fotovoltaicas, porque fornece um caminho alternativo para a corrente elétrica fotogerada. A resistência em paralelo reduz principalmente a tensão de circuito aberto da célula solar, como mostra a Figura 9(b) [18].

Na Figura 9 pode-se comparar os efeitos dos dois tipos de resistência no comportamento da célula solar. Quanto menor a R_p , menor a V_{oc} e FF, e quanto maior a R_s , menor FF e I_{sc} [19].

2.2. Processo de Fabricação de Células Solares

Um processo típico de fabricação das células solares da indústria envolve a texturação da superfície das lâminas de silício, seguido da limpeza química com a solução RCA, difusão de fósforo, ataque do silicato de fósforo, seguido de outra limpeza RCA, deposição do filme antirreflexo, formação da malha metálica frontal e deposição e difusão de alumínio na face posterior por serigrafia e isolamento das bordas [20].

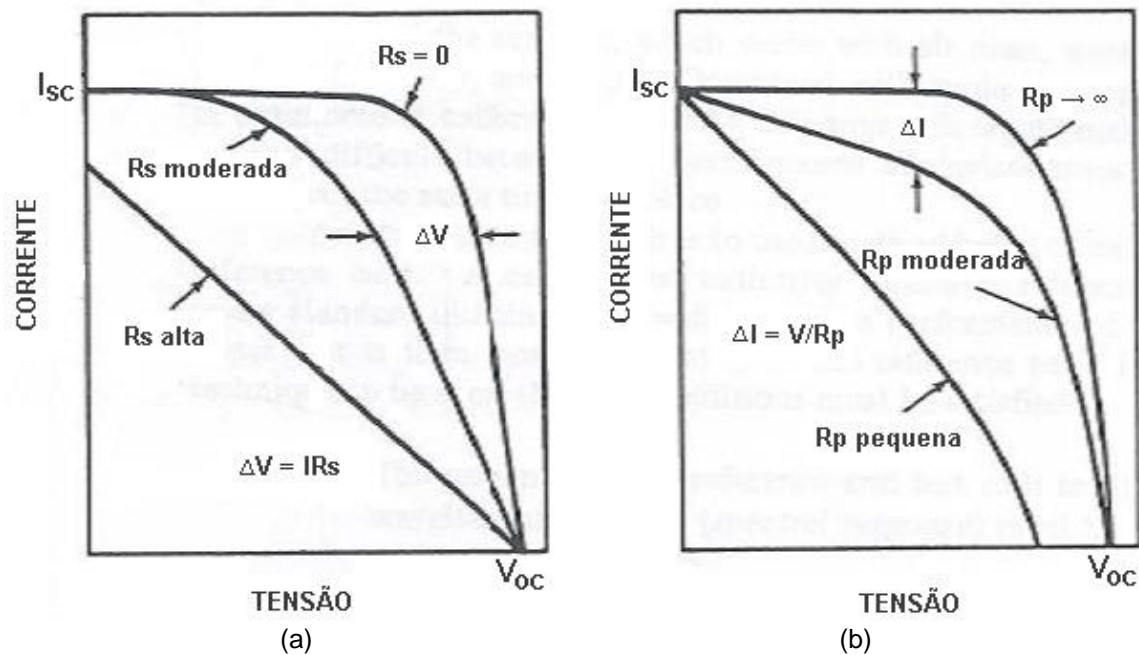


Figura 9 - Influência da (a) resistência em série e (b) resistência em paralelo nas células solares [19].

Atualmente, a deposição de alumínio por serigrafia na face posterior da célula solar é o método mais utilizado para reduzir a taxa de recombinação dos portadores de carga minoritários nesta região, mas a deformação durante o resfriamento da liga alumínio-silício formada é um problema da técnica. A alternativa é depositar uma camada passivadora na face posterior da célula solar, formando contatos elétricos pontuais no silício, como proposto pela célula solar com emissor passivado e face posterior passivada, denominada PERC (*passivated emitter and rear cell*). O resultado desta técnica é um dispositivo com maior eficiência, graças à redução da velocidade de recombinação na região posterior, além de evitar a deformação da célula. Além disso, a camada passivadora serve como um espelho, aumentando a refletância na face posterior e, com isso, a eficiência da célula solar. A criação de pontos no silício formados por processos de fotolitografia, seguida da deposição de alumínio por evaporação, utilizada na célula solar PERC, é substituída pela utilização de radiação laser para realizar o contato e a difusão do alumínio evaporado na face posterior. Esta técnica é denominada de LFC (*laser fired contact*). Uma comparação entre os processos para produzir células solares PERC com fotolitografia e LFC pode ser observada na Figura 10 [21].

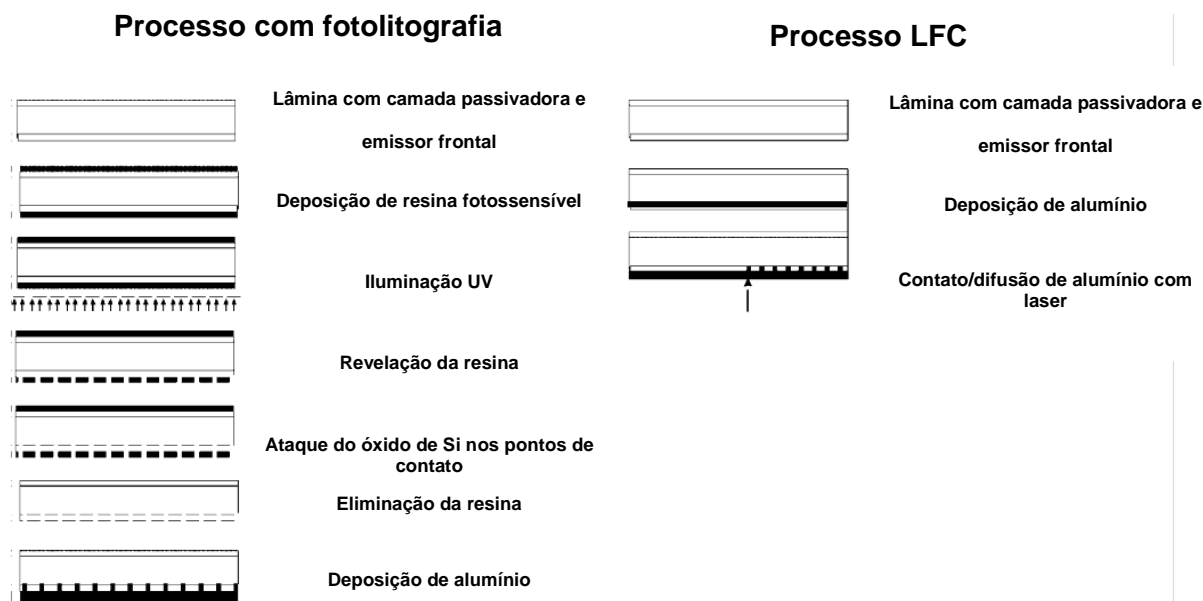


Figura 10 – Comparação do método com fotolitografia e o método LFC para o processamento de células solares com região posterior passivada [21].

Além da estrutura PERC, há outro método para produzir células solares com emissor passivado, mas a face posterior com difusão localizada, denominada PERL. Zhao et al. [22] desenvolveram uma célula PERL em substratos criados por crescimento magnético Czochralski com 400 μm de espessura. A maior vantagem da célula solar PERL, apresentada na Figura 11, é a passivação da maior parte da célula com SiO_2 crescido em ambiente com tricloroetano (TCA). Os contatos frontal e posterior foram passivados por difusão de fósforo e boro, respectivamente. As pirâmides invertidas criadas na face frontal e a face posterior que reflete a radiação solar devido à camada de SiO_2 criam um sistema que aprisiona a radiação solar. Por tais fatores, a célula PERL possui valores de V_{oc} e J_{sc} altos em substratos de Si-FZ. A metalização foi otimizada, visando diminuir as sombras formadas e a perda por resistência em série [22].

A célula solar produzida pelo processo LFC é uma ótima alternativa para realizar a estrutura PERC em escala industrial. Comparando com células solares produzidas com BSF na face posterior, esse método precisa de uma camada de alumínio evaporado na face posterior [23].

Em comparação com o processo com fotolitografia, a técnica LFC simplifica o processo, implementando o contato pontual seletivo com um sistema laser e difundindo o alumínio no silício na face posterior [24].

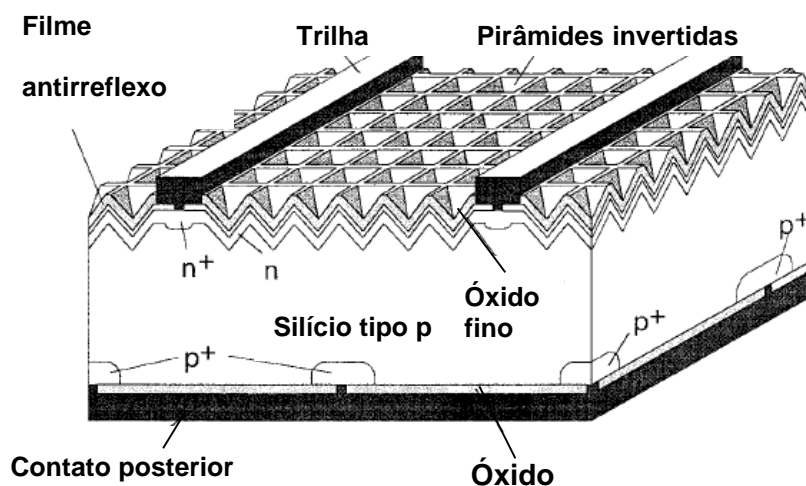


Figura 11 – Esquema da estrutura PERL [22].

A tecnologia utilizada na passivação posterior resulta em uma eficiência maior em comparação com outras tecnologias, mas para a produção de células solares com LFC, são necessárias mais etapas de processo. Com isto em mente, pesquisas foram realizadas por diversos grupos, visando simplificar a formação da camada dielétrica, e também foi estudada a utilização de diversos tipos de laser para a remoção seletiva da camada dielétrica [25]. Em todos os casos o objetivo foi criar uma camada dielétrica para passivar a superfície do silício na face posterior.

Nos experimentos de Schneiderlöchner et al. [24] foi utilizado um sistema laser com bombeamento por lâmpada *flash*. O laser operou no modo TEM₀₀ com um comprimento de onda de 1064 nm. A frequência e a corrente variaram entre 1 e 30 kHz e 16 e 28 A, respectivamente. As amostras de 2 cm x 2 cm foram obtidas em lâminas de silício crescido pela técnica de fusão zonal flutuante (Si-FZ) tipo p de 0,5 Ω .cm. Na Figura 12 apresenta-se um esquema da formação das amostras. Depositaram um filme passivador, seguido da evaporação de uma camada de alumínio de 2 μ m de espessura em ambos os lados e a formação do contato/difusão implementada por laser. Para utilizar como parâmetro, amostras de comparação com contatos criados por fotolitografia, com área de contato variando de 0,25 % a 4 % da área total, foram preparadas [24].

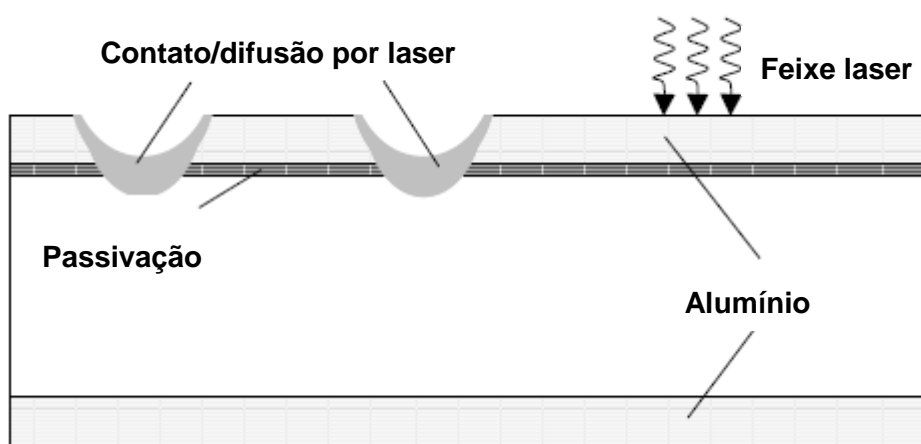


Figura 12 - Visão lateral do corpo de teste para o processo LFC [24].

Parâmetros como o espaçamento entre pontos foram variados e foram comparados os valores de resistência entre a face frontal e posterior das lâminas processadas por LFC e fotolitografia. Metade das lâminas foram passivadas com uma camada de 60 nm de $\text{SiN}_x\text{:H}$, e a outra metade com óxido de silício de 100 nm de espessura. As células solares processadas com a estrutura PERC foram medidas sob as condições padrão de medição de irradiância de 100 mW/cm^2 , à $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e os melhores resultados são apresentados na Tabela 1 [24]. Nota-se que a melhor célula solar processada com laser atingiu a eficiência de 21,3 %, próxima da eficiência das células solares processadas com fotolitografia. Os melhores resultados foram obtidos com passivação de SiO_2 .

2.3. Células Solares com Deposição de Alumínio por Evaporação

Na deposição por evaporação, o alumínio sólido é colocado em um cadinho dentro de uma evaporadora. E, por feixe de elétrons, o material é fundido e deposita-se nas lâminas suspensas [20].

Nekarda et al. [26] avaliaram diferentes técnicas de evaporação, analisando a condutividade e homogeneidade de filmes finos de alumínio, com a finalidade de produzir células solares com contato/difusão posterior com radiação laser.

Tabela 1 - Melhores resultados para células solares PERC processadas com o método LFC, comparadas com células de referência processadas com fotolitografia [24].

| Passivação Posterior | Tipo de célula | V _{oc} (mV) | J _{sc} (mA/cm ²) | FF (%) | η (%) |
|--|----------------|----------------------|---------------------------------------|--------|-------|
| SiO ₂ , alumínio depositado por feixe de elétrons | Referência | 683 | 39,4 | 81,1 | 21,9 |
| | | 682 | 39,3 | 81,5 | 21,9 |
| | | 678 | 38,6 | 81,1 | 21,3 |
| | | 675 | 39,0 | 80,3 | 21,2 |
| SiN _x :H, alumínio depositado por feixe de elétrons | LFC | 667 | 36,7 | 79,0 | 19,4 |
| | | 665 | 36,4 | 79,5 | 19,3 |
| SiN _x :H, alumínio depositado por <i>sputtering</i> | | 661 | 36,2 | 79,4 | 19,0 |
| | | 656 | 36,1 | 79,6 | 18,9 |

Também avaliaram a qualidade da passivação com óxido de silício de 100 nm de espessura. Com a evaporação por processo térmico e passivação com SiO₂, a reflexão interna na face posterior é similar aos resultados obtidos pela deposição por feixe de elétrons e o tempo de vida dos portadores de carga minoritários foi de 250 μs. Células solares com eficiência similar foram produzidas com as duas técnicas de evaporação. A eficiência alcançada foi de 21 %.

A espessura da camada de alumínio tem uma grande influência na condutividade lateral (*lateral conductivity*) e, por consequência, na eficiência da célula solar. Foram feitas análises relacionando a espessura da camada de alumínio, e a eficiência. Foi constatado que com espessuras entre 0,5 μm e 3 μm a eficiência é maior quanto mais espessa a camada de alumínio, sendo que 2 μm é a espessura mínima para se evitar perdas significativas de eficiência [27].

Células solares também foram desenvolvidas com deposição do Al na face posterior por *sputtering* e formação do contato/difusão por radiação laser [28]. Com metalização da face frontal por *sputtering*, foram obtidas células solares de 4 cm² com 21,1 % de eficiência em lâminas de Si-FZ, tipo p. Com este tipo de metalização, foi possível usar um emissor com resistência de folha de 120 Ω/□. A passivação foi formada por óxido de silício. Com o mesmo tipo de substrato e área,

Ramanathan e colaboradores [29] desenvolveram células solares com eficiência de 20,1 %, com metalização por serigrafia em ambas as faces. Neste caso, a passivação na face posterior foi formada pela deposição por *spin-on* de um dielétrico e a formação do óxido posterior e do emissor de fósforo, com resistência de folha de $75 \Omega/\square$, foi realizada no mesmo processo térmico. A abertura dos pontos no dielétrico foi produzida com uma pasta de ataque depositada por serigrafia.

Para avaliar a utilidade da técnica LFC, Schneiderlöchner et al. [21] prepararam lâminas de silício Si-FZ passivadas com uma camada de 60 nm de nitreto de silício e uma camada de alumínio de 2 μm depositado por feixe de elétrons em ambas as faces. Pontos de contato foram criados por LFC. Os resultados obtidos foram, então, comparados com referências de amostras processadas com fotolitografia e abertura dos contatos por ataque com plasma. Após a otimização dos parâmetros do laser, células PERC de 4 cm^2 com contatos frontais formados por fotolitografia foram processadas em Si-FZ tipo p. Além da passivação posterior com $\text{SiN}_x\text{:H}$ por PECVD (*plasma enhanced chemical vapour deposition*), também foram preparadas células solares de silício com SiO_2 crescido termicamente na face posterior. A comparação dos resultados é apresentada na Tabela 2 [21].

Tabela 2 – Comparação dos resultados de células solares de silício com a técnica LFC e com o processo convencional PERC com ataque químico [21].

| Passivação | Tipo de processo | V_{oc} (mV) | J_{sc} (mA/cm^2) | FF (%) | η (%) |
|-------------------------|-------------------|---------------|--------------------------------------|--------|------------|
| SiO_2 | Ataque químico | 683 | 39,7 | 81,3 | 22,0 |
| | LFC | 679 | 38,6 | 81,1 | 21,3 |
| | LFC | 676 | 39,1 | 80,3 | 21,2 |
| $\text{SiN}_x\text{:H}$ | Ataque com plasma | 674 | 39,4 | 81,1 | 21,5 |
| | LFC | 665 | 37,0 | 79,1 | 19,5 |
| | LFC | 668 | 36,7 | 79,0 | 19,4 |

Com o processo convencional para produzir células solares PERC a eficiência alcançada foi de 22 % em células de 4 cm^2 , metalização por fotolitografia e substrato de alta qualidade (Si-FZ). Utilizando a técnica LFC, a eficiência reduziu-se

em torno de 0,7 %. Porém, se a abertura dos contatos for realizada por ataque com plasma, a eficiência reduz-se em 0,5 %, atingindo o valor de 21,5 %.

2.4. Células Solares com Deposição de Pasta de Alumínio por Serigrafia

A deposição de pasta de alumínio por serigrafia consiste na utilização de um equipamento denominado *screen-printer*. O alumínio em forma de pasta é colocado na máquina, que deposita a malha selecionada sobre a célula, com a ajuda de uma máscara com o formato de malha desejado [23].

Nekarda et al. [23] desenvolveram dois processos e produziram três lotes de células solares para provar a utilidade da deposição por serigrafia e o método LFC. No primeiro processo, um lote foi produzido em lâminas de silício com espessura de 120 μm e área de 125 mm x 125 mm. A eficiência dos dispositivos deste lote foi de no máximo 18 %. No segundo processo, as células solares de 20 mm x 20 mm apresentaram maior eficiência. Neste caso, as lâminas de silício foram crescidas pela técnica de fusão zonal flutuante, com 250 μm de espessura e a passivação da face posterior consistiu de 100 nm de óxido de silício e 2 μm de alumínio, depositados por deposição física em fase vapor (PVD). A eficiência encontrada foi de até 20,6 %. No terceiro lote a face posterior foi modificada, depositando uma camada de 30 nm de oxinitreto enriquecido com silício (SiO_xN_y) e uma camada de 70 nm de SiN_x . Também foi substituída a deposição de alumínio por PVD pela deposição por serigrafia. A eficiência encontrada foi de 20,5 %, sendo quase igual a eficiência máxima obtida utilizando o método PVD para a deposição do alumínio na face posterior [23].

Nos experimentos de Lee et al. [30], foram utilizadas lâminas de silício monocristalino tipo p com uma espessura de 130 μm crescidas pelo método de fusão zonal flutuante e dopadas com boro. O processo começa com um banho químico para remover danos superficiais na lâmina, seguido da formação de um emissor de 50 Ω/\square obtido por meio da difusão de fósforo com POCl_3 e remoção da camada n^+ na face posterior utilizando hidróxido de tetrametilamônia (TMAH). Uma camada dupla de filme antirreflexo foi depositada sobre o emissor por PECVD [30].

Na face posterior, a passivação de $\text{SiO}_x/\text{SiN}_x/\text{SiO}_x\text{N}_y$ foi depositada, seguida da deposição de pasta de alumínio por serigrafia. Para comparar as diferentes estruturas posteriores, também foram fabricadas células solares com Al-BSF depositado por serigrafia. Após a serigrafia, os contatos posteriores de alumínio com o silício tipo p foram formados utilizando o laser para completar a célula PERC. A seguir, as células foram queimadas em um forno de esteira. Os resultados das células solares criadas são comparados e apresentados na Tabela 3 [31].

Tabela 3 – Características elétricas de células solares processadas em Si-FZ e Si multicristalino [30].

| Lâminas de silício 130 μm , 1 Ω .cm, tipo p | | J_{sc} (mA/cm ²) | V_{oc} (mV) | FF (%) | η (%) |
|---|--------|--------------------------------|---------------|--------|------------|
| FZ-Si | PERC | 35,6 | 639 | 77,3 | 17,6 |
| | Al-BSF | 33,2 | 620 | 78,0 | 16,2 |
| Si multicristalino | PERC | 34,9 | 633 | 77,8 | 17,2 |
| | Al-BSF | 33,2 | 619 | 77,5 | 15,9 |

Em ambos tipos de substrato, de alta qualidade (SI-FZ) e de baixa qualidade (Si multicristalino), a melhor eficiência foi obtida em células PERC, devido ao aumento da J_{sc} e V_{oc} , resultado da melhor passivação na face posterior.

3. METODOLOGIA

3.1. Processo de Fabricação

Foi desenvolvido um processo de fabricação para células solares PERC e metalização por serigrafia, típica de processos industriais. A lâmina de silício após a texturação inicial e limpeza RCA foi colocada em um forno de oxidação (marca Tystar) para formar uma camada de óxido de silício. A face posterior da lâmina foi coberta com resina fotossensível, e o óxido na face frontal foi removido com um ataque químico em HF tampão. Após uma limpeza RCA, as lâminas foram introduzidas no forno para difundir fósforo na face frontal. Depois de retirar o silicato de fósforo na face com fósforo com um ataque químico, foi realizada a limpeza RCA2 e medida a resistência de folha. Por fim, foi depositado um filme antirreflexo de óxido de titânio na face frontal da lâmina. A metalização frontal foi feita por serigrafia, enquanto que na face depositou-se uma camada de 2 μm de alumínio por feixe de elétrons, onde foram implementados os contatos por radiação laser, utilizando um laser da marca FOBA, ilustrado na Figura 13. Após o processamento, as células solares foram caracterizadas eletricamente sob condições padrão de medição. As lâminas de Si foram analisadas a partir da medição do tempo de vida dos portadores de carga minoritários.

Para o desenvolvimento das células solares de 4 cm^2 de área foram utilizadas lâminas de Si-Cz, tipo p, grau solar, orientação $\langle 100 \rangle$, de 100 cm de diâmetro, espessura de 200 μm , resistividade de base de 1 $\Omega\cdot\text{cm}$ a 20 $\Omega\cdot\text{cm}$ e tempo de vida dos portadores de carga minoritários entre 27 μs e 46 μs [33]. As lâminas foram fornecidas pela empresa Amex. Entende-se por silício grau solar o silício de alta pureza (99,999 % a 99,9999 %) empregado na produção de células solares fotovoltaicas. As características das lâminas de PV-Si-FZ, adquiridas da empresa Silicon Quest, são: tipo p, diâmetro de 100 mm, espessura de 255 a 305

μm , orientação $\langle 100 \rangle$, resistividade de base de 1 a 5 $\Omega\cdot\text{cm}$ e tempo de vida dos portadores de carga minoritários maior que 300 μs . Na Figura 14, mostra-se a célula solar que foi desenvolvida.

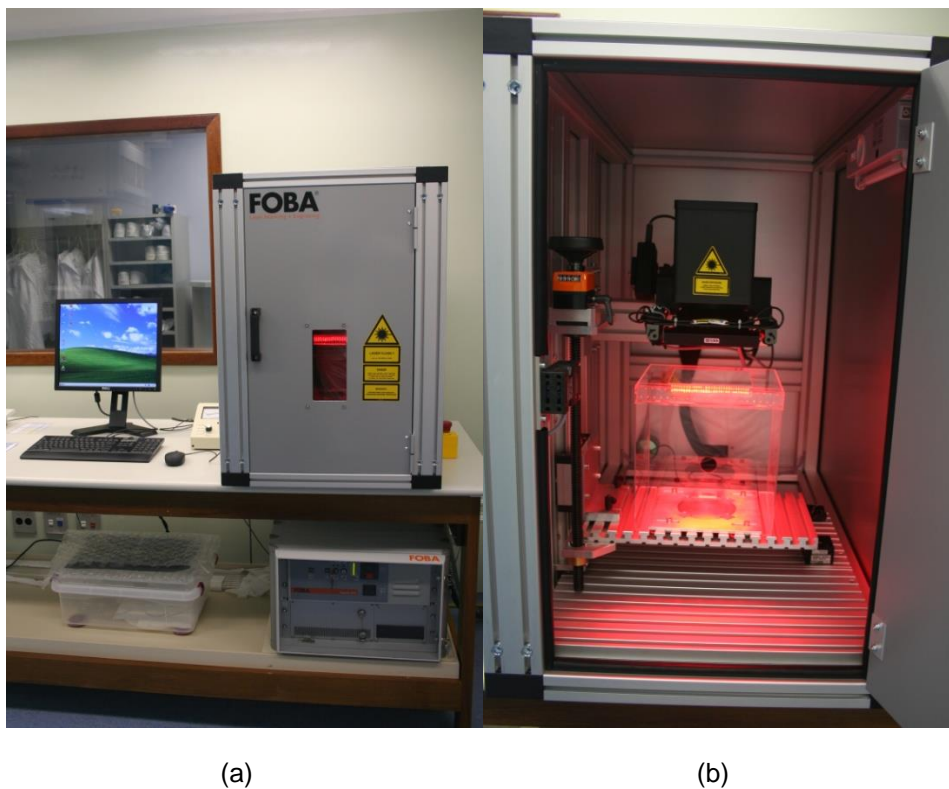


Figura 13 – Vista (a) externa e (b) interna do sistema laser utilizado para produzir o contato/difusão na face posterior das células solares.

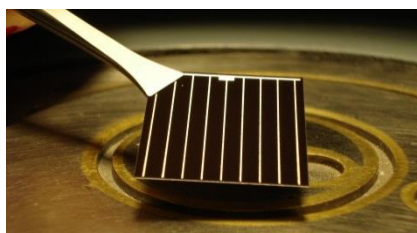


Figura 14 - Célula solar desenvolvida com contato/difusão de alumínio em pontos formados por radiação laser.

O processo de fabricação resume-se nas seguintes etapas:

- texturação das lâminas de silício;
- limpeza RCA2;
- oxidação a 1000 °C;
- deposição de resina, ataque do óxido de silício em solução de HF tampão e limpeza da resina;
- limpeza RCA1 e RCA2;

- difusão de fósforo a partir de POCl_3 ;
- ataque do silicato de fósforo na face frontal em solução de HF e ataque simultâneo das primeiras camadas do óxido de silício na face posterior [37];
- limpeza RCA2;
- deposição do filme antirreflexo (AR) de TiO_2 ;
- metalização por serigrafia na face frontal e queima;
- deposição por evaporação de 2 μm de alumínio na face posterior;
- corte das 9 células solares processadas em uma lâmina de Si com o sistema laser;
- formação do contato/difusão em pontos por laser na face posterior e recozimento, em forno de esteira.

O processo de fabricação será desenvolvido a partir da otimização da potência e da frequência do sistema laser, da temperatura e da velocidade de esteira durante o recozimento, da distância entre pontos e do diâmetro dos pontos formados por radiação laser, da temperatura de difusão de fósforo para células solares processadas em substrato de alta qualidade (PV-Si-FZ) e da passivação na face posterior com óxido de silício com diferentes espessuras e com óxido de titânio. Um resumo dos parâmetros variados nos processos, assim como o intervalo das variações pode ser observado na Tabela 4.

3.1. Texturação

A fabricação de células solares de silício começa com o processo denominado de texturação, que representa o ataque químico da lâmina de silício com KOH, para a formação de micropirâmides randômicas na superfície. A texturação possibilita um maior confinamento da radiação solar na célula. A texturação expõe os planos cristalinos (111) do silício, o que diminui a refletância na superfície [34]. O processo é realizado imergindo as lâminas em uma solução de KOH, isopropanol e água deionizada. As micropirâmides resultantes são apresentadas na Figura 15 (a) e 15 (b) com aumento de 730 vezes e de 2500 vezes, respectivamente. Esse processo reduz a refletância na superfície do silício monocristalino para o valor de 12 %, que se reduz a 3-4 % quando um filme AR de TiO_2 é depositado. A variação na refletância final pode ser atribuída por variações na espessura do filme AR e/ou no índice de refração [38].

Tabela 4 - Resumo dos parâmetros variados para lâminas Si-Cz e PV-Si-FZ.

| | | Parâmetro | Intervalo |
|-----------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------|
| Si-Cz | Passivação de Óxido | Tempo de Oxidação (min) | 120 e 240 |
| | Difusão de Fósforo | Temperatura de Difusão (°C) | 865 |
| | Deposição do Filme AR | Espessura do filme AR (nm) | 70 e 90 |
| | Sistema Laser | Potência (W) | 9 a 15 |
| | | Frequência (kHz) | 20 a 100 |
| Área do Ponto (μm^2) | | 2420 a 10430 | |
| | | Distância entre Pontos (mm) | 0,2 a 1,0 |
| | Recozimento | Temperatura de Recozimento (°C) | 200 a 450 |
| PV-Si-FZ | Passivação de Óxido | Tempo de Oxidação (min) | 120 e 240 |
| | Difusão de Fósforo | Temperatura de Difusão (°C) | 855 a 885 |
| | Deposição do Filme AR | Espessura do filme AR (nm) | 70 e 90 |
| | Recozimento | Temperatura de Recozimento (°C) | 300 a 450 |

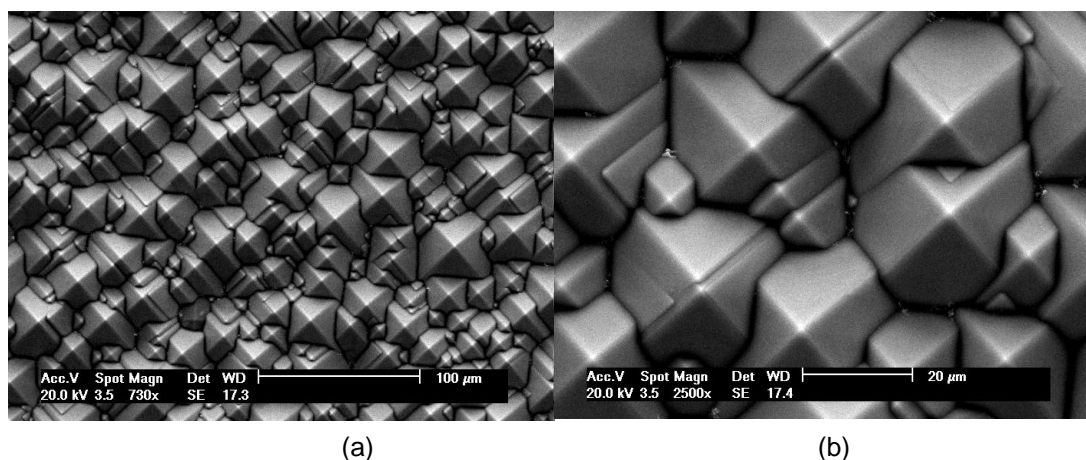


Figura 15 - Superfície da lâmina de silício monocristalino, após texturação com KOH com aumento de (a) 730 e (b) 2500 vezes.

3.2. Processos de Limpeza

Após certas etapas do processo de fabricação da célula solar de silício monocristalino, neste caso, a texturação, deposição e remoção de resina fotossensível e difusão de fósforo, será necessário realizar uma limpeza química para retirar contaminantes da superfície da lâmina de silício, pois esses degradam a superfície e podem ser difundidos durante as etapas à alta temperatura.

O processo de limpeza mais utilizado denomina-se RCA (*Radio Corporation of America*), largamente utilizado na indústria de semicondutores desde que foi proposto por Kern [36] nos anos 70. Essa limpeza é constituída de duas soluções, denominadas RCA1 e RCA2. A RCA1 consiste de uma parte de água oxigenada, para uma parte de hidróxido de amônio e para cinco partes de água deionizada, sendo utilizada para a remoção de partículas orgânicas. A RCA2 consiste de uma parte de água oxigenada, para uma parte de ácido clorídrico e para cinco partes de água deionizada, sendo utilizada para a remoção de partículas metálicas [36]. Ambas as soluções são aquecidas em um volume de solução o suficiente para possibilitar a imersão total das lâminas de silício.

3.3. Deposição de Resina e Ataque do Óxido

Como a face frontal da lâmina será difundida com fósforo, é necessário remover o óxido nessa face. Para isso utilizou-se um *spinner* para depositar uma resina fotossensível na face posterior da lâmina de silício, sendo em seguida levada a uma estufa para secar a resina por 10 min à temperatura de 85 °C. As lâminas foram, então, mergulhadas em uma solução de HF tampão para remover o óxido da face frontal, processo que leva de 5 a 10 min, deixando a face posterior intacta devido à proteção proporcionada pela resina. A resina foi removida com o auxílio de dimetilcetona e limpa com isopropanol e água deionizada.

3.4. Oxidação e Difusão de Fósforo

Para a obtenção de células solares com alta eficiência é necessária a passivação superficial da lâmina de silício, para diminuir a taxa de recombinação dos portadores de carga minoritários [25]. A passivação foi realizada em um forno, onde as lâminas foram oxidadas durante 120 min ou 240 min, dependendo do processo realizado, à temperatura de 1000 °C. O resultado esperado é uma camada de óxido de 103 nm para o processo de 120 min e de 150 nm para o processo de 240 min.

Depois da retirada da camada de óxido com o ataque químico em HF tampão, as lâminas foram limpas com as soluções RCA1 e RCA2 e levadas ao forno para difusão de fósforo. O líquido utilizado foi o POCl_3 , que foi arrastado para o tubo

de quartzo por meio do gás nitrogênio. Levando em conta os tempos de abertura e fechamento do forno, tempos de rampa de variação de temperatura e de difusão, todo o processo leva em torno de 1h e 40 min. A temperatura de difusão foi de 865 °C para lâminas Si-Cz e temperaturas de entre 855 °C a 895 °C para lâminas de PV-Si-FZ [39] [40]. Para caracterizar a difusão, mediu-se a resistência de folha (R_{\square}) em 13 regiões da lâmina de silício e calculou-se o desvio padrão.

3.5. Deposição de Filme Antirreflexo e Alumínio

Após a difusão de fósforo, ataque do silicato de fósforo e limpeza RCA2, as lâminas de silício foram colocadas na evaporadora, e por feixe de elétrons foi fundido o dióxido de titânio, que se depositou sobre a face frontal ou em ambas as faces, dependendo do processo realizado. A evaporadora é mostrada na Figura 16. A evaporadora também será utilizada, após a formação da malha frontal por serigrafia, para depositar a camada de alumínio na face posterior.

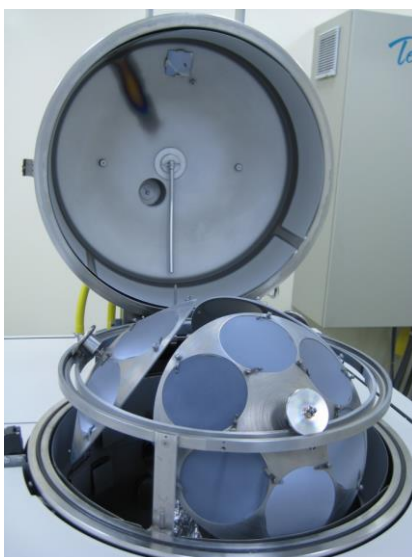


Figura 16 - Lâminas de silício na evaporadora utilizada para a deposição do filme AR e do alumínio.

3.6. Metalização e Recozimento

Após a deposição do filme antirreflexo, as lâminas de silício foram metalizadas na face frontal, utilizando o equipamento denominado de *screen printer*. Este equipamento é utilizado na serigrafia para a aplicação da pasta de prata PV16A

e PV17A, da Dupont, para formar a malha metálica na face frontal. Para secar a pasta de prata, as lâminas passaram pelo forno de esteira, a uma temperatura de 300 °C. Para o processo de queima, foram utilizadas temperaturas de 850 °C a 870 °C para lâminas Si-Cz e 880 °C para as amostras de PV-Si-FZ [39] [40].

Na indústria de semicondutores, lâminas de silício são recozidas de modo que os dopantes, geralmente de boro, fósforo ou alumínio, podem difundir em posições substitucionais na rede cristalina, resultando em mudanças drásticas nas propriedades elétricas do material semiconductor. As lâminas serão recozidas para a difusão dos contatos pontuais no silício a temperaturas de 300 °C a 350 °C para lâminas Si-Cz e 400 a 450 °C para as amostras de PV-Si-FZ.

3.7. Formação do Contato e Difusão em Pontos por Radiação Laser

Após a lâmina ser submetida a todas as etapas descritas anteriormente, ela foi processada com radiação laser. Utilizou-se o equipamento da marca FOBA para a formação dos contatos e difusão do alumínio na face posterior. Diversos parâmetros do processo, como potência e frequência do laser, tamanho de ponto e distância entre pontos foram otimizados. Um esquema da malha de pontos a ser formada pode ser visto na Figura 17.

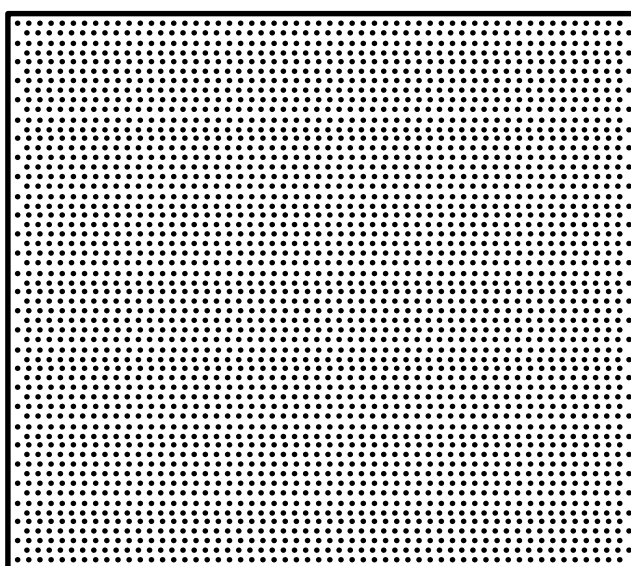


Figura 17 - Representação da malha de pontos formada pelo laser.

As lâminas foram posicionadas no sistema laser de uma maneira que a malha de pontos programada no *software* do equipamento esteja alinhada com a lâmina de silício. Foram então selecionados os valores de potência e frequência do laser, sendo que a velocidade de varredura do laser é constante, de 1000 mm/s, para todos os processos. São necessários 6 s para implementar a malha de pontos em cada lâmina de 4 cm².

3.8. Caracterização das Lâminas de Silício e Células Solares

As células solares de silício serão caracterizadas medindo a curva I-V no simulador solar, por meio da aplicação de uma diferença de potencial e medição da corrente elétrica gerada, em um sistema automático de medição, ilustrado na Figura 18. As condições padrão utilizadas na caracterização são: irradiância de 1000 W/m², espectro solar AM1,5G e temperatura da célula solar de silício de 25 °C. A célula é contatada na base por vácuo e dois eletrodos são posicionados sobre as barras coletoras (*busbar*). A partir da curva I-V, foram obtidos os principais parâmetros elétricos da célula solar: tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente de curto-circuito (I_{sc}), densidade de corrente de curto-circuito (J_{sc}), fator de forma (FF) e eficiência (η).



Figura 18 - Sistema automatizado utilizado na medição das células solares.

Outro parâmetro que será medido é o tempo de vida dos portadores de carga minoritários. Após uma etapa do processamento em alta temperatura, como oxidação, difusão ou queima das pastas de metalização, o tempo de vida dos portadores de carga minoritários pode aumentar ou diminuir. A partir da medição do tempo de vida dos portadores de carga minoritários é possível avaliar se etapas do processo que contribuirão para melhorar ou degradar o substrato de silício. O

equipamento WCT-120 da *Sinton*, mostrado na Figura 19, por meio do método QSSPC (estado quase-estacionário da fotocondutância), mede tempos de vida dos portadores de carga minoritários menores que 50 μ s.



Figura 19 - Equipamento WCT-120 utilizado para medição do tempo de vida dos portadores de carga minoritários.

Com este método obtém-se a intensidade da radiação *versus* o tempo, durante o decaimento exponencial do pulso luminoso que é convertido em densidade de portadores de carga minoritários. A amostra deve ser passivada na superfície para evitar a recombinação dos portadores de carga minoritários. Para isso, utilizou-se uma solução de ácido fluorídrico com concentração de 48 %.

4. DESENVOLVIMENTO DE CÉLULAS SOLARES COM CONTATOS POSTERIORES FORMADOS POR RADIAÇÃO LASER E ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PASSIVAÇÃO

4.1. Otimização experimental da Potência e da Frequência do Sistema Laser

Para encontrar os melhores parâmetros do sistema laser foram utilizadas lâminas de Si-Cz. A tensão de circuito aberto, a densidade de corrente de curto-circuito, o fator de forma e a eficiência das células solares em função da potência e da frequência do sistema laser são apresentados nas Tabelas 5 e 6 para dispositivos sem e com recozimento, respectivamente. Para as análises iniciais foi utilizada a temperatura de recozimento (T_R) no forno de esteira de 300 °C, com base nos processos realizados no NT-solar [37]. Em todas as tabelas as células são referidas como PXXLYYZ, onde PXX representa o número do processo, LYY o número da lâmina na qual a célula solar foi produzida e Z uma letra de A a I, representando a região da lâmina de silício onde a célula solar foi produzida, conforme mostra a Figura 20.

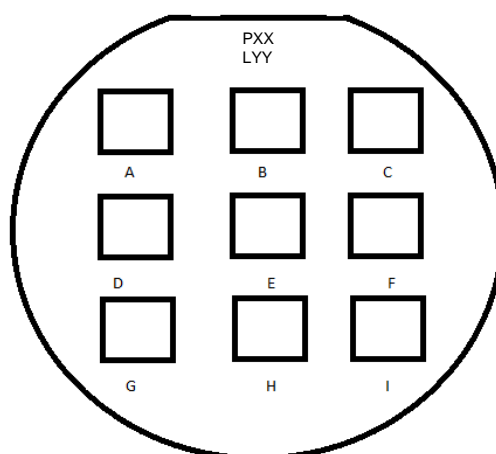


Figura 20 - Representação Ilustrativa da posição das células solares na lâmina de silício.

Tabela 5 – Parâmetros elétricos das células solares em função da potência e da frequência do sistema laser, sem recozimento no forno de esteira.

| Potência (W) | Célula | Frequência (kHz) | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|--------------|---------|------------------|----------|---------------------------|-------|----------------|
| 9 | P06L03C | 60 | 537,8 | 27,5 | 0,287 | 4,3 |
| | P06L03A | 80 | 529,7 | 13,0 | 0,264 | 1,8 |
| 11 | P06L03G | 60 | 539,6 | 31,6 | 0,409 | 7,0 |
| | P06L03F | 80 | 537,9 | 30,5 | 0,319 | 5,2 |
| 13 | P06L02F | 100 | 566,3 | 31,9 | 0,497 | 9,0 |
| 15 | P06L02G | 50 | 566,2 | 31,2 | 0,595 | 10,5 |
| | P06L02H | 80 | 567,2 | 31,4 | 0,607 | 10,8 |
| | P06L02I | 100 | 565,6 | 31,6 | 0,626 | 11,2 |

Tabela 6 - Parâmetros elétricos das células solares em função da potência e da frequência do sistema laser, após o recozimento a temperatura de 300 °C e melhora relativa da eficiência após o recozimento ($\Delta\eta$).

| Potência (W) | Célula | Frequência (kHz) | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) | $\Delta\eta$ (%) |
|--------------|---------|------------------|----------|---------------------------|-------|----------------|------------------|
| 9 | P06L03C | 60 | 560,1 | 32,2 | 0,319 | 5,8 | 34,9 |
| | P06L03A | 80 | 552,2 | 18,6 | 0,278 | 2,9 | 61,1 |
| 11 | P06L03G | 60 | 570,8 | 35,1 | 0,461 | 9,2 | 31,4 |
| | P06L03F | 80 | 571,6 | 34,7 | 0,355 | 7,1 | 36,5 |
| 13 | P06L02F | 100 | 585,2 | 34,0 | 0,479 | 9,5 | 5,6 |
| 15 | P06L02G | 50 | 589,0 | 32,7 | 0,583 | 11,2 | 6,7 |
| | P06L02H | 80 | 593,9 | 33,4 | 0,612 | 12,2 | 13,0 |
| | P06L02I | 100 | 593,2 | 33,8 | 0,627 | 12,6 | 12,5 |

Comparando a Tabela 6 com a Tabela 5, nota-se que com o recozimento a eficiência das células solares aumenta, devido ao aumento da Jsc e Voc, mas especialmente do FF. Isso ocorre porque o recozimento repara danos causados pelo laser no silício [41]. No entanto, para as potências menores que 13 W, a eficiência foi inferior a 9,5 %. Conforme pode-se ver na curva J-V na Figura 21, o fator de forma foi baixo para as potências menores que 13 W, devido à resistência em série. Observa-se que as maiores eficiências foram alcançadas com a potência de 15 W e quanto maior a frequência, maior foi a eficiência. A maior eficiência alcançada foi de 12,6 % para a frequência de 100 kHz.

Na Tabela 7 são mostradas as características dos dispositivos antes do recozimento. Na Tabela 8 compara-se a influência da frequência do sistema laser para as potências de 13 W e 15 W e temperatura de recozimento de 350 °C.

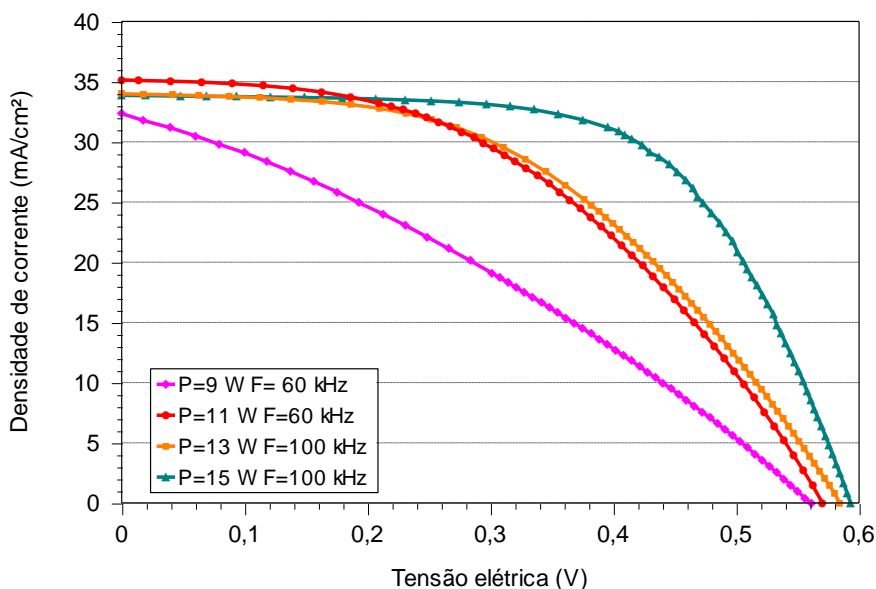


Figura 21 - Curvas da densidade de corrente em função da tensão aplicada das melhores células solares para cada potência, e respectivas frequências para a temperatura de recozimento de 300 °C.

Tabela 7 - Parâmetros elétricos das células solares sem recozimento no forno de esteira.

| Potência (W) | Célula | Frequência (kHz) | Voc (mV) | Jsc (mA/cm2) | FF | Eficiência (%) |
|--------------|---------|------------------|----------|--------------|-------|----------------|
| 13 | P06L03I | 50 | 542,8 | 31,5 | 0,521 | 8,9 |
| | P06L04A | 80 | 542,7 | 31,3 | 0,445 | 7,6 |
| | P06L02E | 80 | 568,1 | 31,3 | 0,668 | 11,9 |
| | P06L04B | 100 | 540,1 | 30,8 | 0,349 | 5,8 |
| | P06L02F | 100 | 566,3 | 31,9 | 0,497 | 9,0 |
| 15 | P06L04C | 50 | 542,5 | 31,1 | 0,562 | 9,5 |
| | P06L02G | 50 | 566,2 | 31,2 | 0,595 | 10,5 |
| | P06L02H | 80 | 567,2 | 31,4 | 0,607 | 10,8 |
| | P06L04D | 80 | 543,9 | 31,8 | 0,499 | 8,6 |
| | P06L04E | 100 | 540,5 | 31,8 | 0,487 | 8,4 |
| | P06L02I | 100 | 565,6 | 31,6 | 0,626 | 11,2 |

Novamente o recozimento aumenta a eficiência das células devido ao aumento nos valores de seus parâmetros elétricos. Observa-se que a Jsc e Voc antes do recozimento são relativamente similares para as duas potências e todas as

frequências do sistema laser. No entanto, o FF varia de uma célula para outra, mesmo que processadas com a mesma potência e frequência. Comparando a Tabela 6 com a Tabela 8, notam-se melhores resultados com a temperatura de recozimento de 350 °C. Entretanto, a eficiência foi menor que 9,1 % para 13 W e 100 kHz e 50 kHz devido ao menor valor do FF. Como pode-se observar na Figura 22, os melhores resultados tanto para a potência de 13 W e 15 W foram para 80 kHz. A melhor eficiência, de 13,8 %, foi obtida para a potência de 13 W.

Tabela 8 - Parâmetros elétricos das células solares em função da potência e da frequência do sistema laser, após recozimento a 350 °C e melhora relativa da eficiência após o recozimento ($\Delta\eta$).

| Potência (W) | Célula | Frequência (kHz) | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) | $\Delta\eta$ (%) |
|--------------|---------|------------------|----------|---------------------------|-------|----------------|------------------|
| 13 | P06L03I | 50,00 | 565,3 | 34,5 | 0,444 | 8,7 | -2,2 |
| | P06L04A | 80,00 | 581,2 | 35,2 | 0,550 | 11,3 | 48,7 |
| | P06L02E | 80,00 | 598,4 | 34,7 | 0,663 | 13,8 | 16,0 |
| | P06L04B | 100,00 | 573,9 | 34,3 | 0,341 | 6,7 | 15,5 |
| | P06L02F | 100,00 | 580,6 | 34,6 | 0,453 | 9,1 | 1,1 |
| 15 | P06L04C | 50,00 | 575,3 | 34,6 | 0,562 | 11,2 | 17,9 |
| | P06L02G | 50,00 | 589,3 | 33,3 | 0,576 | 11,3 | 7,6 |
| | P06L02H | 80,00 | 596,3 | 34,1 | 0,599 | 12,2 | 13,0 |
| | P06L04D | 80,00 | 582,3 | 36,0 | 0,628 | 13,1 | 52,3 |
| | P06L04E | 100,00 | 581,3 | 36,0 | 0,485 | 10,1 | 20,2 |
| | P06L02I | 100,00 | 594,3 | 34,4 | 0,609 | 12,5 | 11,6 |

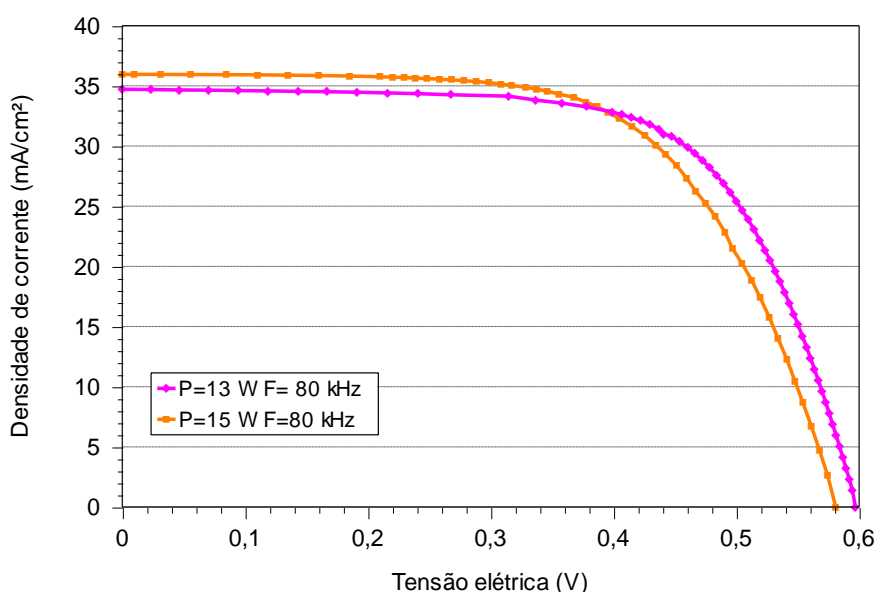


Figura 22 - Curvas J-V das melhores células solares para cada potência e com temperatura de recozimento de 350 °C.

Observa-se que para ambas as potências obtêm-se um FF similar, com apenas 0,7 % de diferença na eficiência das melhores células solares de 13 W e 15 W. Para comparar os pontos formados com as potências de 13 W e 15 W e frequência de 80 kHz, foi realizada uma análise com o microscópio óptico. O resultado está mostrado na Figura 23. Nota-se que o ponto formado é maior para a maior potência, representando maior área com difusão do alumínio na face posterior.

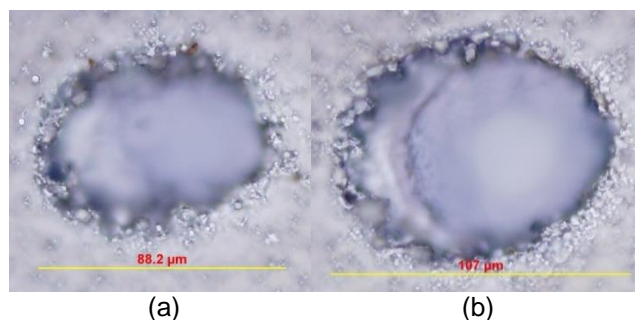


Figura 23 – Fotos dos pontos formados por laser de duas células solares com (a) 13 W e 80 kHz e com (b) 15 W e 80 kHz, obtidas com o microscópio óptico.

Como os parâmetros das células solares melhoraram com o aumento da temperatura, outro grupo de células foi processado, com temperatura de recozimento de 400 °C. Foram processadas células solares com potências de laser de 9 W e 11 W para verificar se 13 W e 15 W sempre resultam nos melhores resultados. Os dados são apresentados nas Tabelas 9 e 10.

Novamente o recozimento melhora as células solares para todas as combinações de potência e frequência em todos os parâmetros elétricos medidos. A eficiência foi menor que 8,4 % para 9 W, 11 W e 13 W, somente para as frequências 20 kHz e 100 kHz, como em resultados anteriores, devido a menores valores do fator de forma. Conclui-se que para baixas potências e/ou frequências se realiza um contato pouco eficaz.

Observa-se alta resistência em série para células solares com potência inferior a 11 W. Estas potências praticamente não estabelecem o contato na face posterior. A redução da resistência em série ocorre para as potências de 13 W e 15 W. Para estas potências o aumento da temperatura de recozimento, que, mesmo reduzindo defeitos causados pelo laser na célula e aumentando a difusão do

alumínio nos pontos, também aumenta a resistência em série, causando reduzido valor de fator de forma, visto na Figura 24, na comparação das curvas J-V das células solares mais eficientes.

Tabela 9 - Parâmetros elétricos das células solares sem recozimento no forno.

| Potência (W) | Célula | Frequência (kHz) | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|--------------|---------|------------------|----------|---------------------------|-------|----------------|
| 9 | P06L03C | 60 | 537,8 | 27,5 | 0,287 | 4,3 |
| 11 | P06L03G | 60 | 539,6 | 31,6 | 0,409 | 7,0 |
| | P06L03F | 80 | 537,9 | 30,5 | 0,319 | 5,2 |
| 13 | P06L01C | 20 | 517,0 | 14,0 | 0,242 | 1,8 |
| | P06L01G | 50 | 515,6 | 8,6 | 0,254 | 1,1 |
| | P06L02E | 80 | 568,1 | 31,3 | 0,668 | 11,9 |
| | P06L02F | 100 | 566,3 | 31,9 | 0,497 | 9,0 |
| 15 | P06L02G | 50 | 566,2 | 31,2 | 0,595 | 10,5 |
| | P06L02H | 80 | 567,2 | 31,4 | 0,607 | 10,8 |
| | P06L02I | 100 | 565,6 | 31,6 | 0,626 | 11,2 |

Tabela 10 - Parâmetros elétricos das células solares em função da potência e da frequência do sistema laser, na temperatura de recozimento de 400 °C e melhora relativa da eficiência após o recozimento ($\Delta\eta$).

| Potência (W) | Célula | Frequência (kHz) | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) | $\Delta\eta$ (%) |
|--------------|---------|------------------|----------|---------------------------|-------|----------------|------------------|
| 9 | P06L03C | 60 | 548,1 | 29,3 | 0,307 | 4,9 | 14,0 |
| 11 | P06L03G | 60 | 571,2 | 34,8 | 0,426 | 8,5 | 21,4 |
| | P06L03F | 80 | 572,6 | 33,3 | 0,329 | 6,3 | 21,2 |
| 13 | P06L01C | 20 | 516,4 | 7,9 | 0,227 | 0,9 | -50,0 |
| | P06L01G | 50 | 562,9 | 36,6 | 0,487 | 10,0 | 809,1 |
| | P06L02E | 80 | 597,8 | 34,9 | 0,651 | 13,6 | 14,3 |
| | P06L02F | 100 | 566,6 | 34,8 | 0,427 | 8,4 | -6,7 |
| 15 | P06L02G | 50 | 583,6 | 33,4 | 0,541 | 10,6 | 1,0 |
| | P06L02H | 80 | 594,1 | 34,5 | 0,533 | 10,9 | 0,9 |
| | P06L02I | 100 | 589,3 | 34,7 | 0,578 | 11,8 | 5,4 |

4.2. Influência da Temperatura de Recozimento

Para avaliar a influência da temperatura de recozimento nos parâmetros elétricos das células solares, selecionaram-se primeiramente a potência e frequência

do sistema laser de 15 W e 80 kHz, respectivamente. Foram realizados processos com temperatura de recozimento entre 200 °C a 400 °C e comparados os resultados entre sem e com o recozimento. Os parâmetros elétricos das células solares são apresentados na Tabela 11.

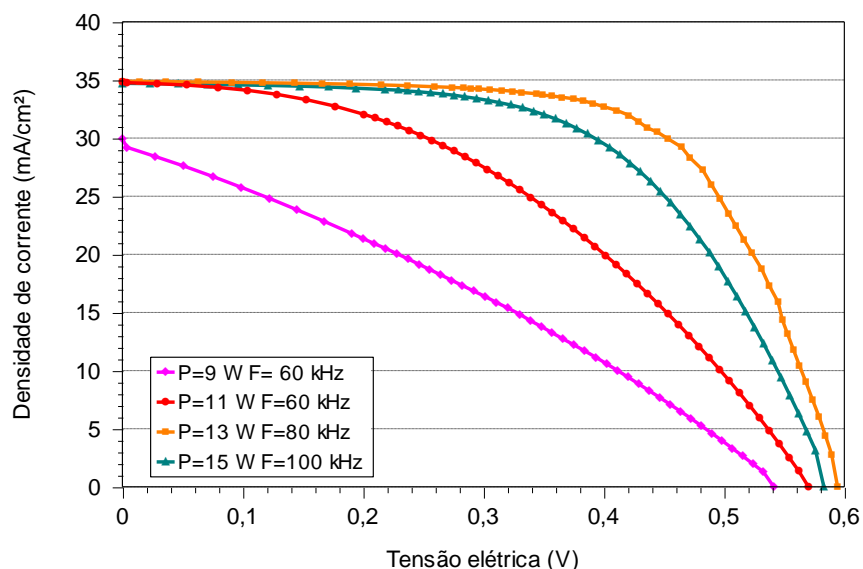


Figura 24 - Curva J-V das melhores células solares para cada potência e frequência com temperatura de recozimento de 400 °C.

Observa-se que quando os dispositivos foram recozidos com a temperatura de 200 °C e 250 °C, todos os parâmetros elétricos praticamente não foram afetados. A eficiência média foi inferior a 10,8 % para os processos com T_R de 300 °C, e notou-se um aumento da eficiência média de 1 % com o recozimento. Os resultados para o recozimento a 350 °C e 400 °C foram similares. Em ambos os casos verificou-se um aumento na eficiência média de 2,3 %. Os resultados também foram similares para as melhores células solares, como se pode ver na Figura 25. Observa-se um aumento de todos os parâmetros elétricos até a T_R de 350 °C e 400 °C.

Na Figura 26 apresentam-se os parâmetros médios elétricos das células solares em função da temperatura de recozimento. Nota-se que a V_{oc} e J_{sc} aumentam com a T_R de forma significativa a partir de 350 °C. A V_{oc} cresce de valores próximos a 580 mV para valores maiores que 600 mV. Da mesma forma a J_{sc} aumenta de 33 mA/cm² para valores da ordem de 36 mA/cm².

Tabela 11 – Parâmetros elétricos das células solares em função da temperatura de recozimento do forno de esteira, na potência de 15 W e frequência de 80 kHz.

| Recozimento | Célula | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|--------------------------------|--------------|--------------------|---------------------------|--------------------|-------------------|
| Sem | P07L01A | 567,0 | 30,9 | 0,439 | 7,7 |
| T_R = 200 ° C | P07L01A | 567,1 | 31,4 | 0,535 | 9,5 |
| Sem | P07L01B | 568,1 | 31,3 | 0,434 | 7,7 |
| T_R = 250 ° C | P07L01B | 568,1 | 31,9 | 0,451 | 8,2 |
| Sem | P07L01C | 569,2 | 31,4 | 0,529 | 9,5 |
| | P07L01F | 568,7 | 30,9 | 0,501 | 8,8 |
| | P07L01G | 568,6 | 31,0 | 0,630 | 11,1 |
| | Média | 568,8 ± 0,4 | 31,1 ± 0,3 | 0,55 ± 0,08 | 9,8 ± 1,2 |
| T_R = 300 ° C | P07L01C | 587,9 | 34,4 | 0,544 | 11,0 |
| | P07L01F | 582,7 | 33,2 | 0,503 | 9,7 |
| | P07L01G | 572,8 | 32,4 | 0,631 | 11,7 |
| | Média | 581 ± 8 | 33,4 ± 1,1 | 0,60 ± 0,07 | 10,8 ± 1,0 |
| Sem | P07L01D | 568,3 | 31,1 | 0,556 | 9,8 |
| | P07L01H | 569,7 | 31,3 | 0,607 | 10,8 |
| | P07L01I | 568,4 | 31,2 | 0,638 | 11,3 |
| | P07L02C | 568,1 | 31,9 | 0,590 | 10,7 |
| | P07L02D | 566,8 | 31,7 | 0,646 | 11,6 |
| | P07L02E | 564,4 | 29,8 | 0,341 | 5,7 |
| | Média | 567,6 ± 1,8 | 31,2 ± 0,7 | 0,56 ± 0,11 | 10,0 ± 2,2 |
| T_R = 350 ° C | P07L01D | 605,8 | 35,4 | 0,562 | 12,0 |
| | P07L01H | 604,9 | 36,0 | 0,622 | 13,6 |
| | P07L01I | 607,7 | 35,8 | 0,649 | 14,1 |
| | P07L02C | 603,3 | 36,3 | 0,599 | 13,1 |
| | P07L02D | 601,2 | 35,9 | 0,647 | 14,0 |
| | P07L02E | 596,6 | 33,0 | 0,344 | 6,8 |
| | Média | 603 ± 4 | 35,4 ± 1,3 | 0,58 ± 0,12 | 12,3 ± 2,8 |
| Sem | P07L01E | 565,3 | 31,4 | 0,391 | 6,9 |
| | P07L02A | 565,2 | 31,5 | 0,625 | 11,1 |
| | P07L02B | 566,9 | 32,0 | 0,535 | 9,7 |
| | P07L02F | 569,1 | 31,6 | 0,492 | 8,8 |
| | P07L02G | 566,5 | 31,3 | 0,638 | 11,3 |
| | P07L02H | 567,2 | 31,7 | 0,620 | 11,2 |
| | Média | 566,7 ± 1,4 | 31,6 ± 0,3 | 0,55 ± 0,10 | 9,8 ± 1,7 |
| T_R = 400 ° C | P07L01E | 599,2 | 35,5 | 0,417 | 8,9 |
| | P07L02A | 605,8 | 36,3 | 0,619 | 13,6 |
| | P07L02B | 606,5 | 36,8 | 0,543 | 12,1 |
| | P07L02F | 611,0 | 35,7 | 0,480 | 10,5 |
| | P07L02G | 606,5 | 35,7 | 0,640 | 13,9 |
| | P07L02H | 608,6 | 36,2 | 0,631 | 13,9 |
| | Média | 606 ± 4 | 36,0 ± 0,5 | 0,57 ± 0,10 | 12,1 ± 2,1 |

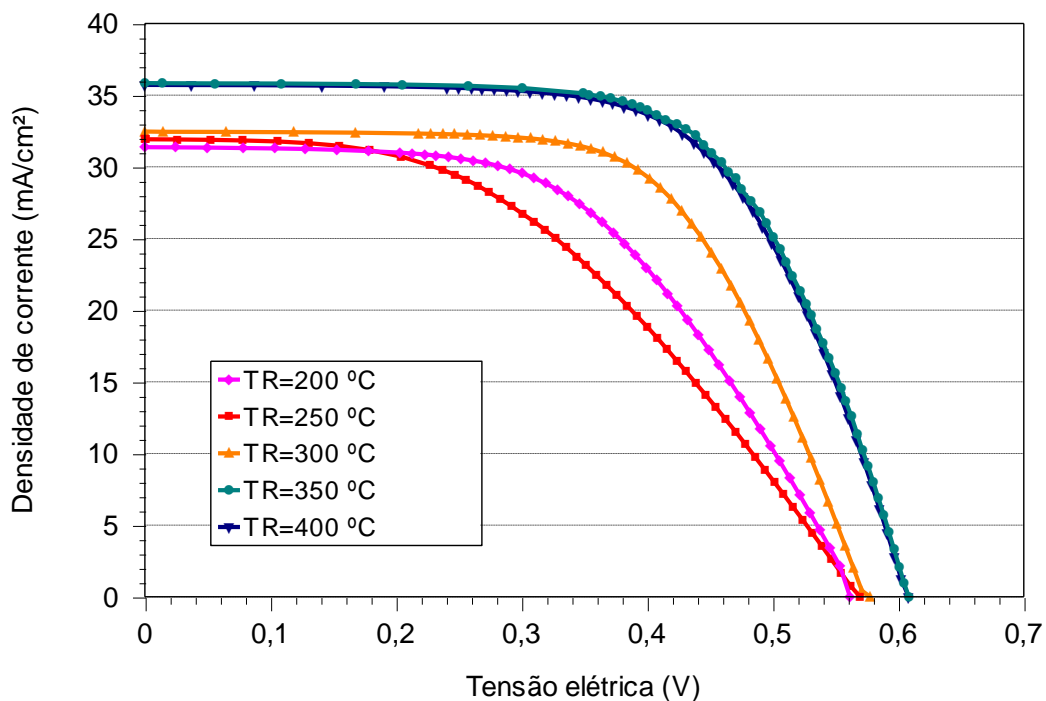


Figura 25 - Curva J-V com as melhores células solares para temperatura de recozimento, em potência de 15 W e frequência de 80 kHz

O fator de forma apresenta um comportamento similar, tendendo a aumentar com a T_R , porém de forma menos significativa e permanece aproximadamente constante para as T_R maiores que 300 °C. Em todos os casos, o fator de forma limitou a eficiência. Constata-se que a maior eficiência média ocorreu para a T_R de 350 °C.

4.3. Influência da Velocidade de Esteira Durante o Recozimento

Considerando que o melhor conjunto de resultados foi encontrado com as potências de 13 W e 15 W e temperatura de recozimento de 350 °C, o próximo parâmetro avaliado foi a velocidade de esteira durante o recozimento (V_E), sendo variada entre 30 cm/min e 80 cm/min. Os resultados se encontram na Tabela 12 e 13.

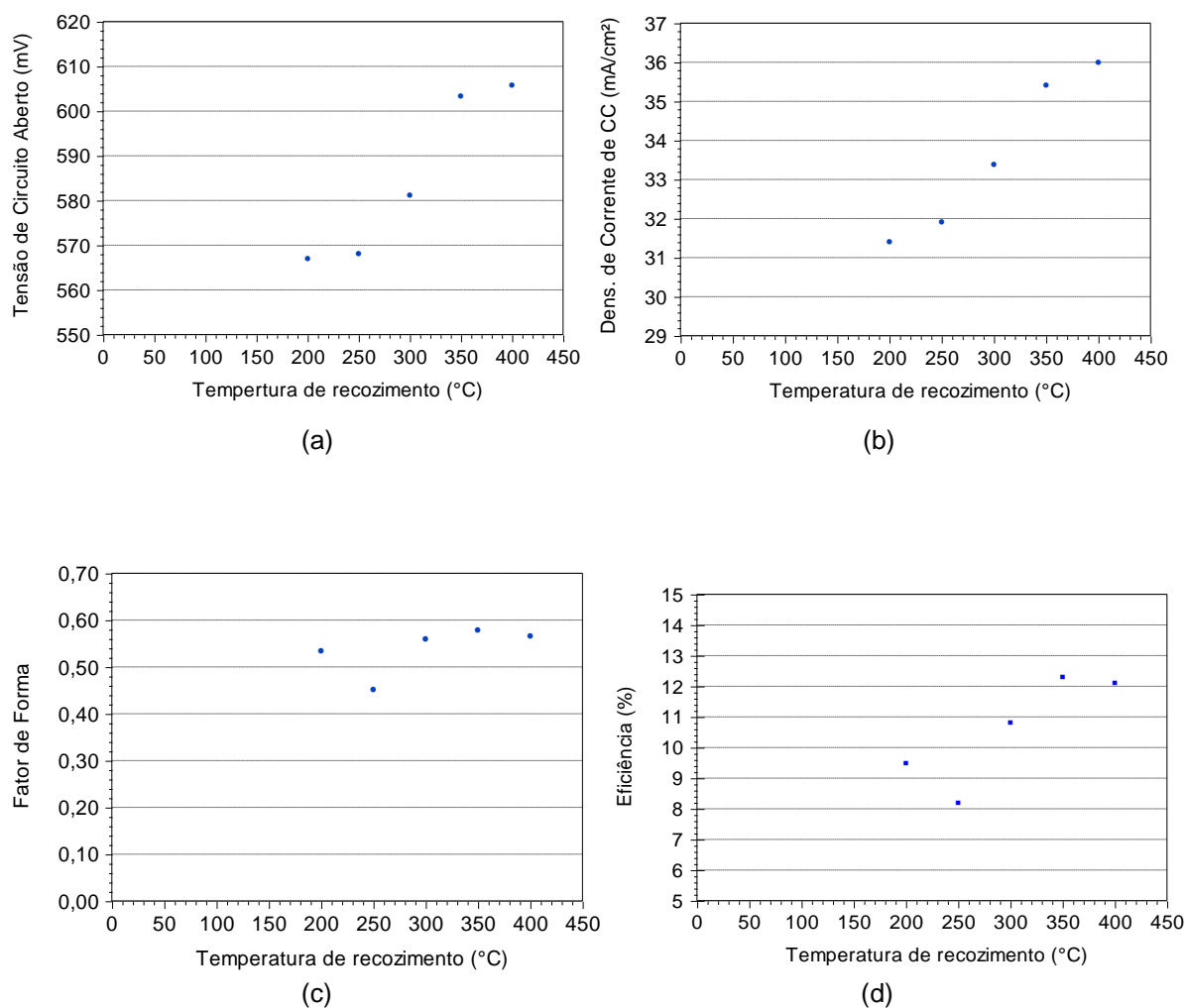


Figura 26 - Valores médios da (a) V_{OC} , (b) J_{SC} , (c) FF e (d) η em função da temperatura de recozimento.

Nota-se uma pequena influência da V_E nos parâmetros elétricos da célula solar para a potência de 13 W, também observado na Figura 27, com insignificante mudança no FF. Os maiores valores médios de eficiência ocorreram entre 50 cm/min e 75 cm/min. Um valor baixo de V_E resulta em maior tempo de recozimento, causando danos na malha de pontos formada por laser na face posterior, enquanto um valor alto de V_E , isto é, um tempo curto de processamento, provavelmente não resultou na re-estruturação cristalina do silício onde foi danificado pelo laser [41] e/ou não causou um contato adequado nos pontos.

Tabela 12 – Parâmetros elétricos das células solares em função da velocidade de esteira para a temperatura de recozimento de 350 °C, potência de 13 W e frequência de 80 kHz.

| V_E (cm/min) | Célula | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|----------------|--------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|
| 30 | P12L04E | 567,1 | 31,1 | 0,646 | 11,4 |
| | P12L04G | 562,0 | 31,0 | 0,621 | 10,8 |
| | Média | 564 ± 4 | 31,09 ± 0,07 | 0,634 ± 0,018 | 11,1 ± 0,4 |
| 50 | P12L04A | 560,6 | 31,0 | 0,624 | 10,8 |
| | P12L04C | 567,5 | 30,9 | 0,677 | 11,8 |
| | P12L04H | 567,4 | 31,2 | 0,639 | 11,3 |
| | Média | 565 ± 4 | 31,0 ± 0,1 | 0,647 ± 0,027 | 11,3 ± 0,5 |
| 66 | P12L04B | 565,2 | 30,9 | 0,646 | 11,2 |
| | P12L04D | 568,2 | 31,1 | 0,647 | 11,4 |
| | P12L04F | 565,5 | 31,2 | 0,661 | 11,6 |
| | Média | 566,3 ± 1,6 | 31,0 ± 0,2 | 0,651 ± 0,008 | 11,4 ± 0,2 |
| 70 | P12L04I | 565,7 | 31,0 | 0,663 | 11,6 |
| | P12L07H | 560,4 | 31,3 | 0,632 | 11,0 |
| | P12L08B | 566,4 | 30,4 | 0,684 | 11,7 |
| | Média | 564 ± 3 | 30,9 ± 0,5 | 0,660 ± 0,026 | 11,4 ± 0,4 |
| 75 | P12L07B | 564,3 | 31,0 | 0,644 | 11,2 |
| | P12L07E | 565,5 | 31,2 | 0,645 | 11,3 |
| | Média | 564,9 ± 0,9 | 31,1 ± 0,1 | 0,645 ± 0,001 | 11,3 ± 0,1 |
| 80 | P12L07C | 557,1 | 31,1 | 0,658 | 11,4 |
| | P12L07F | 563,8 | 31,2 | 0,649 | 11,4 |
| | P12L07I | 556,1 | 31,2 | 0,627 | 10,8 |
| | Média | 559 ± 4 | 31,17 ± 0,06 | 0,645 ± 0,016 | 11,2 ± 0,3 |

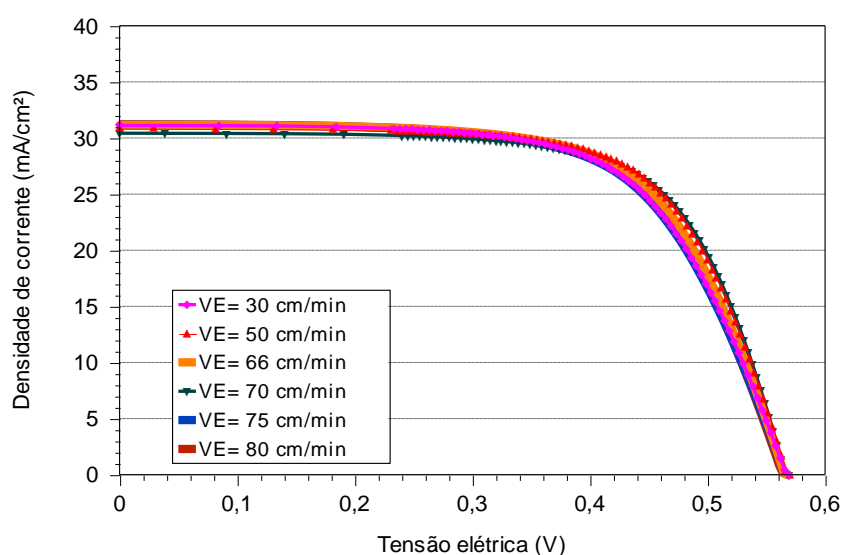


Figura 27 - Curva J-V das melhores células solares para as diferentes velocidades de esteira e temperatura de recozimento de 350 °C, potência de 13 W e frequência de 80 kHz.

Da Figura 28, verifica-se que para a V_E maior que 66 cm/min a V_{oc} cai, porém a J_{sc} praticamente não é afetada pela V_E . Além disso, a J_{sc} é menor que os resultados apresentados na Figura 26(b), para T_R de 350 °C. Por outro lado, o FF aumenta para V_E igual a 70 cm/min. Conseqüentemente, a eficiência é pouco afetada pela V_E , e a maior eficiência média ocorreu para V_E de 70 cm/min. A menor J_{sc} pode ter sido resultado da baixa qualidade do substrato de Si.

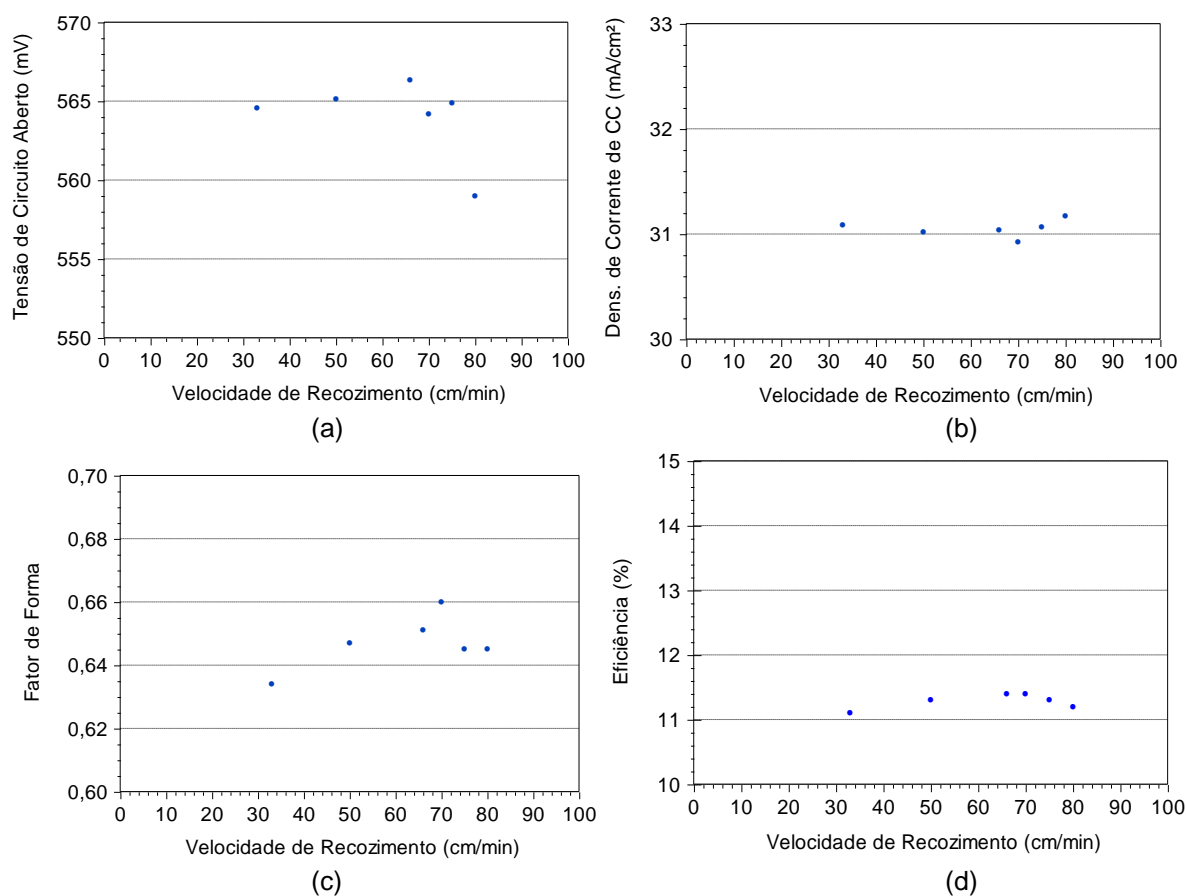


Figura 28 - Valores médios da (a) V_{oc} , (b) J_{sc} , (c) FF e (d) η em função da velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 350 °C, potência de 13 W e frequência de 80 kHz.

Para comparar estes resultados, os parâmetros elétricos das células solares processadas com a potência do laser de 15 W são apresentados na Tabela 13.

Para a potência de 15 W, os melhores valores médios da eficiência foram encontrados para as velocidades de esteira de 50 cm/min e 66 cm/min. Porém, os melhores valores de fator de forma foram encontrados para a V_E de 70 cm/min, 75 cm/min e 80 cm/min, como se pode ver na Figura 29. Verifica-se pela curva J-V das

melhores células solares que os dispositivos processados com V_E de 70, 75 e 80 apresentam menor resistência em série, resultando em maior valor de FF, mas menores valores para I_{sc} e V_{oc} , resultando em menor eficiência.

Tabela 13 - Parâmetros elétricos das células solares em função da velocidade de esteira na temperatura de recozimento de 350 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz.

| V_E (cm/min) | Célula | V_{oc} (mV) | J_{sc} (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|----------------|--------------|---------------------|--------------------------------|----------------------|-------------------|
| 33 | P07L05D | 618,7 | 36,7 | 0,580 | 13,3 |
| | P07L05F | 619,2 | 37,1 | 0,580 | 13,4 |
| | P12L02E | 557,2 | 31,1 | 0,578 | 10,0 |
| | P12L02G | 562,8 | 31,0 | 0,664 | 11,6 |
| | Média | 589,5 ± 34,1 | 34,0 ± 3,4 | 0,601 ± 0,042 | 12,1 ± 1,6 |
| 50 | P07L01D | 605,8 | 35,4 | 0,562 | 12,0 |
| | P07L01H | 604,9 | 36,0 | 0,622 | 13,6 |
| | P07L01I | 607,7 | 35,8 | 0,649 | 14,1 |
| | P07L02C | 603,3 | 36,3 | 0,599 | 13,1 |
| | P07L02D | 601,2 | 35,9 | 0,647 | 14,0 |
| | P12L02A | 565,2 | 31,1 | 0,642 | 11,3 |
| | P12L02C | 563,7 | 30,8 | 0,670 | 11,7 |
| | P12L02H | 553,0 | 31,1 | 0,634 | 10,9 |
| | Média | 588,1 ± 23,1 | 34,1 ± 2,5 | 0,628 ± 0,034 | 12,6 ± 1,3 |
| 66 | P07L05G | 611,6 | 35,9 | 0,650 | 14,3 |
| | P07L05H | 613,1 | 36,2 | 0,650 | 14,5 |
| | P12L02B | 560,1 | 31,0 | 0,649 | 11,3 |
| | P12L02D | 564,0 | 31,1 | 0,600 | 10,5 |
| | P12L02F | 560,3 | 31,1 | 0,595 | 10,4 |
| | Média | 581,8 ± 27,9 | 33,1 ± 2,7 | 0,629 ± 0,029 | 12,2 ± 2,0 |
| 70 | P12L02I | 554,6 | 30,8 | 0,651 | 11,1 |
| | P12L03F | 565,1 | 31,6 | 0,667 | 11,9 |
| | P12L03H | 566,6 | 31,5 | 0,669 | 11,9 |
| | Média | 562,1 ± 6,5 | 31,3 ± 0,4 | 0,663 ± 0,010 | 11,6 ± 0,5 |
| 75 | P12L03B | 563,3 | 30,9 | 0,667 | 11,6 |
| | P12L03D | 568,6 | 31,6 | 0,670 | 12,0 |
| | P12L03I | 562,4 | 31,2 | 0,666 | 11,7 |
| | Média | 564,7 ± 3,3 | 31,3 ± 0,4 | 0,668 ± 0,002 | 11,8 ± 0,2 |
| 80 | P12L03C | 562,9 | 30,9 | 0,676 | 11,8 |
| | P12L03E | 564,5 | 31,6 | 0,657 | 11,7 |
| | P12L03G | 565,9 | 31,5 | 0,669 | 11,9 |
| | Média | 564,4 ± 1,5 | 31,4 ± 0,4 | 0,667 ± 0,010 | 11,8 ± 0,1 |

Na Figura 30 apresentam-se os parâmetros elétricos das melhores células solares, processadas em diferentes V_E . Observa-se que a V_{oc} e J_{sc} são maiores para a V_E menor ou igual que 66 cm/min, atingindo o valor máximo em 33 cm/min. Porém, o FF foi inferior a 0,7 em todos os casos, e o menor valor ocorreu para a V_E

de 33 cm/min. Portanto, concluiu-se que a melhor V_E está entre 50 cm/min e 66 cm/min.

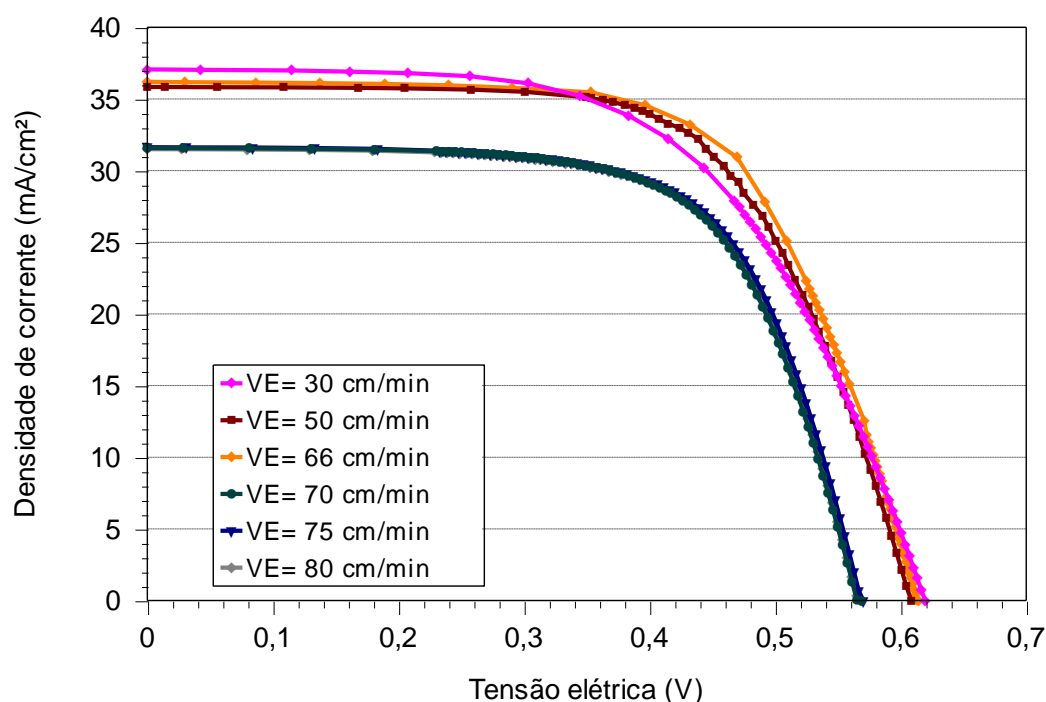


Figura 29 - Curva J-V das melhores células solares para velocidade de esteira, em temperatura de recozimento de 350 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz

Os valores de fator de forma não foram altos como o esperado para nenhuma das células solares, podendo haver problemas com a malha metálica de prata na face frontal da célula solar. Para averiguar esta hipótese, foram processadas células solares sem a criação dos contatos posteriores formados por laser, e com queima da malha frontal com temperaturas de queima (T_Q) de 650 °C, 700 °C e 750 °C. Desta forma, ocorrerá a difusão do alumínio em toda a face posterior, apesar da existência do óxido de silício nesta face.

Os resultados são mostrados na Tabela 14. Pode-se notar que há um aumento no FF, porém a V_{oc} diminuiu, devido ao aumento da recombinação dos portadores de carga minoritários na face posterior. Na Figura 31 apresentam-se as curvas J-V das melhores células solares com difusão de alumínio em toda a face posterior. Verifica-se que não há problemas de resistência em série, pois o FF foi de 0,74 a 0,77. A eficiência das melhores células solares foi de 13,5 % a 13,7 %.

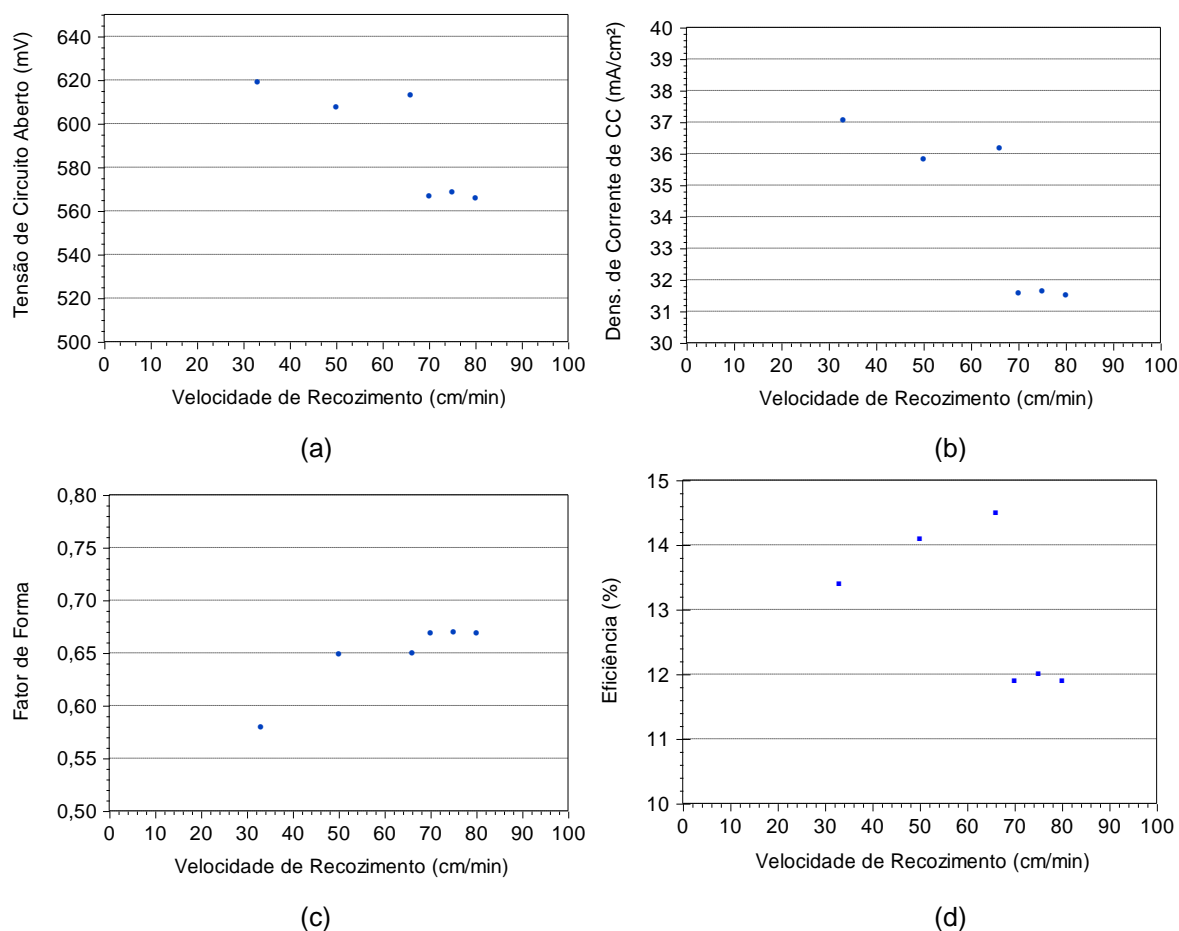


Figura 30 - Valores da (a) V_{oc} , (b) J_{sc} , (c) FF e (d) η em função da velocidade de recozimento das melhores células solares, para V_E de 350 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz.

Tabela 14 - Parâmetros elétricos das células solares sem processamento com laser para a temperatura de queima da malha frontal de 650 °C, 700 °C e 750 °C.

| Recozimento | Célula | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|---------------------|--------------|---------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|
| $T_Q=650\text{ °C}$ | P07L02I | 569,9 | 30,9 | 0,776 | 13,7 |
| | P07L03A | 545,6 | 31,3 | 0,753 | 12,9 |
| | P07L04D | 571,4 | 31,0 | 0,703 | 12,5 |
| | Média | 562,3 ± 14,5 | 30,9 ± 0,2 | 0,744 ± 0,037 | 13,0 ± 0,6 |
| $T_Q=700\text{ °C}$ | P07L03B | 552,6 | 32,5 | 0,668 | 12,0 |
| | P07L03C | 552,2 | 32,4 | 0,694 | 12,4 |
| | P07L04A | 572,8 | 31,1 | 0,744 | 13,3 |
| | P07L04I | 571,7 | 30,9 | 0,773 | 13,7 |
| | Média | 562,3 ± 11,5 | 31,7 ± 0,8 | 0,720 ± 0,047 | 12,8 ± 0,8 |
| $T_Q=750\text{ °C}$ | P07L03D | 556,1 | 32,7 | 0,741 | 13,5 |
| | P07L04B | 564,3 | 31,9 | 0,672 | 12,1 |
| | P07L04C | 545,1 | 31,7 | 0,615 | 10,6 |
| | Média | 555,2 ± 9,6 | 32,1 ± 0,5 | 0,676 ± 0,063 | 12,1 ± 1,4 |

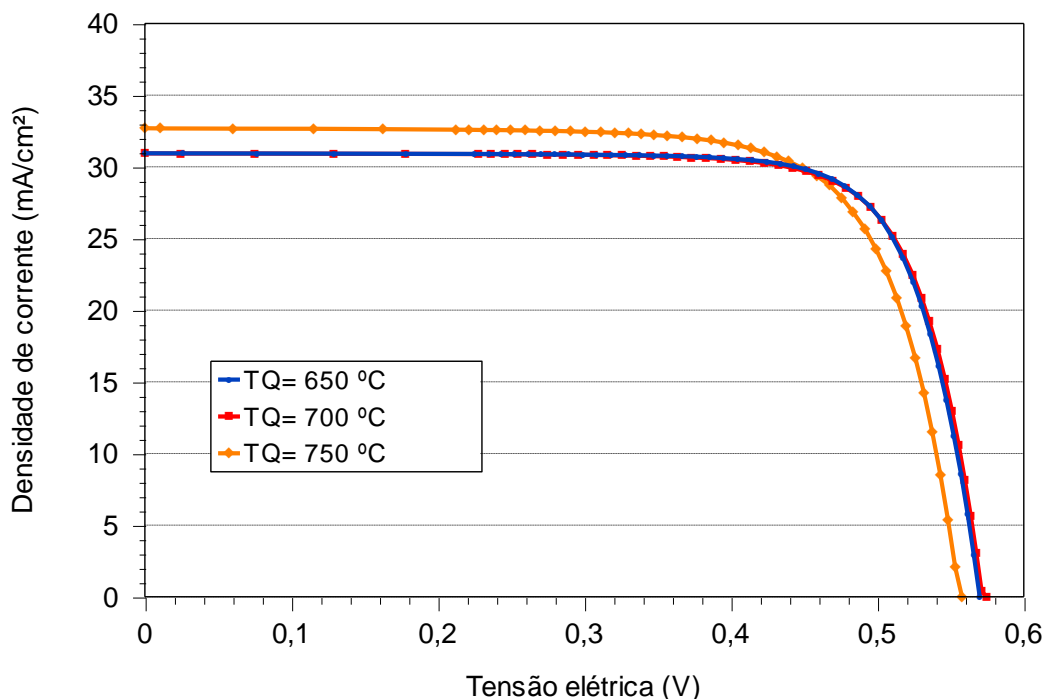


Figura 31 - Curva J-V com as melhores células solares para altas temperaturas de queima sem laser.

4.4. Influência da Distância entre Pontos

A distância entre os pontos formados pela radiação laser (D_P), foi otimizada para a potência de 15 W, frequência de 80 kHz e T_R de 350 °C, definidos como os melhores parâmetros para a produção das células solares. A V_E usada foi de 50 cm/min. A D_P foi variada entre 0,3 mm e 0,9 mm, e os valores dos parâmetros elétricos das células solares são apresentados na Tabela 15.

Os maiores valores médios de eficiência ocorreram para a D_P de 0,3 mm e de 0,5 mm e o maior valor de eficiência foi de 14,1 % para D_P de 0,5 mm. Porém, a D_P de 0,5 mm apresentou maior variação nos valores de eficiência, com um desvio padrão de 0,8 % (absoluto) quando comparado com o valor de 0,4 % para a D_P de 0,3 mm. Mesmo que a D_P de 0,3 mm resulte em valores de J_{SC} e V_{OC} médios menores aqueles obtidos com D_P de 0,5 mm, os valores maiores de FF foram encontrados com 0,3 mm. No entanto, como se pode ver na Figura 32, o FF cai drasticamente para a D_P de 0,9 mm.

Tabela 15 - Parâmetros elétricos das células solares em função da distância entre os pontos, para a temperatura de recozimento de 350 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz.

| D_p (mm) | Célula | V_{oc} (mV) | J_{sc} (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|------------|--------------|--------------------|--------------------------------|----------------------|-------------------|
| 0,3 | P07L03G | 581,4 | 34,4 | 0,658 | 13,2 |
| | P07L03H | 584,9 | 35,2 | 0,650 | 13,4 |
| | P07L03I | 587,7 | 35,2 | 0,672 | 13,9 |
| | Média | 584,7 ± 3,2 | 34,9 ± 0,4 | 0,660 ± 0,011 | 13,5 ± 0,4 |
| 0,5 | P07L01D | 605,8 | 35,4 | 0,562 | 12,0 |
| | P07L01H | 604,9 | 36,0 | 0,622 | 13,6 |
| | P07L01I | 607,7 | 35,8 | 0,649 | 14,1 |
| | P07L02C | 603,3 | 36,3 | 0,599 | 13,1 |
| | P07L02D | 601,2 | 35,9 | 0,647 | 14,0 |
| | Média | 604,6 ± 2,5 | 35,9 ± 0,3 | 0,616 ± 0,036 | 13,4 ± 0,8 |
| 0,7 | P07L04G | 609,6 | 35,6 | 0,612 | 13,3 |
| | P07L04H | 608,9 | 36,0 | 0,611 | 13,4 |
| | P07L04I | 616,0 | 36,4 | 0,522 | 11,7 |
| | Média | 611,5 ± 3,9 | 36,0 ± 0,4 | 0,582 ± 0,052 | 12,8 ± 0,9 |
| 0,9 | P07L05A | 611,8 | 27,2 | 0,275 | 4,6 |
| | P07L05B | 615,9 | 29,1 | 0,282 | 5,1 |
| | P07L05C | 617,2 | 33,0 | 0,304 | 6,2 |
| | Média | 615,0 ± 2,8 | 29,8 ± 2,9 | 0,287 ± 0,015 | 5,3 ± 0,8 |

Na Figura 32 são apresentados os parâmetros elétricos em função da distância entre pontos das células solares com as maiores eficiências. A V_{oc} tende a crescer com o aumento da distância entre pontos, pois a área com difusão/contato de alumínio diminui e, conseqüentemente, diminui a área com recombinação dos portadores da carga minoritários. A maior V_{oc} foi de 617 mV. O valor máximo de J_{sc} foi em torno de 36,3 mA/cm² e ocorreu para D_p de 0,7 mm. Para a maior distância, de 0,9 mm, a J_{sc} caiu significativamente. O FF diminuiu com o aumento da D_p , reduzindo o valor a 0,304 para a maior D_p . Como resultado do comportamento dos três parâmetros elétricos, as melhores eficiências ocorrem para as menores distâncias entre pontos. A maior eficiência foi de 14,1 % e ocorreu para D_p de 0,5 mm.

Processaram-se células solares com pontos formados por radiação laser em substratos de Si-Cz, porém de menor qualidade que os anteriormente utilizados, para verificar se a distância entre pontos apresenta a mesma influência nos parâmetros elétricos das células solares. Comparando a Tabela 16 com a Tabela 15, verifica-se que a eficiência dos dispositivos diminuiu, devido à redução na V_{oc} e J_{sc} .

Porém, na Figura 34 nota-se que o comportamento dos quatro parâmetros elétricos é similar ao apresentado na Figura 33.

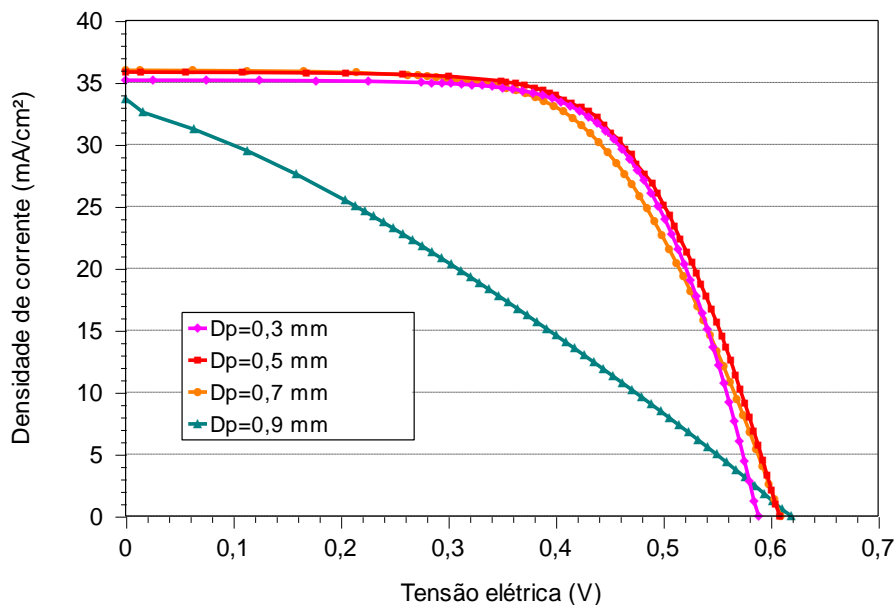


Figura 32 - Curva J-V das melhores células solares para diferentes distâncias entre pontos, e temperatura de recozimento de 350 °C, potência de 13 W e frequência de 80 kHz.

Tabela 16 - Parâmetros elétricos das células solares em função da distância entre pontos, na temperatura de recozimento de 350 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz para lâminas Si-Cz de pior qualidade.

| D_p (mm) | Célula | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|------------|--------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|
| 0,3 | P12L08H | 566,5 | 30,7 | 0,715 | 12,4 |
| | P12L10E | 568,2 | 31,5 | 0,693 | 12,4 |
| | Média | 567,4 ± 1,2 | 31,1 ± 0,6 | 0,704 ± 0,016 | 12,4 |
| 0,5 | P12L10B | 566,5 | 31,3 | 0,670 | 12,0 |
| | P12L10F | 564,2 | 31,5 | 0,670 | 11,9 |
| | Média | 565,3 ± 1,7 | 31,38 ± 0,14 | 0,670 | 11,9 |
| 0,7 | P12L10D | 569,0 | 31,4 | 0,599 | 10,7 |
| | P12L10H | 555,5 | 31,5 | 0,587 | 10,3 |
| | Média | 562 ± 9 | 31,45 ± 0,04 | 0,593 ± 0,009 | 10,5 ± 0,3 |
| 0,9 | P12L10C | 567,8 | 31,0 | 0,563 | 9,9 |
| | P12L10G | 564,8 | 31,0 | 0,468 | 8,2 |
| | P12L10I | 569,0 | 31,4 | 0,525 | 9,4 |
| | Média | 567,2 ± 2,1 | 31,10 ± 0,21 | 0,52 ± 0,05 | 9,2 ± 0,9 |

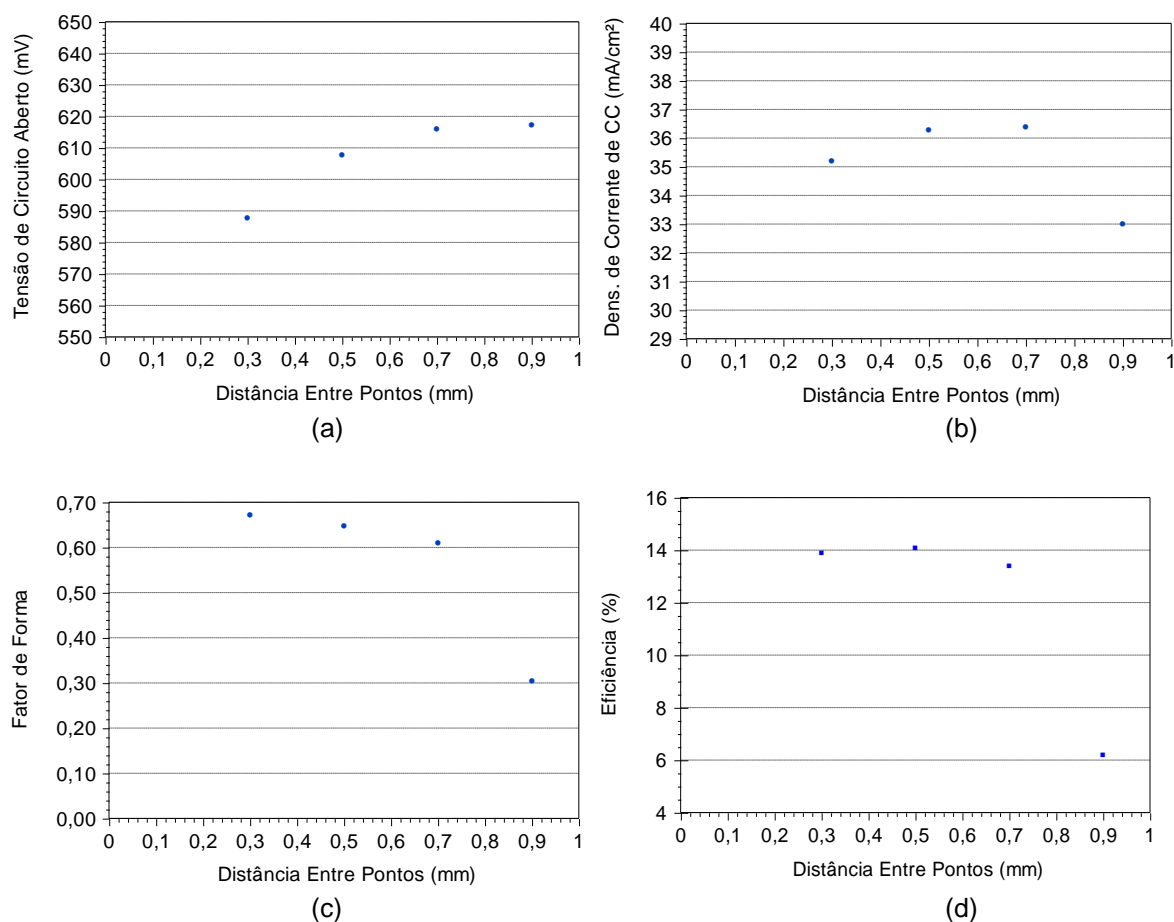


Figura 33 - (a) V_{oc} , (b) J_{sc} , (c) FF e (d) η em função na distância entre pontos, para as melhores células solares do processo 07.

4.5. Influência da Área do Contato

Nesta etapa, avaliou-se a influência da área do contato (A_c) dos pontos formados por laser nos parâmetros elétricos das células solares com passivação na face posterior. Inicialmente, determinou-se a espessura da camada passivadora de dióxido de silício na face posterior e do filme antirreflexo de TiO_2 na face frontal, a partir da medição da refletância em uma lâmina sem malha metálica ou formação dos pontos de contato/difusão por radiação laser. Na Tabela 17 apresenta-se a refletância média ponderada e a espessura calculada da camada de SiO_2 e do filme antirreflexo em 5 regiões da amostra. A refletância do filme de TiO_2 é de 1,7 % e a espessura é de 65,6 nm. A espessura da camada de SiO_2 , crescida em processo térmico seco foi de 103 nm. Na Figura 35 compara-se a refletância do filme antirreflexo e da camada de SiO_2 e, como se esperava, a camada de SiO_2 apresenta maior refletância média de 2,2 % com o mínimo em 620 nm.

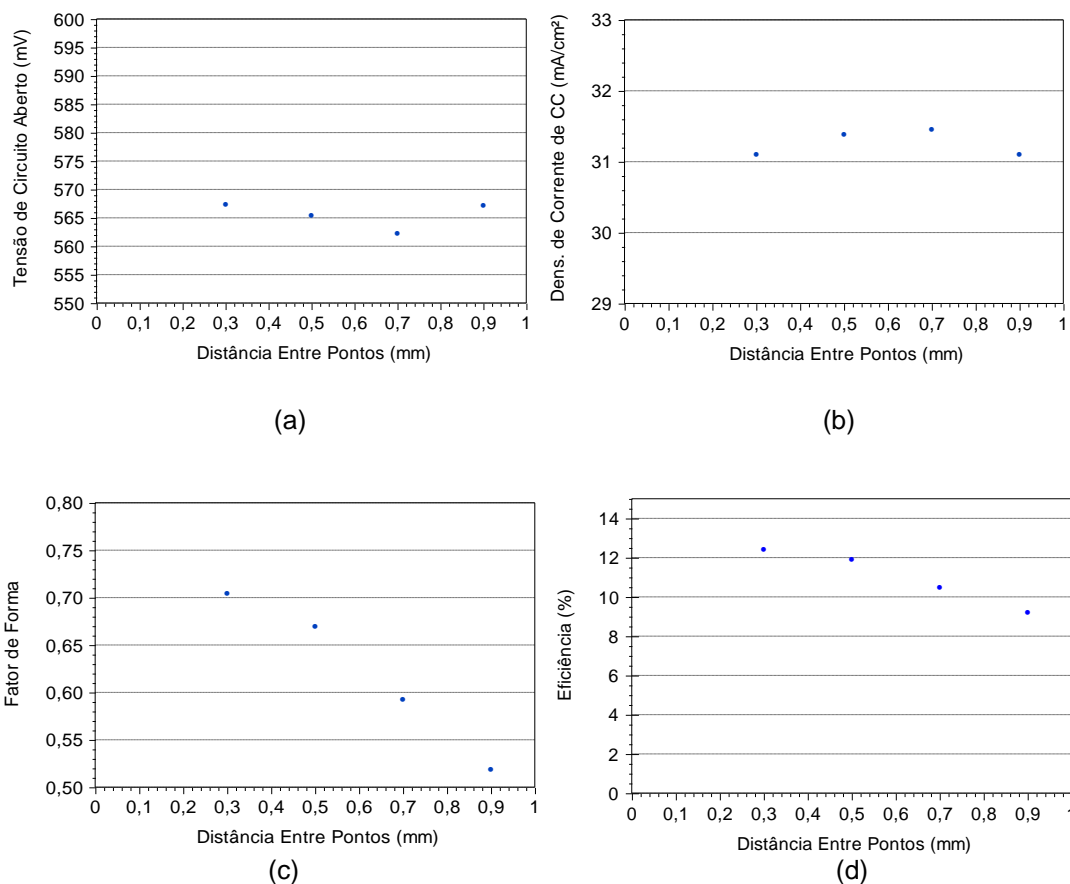


Figura 34 – Valores médios da (a) V_{oc} , (b) J_{sc} , (c) FF e (d) η para as variações na distância entre pontos para o processo 12, quando foi usado um silício Cz de menor qualidade.

Tabela 17 – Refletância média ponderada e espessura da camada passivadora de SiO_2 e do filme antirreflexo.

| | Região | Refletância (%) | Espessura calculada (nm) |
|----------------|----------|-----------------|--------------------------|
| TiO_2 | Região 1 | 1,8 | 66 |
| | Região 2 | 1,7 | 64 |
| | Região 3 | 1,7 | 67 |
| | Região 4 | 1,7 | 64 |
| | Região 5 | 1,9 | 66 |
| | Média | $1,7 \pm 0,3$ | $65,4 \pm 1,3$ |
| SiO_2 | - | 2,2 | 103 |

Conforme ilustram as Figuras 36 e 37, aumentou-se a área de contato, com a potência do sistema laser de 13 W e 15 W, respectivamente. As áreas de contato dos pontos foram entre $2400 \mu\text{m}^2$ e $6900 \mu\text{m}^2$ para 13 W e entre $2900 \mu\text{m}^2$ e $10345 \mu\text{m}^2$ para 15 W. As áreas foram medidas a partir do programa computacional

Analyzing Digital Images. Os resultados dos parâmetros elétricos das células solares processadas com 13 W são apresentados na Tabela 18.

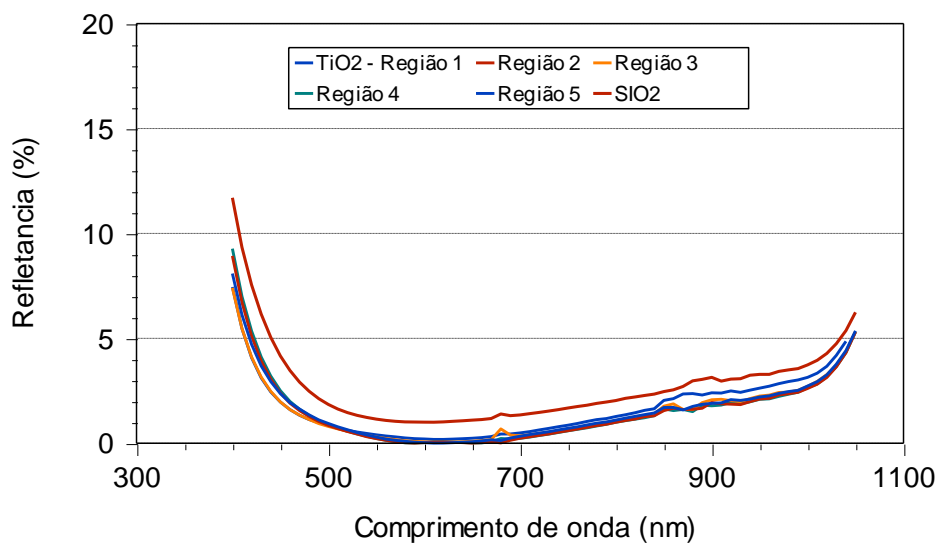


Figura 35 – Refletância da camada passivadora de SiO₂ e do filme antirreflexo de TiO₂.

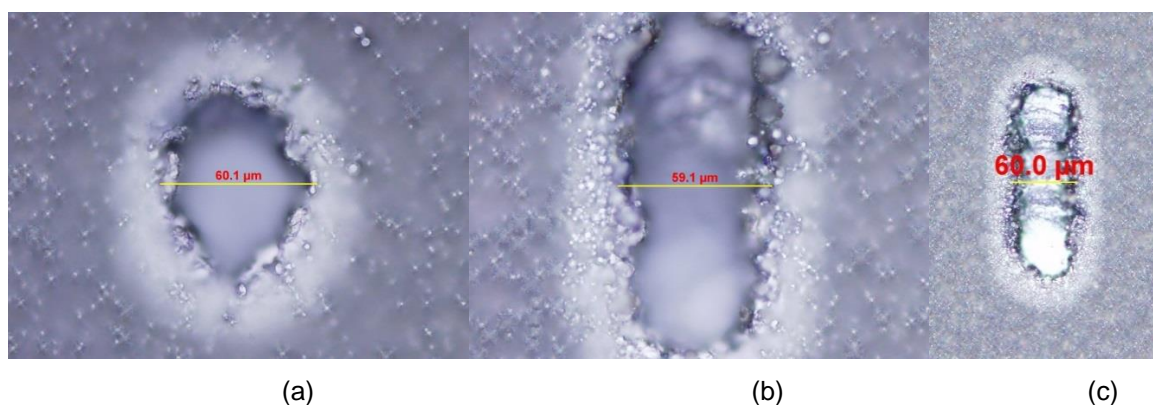


Figura 36 - Área de contato formada por laser com potência de 13 W de (a) 2423 μm², (b) 5627 μm² e (c) 6895 μm². Imagens obtidas com o microscópio óptico.

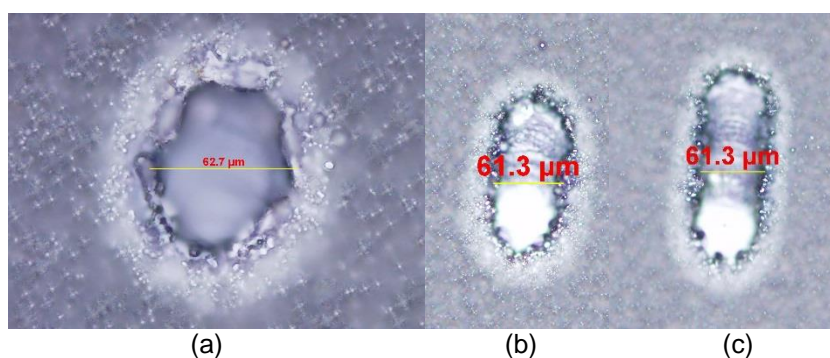


Figura 37 - Área de contato formada por laser com potência de 15 W de (a) 2900 μm², (b) 7230 μm² e (c) 10432 μm². Imagens obtidas com o microscópio óptico.

Tabela 18 - Parâmetros elétricos das células solares em função da área de contato para temperatura de recozimento de 350 °C, V_E de 70 cm/min, potência de 13 W e frequência de 80 kHz.

| A_c (μm^2) | Célula | V_{oc} (mV) | J_{sc} (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|---------------------------|--------------|---------------------|--------------------------------|----------------------|-------------------|
| 2423 | P12L04I | 565,7 | 31,0 | 0,663 | 11,6 |
| | P12L07H | 560,4 | 31,3 | 0,632 | 11,1 |
| | P12L08B | 566,4 | 30,4 | 0,684 | 11,8 |
| | Média | 564,2 ± 3,3 | 30,9 ± 0,5 | 0,659 ± 0,026 | 11,5 ± 0,4 |
| 5627 | P12L08A | 566,3 | 30,6 | 0,679 | 11,8 |
| | P12L08E | 567,7 | 30,0 | 0,701 | 11,9 |
| | P12L08G | 548,5 | 30,9 | 0,674 | 11,4 |
| | Média | 560,8 ± 10,7 | 30,5 ± 0,4 | 0,685 ± 0,014 | 11,7 ± 0,3 |
| 6895 | P12L08C | 567,2 | 30,3 | 0,714 | 12,3 |
| | P12L08F | 568,7 | 30,0 | 0,718 | 12,3 |
| | Média | 568,0 ± 1,1 | 30,18 ± 0,22 | 0,716 ± 0,003 | 12,3 |

Da Tabela 18 e da Figura 38, novamente observa-se que com o aumento da área de contato total na face posterior, aumenta a eficiência, devido ao aumento do FF. O melhor resultado foi de 12,3 %, com V_{oc} de 567,2 mV e FF de 0,718. Porém, o melhor valor de J_{sc} foi para a menor área, de 31,3 mA/cm² e a J_{sc} apresenta uma tendência de diminuir com o aumento da área de contato, como se pode ver na Figura 38 (b). Isso ocorre devido a maior área com passivação e, conseqüentemente, menor recombinação na face posterior.

Na Tabela 19 mostram-se os resultados para a potência do sistema laser de 15 W. Neste caso, observa-se que a eficiência tende a crescer até a área de 7230 μm^2 , devido a tendência de aumento do FF. O valor máximo da eficiência foi de 12,6 %, com V_{oc} de 568 mV, FF médio de 0,702, e J_{sc} de 31,6 mA/cm². A V_{oc} e o FF são similares aos obtidos para a potência de 13 W. Somente a J_{sc} é um pouco maior, resultando no aumento de 0,3 % na eficiência. A resistência em série continua alta, sendo menor para a maior A_c , conforme se pode notar na Figura 39.

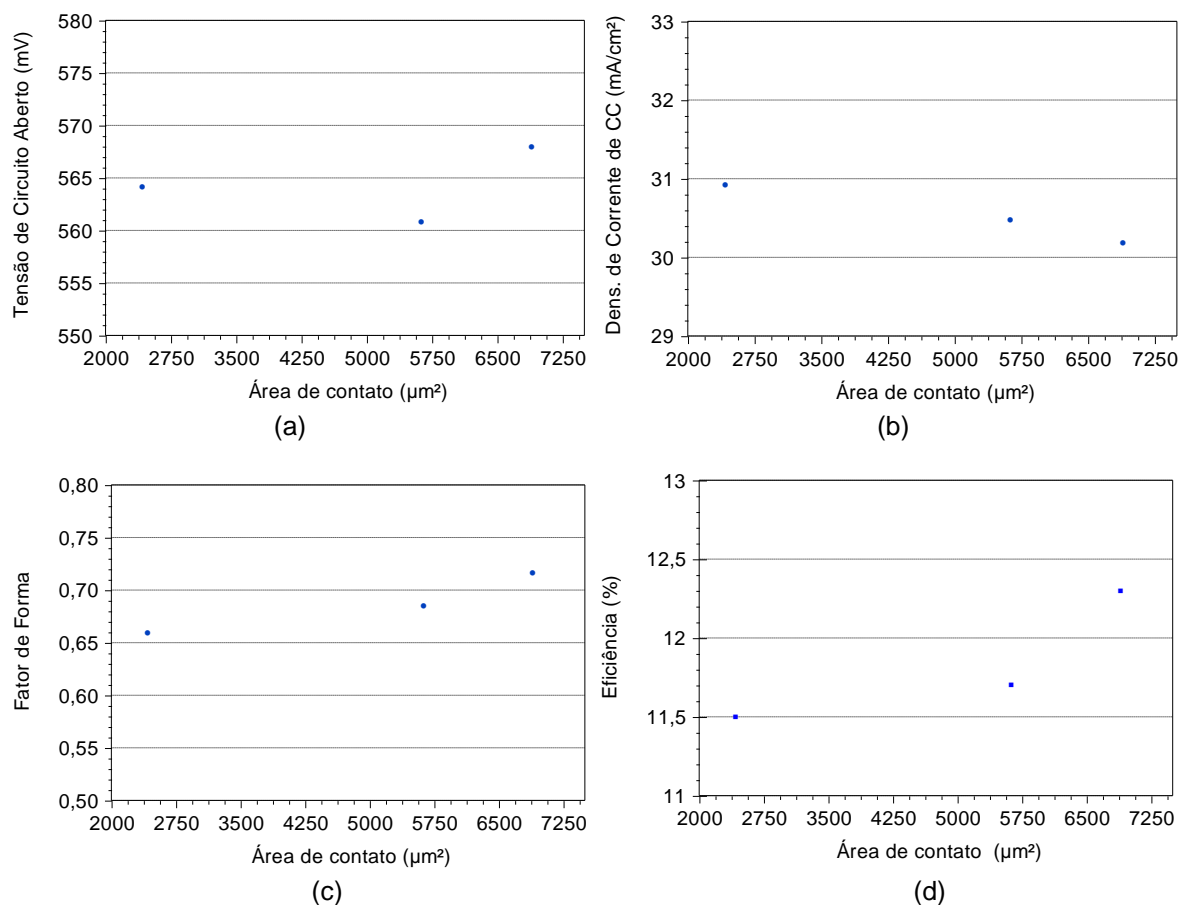


Figura 38 - Valores médios da (a) V_{oc} , (b) J_{sc} , (c) FF e (d) η para diferentes áreas de contato formadas com a potência de 13 W.

Tabela 19 - Parâmetros elétricos das células solares em função da área dos pontos, para temperatura de recozimento de 350 °C, V_E de 75 cm/min, potência de 15 W e frequência de 80 kHz.

| A_c (µm²) | Célula | V_{oc} (mV) | J_{sc} (mA/cm²) | FF | Eficiência (%) |
|-------------|--------------|--------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| 2900 | P12L03B | 563,3 | 30,9 | 0,667 | 11,6 |
| | P12L03D | 568,6 | 31,6 | 0,670 | 12,0 |
| | P12L03I | 562,4 | 31,2 | 0,666 | 11,7 |
| | Média | 564,8 ± 3,4 | 31,3 ± 0,4 | 0,668 ± 0,002 | 11,8 ± 0,2 |
| 7230 | P12L09F | 568,7 | 31,6 | 0,702 | 12,6 |
| | P12L09I | 568,3 | 31,4 | 0,702 | 12,5 |
| | Média | 568,5 ± 0,3 | 31,5 ± 0,1 | 0,702 | 12,6 ± 0,1 |
| 10432 | P12L09C | 565,3 | 31,3 | 0,687 | 12,1 |
| | P12L09E | 567,8 | 31,5 | 0,709 | 12,7 |
| | P12L09H | 568,3 | 31,6 | 0,715 | 12,8 |
| | Média | 567,1 ± 1,6 | 31,4 ± 0,2 | 0,704 ± 0,015 | 12,5 ± 0,4 |

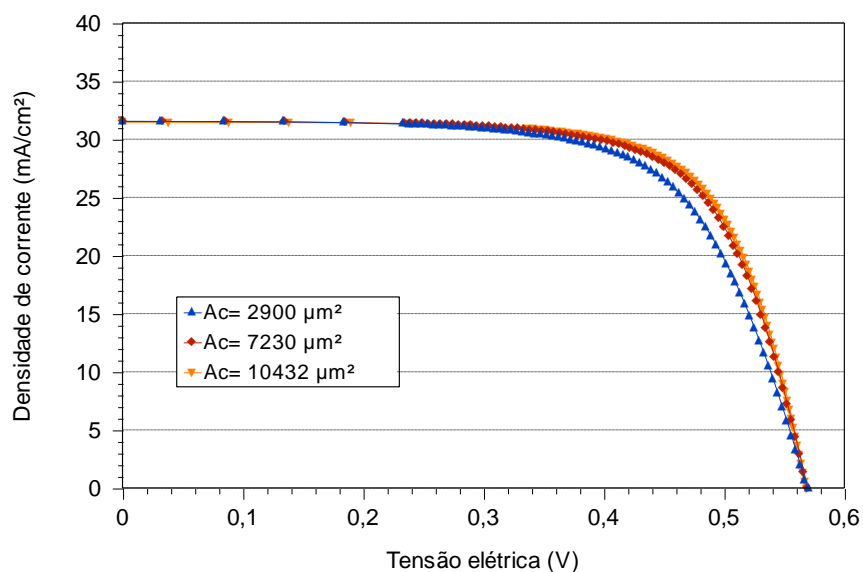


Figura 39 - Curva J-V das melhores células solares com diferentes áreas dos pontos e temperatura de recozimento de 350 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz.

4.6. Substrato de Alta Qualidade

4.6.1. Temperatura de Difusão de Fósforo de 855 °C

Para o desenvolvimento de células solares em substratos de silício de alta qualidade (PV-Si-FZ), otimizou-se a temperatura de difusão de fósforo (T_D) com base em trabalhos previamente realizados pelo NT-Solar [37]. Para o processo de recozimento utilizou-se o melhor intervalo da velocidade de esteira e temperatura do forno de esteira encontrado para substratos de Si-Cz. Esta etapa foi iniciada com a T_D de 855 °C e foram utilizadas as V_E de 65 cm/min e 75 cm/min para a T_R de 350 °C e as V_E de 65 cm/min, 75 cm/min e 85 cm/min para a T_R de 400 °C e 450 °C. Os resultados são apresentados nas Tabelas 19, 20 e 21. A resistência de folha média medida em 13 regiões em uma lâmina de silício após a difusão de fósforo para formar o emissor foi de 63 Ω/\square .

Os maiores valores médios foram todos encontrados para a V_E de 65 cm/min, devido a maior V_{oc} de 570,9 mV, resultando na eficiência de 12,6 %. No entanto, a diferença dos resultados para as duas velocidades de recozimento é pequena.

Tabela 19 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 350 °C, temperatura de difusão de 855 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz.

| V_E (cm/min) | Célula | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|----------------|--------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|
| 65 | P19L10A | 573,1 | 30,7 | 0,721 | 12,7 |
| | P19L10F | 571,0 | 31,3 | 0,714 | 12,7 |
| | P19L10H | 570,6 | 30,5 | 0,716 | 12,5 |
| | P19L11A | 569,0 | 30,6 | 0,727 | 12,7 |
| | P19L11F | 571,1 | 30,2 | 0,725 | 12,5 |
| | P19L11H | 570,7 | 29,7 | 0,728 | 12,3 |
| | Média | 570,9 ± 1,3 | 30,5 ± 0,5 | 0,722 ± 0,006 | 12,6 ± 0,2 |
| 75 | P19L12A | 562,86 | 30,57 | 0,723 | 12,4 |
| | P19L12F | 566,22 | 30,84 | 0,712 | 12,4 |
| | P19L12H | 565,45 | 30,52 | 0,703 | 12,1 |
| | Média | 567,3 ± 3,6 | 30,4 ± 0,4 | 0,718 ± 0,010 | 12,3 ± 0,2 |

Tabela 20 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 400 °C, temperatura de difusão de 855 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz.

| V_E (cm/min) | Célula | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|----------------|--------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|
| 65 | P19L08A | 572,1 | 31,2 | 0,655 | 11,7 |
| | P19L08F | 575,4 | 31,2 | 0,681 | 12,2 |
| | P19L08H | 574,0 | 31,0 | 0,687 | 12,2 |
| | P19L10B | 571,8 | 30,7 | 0,725 | 12,7 |
| | P19L10D | 575,2 | 30,6 | 0,735 | 12,9 |
| | P19L10I | 573,0 | 30,8 | 0,733 | 12,9 |
| | P19L11B | 567,1 | 30,4 | 0,725 | 12,5 |
| | P19L11D | 574,3 | 29,9 | 0,741 | 12,7 |
| | P19L11I | 570,3 | 29,9 | 0,741 | 12,7 |
| | Média | 572,6 ± 2,7 | 30,6 ± 0,5 | 0,714 ± 0,031 | 12,5 ± 0,4 |
| 75 | P19L08B | 572,8 | 31,0 | 0,672 | 11,9 |
| | P19L08D | 575,7 | 31,3 | 0,67 | 12,1 |
| | P19L08I | 575,6 | 31,1 | 0,698 | 12,5 |
| | P19L12B | 567,3 | 30,2 | 0,72 | 12,4 |
| | P19L12D | 570,7 | 30,5 | 0,724 | 12,6 |
| | P19L12I | 566,3 | 30,8 | 0,717 | 12,5 |
| | Média | 571,4 ± 4,0 | 30,8 ± 0,4 | 0,700 ± 0,024 | 12,3 ± 0,3 |
| 85 | P19L08C | 572,8 | 31,3 | 0,673 | 12,1 |
| | P19L08E | 572,5 | 31,1 | 0,679 | 12,1 |
| | P19L08G | 576,3 | 31,0 | 0,7 | 12,5 |
| | Média | 573,9 ± 2,1 | 31,1 ± 0,2 | 0,684 ± 0,014 | 12,2 ± 0,2 |

Confirma-se a tendência de diminuição da eficiência em função do aumento da V_E , devido à redução do FF. A melhor eficiência média de 12,5 % foi similar a obtida para a T_R de 350 °C, onde a V_{oc} média foi de 572,3 mV e, novamente, ocorreu para a V_E de 65 cm/min.

Tabela 21 - Parâmetros elétricos das células solares em função da velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 450 °C, temperatura de difusão de 855 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz.

| V_E (cm/min) | Célula | V_{oc} (mV) | J_{sc} (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|----------------|--------------|--------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------|
| 65 | P19L07A | 576,8 | 31,0 | 0,668 | 12,0 |
| | P19L07F | 571,6 | 31,5 | 0,674 | 12,1 |
| | P19L07H | 573,0 | 31,1 | 0,673 | 12,0 |
| | P19L10C | 573,0 | 31,4 | 0,724 | 13,0 |
| | P19L10E | 571,2 | 30,8 | 0,716 | 12,6 |
| | P19L10G | 574,2 | 30,3 | 0,734 | 12,8 |
| | P19L11C | 565,0 | 30,4 | 0,735 | 12,6 |
| | P19L11E | 573,1 | 30,0 | 0,735 | 12,6 |
| | P19L11G | 573,2 | 29,7 | 0,738 | 12,6 |
| | Média | 572,3 ± 3,2 | 30,7 ± 0,6 | 0,711 ± 0,030 | 12,5 ± 0,4 |
| 75 | P19L07B | 567,5 | 31,2 | 0,679 | 12,0 |
| | P19L07D | 576,9 | 31,1 | 0,682 | 12,2 |
| | P19L07I | 572,6 | 31,1 | 0,691 | 12,3 |
| | P19L12C | 566,2 | 30,9 | 0,717 | 12,6 |
| | P19L12E | 566,3 | 30,6 | 0,704 | 12,2 |
| | P19L12G | 566,5 | 30,5 | 0,721 | 12,5 |
| | | Média | 569,3 ± 4,4 | 30,9 ± 0,3 | 0,699 ± 0,018 |
| 85 | P19L07C | 573,6 | 31,3 | 0,689 | 12,3 |
| | P19L07E | 574,4 | 31,2 | 0,668 | 12,0 |
| | P19L07G | 574,2 | 30,9 | 0,686 | 12,2 |
| | | Média | 574,1 ± 0,4 | 31,1 ± 0,2 | 0,681 ± 0,011 |

Comparando-se as Tabelas 19, 20 e 21, observa-se que a eficiência é similar para cada V_E . Para a V_E de 65 cm/min a eficiência média foi de 12,6% – 12,5%, para a V_E de 75 cm/min foi 12,3% e para a V_E de 85 cm/min a eficiência foi de 12,2%, confirmando a tendência de redução da eficiência em função do aumento da V_E , devido à diminuição do FF. Por causa do menor tempo de processamento para a maior V_E , provavelmente não ocorre um bom contato, aumentando a resistência em série. A melhor eficiência média ocorreu para a T_R de 350 °C, porém os melhores valores, de 12,9% e 13,0 % ocorreram para a T_R de 400 °C e 450 °C.

4.6.2. Temperatura de Difusão de Fósforo de 865 °C

Com o objetivo de reduzir a resistência de folha do emissor, isto é aumentar a quantidade de fósforo difundido na face frontal da lâmina de silício, aumentou-se a T_D para 865 °C. Neste caso, a resistência de folha média do emissor foi de 60 Ω/\square . Novamente utilizou-se a T_R de 350 °C, 400 °C e 450 °C e V_E de 65 cm/min, 75 cm/min e 85 cm/min. Os dados obtidos são apresentados nas Tabelas 22, 23 e 24.

Para esta temperatura de difusão e T_R de 350 °C e 400 °C, não se observa uma tendência de redução da eficiência com o aumento da V_E e os demais parâmetros elétricos também aumentaram, contradizendo os resultados anteriores. Somente para a T_R de 450 °C, a eficiência reduz-se com o aumento da V_E .

Tabela 22 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 350 °C, temperatura de difusão de 865 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz.

| V_E (cm/min) | Célula | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|----------------|--------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|
| 65 | P13L10A | 579,8 | 32,0 | 0,637 | 11,8 |
| | P13L10F | 574,7 | 32,1 | 0,650 | 11,9 |
| | Média | 577,3 ± 3,6 | 32,1 | 0,644 ± 0,009 | 11,9 ± 0,1 |
| 75 | P13L10B | 579,1 | 32,2 | 0,656 | 12,2 |
| | P13L10D | 578,3 | 32,1 | 0,614 | 11,3 |
| | P13L10I | 576,7 | 31,8 | 0,665 | 12,1 |
| | Média | 578,0 ± 1,2 | 32,0 ± 0,2 | 0,645 ± 0,027 | 11,9 ± 0,5 |
| 85 | P13L10E | 577,3 | 32,2 | 0,639 | 11,8 |
| | P13L10G | 578,8 | 32,2 | 0,677 | 12,6 |
| | P13L10H | 581,2 | 32,8 | 0,662 | 12,6 |
| | Média | 579,1 ± 2,0 | 32,4 ± 0,4 | 0,659 ± 0,019 | 12,3 ± 0,5 |

Observa-se um crescimento da J_{SC} com o aumento da T_R , alcançando o valor médio de 33,3 mA/cm², para as duas maiores temperaturas de recozimento. O melhor valor da V_{oc} média foi de 591,3 mV e ocorreu para a T_R de 400 °C, que associado ao aumento da J_{sc} resultou na melhor eficiência média de 13,6 % para a V_E de 85 cm/min. A melhor eficiência ocorreu para estes parâmetros de recozimento e o valor foi de 13,9 %, provocada pela V_{oc} de 594,9 mV e J_{sc} de 33,8 mA/cm². Da

mesma forma que para células solares em Si-Cz, somente o fator de forma foi baixo para todos os casos, sendo inferior a 0,70.

Comparando as Tabelas 19, 20 21 com as Tabelas 22, 23 e 24 nota-se que com o aumento da temperatura de difusão de fósforo ocorreu um aumento da eficiência para as T_R de 400 °C e 450 °C. Especificamente para a T_R de 400 °C, observa-se um aumento da V_{OC} e da J_{SC} com o aumento da temperatura de difusão de fósforo devido a formação de um emissor mais profundo. No entanto, o FF é baixo para as duas T_D , indicando que a resistência em série não é provocada pela resistência de contato entre a malha metálica frontal e a superfície do emissor. Portanto, pode-se concluir que a concentração em superfície do dopante não é baixa e não provoca a alta resistência em série.

Tabela 23 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 400 °C, temperatura de difusão de 865 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz.

| V_E (cm/min) | Célula | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|----------------|--------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|
| 65 | P13L11A | 592,3 | 32,9 | 0,691 | 13,4 |
| | P13L11F | 590,4 | 33,5 | 0,681 | 13,4 |
| | P13L11H | 587,9 | 33,4 | 0,678 | 13,3 |
| | Média | 590,2 ± 2,2 | 33,3 ± 0,3 | 0,683 ± 0,007 | 13,4 ± 0,1 |
| 75 | P13L11B | 591,9 | 33,9 | 0,675 | 13,5 |
| | P13L11D | 593,5 | 33,8 | 0,686 | 13,7 |
| | P13L11I | 587,1 | 32,8 | 0,701 | 13,4 |
| | Média | 590,8 ± 3,3 | 33,5 ± 0,6 | 0,687 ± 0,013 | 13,5 ± 0,2 |
| 85 | P13L11C | 585,1 | 32,8 | 0,687 | 13,1 |
| | P13L11E | 594,9 | 33,8 | 0,692 | 13,9 |
| | P13L11G | 594,0 | 33,5 | 0,694 | 13,7 |
| | Média | 591,3 ± 5,4 | 33,3 ± 0,5 | 0,691 ± 0,004 | 13,6 ± 0,4 |

4.6.3. Temperatura de Difusão de Fósforo de 875 °C

Como uma maior temperatura de difusão resultou em células solares mais eficientes, avaliou-se a influência da T_D de 875 °C nos parâmetros elétricos das células solares, utilizando as temperaturas de recozimento de 300 °C, 400 °C e 450 °C. A resistência de folha média após a difusão de fósforo foi de 53 Ω/\square . Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 25, 26 e 27.

Tabela 24 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 450 °C, temperatura de difusão de 865 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz.

| V_E (cm/min) | Célula | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|----------------|--------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|
| 65 | P13L12A | 584,3 | 32,9 | 0,685 | 13,1 |
| | P13L12F | 581,1 | 33,6 | 0,668 | 13,1 |
| | Média | 582,7 ± 2,3 | 33,2 ± 0,6 | 0,677 ± 0,012 | 13,1 |
| 75 | P13L12B | 578,9 | 33,1 | 0,67 | 12,8 |
| | P13L12D | 576,4 | 33,2 | 0,643 | 12,3 |
| | P13L12I | 585,6 | 33,2 | 0,697 | 13,5 |
| | Média | 580,3 ± 4,8 | 33,2 | 0,670 ± 0,027 | 12,9 ± 0,6 |
| 85 | P13L12C | 585,9 | 33,6 | 0,672 | 13,2 |
| | P13L12E | 584,3 | 33,6 | 0,627 | 12,3 |
| | P13L12G | 579,1 | 32,7 | 0,691 | 13,1 |
| | Média | 583,1 ± 3,6 | 33,3 ± 0,5 | 0,663 ± 0,033 | 12,9 ± 0,5 |

Tabela 25 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 300 °C, temperatura de difusão de 875 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz.

| V_E (cm/min) | Célula | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|----------------|--------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|
| 65 | P14L13F | 582,8 | 33,7 | 0,664 | 13,1 |
| | P14L13H | 582,0 | 33,5 | 0,683 | 13,3 |
| | Média | 582,4 ± 0,6 | 33,6 ± 0,1 | 0,674 ± 0,013 | 13,2 ± 0,2 |
| 75 | P14L13B | 568,0 | 33,5 | 0,682 | 13,0 |
| | P14L13D | 579,4 | 33,5 | 0,678 | 13,2 |
| | P14L13I | 583,0 | 33,9 | 0,689 | 13,6 |
| | Média | 581,2 ± 2,5 | 33,6 ± 0,2 | 0,683 ± 0,005 | 13,2 ± 0,3 |
| 85 | P14L13E | 578,7 | 33,3 | 0,664 | 12,8 |
| | P14L13G | 575,6 | 33,1 | 0,673 | 12,8 |
| | Média | 577,2 ± 2,2 | 33,2 ± 0,2 | 0,668 ± 0,006 | 12,8 |

Para a T_R de 300 °C a maior eficiência média foi de 13,2 % e ocorreu para as duas menores V_E . Porém, a maior eficiência de 13,6 % ocorreu para $V_E = 75$ cm/min. Este valor foi similar a maior eficiência, de 13,7 %, encontrada para a T_R de 400 °C. Para esta temperatura não se observa uma influência clara da V_E nos resultados.

Tabela 26 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 400 °C, temperatura de difusão de 875 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz.

| V_E (cm/min) | Célula | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|----------------|--------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|
| 65 | P14L14A | 591,6 | 33,9 | 0,674 | 13,5 |
| | P14L14F | 582,8 | 34,1 | 0,677 | 13,4 |
| | P14L14H | 584,7 | 34,2 | 0,685 | 13,7 |
| | Média | 586,4 ± 4,6 | 34,1 ± 0,1 | 0,679 ± 0,006 | 13,6 ± 0,1 |
| 75 | P14L14B | 588,4 | 34,2 | 0,667 | 13,4 |
| | P14L14D | 583,8 | 34,1 | 0,650 | 12,9 |
| | P14L14I | 583,4 | 33,7 | 0,691 | 13,6 |
| | Média | 585,1 ± 2,8 | 34,0 ± 0,3 | 0,669 ± 0,021 | 13,3 ± 0,3 |
| 85 | P14L14C | 580,8 | 33,5 | 0,672 | 13,1 |
| | P14L14E | 589,8 | 34,2 | 0,679 | 13,7 |
| | P14L14G | 586,2 | 34,0 | 0,688 | 13,7 |
| | Média | 586,6 ± 4,5 | 33,9 ± 0,4 | 0,680 ± 0,008 | 13,5 ± 0,4 |

Tabela 27 - Parâmetros elétricos das células solares em função da velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 450 °C, temperatura de difusão de 875 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz.

| V_E (cm/min) | Célula | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|----------------|--------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|
| 65 | P14L16A | 589,5 | 33,8 | 0,694 | 13,8 |
| | P14L16F | 584,8 | 34,0 | 0,688 | 13,7 |
| | P14L16H | 581,6 | 33,4 | 0,683 | 13,3 |
| | Média | 585,3 ± 4,0 | 33,7 ± 0,3 | 0,688 ± 0,005 | 13,6 ± 0,3 |
| 75 | P14L16B | 589,9 | 34,2 | 0,688 | 13,9 |
| | P14L16D | 587,8 | 34,1 | 0,687 | 13,8 |
| | P14L16I | 588,0 | 33,8 | 0,690 | 13,7 |
| | Média | 588,6 ± 1,2 | 34,1 ± 0,2 | 0,688 ± 0,001 | 13,8 ± 0,1 |
| 85 | P14L16C | 579,6 | 33,1 | 0,698 | 13,4 |
| | P14L16E | 589,3 | 34,2 | 0,693 | 14,0 |
| | P14L16G | 589,0 | 33,6 | 0,699 | 13,8 |
| | Média | 586,0 ± 5,5 | 33,6 ± 0,6 | 0,697 ± 0,003 | 13,7 ± 0,3 |

Para a T_R de 450 °C a eficiência é similar para as diferentes velocidades de recozimento, porém a maior eficiência média de 13,8 % ocorreu para a V_E de 75 cm/min e apresentou o menor desvio padrão. No entanto, verificou-se que a maior eficiência, de 14,0 %, ocorreu para a maior V_E com V_{oc} , J_{sc} e FF de 589,3 mV, 34,2 mA/cm² e 0,693, respectivamente.

Comparando os parâmetros elétricos dos dispositivos processados com a T_D de 865 °C com os processados com a T_D de 875 °C, nota-se que a J_{sc} aumentou.

Para quantificar este aumento, pode-se comparar a J_{sc} média de $33,3 \text{ mA/cm}^2$ obtida com a T_D de $865 \text{ }^\circ\text{C}$ com a J_{sc} de $34,0 \text{ mA/cm}^2$ obtida com a T_D de $875 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.6.4. Temperatura de Difusão de Fósforo de $885 \text{ }^\circ\text{C}$

Para avaliar a influência do aumento da temperatura de difusão de fósforo, processaram-se células solares com a temperatura de difusão de $885 \text{ }^\circ\text{C}$ e repetiu-se a metodologia nas três temperaturas e velocidades de recozimento. Neste caso, a resistência de folha média do emissor foi de $44 \text{ } \Omega/\square$. Os resultados são apresentados nas Tabelas 28, 29 e 30.

Tabela 28 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de $350 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura de difusão de $885 \text{ }^\circ\text{C}$, potência de 15 W e frequência de 80 kHz para o processo 15.

| V_E (cm/min) | Célula | V_{oc} (mV) | J_{sc} (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|----------------|--------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------|
| 65 | P15L01A | 563,1 | 29,9 | 0,564 | 9,5 |
| | P15L01F | 577,1 | 30,6 | 0,644 | 11,4 |
| | P15L01H | 576,2 | 30,5 | 0,633 | 11,1 |
| | Média | 572 ± 8 | 30,3 ± 0,4 | 0,61 ± 0,04 | 10,7 ± 1,0 |
| 75 | P15L01B | 577,4 | 30,4 | 0,599 | 10,5 |
| | P15L01D | 577,1 | 30,4 | 0,631 | 11,1 |
| | P15L01I | 575,3 | 30,3 | 0,394 | 6,9 |
| | Média | 576,6 ± 1,2 | 30,37 ± 0,03 | 0,54 ± 0,13 | 9,5 ± 2,3 |
| 85 | P15L01C | 577,5 | 30,4 | 0,633 | 11,1 |
| | P15L01E | 576,9 | 30,6 | 0,622 | 11,0 |
| | P15L01G | 575,5 | 30,0 | 0,528 | 9,1 |
| | Média | 576,6 ± 1,1 | 30,3 ± 0,3 | 0,59 ± 0,06 | 10,4 ± 1,1 |

Percebe-se uma significativa redução na eficiência das células solares, chegando a valores tão baixos quanto $6,9 \%$. Enquanto a V_{oc} apresentou valores similares aos encontrados com as menores T_D , o fator de forma e a J_{sc} sofreram uma redução. Para verificar se o problema foi da T_D ou de algum problema durante o processamento e/ou do uso de substrato com problemas, foram processadas novamente células solares com a mesma metodologia. Os resultados são apresentados nas Tabelas 31, 32 e 33.

Tabela 29 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 400 °C, temperatura de difusão de 885 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz para o processo 15.

| V_E (cm/min) | Célula | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|----------------|--------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|
| 65 | P15L02A | 585,3 | 31,6 | 0,623 | 11,5 |
| | P15L02F | 581,1 | 31,4 | 0,613 | 11,2 |
| | P15L02H | 577,7 | 31,0 | 0,639 | 11,5 |
| | Média | 581,4 ± 3,8 | 31,4 ± 0,3 | 0,625 ± 0,013 | 11,4 ± 0,2 |
| 75 | P15L02B | 581,4 | 31,3 | 0,604 | 11,0 |
| | P15L02D | 580,8 | 31,2 | 0,509 | 9,2 |
| | P15L02I | 576,8 | 31,0 | 0,571 | 10,2 |
| | Média | 579,7 ± 2,5 | 31,2 ± 0,1 | 0,561 ± 0,048 | 10,1 ± 0,9 |
| 85 | P15L02C | 579,9 | 31,2 | 0,488 | 8,8 |
| | P15L02E | 580,4 | 31,2 | 0,640 | 11,6 |
| | P15L02G | 580,2 | 30,8 | 0,659 | 11,8 |
| | Média | 580,2 ± 0,3 | 31,1 ± 0,2 | 0,596 ± 0,094 | 10,7 ± 1,7 |

Tabela 30 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 450 °C, temperatura de difusão de 885 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz para o processo 15.

| V_E (cm/min) | Célula | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|----------------|--------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|
| 65 | P15L04A | 572,9 | 31,8 | 0,614 | 11,2 |
| | P15L04F | 581,6 | 32,2 | 0,631 | 11,8 |
| | P15L04H | 578,3 | 32,0 | 0,595 | 11,0 |
| | Média | 577,6 ± 4,4 | 32,0 ± 0,2 | 0,613 ± 0,018 | 11,3 ± 0,4 |
| 75 | P15L04B | 581,2 | 32,3 | 0,526 | 9,9 |
| | P15L04D | 584,5 | 32,0 | 0,615 | 11,5 |
| | P15L04I | 580,6 | 31,6 | 0,628 | 11,5 |
| | Média | 582,1 ± 2,1 | 32,0 ± 0,3 | 0,590 ± 0,056 | 11,0 ± 0,9 |
| 85 | P15L04C | 572,5 | 31,7 | 0,612 | 11,1 |
| | P15L04E | 581,8 | 32,2 | 0,589 | 11,0 |
| | P15L04G | 580,8 | 31,4 | 0,627 | 11,4 |
| | Média | 578,4 ± 5,1 | 31,7 ± 0,4 | 0,609 ± 0,019 | 11,2 ± 0,2 |

Enquanto os parâmetros elétricos são mais homogêneos quando comparados com os resultados apresentados nas Tabelas 31, 32 e 33 entre si, verifica-se que a eficiência sofre uma importante redução, quando comparam-se estes resultados com os obtidos para a T_D de 875 °C. Considerando que os dois experimentos foram realizados utilizando a mesma metodologia, pode-se afirmar que a queda no valor de eficiência deve-se ao aumento na temperatura de difusão, que aumenta a profundidade do emissor de fósforo, reduzindo principalmente a J_{sc} . A V_{oc} também foi reduzida. Este fato deve-se ao aumento da recombinação dos portadores de carga minoritários no emissor.

Tabela 31 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 350 °C, temperatura de difusão de 885 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz para o processo 18.

| V_R (cm/min) | Célula | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|----------------|--------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|
| 65 | P18L01A | 575,0 | 29,0 | 0,683 | 11,4 |
| | P18L01F | 574,6 | 29,6 | 0,682 | 11,6 |
| | P18L01H | 575,7 | 29,4 | 0,699 | 11,8 |
| | Média | 575,1 ± 0,6 | 29,3 ± 0,3 | 0,688 ± 0,009 | 11,6 ± 0,2 |
| 75 | P18L01B | 575,6 | 29,2 | 0,682 | 11,5 |
| | P18L01D | 572,6 | 29,0 | 0,692 | 11,5 |
| | P18L01I | 575,3 | 29,6 | 0,696 | 11,8 |
| | Média | 574,5 ± 1,7 | 29,3 ± 0,3 | 0,690 ± 0,007 | 11,6 ± 0,2 |
| 85 | P18L01C | 577,3 | 29,6 | 0,683 | 11,7 |
| | P18L01E | 574,7 | 29,3 | 0,690 | 11,6 |
| | P18L01G | 574,9 | 28,9 | 0,706 | 11,7 |
| | Média | 575,6 ± 1,5 | 29,3 ± 0,3 | 0,693 ± 0,012 | 11,7 ± 0,1 |

Tabela 32 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 400 °C, temperatura de difusão de 885 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz para o processo 18.

| V_R (cm/min) | Célula | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|----------------|--------------|----------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|
| 65 | P18L02A | 575,7 | 29,6 | 0,693 | 11,8 |
| | P18L02F | 576,7 | 30,0 | 0,686 | 11,9 |
| | P18L02H | 575,6 | 29,4 | 0,681 | 11,5 |
| | Média | 576,0 ± 0,6 | 29,7 ± 0,3 | 0,687 ± 0,006 | 11,7 ± 0,2 |
| 75 | P18L02B | 578,5 | 29,7 | 0,681 | 11,7 |
| | P18L02D | 578,2 | 29,5 | 0,688 | 11,8 |
| | P18L02I | 575,4 | 29,7 | 0,708 | 12,1 |
| | Média | 577,4 ± 1,7 | 29,7 ± 0,1 | 0,692 ± 0,014 | 11,9 ± 0,2 |
| 85 | P18L02C | 576,3 | 30,0 | 0,696 | 12,0 |
| | P18L02E | 578,0 | 29,6 | 0,691 | 11,8 |
| | P18L02G | 574,6 | 29,2 | 0,711 | 11,9 |
| | Média | 576,307 ± 1,7 | 29,6 ± 0,4 | 0,699 ± 0,010 | 11,9 ± 0,1 |

Portanto, concluiu-se que, para substratos de PV-Si-FZ, a temperatura de difusão adequada é de 875 °C e a temperatura do processo de recozimento é de 450 °C, com VE entre 75 cm/min e 85 cm/min. A máxima eficiência alcançada foi de 14,0 %, similar ao maior valor de 14,1 %, obtido em substrato de Si-Cz. Os parâmetros elétricos desta célula solar com PV-Si-FZ foram: com $V_{oc} = 589,3$ mV, $J_{sc} = 34,2$ mA/cm² e $FF = 0,693$. Em Si-CZ, os parâmetros elétricos da melhor célula solar foram: $V_{oc} = 607,7$ mV, $J_{sc} = 35,8$ mA/cm² e $FF = 0,649$. Este resultado foi obtido com a potência de 15 W, frequência de 80 kHz, temperatura de recozimento de 350 °C e velocidade de esteira de 50 cm/min.

Tabela 33 - Parâmetros elétricos das células solares em função velocidade de recozimento para a temperatura de recozimento de 450 °C, temperatura de difusão de 885 °C, potência de 15 W e frequência de 80 kHz para o processo 18.

| V_R (cm/min) | Célula | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|----------------|--------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|
| 65 | P18L04A | 577,0 | 30,3 | 0,686 | 12,0 |
| | P18L04F | 581,9 | 30,6 | 0,693 | 12,3 |
| | P18L04H | 576,9 | 29,9 | 0,694 | 12,0 |
| | Média | 578,6 ± 2,9 | 30,3 ± 0,3 | 0,691 ± 0,004 | 12,1 ± 0,2 |
| 75 | P18L04B | 579,5 | 30,3 | 0,690 | 12,1 |
| | P18L04D | 579,7 | 30,1 | 0,694 | 12,1 |
| | P18L04I | 574,6 | 30,1 | 0,706 | 12,2 |
| | Média | 578,0 ± 2,9 | 30,2 ± 0,2 | 0,697 ± 0,008 | 12,2 ± 0,1 |
| 85 | P18L04C | 574,6 | 30,2 | 0,687 | 11,9 |
| | P18L04E | 580,3 | 30,2 | 0,695 | 12,2 |
| | P18L04G | 577,2 | 29,4 | 0,706 | 12,0 |
| | Média | 577,4 ± 2,9 | 29,9 ± 0,4 | 0,696 ± 0,010 | 12,0 ± 0,1 |

4.6.5. Análise do Tempo de Vida dos Portadores de Carga Minoritários

Os resultados obtidos em substrato de PV-Si-FZ não foram melhores que os resultados encontrados com lâminas de Si-Cz. Para entender este resultado, foram realizadas medições do tempo de vida dos portadores de carga minoritários (τ), após as etapas de processamento em alta temperatura. A oxidação para a passivação na face posterior foi realizada durante 240 minutos, resultando na espessura do óxido de silício de 150 nm, 50 % maior que o resultado obtido com 120 minutos de processo. Os resultados são apresentados na Tabela 34.

Conforme esperado, a resistência de folha diminui com o aumento da T_D , porém para as temperaturas de 855 °C e 865 °C os valores são próximos. A melhor eficiência foi obtida para a T_D de 875 °C, que resultou na resistência de folha de 53 Ω/\square . Para a $T_D = 885$ °C, notou-se uma importante variação da resistência de folha em diferentes processos realizados na mesma temperatura, indicando que o processo não é repetitivo.

Tabela 34 - Resistência de folha e tempo de vida dos portadores de carga minoritários medidos em lâminas de PV-Si-FZ após diferentes etapas de processamento e temperatura de difusão de fósforo (T_D).

| | $T_D = 855 \text{ }^\circ\text{C}$ | $T_D = 865 \text{ }^\circ\text{C}$ | $T_D = 875 \text{ }^\circ\text{C}$ | $T_D = 885 \text{ }^\circ\text{C}$ | |
|--|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------------|
| | Processo 19 | Processo 13 | Processo 14 | Processo 15 | Processo 18 |
| Resistência de folha (Ω/\square) | 63 ± 11 | 60 ± 5 | 53 ± 6 | 44 ± 7 | 28 ± 6 |
| τ Inicial em HF (μs) | - | 28 | - | - | - |
| τ Após Difusão com SiO_2 (μs) | 1 | 9 | 15 | 14 | 13 |
| τ Após Difusão sem SiO_2 (μs) | 3 | 8 | 12 | 13 | 11 |
| τ Após Difusão sem SiO_2 e em HF (μs) | 1 | 12 | 16 | 13 | 10 |
| τ Após Difusão sem Junção em HF (μs) | 1 | 21 | 31 | 21 | 30 |

O tempo de vida dos portadores de carga inicial, de $28 \mu\text{s}$, é muito baixo para lâminas de PV-Si-FZ, que justifica a eficiência de 14 %, similar aos substratos de Si-Cz. O valor esperado do τ inicial para PV-Si-FZ deveria ser superior a $300 \mu\text{s}$. Para a T_D de $855 \text{ }^\circ\text{C}$ o τ é muito baixo e similar a incerteza da medição, não sendo possível avaliar os resultados.

Para as temperaturas de difusão de fósforo de $865 \text{ }^\circ\text{C}$, nota-se que após a difusão de fósforo, o tempo de vida dos portadores de carga minoritários da base (medido com as lâminas imersas em HF) cai praticamente pela metade, indicando que os processos de oxidação e/ou difusão degradaram o material e a difusão de fósforo não realizou *gettering*. Além disso, a camada de SiO_2 não é de qualidade, pois o τ medido em HF é maior que o medido com a camada de óxido de silício. Esta conclusão é confirmada também pela medição do τ com e sem a camada de óxido, pois os dois valores são similares. O tempo de vida na base (sem junção) após o processamento das lâminas de Si é menor que o tempo de vida inicial, indicando que há contaminação do material durante o processamento.

Os resultados do tempo de vida para as T_D de $875 \text{ }^\circ\text{C}$ e $885 \text{ }^\circ\text{C}$ confirmam que a camada de SiO_2 posterior não é de qualidade, pois os valores do τ com e sem

SiO₂ são similares. Em todos os casos, como esperado, observa-se que o tempo de vida dos portadores de carga minoritários, medido em HF, sem junção é maior que o medido com junção, pois o emissor é uma região de recombinação. No entanto, o τ na base (sem junção) é baixo para substratos de PV-Si-FZ.

Para comparar os resultados obtidos em lâminas de PV-Si-FZ e de Si-Cz, foram processadas lâminas de Si em dois processos com o mesmo método ($T_D = 865$ °C e espessura do óxido de silício de 150 nm), um usando PV-Si-FZ e outro Si-Cz. Os resultados das medições de tempo de vida dos portadores de carga minoritários são mostrados na Tabela 35.

Não se observam diferenças entre os resultados obtidos com PV-Si-FZ e Si-Cz. A resistência de folha após a difusão de fósforo é similar. O tempo de vida dos portadores de carga minoritários é baixo e similar para ambos os tipos de substratos, com valores entre 23 μ s (Si-Cz) e 28 μ s (PV-Si-FZ). Salienta-se que as células solares são processadas com o τ “após difusão com SiO₂” e, neste caso, o valor é inferior a 10 μ s. Também se confirma que, para ambos os tipos de substrato, a camada de passivação de SiO₂ é da baixa qualidade, pois os resultados com e sem SiO₂ são similares. Também se confirma que o processo degrada os dois tipos de substratos, pois o tempo de vida dos portadores de carga minoritários sem junção é inferior ao inicial. Neste caso o valor medido para substrato de PV-Si-FZ e Si-Cz foi da ordem de 20 μ s e 10 μ s, respectivamente.

Tabela 35 – Comparação dos resultados da resistência de folha e do tempo de vida dos portadores de carga minoritários em PV-Si-FZ e Si-Cz, processadas com o mesmo método de fabricação.

| | PV-Si-FZ | Si-Cz |
|---|-----------------|--------------|
| Resistência de folha (Ω/\square) | 60 \pm 5 | 62 \pm 8 |
| τ Inicial em HF (μs) | 28 | 23 |
| τ Após Difusão com SiO₂ (μs) | 9 | 9 |
| τ Após Difusão sem SiO₂ (μs) | 8 | 7 |
| τ Após Difusão sem SiO₂ e em HF (μs) | 12 | 9 |
| τ Após Difusão sem Junção em HF (μs) | 21 | 11 |

4.7. Análise da Passivação na Face Posterior

4.7.1. Influência da Espessura do Óxido na Face Posterior

A espessura da camada de óxido de silício foi aumentada de 100 nm (120 minutos de processo térmico) para 150 nm (240 min) visando melhorar a passivação e para avaliar o resultado no tempo de vida dos portadores de carga minoritários. Primeiramente, foram comparados os resultados do tempo de vida dos portadores de carga minoritários em lâminas de Si-Cz medidos em dois processos de fabricação. A temperatura de difusão de fósforo foi de 865 °C. Os parâmetros de produção de ambos os processos foram os mesmos, com o tempo de oxidação (t_o) de 240 minutos. Na Tabela 36 apresentam-se os valores obtidos.

Novamente, nota-se que a resistência de folha varia de processo para processo. Neste caso, o valor foi entre 50 Ω/\square e 65 Ω/\square . Confirma-se que o tempo de vida dos portadores de carga minoritários inicial é baixo, da ordem de 20 μs , e que o processo para passivação a 1000 °C não degrada o substrato, pois o τ inicial de 23 μs aumenta para 42 μs , quando medido nas mesmas condições em HF. No entanto, a camada de SiO_2 é de baixa qualidade não passivando a superfície. Esta conclusão é confirmada pelo valor de 0,4 μs medido com a camada de passivação e pelo valor de 12 μs sem a camada de passivação.

Tabela 36 – Comparação dos resultados da resistência de folha e do tempo de vida dos portadores de carga minoritários para o mesmo método de fabricação de Si-Cz.

| | Temperatura de 865 °C | |
|--|-----------------------|-------------|
| | Processo 13 | Processo 20 |
| Resistência de folha (Ω/\square) | 62 \pm 8 | 52 \pm 3 |
| τ inicial em HF (μs) | 23 | - |
| τ Após oxidação com SiO_2 (μs) | 0,4 | - |
| τ Após oxidação sem SiO_2 (μs) | 12 | - |
| τ Após Oxidação e em HF (μs) | 42 | - |
| τ Após Difusão e com SiO_2 (μs) | 9 | 24 |
| τ Após Difusão e sem SiO_2 (μs) | 7 | 24 |
| τ Após Difusão e com junção, em HF (μs) | 9 | 13 |
| τ Após Difusão e sem Junção, em HF (μs) | 11 | 49 |

Para verificar o efeito da espessura do óxido depositado na face posterior da lâmina de silício nos parâmetros elétricos das células solares foram comparados dois processos com tempo de oxidação de 120 min (103 nm) e de 240 min (150 nm). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 37.

Tabela 37 - Parâmetros elétricos das células solares em função do tempo de oxidação para a temperatura de recozimento de 350 °C, velocidade de recozimento de 65 cm/min, potência de 15 W e frequência de 80 kHz.

| t_o (min) | Célula | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|-------------|--------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|
| 120 | P12L04B | 565,2 | 30,9 | 0,646 | 11,2 |
| | P12L04D | 568,2 | 31,1 | 0,647 | 11,4 |
| | P12L04F | 565,5 | 31,2 | 0,661 | 11,6 |
| | Média | 566,3 ± 1,7 | 31,0 ± 0,2 | 0,651 ± 0,008 | 11,4 ± 0,2 |
| 240 | P20L13A | 537,2 | 30,7 | 0,411 | 6,8 |
| | P20L13F | 536,9 | 30,8 | 0,394 | 6,5 |
| | P20L13H | 539,5 | 30,9 | 0,470 | 7,8 |
| | Média | 537,9 ± 1,4 | 30,8 ± 0,1 | 0,425 ± 0,040 | 7,0 ± 0,7 |

Observou-se que o processo com 120 min de oxidação apresentou melhores resultados para todos os parâmetros elétricos médios. A menor diferença ocorreu na J_{sc} , com redução de apenas 0,7 %. A V_{oc} reduziu-se em 5 % com o aumento do tempo de oxidação, indicando que provavelmente ocorreu contaminação. O FF sofreu uma redução de 35 %, provavelmente devido ao pior contato na face posterior. Conseqüentemente, a eficiência diminuiu em 39 %, com o aumento da espessura do óxido de silício.

4.7.2. Comparação da Passivação com SiO₂ e TiO₂ em Substrato de PV-Si-FZ

A fim de comparar a passivação na face posterior com diferentes materiais foram implementados processos utilizando um filme de TiO₂ para a passivação na face posterior em lâminas de PV-Si-FZ. A temperatura de difusão foi de 885 °C e a espessura do óxido de silício na face posterior foi de 150 nm. A comparação dos parâmetros elétricos das células solares com SiO₂ (crescido termicamente), deposição de TiO₂ sobre a camada de SiO₂ e deposição de TiO₂ diretamente no silício na face posterior encontram-se nas Tabelas 38, 39 e 40.

Tabela 38 - Parâmetros elétricos das células solares com passivação na face posterior com SiO₂, TiO₂ depositado sobre o SiO₂ e TiO₂, processadas com temperatura de recozimento de 350 °C e velocidade de recozimento de 75 cm/min.

| Passivação posterior | Célula | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|-------------------------------------|--------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|
| SiO ₂ | P15L01B | 577,4 | 30,4 | 0,599 | 10,5 |
| | P15L01D | 577,1 | 30,4 | 0,631 | 11,1 |
| | P15L01I | 575,3 | 30,3 | 0,394 | 6,9 |
| | Média | 576,6 ± 1,2 | 30,37 ± 0,03 | 0,541 ± 0,129 | 9,5 ± 2,3 |
| SiO ₂ e TiO ₂ | P15L05A | 576,6 | 30,8 | 0,665 | 11,8 |
| | P15L05F | 577,4 | 31,2 | 0,657 | 11,8 |
| | P15L05H | 572,6 | 31,0 | 0,663 | 11,7 |
| | Média | 575,5 ± 2,6 | 31,0 ± 0,2 | 0,661 ± 0,004 | 11,8 |
| TiO ₂ | P15L06A | 571,9 | 30,2 | 0,724 | 12,5 |
| | P15L06F | 571,8 | 30,3 | 0,734 | 12,7 |
| | P15L06H | 571,3 | 30,4 | 0,734 | 12,7 |
| | Média | 571,7 ± 0,3 | 30,30 ± 0,06 | 0,730 ± 0,006 | 12,7 ± 0,1 |

Comparando-se os três diferentes resultados para a T_R de 350 °C, percebe-se que os dispositivos com somente TiO₂ na face posterior apresentaram maior fator de forma. O FF médio é de 0,54 para células com SiO₂, aumenta para 0,66 quando o filme de TiO₂ é depositado sobre a camada de SiO₂ e atinge o valor de 0,73 com a passivação com TiO₂. Portanto, a resistência em série foi reduzida com a substituição da passivação posterior. A V_{oc} apresenta uma tendência de redução, da ordem de 5 mV, com a passivação com TiO₂, indicando que este material passiva pior que o SiO₂. Conseqüentemente, a eficiência é 3,2 % (absoluto) maior, de 12,7 %, para as células com somente TiO₂, quando comparadas com as células com passivação posterior com SiO₂. Portanto, pode-se concluir que o FF estava limitado pela passivação na face posterior com SiO₂.

Para a temperatura de recozimento de 400 °C, os resultados são similares aos encontrados para a T_R de 350 °C em relação à tendência de crescimento dos parâmetros elétricos. O fator de forma aumenta, de forma similar, em 24 % com a substituição da camada de SiO₂ para camada de TiO₂ e a V_{oc} cai quase 9 mV. Neste caso, a eficiência aumentou em 2,6 % (absoluto).

Tabela 39 - Parâmetros elétricos das células solares com passivação na face posterior com SiO₂, TiO₂ depositado sobre o SiO₂ e TiO₂, processadas com temperatura de recozimento de 400 °C e velocidade de recozimento de 75 cm/min.

| Passivação posterior | Célula | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|-------------------------------------|--------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|
| SiO ₂ | P15L02B | 581,4 | 31,3 | 0,604 | 11,0 |
| | P15L02D | 580,8 | 31,2 | 0,509 | 9,2 |
| | P15L02I | 576,8 | 31,0 | 0,571 | 10,2 |
| | Média | 579,7 ± 2,5 | 31,2 ± 0,1 | 0,561 ± 0,048 | 10,1 ± 0,9 |
| SiO ₂ e TiO ₂ | P15L05B | 578,1 | 30,8 | 0,634 | 11,3 |
| | P15L05D | 577,7 | 30,8 | 0,670 | 11,9 |
| | P15L05I | 576,0 | 30,8 | 0,672 | 11,9 |
| | Média | 577,3 ± 1,1 | 30,83 ± 0,02 | 0,659 ± 0,021 | 11,7 ± 0,4 |
| TiO ₂ | P15L06B | 572,1 | 30,3 | 0,734 | 12,7 |
| | P15L06D | 571,4 | 30,2 | 0,737 | 12,7 |
| | P15L06I | 569,4 | 30,1 | 0,732 | 12,5 |
| | Média | 571,0 ± 1,4 | 30,2 ± 0,1 | 0,734 ± 0,002 | 12,7 ± 0,1 |

Tabela 40 - Parâmetros elétricos das células solares com passivação na face posterior com SiO₂, TiO₂ depositado sobre o SiO₂ e TiO₂, processadas com temperatura de recozimento de 450 °C e velocidade de recozimento de 75 cm/min.

| Passivação posterior | Célula | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|-------------------------------------|--------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|
| SiO ₂ | P15L04B | 581,2 | 32,3 | 0,526 | 9,9 |
| | P15L04D | 584,5 | 32,0 | 0,615 | 11,5 |
| | P15L04I | 580,6 | 31,6 | 0,628 | 11,5 |
| | Média | 582,1 ± 2,1 | 32,0 ± 0,3 | 0,59 ± 0,06 | 11,0 ± 0,9 |
| SiO ₂ e TiO ₂ | P15L05C | 577,7 | 31,2 | 0,652 | 11,7 |
| | P15L05E | 579,8 | 31,3 | 0,664 | 12,1 |
| | P15L05G | 578,0 | 30,9 | 0,684 | 12,2 |
| | Média | 578,5 ± 1,1 | 31,1 ± 0,2 | 0,667 ± 0,016 | 12,0 ± 0,2 |
| TiO ₂ | P15L06C | 573,2 | 30,4 | 0,744 | 13,0 |
| | P15L06E | 574,3 | 30,6 | 0,737 | 12,9 |
| | P15L06G | 574,2 | 30,1 | 0,742 | 12,8 |
| | Média | 573,9 ± 0,6 | 30,4 ± 0,2 | 0,741 ± 0,004 | 12,9 ± 0,1 |

Para T_R de 450 °C, confirma-se que a deposição de TiO₂ na face posterior provoca um aumento no fator de forma, neste caso, de 20 %. A eficiência de 12,9 % obtida com a passivação com TiO₂ é 1,9 % (absoluto) maior.

Portanto, se pode concluir que a camada de TiO₂ sobre a camada de SiO₂, resultou no aumento do fator de forma e conseqüentemente na eficiência das células solares processadas em PV-Si-FZ. Porém os melhores resultados para o

fator de forma e, conseqüentemente para a eficiência, foram encontrados para as células solares com somente TiO_2 na face posterior, devido a redução da resistência em série. Provavelmente, a resistência de contato é menor quando o filme de TiO_2 é depositado. Também se constatou que a V_{OC} diminuiu, devido a pior passivação produzida pelo óxido de titânio.

4.7.3. Comparação da Passivação com SiO_2 e TiO_2 em Substrato de Si-Cz

Os mesmos processos realizados em lâminas de PV-Si-FZ foram implementados em substratos de Si-Cz, com deposição de TiO_2 na face posterior. A temperatura de difusão foi de 865 °C. Os resultados experimentais com passivação de SiO_2 e TiO_2 em Si-Cz encontram-se nas Tabelas 41, 42 e 43. A camada de óxido de titânio foi depositada sobre a camada de dióxido de silício e diretamente sobre o silício na face posterior.

Tabela 41 - Parâmetros elétricos das células solares com passivação na face posterior com SiO_2 , TiO_2 depositado sobre SiO_2 e TiO_2 , processadas com temperatura de recozimento de 350 °C.

| Passivação posterior | Célula | Voc (mV) | Jsc (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|---------------------------------|--------------|--------------------|---------------------------|----------------------|-------------------|
| SiO_2 | P20L13B | 537,6 | 30,7 | 0,375 | 6,2 |
| | P20L13D | 535,5 | 31,0 | 0,437 | 7,3 |
| | P20L13I | 539,0 | 30,9 | 0,430 | 7,2 |
| | Média | 537,4 ± 1,7 | 30,8 ± 0,2 | 0,414 ± 0,034 | 6,9 ± 0,6 |
| SiO_2 e TiO_2 | P20L16A | 538,4 | 30,4 | 0,644 | 10,5 |
| | P20L16F | 538,3 | 31,1 | 0,654 | 11,0 |
| | P20L16H | 538,9 | 30,1 | 0,667 | 10,8 |
| | Média | 538,6 ± 0,3 | 30,5 ± 0,5 | 0,655 ± 0,011 | 10,8 ± 0,2 |
| TiO_2 | P20L18A | 538,0 | 30,1 | 0,636 | 10,3 |
| | P20L18F | 540,5 | 30,9 | 0,650 | 10,9 |
| | P20L18H | 541,2 | 30,2 | 0,662 | 10,8 |
| | Média | 539,9 ± 1,7 | 30,4 ± 0,4 | 0,649 ± 0,013 | 10,7 ± 0,3 |

Comparando-se os resultados, da mesma forma que para substratos de PV-Si-FZ, observou-se que camada de TiO_2 na face posterior provocou um aumento do fator de forma, de 0,41 para 0,65. No entanto, a combinação do filme de TiO_2 depositado sobre a camada de SiO_2 na face posterior resultou em células com eficiência similar às com deposição do filme de TiO_2 diretamente na face posterior. Para a T_R de 350 °C, o aumento na eficiência média foi de 3,9 % (absoluto). Ao

contrário dos resultados baseados em PV-Si-FZ, em substratos de Si-Cz, a V_{oc} não apresentou uma redução com a deposição de TiO_2 , aumentando em média 2,5 mV quando este filme foi depositado.

Tabela 42 - Parâmetros elétricos das células solares com passivação na face posterior com SiO_2 , TiO_2 depositado sobre o SiO_2 e TiO_2 , processadas com temperatura de recozimento de 400 °C.

| Passivação posterior | Célula | V_{oc} (mV) | J_{sc} (mA/cm ²) | FF | Eficiência (%) |
|----------------------|---------|-----------------|--------------------------------|-------------------|----------------|
| SiO_2 | P20L14B | 540,8 | 31,2 | 0,376 | 6,3 |
| | P20L14D | 539,9 | 31,2 | 0,388 | 6,5 |
| | P20L14I | 539,4 | 31,0 | 0,441 | 7,4 |
| | Média | $540,0 \pm 0,7$ | $31,12 \pm 0,06$ | $0,402 \pm 0,035$ | $6,8 \pm 0,6$ |
| SiO_2 e TiO_2 | P20L16B | 537,7 | 30,5 | 0,636 | 10,4 |
| | P20L16D | 538,1 | 30,2 | 0,661 | 10,7 |
| | P20L16I | 539,8 | 30,4 | 0,665 | 10,9 |
| | Média | $538,5 \pm 1,1$ | $30,4 \pm 0,2$ | $0,654 \pm 0,015$ | $10,7 \pm 0,2$ |
| TiO_2 | P20L18B | 539,3 | 30,5 | 0,617 | 10,1 |
| | P20L18D | 539,2 | 30,2 | 0,653 | 10,6 |
| | P20L18I | 542,5 | 30,6 | 0,656 | 10,9 |
| | Média | $540,3 \pm 1,9$ | $30,4 \pm 0,2$ | $0,642 \pm 0,022$ | $10,6 \pm 0,4$ |

Para uma maior temperatura de recozimento, o fator de forma, e por consequência a eficiência, continuam sendo maiores para a combinação de SiO_2 e TiO_2 depositados na face posterior. O fator de forma aumentou em média quase 39 % para o fator de forma e a eficiência de forma similar ao resultado obtido para a T_R de 350 °C. Ao contrário que os resultados apresentados na Tabela 41, a V_{oc} média praticamente não foi alterada com a deposição do filme de TiO_2 .

O aumento da temperatura de recozimento não melhorou a eficiência para células solares com deposição de filme de TiO_2 na face posterior, permanecendo a eficiência entre 10,4 % e 10,7 %, com a maior eficiência média para a célula solar com o filme de TiO_2 depositado sobre o SiO_2 .

Portanto, para células solares processadas em Si-Cz, constatou-se que a camada de TiO_2 depositada na face posterior, melhorou o fator de forma e a eficiência, sendo os melhores resultados para a combinação do SiO_2 posterior com o filme de TiO_2 depositado sobre ele.

Tabela 43 - Parâmetros elétricos das células solares com passivação na face posterior com SiO₂, TiO₂ depositado sobre o SiO₂ e TiO₂, processadas com temperatura de recozimento de 450 °C.

| Passivação posterior | Célula | Voc (mV) | Jsc (mA/cm²) | FF | Eficiência (%) |
|--|----------------|--------------------|--------------------------------|----------------------|-----------------------|
| SiO₂ e TiO₂ | P20L16C | 537,6 | 30,8 | 0,622 | 10,3 |
| | P20L16E | 542,3 | 30,6 | 0,658 | 10,9 |
| | P20L16G | 540,2 | 30,2 | 0,660 | 10,8 |
| | Média | 540,0 ± 2,4 | 30,5 ± 0,3 | 0,647 ± 0,021 | 10,7 ± 0,3 |
| TiO₂ | P20L18C | 540,1 | 30,3 | 0,616 | 10,1 |
| | P20L18E | 540,4 | 30,5 | 0,644 | 10,6 |
| | P20L18G | 540,7 | 29,8 | 0,658 | 10,6 |
| | Média | 540,4 ± 0,3 | 30,2 ± 0,4 | 0,639 ± 0,022 | 10,4 ± 0,3 |

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

O objetivo dessa dissertação foi desenvolver um processo de produção de células solares com passivação na face posterior e contato/difusão formado por radiação laser pontual bem como avaliar a influência da passivação na face posterior. Com esse fim foram produzidas 828 células solares em dois diferentes substratos: Si-Cz e PV-Si-FZ, sendo 477 em Si-Cz e 351 em PV-Si-FZ.

Em relação aos parâmetros relacionados ao sistema laser e a formação dos contatos pontuais posteriores no Si-Cz, os melhores resultados foram encontrados com a combinação da potência de 13 W e da frequência de 80 kHz produzindo uma célula solar com 13,8% de eficiência máxima e a potência de 15 W resultou na eficiência máxima de 13,1 %

Após a otimização dos parâmetros do sistema laser, a distância entre os pontos de 0,5 mm combinada com a área de contato de 7230 μm^2 resultaram em uma célula solar com eficiência máxima de 14,1 %.

Da otimização do processo de recozimento no forno de esteira, constatou-se que a temperatura de recozimento de 350 °C, combinada com a velocidade de esteira de 66 cm/min, resultou em dispositivos com a eficiência máxima de 14,5%, em substratos de Si-Cz.

Em relação ao substrato de alta qualidade PV-Si-FZ, a temperatura ótima de difusão foi de 875 °C, resultando na eficiência máxima de 14,0 %. Contudo, comparando-se os resultados das células solares processadas em Si-Cz e PV-Si-FZ, constatou-se que a eficiência obtida foi similar, pois o tempo de vida dos portadores de carga minoritários é baixo para os dois tipos de substratos. Após o

processamento, o tempo de vida dos minoritários na base é da ordem de 10 μs e 20 μs , para Si-Cz e PV-Si-FZ, respectivamente.

Em relação à passivação da face posterior, foi verificado que o tempo de oxidação de 120 min, que resultou em uma camada da ordem de 100 nm, resultou nos melhores valores de eficiência. A eficiência reduziu-se de 11,4 % para 7,0 % com o aumento da espessura da camada de SiO_2 para 150 nm, devido à redução de todos os parâmetros elétricos.

Em substratos de PV-Si-FZ, a deposição do filme de TiO_2 diretamente sobre a face posterior resultou em um aumento da eficiência média de 11,0 % para 12,9 %, devido ao aumento no fator de forma médio de 0,59 para 0,74. Em lâminas de Si-Cz, a deposição do filme de TiO_2 sobre a camada de SiO_2 resultou em eficiência similares aos valores encontrados com a deposição de TiO_2 diretamente na face posterior. Da mesma forma que para os resultados encontrados com PV-Si-FZ, em Si-Cz a deposição do filme de TiO_2 aumenta o fator de forma.

A melhor célula solar fabricada apresentou a V_{OC} de 613,1 mV, J_{SC} de 36,2 mA/cm^2 , FF de 0,650, resultando na eficiência de 14,5 %, foi produzida com os seguintes parâmetros de processo: potência de 15 W, frequência de 80 kHz, D_P de 0,5 mm, A_C de 7230 μm^2 , T_R de 350 °C e V_E de 66 cm/min. A melhor célula solar desenvolvida por Sauaia [37] resultou na V_{OC} de 626,9 mV, J_{SC} de 36,6 mA/cm^2 , FF de 0,733, resultando na eficiência de 16,8 %.

Para a continuidade deste trabalho, sugere-se:

- Otimizar a espessura de óxido depositado na face posterior;
- Desenvolver células solares em Si-FZ de melhor qualidade;
- Estudar detalhadamente a influência do filme TiO_2 depositado na face posterior sobre no fator de forma;
- Análise da densidade de corrente de saturação, resistência em paralelo e resistência em série;
- Análise da resposta espectral das células solares.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] LORENZO, E. **Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems**. 1ª ed. Sevilha: Progensa, 1994. 316 p.

[2] Organização das Nações Unidas. **Our Common Future, Chapter 7: Energy: Choices for Environment and Development**. Official Records of the General Assembly, Forty-second Session, Supplement No, 25 (A/42/25). (1983).

[3] International Energy Agency. **Technology Roadmap: Hydropower – Foldout**. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-hydropower---foldout.html>> Acesso em: 7 de Março de 2013.

[4] International Energy Agency. **Technology Roadmap: Wind energy – Foldout**. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,28529,en.html>> Acesso em: 7 de Março de 2013.

[5] MESSENGER, R. V., J. **Photovoltaic Systems Engineering**. 1ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2000. 400p.

[6] SEIPPEL, R. G. **Photovoltaics**. 1ª ed. Reston: Reston, 1983. 234p.

[7] International Energy Agency. **Topic: Solar (PV and CSP)**. Disponível em: <<http://www.iea.org/topics/solarpvandcsp/>> Acesso em: 7 de Março de 2013.

[8] European Photovoltaic Industry Association. **Global Market Outlook for Photovoltaics 2014-2018**. Disponível em: <<http://www.epia.org/?id=22/>>. Acesso em: 7 abril 2013.

[9] International Energy Agency. **Technology Roadmap: Solar photovoltaic energy – Foldout**. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,28528,en.html>> Acesso em: 7 março 2013.

[10] FATH, P. et al. Status and perspective of crystalline silicon solar cell production. In: **34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference**: 2009, Filadélfia, Proceedings. Filadélfia : IEEE, 2009, p. 2471-2476.

[11] JOURDAN, J. et al. Formation of boron-doped region using spin-on dopant: investigation on the impact of metallic impurities. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 16, n. 5, p. 379-387, jan 2008. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.818/abstract>>. Acesso em: 13 setembro 2013.

[12] GREEN, M. A. The path to 25% silicon solar cell efficiency: history of silicon cell evolution. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 17, n. 3, p. 183-189, mar 2009. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.892/references>>. Acesso em: 27 dezembro 2013.

[13] Yingli Solar. **Série de Células PANDA 60**. Disponível em: <<http://www.yinglisolar.com/br/products/monocrystalline/panda-60-cell-series/>> Acesso em: 8 maio 2014.

[14] LOPES, N. F. **Implementação e Análise de Junção Flutuante em Células Solares Industriais de Silício Tipo n**. 2013. 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

[15] MARTÍ, A. Fundamentos de la conversión fotovoltaica: la célula solar. In: **Fundamentos, Dimensionado y Aplicaciones de la Energia Solar Fotovoltaica**. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Madrid, 1995, v. 1 p. 13 – 127.

- [16] HONSBURG, C.; BOWDEN, S. **PV CDROM**. Disponível em: <<http://www.pveducation.org>>. Acesso em: 28 de Abril de 2014.
- [17] MALLMANN, A. P.; ZANESCO, I.; WEHR, G.; MOEHLECKE, A. Análise da largura das trilhas metálicas em células solares de silício com emissor seletivo posterior. In: **II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Latino-Americana da ISES: 2008**, Florianópolis. Anais. Florianópolis: ISES, p. 1-12.
- [18] WEHR, G. **Desenvolvimento e Comparação de Células Solares N⁺PN⁺ e N⁺PP⁺ em Silício Multicristalino**. 2011. 136 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- [19] GREEN, M. A. **Solar cells: operating principles, technology e system applications**. Sydney: UNSW Photovoltaics, 1992. 274 p.
- [20] CENCI, A. S. **Desenvolvimento de Células Solares com Metalização por Serigrafia: Influência do Emissor n⁺**. 2013. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- [21] SCHNEIDERLÖCHNER, E et al. Laser-fired rear contacts for crystalline silicon solar cells. **Progress in Photovoltaics**, Freiburg, , v. 10, n. 1, p. 29-34, jan 2002. Disponível em: < <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.422/abstract>>. Acesso em: 04 agosto 2013
- [22] ZHAO, J.; WANG, A.; GREEN, M.A. 24.5% efficiency silicon PERT cells on mcz substrates and 24.7% efficiency PERL cells on FZ substrates. **Progress in Photovoltaics**, v. 10, n. 1, p. 29-34, jan 2002. Disponível em: < <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pip.422/abstract>>. Acesso em: 04 agosto 2013
- [23] NEKARDA, J et al. LFC on screen printed aluminium rear side metallization. In: **24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition: 2009**, Freiburg. Proceedings. Freiburg, IEEE, p. 1441-1445 .

- [24] SCHNEIDERLÖCHNER, E. et al. Laser-Fired Contacts (LFC). In: **17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition**: 2001, Munique, Proceedings. Munique, IEEE, p. 1303-1306.
- [25] PREU, R. et al. Laser ablation: a new low-cost approach for passivated rear contact formation in crystalline silicon solar cell technology. In: **16th European Photovoltaic Solar energy Conference**: 2000, Glasgow, Proceedings. Glasgow, IEEE, p. 1181-1184.
- [26] NEKARDA, J. et al. Industrial pvd metallization for high efficiency crystalline silicon. In: **34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference**: 2009, Filadélfia, Proceedings. Filadélfia: IEEE, 2009, p. 892-896.
- [27] GROHE, A., **Einsatz von Laserverfahren zur Prozessierung von kristallinen Silizium-Solarzellen**. 2007. 251 p. Tese (Doutorado em Ciências Naturais) – Faculdade de Física, Universität Konstanz, Konstanz, Alemanha.
- [28] REINWAND, D. et al. 21,1% Efficient PERC Silicon Solar Cells on Large Scale by Using Inline Sputtering for Metallization. In: **35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference**: 2010, Honolulu, Proceedings. Honolulu: IEEE p. 3582-3586.
- [29] RAMANATHAN, S. et al. Understanding and Fabrication of 20% Efficient Cells Using Spin-on-Based Simultaneous Diffusion and Dielectric Passivation. **IEEE Journal of Photovoltaics**, Atlanta, 12 jan 2012, vol. 2, n. 1, p. 22 – 26. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6129470>. Acesso em: 25 Abril 2014.
- [30] LEE, D. et al. A new back surface passivation stack for thin crystalline silicon solar cells with screen-printed back contacts. In: **19th IEEE Photovoltaic Specialists Conference**: 2009, Jeju, Proceedings. Jeju: IEEE p. 26-29.
- [31] SINTON, R.A.; CUEVAS, A. A Quasi-steady-state open-circuit voltage method for solar cell characterization. In: **16th European Photovoltaic Solar energy Conference**: 2000, Glasgow, Proceedings. Glasgow, IEEE, p. 1152–1155.

- [32] ABERLE, A.G. **Crystalline Silicon Solar cells: Advanced Surface Passivation and Analysis**. 1ª ed. Sydney: Centre for Photovoltaic Engineering, University of New South Wales, 1999. 335 p.
- [33] PINTO, J.L. **Otimização e Comparação de Processos para Formação do Campo Retrodifusor com Boro em Células Solares**. 2012. 130 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- [34] GOETZBERGER, A.; KNOBLOCH, J.; BERNHARD, V. **Crystalline Silicon Solar Cells**. 1ª ed. Inglaterra: R. R. Bowker, 1998. 238 p.
- [35] DA COSTA, R. DE C. **Desenvolvimento e Comparação de Células Solares Bifaciais Industriais com Deposição de Dopante com Boro por *Spin-On***. 2013. 119 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- [36] KERN, W.; Overview and Evolution of Silicon Wafer Cleaning Technology. In: **Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology**, 2ª ed. Califórnia: William Andrew. p. 3-92
- [37] SAUAIA, R.L. **Development And Analysis Of Silicon Solar Cells With Laser-Fired Contacts And Silicon Nitride Laser Ablation**. 2013. 215 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Faculdade de Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- [38] LY, M. et al. Influência da Espessura do Filme Antirreflexo de TiO₂ nos Parâmetros Elétricos de Células Solares com Base n. In: **IV Congresso Brasileiro de Energia Solar (IV CBENS) e V Conferência Latino Americana da ISES: 2012**, São Paulo. Anais. São Paulo: ISES, p. 1-8.
- [39] ZANESCO, I.; MOEHLECKE, A. **Células Solares de Alta Eficiência com Emissores Seletivos**. Relatório Técnico. Porto Alegre: CEEE; 2015.

[40] ZANESCO, I.; MOEHLECKE, A. **Desenvolvimento de Processos Industriais para a Fabricação de Células Solares com Pasta de Alumínio**. Relatório Técnico. Porto Alegre: Eletrosul; 2013.

[41] WOLF, A et al. Pilot processing of 18.6% efficient rear surface passivated silicon solar cells with screen printed front contacts. In: **25th European Photovoltaic Solar energy Conference**: 2010, Valencia, Proceedings. Valencia, IEEE, p. 1391–1395.