



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal  
de Campina Grande

ROGÉRIO MOTA MEIRA JUNIOR



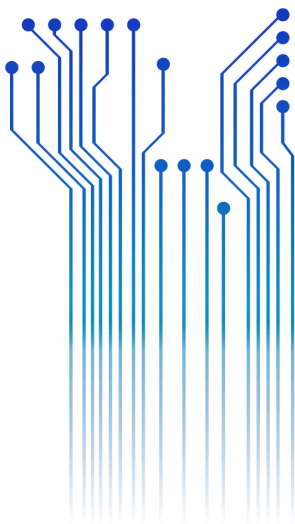
Centro de Engenharia  
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

APLICAÇÃO DO SOFTWARE VIRTUAL PV FACTORY PARA ANÁLISE DAS ETAPAS  
INICIAIS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA



Departamento de  
Engenharia Elétrica



Campina Grande  
2017

ROGÉRIO MOTA MEIRA JUNIOR

APLICAÇÃO DO SOFTWARE VIRTUAL PV FACTORY PARA ANÁLISE DAS ETAPAS INICIAIS DO  
PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação de Curso de Graduação de  
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de  
Campina Grande como parte dos requisitos  
necessários para a obtenção do grau de  
Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia  
Elétrica.*

Área de Concentração: Energia Fotovoltaica

**Professor Ubirajara Rocha Meira, D. Sc.**

Orientador

Campina Grande  
2017

ROGÉRIO MOTA MEIRA JUNIOR

APLICAÇÃO DO SOFTWARE VIRTUAL PV FACTORY PARA ANÁLISE DAS ETAPAS INICIAIS DO  
PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação de Curso de Graduação de  
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de  
Campina Grande como parte dos requisitos  
necessários para a obtenção do grau de  
Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia  
Elétrica.*

Área de Concentração: Energia Fotovoltaica

Aprovado em 06 / 04 / 2017

**Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Ubirajara Rocha Meira, D. Sc.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que me concedeu a graça da vida assim como tantas bênçãos derramadas no meu dia a dia. Pelo Seu imenso amor e Sua bondade infinita que me permitiram alcançar tantas vitórias.

Agradeço aos meus pais Rogério e Ofélia, que sempre zelaram pela minha educação e da minha irmã, por nos incentivar perante as dificuldades, palavras de incentivo e eterno amor. Agradeço também à minha irmã, Yasmin, que sempre acreditou no meu potencial.

Agradeço à minha namorada, Alene, por todo amor, companheirismo e dedicação, ajudando, incentivando e compartilhando todos os momentos.

Agradeço ao meu orientador, Ubirajara, pela disponibilidade e suporte para que eu pudesse fazer este trabalho.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

## RESUMO

A crescente demanda por energia fez com que o uso de recursos renováveis se tornasse essencial. Desde os últimos 50 anos, a energia fotovoltaica cresce de forma considerável. Este desenvolvimento se dá pelo aprimoramento contínuo da tecnologia aliado ao aumento de produção na fábrica fotovoltaica que, conseqüentemente, demanda uma melhor formação dos profissionais da área. Com isso, neste trabalho é apresentado um estudo sobre o principal processo de fabricação da célula fotovoltaica, empregando o uso do software virtual PV Factory. No programa, são simulados lotes de células solares, dos quais tiveram parâmetros de entrada variados para as três etapas iniciais (escolha do material inicial, remoção de superfícies defeituosas e texturização) do processo de fabricação a fim de que fossem analisadas as características físicas e elétricas das células fabricadas nas simulações. Como resultados das simulações, obteve-se a influência das variações das condições de entrada nas características finais dos lotes de células fotovoltaicas.

**Palavras-chave:** Célula, Solar, Fotovoltaica, Fabricação, Linha de Produção, PV Factory, Silício, Remoção de Superfícies Defeituosas, Texturização.

# ABSTRACT

The growing demand for energy has made the use of renewable resources essential. Since the last 50 years, the photovoltaic energy has grown considerably. This development is due to the continuous technology improvement combined with the increase of production in the photovoltaic factories, which consequently requires a good training of the professionals of the area. This work presents a study on the main process of the photovoltaic cell manufacturing, by using the virtual software PV Factory. Batches of solar cells were simulated in the software, from which the input parameters were varied for the three initial processes (starting material, saw damage etch and alkaline texturing) from the manufacturing process in order to analyze the physical and electrical characteristics of the manufactured cells in the simulations. As simulations results, the influence of the input conditions variations on the final characteristics of the photovoltaic cell batches was obtained.

**Key-words:** Solar, Photovoltaic, Cell, Manufacturing, Production Line, PV Factory, Starting Material, Saw Damage Etch, Texturing.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.1 – Estrutura básica da célula fotovoltaica .....  | 19 |
| Figura 2.2 – Silício dopado com Fósforo (elemento pentavalente), criando um substrato com excesso de elétrons, tipo n .....   | 21 |
| Figura 2.3 – Silício dopado com Boro (elemento trivalente), criando um substrato com falta de elétrons, tipo p .....  | 21 |
| Figura 2.4 – Densidade de corrente em função do aumento da temperatura .....  | 25 |
| Figura 2.5 – Dependência da tensão de circuito aberto com a temperatura para uma célula de silício monocristalino .....   | 26 |
| Figura 2.6 – Fator de forma em função da temperatura para uma célula de silício monocristalino.....   | 27 |
| Figura 2.7 – Esquema dos componentes da resistência série em uma célula solar .....   | 27 |
| Figura 2.8 – Circuito elétrico representativo de uma célula solar .....   | 28 |
| Figura 2.9 – Influência da resistência série na característica I-V de uma célula solar ....   | 29 |
| Figura 2.10 – Influência da resistência em paralelo na característica I-V de uma célula solar.....  | 29 |
| Figura 2.11 – Variação da eficiência em função da temperatura, para uma célula de silício de estrutura n+pp+ com uma área de 4 cm <sup>2</sup> e metalização de titânio e prata ..... | 31 |
| Figura 2.12 – Células de silício monocristalino (à esquerda) e policristalino (à direita)..   | 32 |
| Figura 2.13 – Células PV de filme fino, da esquerda para a direita: Amorfo, CIGS e CdTe.....  | 33 |
| Figura 2.14 – Novas tecnologias PV: Gratzel (à esquerda) e Orgânica (à direita) .....   | 34 |
| Figura 2.15 – Efeito da texturização: salto duplo .....   | 37 |
| Figura 2.16 – Tubo de difusão de quartzo .....  | 38 |
| Figura 2.17 – Ferramenta Inline PECVD usada na UNSW .....   | 41 |
| Figura 3.1 – Página inicial do website do software virtual PV Factory .....   | 46 |
| Figura 3.2 – Sequência das etapas de processamento, em que as etapas concluídas são indicadas em verde, a etapa atual em vermelho e as etapas seguintes em azul .....                 | 47 |
| Figura 3.3 – Parte do Laboratório de Caracterização, ilustrando o quadro resumido de características e a curva densidade de corrente vs Tensão .....                                  | 48 |
| Figura 3.4 - Ordem das etapas de produção na linha de serigrafia da UNSW .....  | 49 |
| Figura 3.5 - Ícones de navegação para uma das doze etapas da linha de produção da UNSW .....  | 49 |
| Figura 4.1 – Gráficos da influência do modo de obtenção das lâminas de silício .....  | 53 |
| Figura 4.2 – Corte de um lingote de silício em lâminas .....  | 54 |
| Figura 4.3 – Corte feito com fios de serra diamantados .....  | 54 |
| Figura 4.4 – Gráficos da influência da espessura da lâmina de silício .....   | 55 |
| Figura 4.5 – Gráfico da influência da resistividade das lâminas de silício .....  | 56 |
| Figura 4.6 – Imagens ilustrativas do banho químico para remoção das superfícies defeituosas .....   | 57 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 4.7 – Gráficos de influência da temperatura do banho químico .....                                      | 58 |
| Figura 4.8 – Gráficos de influência do tempo do banho químico .....  | 60 |
| Figura 4.9 – Gráficos de influência da concentração de NaOH .....  | 62 |
| Figura 4.10 – Gráficos de influência da concentração de Isopropanol .....                                      | 64 |
| Figura 4.11 – Gráficos de influência da temperatura na remoção das superfícies<br>defeituosas .....            | 65 |
| Figura 4.12 – Gráficos de influência do tempo do banho químico na remoção das<br>superfícies defeituosas ..... | 66 |
| Figura 4.13 – Gráfico da influência do fluxo de escape .....   | 67 |



## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 2.1 - Fatores que influenciam na determinação da eficiência .....                    | 30 |
| Tabela 4.1 – Caracterização do Lote #11 (Referência) .....                                  | 51 |
| Tabela 4.2 – Material Inicial .....   | 52 |
| Tabela 4.3 – Remoção das Superfícies Defeituosas .....                                      | 56 |
| Tabela A.4 – Parâmetros para lote referência de células fotovoltaicas .....                 | 72 |
| Tabela B.1 – Material inicial: Influência do método de obtenção das lâminas de silício..... | 74 |
| Tabela B.2 – Material inicial: Influência do tipo de fio de serra .....                     | 75 |
| Tabela B.3 – Material inicial: Influência da espessura .....                                | 76 |
| Tabela B.4 – Material inicial: Influência da resistividade .....                            | 77 |
| Tabela C.1 – Remoção das superfícies defeituosas: Influência da concentração de NaOH.....   | 78 |
| Tabela C.2 – Remoção das superfícies defeituosas: Influência da temperatura .....           | 80 |
| Tabela C.3 – Remoção das superfícies defeituosas: Influência do tempo do banho químico..... | 82 |
| Tabela C.4 – Remoção das superfícies defeituosas: Influência do tempo de limpeza ....       | 84 |
| Tabela D.1 – Texturização alcalina: Influência da concentração de NaOH .....                | 86 |
| Tabela D.2 – Texturização alcalina: Influência da concentração de isopropanol .....         | 88 |
| Tabela D.3 – Texturização alcalina: Influência da temperatura .....                         | 90 |
| Tabela D.4 – Texturização alcalina: Influência do tempo do banho químico .....              | 92 |
| Tabela D.5 – Texturização alcalina: Influência do fluxo de escape .....                     | 94 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

|            |   |
|------------|---|
| AM         | Massa de ar (do inglês, <i>Air Mass</i> )   |
| AR         | Antirreflexo  |
| ARC        | Revestimento antirreflexo (do inglês, <i>Anti Reflection Coating</i> )  |
| FV         | Fotovoltaico  |
| IPA        | Isopropanol   |
| PECVD      | Deposição química por vapor de plasma melhorado (do inglês, <i>Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition</i> ) |
| PSG        | Fosfosilicato de vidro (do inglês, phosphosilicate glass)   |
| PV Factory | Fábrica fotovoltaica (do inglês, Photovoltaic factory)  |
| UFCG       | Universidade Federal de Campina Grande  |
| UNSW       | Universidade de Nova Gales do Sul   |
| UV         | Ultravioleta  |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                              |  |
|------------------------------|--|
| Si                           | Silício  |
| Eff                          | Eficiência   |
| FF                           | Fator de Forma   |
| IV                           | Corrente-Tensão  |
| J <sub>sc</sub>              | Densidade de Corrente de Curto-Circuito                |
| V <sub>oc</sub>              | Tensão de Circuito Aberto                              |
| Al                           | Alumínio   |
| Ag                           | Prata  |
| HCl                          | Ácido clorídrico                                       |
| HF                           | Ácido fluorídrico                                      |
| HNO <sub>3</sub>             | Ácido nítrico  |
| N <sub>2</sub>               | Gás nitrogênio   |
| NaOH                         | Hidróxido de sódio (soda cáustica)                     |
| NH <sub>3</sub>              | Amônia   |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | Amônio   |
| A                            | Amperes  |
| a.u.                         | Unidade arbitrária (do inglês, <i>Arbitrary unit</i> ) |
| °C                           | Graus Celsius  |
| l                            | Litros   |
| m                            | Metros   |
| min                          | Minutos  |
| s                            | Segundos   |
| V                            | Volts  |
| W                            | Watts  |
| %                            | Porcento   |
| Ω                            | Ohms   |
| Ω/m <sup>2</sup>             | Ohms por metro quadrado                                |

# SUMÁRIO

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 1       | Introdução .....                                    | 14 |
| 1.1     | Objetivos .....                                     | 15 |
| 1.1.1   | Objetivo Geral .....                                | 15 |
| 1.1.2   | Objetivos Específicos .....                         | 15 |
| 1.2     | Estrutura do Trabalho .....                         | 15 |
| 2       | Embasamento Teórico .....                           | 17 |
| 2.1     | Energia Solar Fotovoltaica.....                     | 17 |
| 2.2     | Célula Fotovoltaica .....                           | 17 |
| 2.2.1   | Semicondutores .....                                | 18 |
| 2.2.2   | Estrutura da Célula FV .....                        | 18 |
| 2.2.3   | Princípio de Funcionamento.....                     | 20 |
| 2.2.4   | Principais características elétricas .....          | 22 |
| 2.2.4.1 | Corrente de Curto-Circuito .....                    | 23 |
| 2.2.4.2 | Tensão de Circuito Aberto .....                     | 25 |
| 2.2.4.3 | Fator de Forma, Resistências Série e Paralelo ..... | 26 |
| 2.2.4.4 | Eficiência .....                                    | 29 |
| 2.2.5   | Tecnologia Fotovoltaica .....                       | 31 |
| 2.2.5.1 | Primeira Geração .....                              | 31 |
| 2.2.5.2 | Segunda Geração .....                               | 32 |
| 2.2.5.3 | Terceira Geração .....                              | 33 |
| 2.3     | Processo de Fabricação da Célula Fotovoltaica.....  | 34 |
| 2.3.1   | Escolha do material inicial .....                   | 34 |
| 2.3.2   | Remoção das superfícies defeituosas .....           | 35 |
| 2.3.3   | Texturização .....                                  | 36 |
| 2.3.3.1 | Ácida.....  | 36 |
| 2.3.3.2 | Alcalina.....                                       | 36 |
| 2.3.4   | Banho Químico com HF:Hcl.....                       | 37 |
| 2.3.5   | Difusão de Fósforo .....                            | 38 |
| 2.3.6   | Remoção da camada de óxido de fósforo.....          | 39 |
| 2.3.7   | Isolamento com Plasma Da Borda .....                | 40 |
| 2.3.8   | Revestimento de Nitreto De Silício.....             | 40 |
| 2.3.9   | Impressão em tela.....                              | 41 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 2.3.9.1 | Superfície Inferior .....                              | 41 |
| 2.3.9.2 | Superfície superior .....                              | 42 |
| 2.3.10  | Forno de Queima dos Contatos Metálicos.....            | 43 |
| 3       | Ferramenta de Simulação.....                           | 44 |
| 3.1     | PV Factory .....                                       | 44 |
| 3.1.1   | Histórico .....  | 44 |
| 3.1.2   | Software em Nuvem.....                                 | 45 |
| 3.1.3   | Funcionamento .....                                    | 46 |
| 3.1.4   | Linha de Produção.....                                 | 49 |
| 4       | Simulações e Resultados.....                           | 50 |
| 4.1     | Metodologia .....                                      | 50 |
| 4.2     | Lote referência de células fotovoltaicas.....          | 50 |
| 4.3     | Material Inicial.....                                  | 52 |
| 4.3.1   | Resultados e Discussões.....                           | 52 |
| 4.4     | Remoção de Superfícies Defeituosas.....                | 56 |
| 4.4.1   | Resultados e Discussões.....                           | 57 |
| 4.5     | Texturização.....                                      | 61 |
| 4.5.1   | Resultados e Discussões.....                           | 61 |
| 5       | Conclusão.....   | 68 |
|         | Referências .....                                      | 70 |
|         | Apêndice A – Parâmetros de referência .....            | 72 |
|         | Apêndice B – Escolha do Material Inicial.....          | 74 |
|         | Apêndice C – Remoção das superfícies defeituosas ..... | 78 |
|         | Apêndice D – Texturização Alcalina.....                | 86 |

# 1 INTRODUÇÃO

O uso de recursos renováveis para geração de energia elétrica já é essencial para o desenvolvimento sustentável do planeta. A energia proveniente da luz solar pode ser captada por dispositivos fotovoltaicos e, durante os últimos 50 anos, dispositivos de conversão de energia fabricados em lingotes de silício cristalino passaram de experimentos em laboratórios a cobrir telhados em todo o mundo. O aperfeiçoamento contínuo desta tecnologia aliado ao aumento do volume de produção resulta na redução dos preços da energia elétrica produzida por dispositivos fotovoltaicos, que acabam por se tornar comparáveis aos preços da energia gerada por combustíveis fósseis. Isto demanda um crescimento rápido da fabricação fotovoltaica, bem como a educação e formação de engenheiros, técnicos e pessoal de marketing por parte das empresas envolvidas.

O principal meio de produção na indústria de células fotovoltaicas de silício é a serigrafia. Esta tecnologia, da década de 1970, tem sido constantemente aperfeiçoada ao longo dos anos. O processo de fabricação integra processos diversos de banhos químicos, difusão de estado sólido, física de plasma e serigrafia. Além de sua natureza multidisciplinar, o processo requer o uso de produtos químicos corrosivos (por exemplo, ácido fluorídrico) e um ambiente limpo para assegurar células com eficiência suficiente. Estes fatores apresentam desafios para a formação de engenheiros, uma vez que muitos fabricantes frequentemente não são receptivos a grupos de estudantes visitando suas linhas de produção ou trabalhando em estágios de curta duração. Além disso, muitas fábricas estão localizadas longe das instituições educacionais que possuem experiência em pesquisa e programas educacionais em silício fotovoltaico.

Um programa baseado em nuvem é utilizado para simular como as células fotovoltaicas são fabricadas. O software, denominado PV Factory, é usado em um ambiente de aprendizagem, como disciplinas de universidade ou programas de trainee, para instruir sobre os processos de fabricação e desenvolver experiência em otimização de linhas de produção de células fotovoltaicas de silício. Neste software, os usuários trabalham como estagiários em engenharia, em uma fábrica virtual onde fabricam lotes de células e aprendem a otimizar seu processo.

De face ao apresentado, no presente trabalho serão estudados os processos da linha de produção das células fotovoltaicas e, com o uso do software virtual PV Factory, os processos iniciais desta linha de produção serão analisados. O estudo será desenvolvido por meio de simulações no software, em que parâmetros das etapas consideradas serão variados a fim de que sejam observadas mudanças nas características físicas e elétricas das células fotovoltaicas fabricadas.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral aprimorar o entendimento do processo de fabricação de células fotovoltaicas utilizando software que simula todas as etapas do processo.

### 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos do trabalho, procura-se:

- Apresentar e introduzir a utilização do software virtual PV Factory.
- Simular no programa citado a fabricação da célula fotovoltaica, variando as condições de entrada para as três etapas iniciais do processo de fabricação avaliado: (1) a escolha do material inicial, (2) a remoção das superfícies defeituosas e (3) a texturização.
- Analisar os resultados das simulações, de cada etapa estudada, para aprimorar os parâmetros de entrada nas características físicas e elétricas da célula virtual produzida.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro Capítulo é introdutório, apresenta-se uma contextualização do processo de fabricação das células fotovoltaicas e explicita-se os objetivos gerais e específicos.

No segundo Capítulo é feito o embasamento teórico do trabalho, em que são abordados o histórico da energia fotovoltaica e o principal dispositivo capaz de gera-la, assim como seu princípio de funcionamento, suas características e os processos de sua fabricação.

No Capítulo 3 é abordado o software virtual utilizado para o desenvolvimento do trabalho, desde a elaboração até o funcionamento.

No Capítulo 4 detalha-se os aspectos metodológicos do trabalho, explica-se como são realizadas as simulações e analisam-se os resultados obtidos.

O quinto Capítulo é reservado às contribuições obtidas e à proposição de trabalhos futuros.



## 2 EMBASAMENTO TEÓRICO

### 2.1 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O fenômeno da conversão de energia solar em energia elétrica foi observado pela primeira vez em 1839 pelo físico francês Edmond Becquerel, que observou a existência de uma diferença de potencial quando eletrodos constituídos por placas de platina ou de prata, mergulhados em um eletrólito, eram expostos à luz. Este fenômeno ficou conhecido como efeito fotovoltaico.

Em 1954, os pesquisadores Daryl Chapin, Calvin Fuller e Gerald Pearson do Laboratório Bell Labs construíram a primeira célula fotovoltaica de silício com eficiência de conversão de energia de 6%. Em 1960, a célula tornou-se mais eficiente atingindo o patamar de 14%. Com estes resultados, os programas espaciais incorporaram essa tecnologia e, em 1958, foi lançado o primeiro satélite (Vanguard I), alimentado a partir de células fotovoltaicas de silício.

Com a crise mundial de energia na década de 70 do século XX, grupos de cientistas intensificaram a pesquisa sobre fontes alternativas de energias renováveis, na busca de soluções mais econômicas e mais eficientes fazendo uso de novos materiais. As novas formas de produção de energia fizeram com que as células fotovoltaicas não se restringissem somente a programas espaciais e fossem utilizadas como formas alternativas complementares de interesse para o suprimento de energia (ORTEGA, 2013).

### 2.2 CÉLULA FOTOVOLTAICA

O dispositivo que converte diretamente a luz solar em energia elétrica é a célula fotovoltaica através do efeito fotovoltaico. Isso se dá nos processos que se desenvolvem a nível atômico dos materiais semicondutores que, ao receber um fóton na célula, desloca o elétron da camada de valência para a banda de condução. A célula fotovoltaica é a menor elemento do sistema FV (PINA, 2013).

### 2.2.1 SEMICONDUTORES

As células fotovoltaicas possuem pelo menos duas camadas de semicondutores. Estes são materiais de condutividade elétrica intermediária entre os materiais isolantes e metálicos (condutores). A condutividade dos semicondutores é influenciada pela temperatura e pela quantidade de impurezas constituídas em sua estrutura. Podem ser classificados como (PINA, 2013):

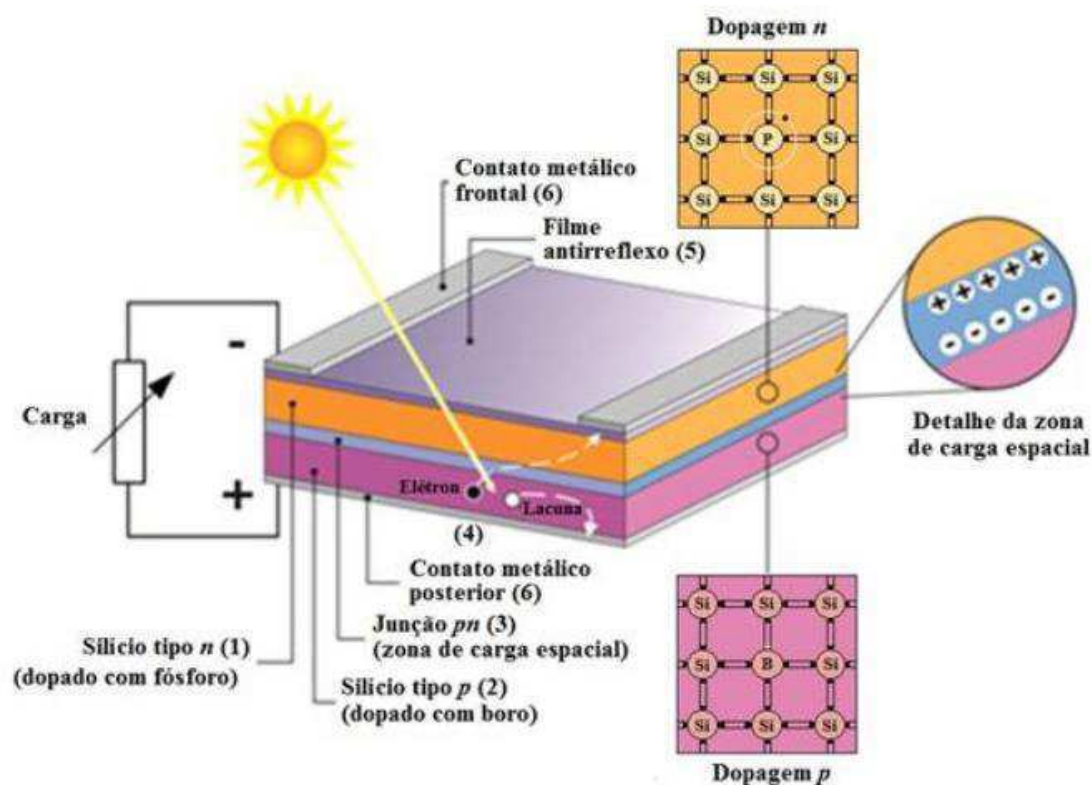
- Semicondutor intrínseco: semicondutor em estado puro. Comportam-se como isolantes à temperatura de zero graus absolutos (-273 C), mas à temperatura ambiente (20 C) já se tornam condutores pois o calor fornece energia térmica necessária para que alguns dos elétrons de valência deixem a ligação covalente (deixando em seu lugar uma lacuna) passando a existir alguns elétrons livres no semicondutor.
- Semicondutor extrínseco: semicondutor dopado por impurezas. Suas características elétricas dependem do tipo e da concentração das impurezas adicionadas.

Diferentes materiais semicondutores podem ser constituídos nas células FV. Os mais utilizados são o Silício (Si), o Arsenato de Gálio (GaAs), o Disseleneto de Cobre e Índio (CuInSe<sub>2</sub>) e o Telureto de Cádmio (CdTe). Contudo, o Si domina o mercado de materiais semicondutores utilizados na fabricação de células solares devido a suas características físicas e elétricas, além de ser o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre (PINA, 2013).

### 2.2.2 ESTRUTURA DA CÉLULA FV

A estrutura de uma célula solar varia de acordo com o projeto da mesma, porém, um modelo padrão é composto por um substrato de material semicondutor, uma ou mais regiões dopadas, filmes antirreflexo (AR) depositados na face frontal e contatos metálicos em ambas as faces (GARCIA, 2009). Na Figura 2.1 é ilustrada esta estrutura da célula fotovoltaica.

Figura 2.1 – Estrutura básica da célula fotovoltaica



Fonte: (GALDINO, 2013).

As regiões dopadas são constituídas pela adição controlada de impurezas doadoras (tipo n) ou aceitadoras (tipo p) e são difundidas no substrato semiconductor. A zona entre estas duas regiões é denominada região de carga espacial, parte essencial para a formação do campo elétrico, responsável pelo funcionamento da junção p-n.

Na face frontal, filmes AR são depositados com o propósito de reduzir as perdas de radiação por reflexão, ocasionando em uma maior porcentagem de energia absorvida pela célula fotovoltaica. Para a mesma finalidade, é geralmente empregado o processo de texturização, responsável pela formação de micropirâmides na superfície da célula (PINA, 2013).

Em ambas as faces da célula, uma malha de trilhas metálicas é adicionada para formar os contatos frontal e posterior, que são responsáveis pela extração de corrente elétrica produzida no interior do substrato. Por meio destes contatos, a célula solar pode ser conectada a um circuito externo.

As dimensões dessas trilhas devem ser bem pensadas, porque estas interferem no fator de sombra da célula (porcentagem de superfície coberta). Este deve ser suficientemente baixo para permitir a passagem da radiação solar e suficientemente alto para que a resistência série da célula se mantenha em um nível tolerável.

A malha deve ter uma área de contato adequada para facilitar a passagem de corrente elétrica, porém, não pode recobrir completamente a superfície da célula (EBERHARDT, 2005).

### 2.2.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Na exposição de certos materiais semicondutores à radiação solar, os fótons que a constituem colidem com os elétrons de valência da estrutura do semicondutor e são capazes de lhes fornecer energia. Quando esta energia é suficiente, as ligações que os elétrons possuem aos seus respectivos átomos são quebradas e estes elétrons se tornam livres dentro do material, deixando uma lacuna em seu lugar. Considera-se que a lacuna também pode se movimentar livremente pelo interior do semicondutor, ao passo de que os elétrons vizinhos ocupam seu lugar continuamente.

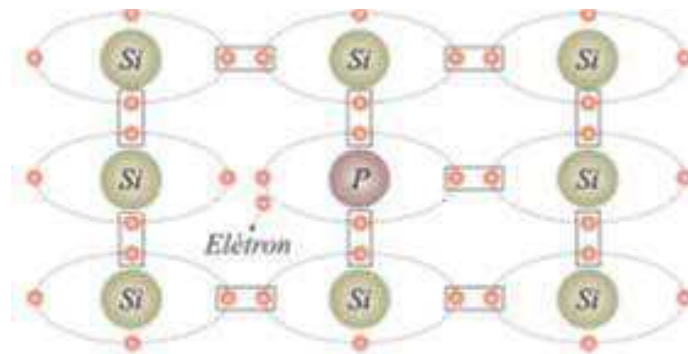
Entretanto, o processo de geração de pares elétron-lacuna não gera energia. Para esta finalidade, se faz necessário que o material semicondutor seja contaminado propositalmente com átomos impuros, em uma técnica conhecida como dopagem.

A dopagem do semicondutor pode ser feita com dois tipos de impurezas: doadoras, se em sua última camada possuem um elétron a mais que os átomos que constituem a estrutura do semicondutor; ou aceitadoras, se em sua última camada possuem um elétron a menos.

No caso do silício como semicondutor, que possui quatro elétrons em sua camada de valência, o processo de dopagem acontece com elementos pentavalentes (doadores) e trivalentes (aceitadores), tais como fósforo e boro, respectivamente. Um átomo de fósforo que tem cinco elétrons na sua banda de valência, cria quatro ligações covalentes com os átomos de silício e um elétron fica livre. Esta união gera excesso de elétrons e por isso caracterizam semicondutores denominados do tipo n (negativos).

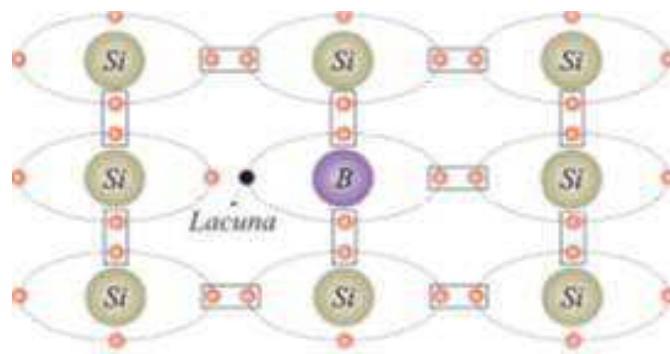
De maneira oposta, um átomo de boro que possui três elétrons na sua banda de valência, pode formar apenas três ligações covalentes com os átomos de silício e, portanto, existe uma lacuna em uma das ligações covalentes. Esta dopagem gera excesso de lacunas e configuram semicondutores do tipo p (positivos). Os processos de dopagem podem ser vistos nas Figura 2.2 e 2.3.

Figura 2.2 – Silício dopado com Fósforo (elemento pentavalente), criando um substrato com excesso de elétrons, tipo n



Fonte: Adaptado de (PORTAL ENERGIA, 2004).

Figura 2.3 – Silício dopado com Boro (elemento trivalente), criando um substrato com falta de elétrons, tipo p



Fonte: Adaptado de (PORTAL ENERGIA, 2004).

Quando os substratos do tipo p e do tipo n são colocados em contato, obtém-se uma junção denominada junção p-n. Naturalmente, os elétrons tendem a migrar através da interface no sentido do semiconductor n para o p. Com isso, há um acúmulo de cargas positivas do lado do semiconductor n, devido a saída de elétrons, ao mesmo tempo que no lado do semiconductor p, a entrada de elétrons produz um acúmulo de cargas negativas.

Nesse sentido, a difusão de elétrons do lado n para o p da junção, e a difusão de buracos do lado p para o n, resulta na formação de uma carga espacial nos dois lados do plano na junção, uma positiva e outra negativa. Estas duas regiões formam uma zona de depleção, assim chamada porque quase não contém cargas móveis.

A formação da carga espacial dá origem a uma diferença de potencial de contato entre as extremidades da zona de depleção. Essa diferença de potencial impede que os elétrons e buracos continuem a atravessar o plano da junção (HALLIDAY, 2012).

#### 2.2.4 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS

Em qualquer fase de um projeto para aplicação de energia solar fotovoltaica, desde o dimensionamento técnico até estudos de viabilidade econômica é imprescindível o conhecimento do comportamento elétrico dos módulos e arranjos fotovoltaicos. Segundo a norma americana ASTM E1036 (1996), a medida da performance de um módulo ou arranjo fotovoltaico consiste em determinar pelo menos as seguintes características elétricas: corrente de curto-circuito  $I_{sc}$ , tensão de circuito aberto  $V_{oc}$ , potência máxima  $P_m$  e tensão de máxima potência  $V_{mp}$ . Estas características são determinadas mediante análise direta da curva característica I-V. Estes são os dados que obrigatoriamente os fabricantes especificam nos módulos comerciais.

Para a completa caracterização elétrica do módulo fotovoltaico outros parâmetros devem ser determinados como a eficiência do módulo  $\eta$ , os coeficientes de temperatura  $\alpha$  e  $\beta$ , a resistência série  $R_s$ , a resistência paralela  $R_p$ , o fator de forma FF, o fator de idealidade do diodo  $m$  e a corrente de saturação reversa  $I_0$  (GASPARIN, 2009).

Para caracterizar uma célula solar é necessário medir a curva da corrente elétrica gerada em função da diferença de potencial aplicada, quando a célula está exposta a uma irradiância de  $1000 \text{ W.m}^{-2}$ , espectro solar AM 1,5G a temperatura de  $25^\circ \text{ C}$ . Desta característica I-V, os principais parâmetros extraídos para a análise são (EBERHARDT, 2005):

- Corrente de curto-circuito ( $I_{sc}$ ): é a corrente que se obtém da célula quando a tensão em suas extremidades é de zero volt, isto é, a máxima corrente que se pode obter.
- Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ): é a tensão na qual os processos de recombinação se igualam aos processos de geração e, portanto, a corrente que se extrai da célula é nula. Constitui a máxima tensão que se pode obter de uma célula solar. Em células de silício industriais os valores são aproximadamente de  $0,5 \text{ V}$ , entretanto, em células de arsenieto de gálio a  $V_{oc}$  é da ordem de  $1 \text{ V}$ .

- Potência máxima ( $P_{\text{máx}}$ ): é a máxima potência que se extrai da célula e é igual o produto da tensão pela corrente elétrica:

$$P_{MAX} = I_{MAX} \times V_{MAX} \quad (3.1)$$

No ponto correspondente a corrente de curto-circuito ou a tensão de circuito aberto,  $P = 0$ . Existe, no entanto, um ponto com valor de  $V$  entre zero e  $V_{oc}$ , que corresponde ao ponto de máxima potência.

- Fator de forma (FF)

É definido por:

$$FF = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc}}{P_{MÁX}} \quad (3.2)$$

Quanto maior for o FF, maior é a probabilidade de a célula apresentar uma alta eficiência.

- Eficiência ( $\eta$ ): este é o parâmetro por excelência que define a qualidade da célula solar. Representa a relação entre a potência elétrica que se obtém da célula e a potência da radiação solar incidente. É expressa pela seguinte equação:

$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF}{A \cdot I_{sol}} \quad (3.3)$$

Onde  $I_{sol}$  é a irradiância incidente na célula, isto é, a radiação solar por unidade de área e tempo incidente na célula e  $A$  é a área da célula.

#### 2.2.4.1 CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

Os principais mecanismos que causam perdas na corrente de curto-circuito são:

- i. Os fótons cuja energia é menor que a energia do gap do semicondutor não são absorvidos. Tão pouco é conveniente escolher um semicondutor de

gap baixo para absorver uma quantidade maior de fótons, pois a tensão de circuito aberto está limitada pelo valor do gap.

- ii. Os fótons com energia maior que a do gap não são absorvidos em todo o volume da célula. Uma célula mais grossa que o necessário, absorve a mesma quantidade de radiação solar, porém aumenta a recombinação desnecessariamente e o custo.
- iii. Parte dos fótons incidentes sofre reflexão na superfície da célula. Este processo pode ser reduzido depositando-se um filme antirreflexo.
- iv. Os fótons que incidem sobre o metal da malha de metalização são também refletidos. A área da malha não pode ser elevada, pois produz sombra.
- v. Ocorrem recombinações, em curto-circuito, dos pares elétron-lacuna, formados.

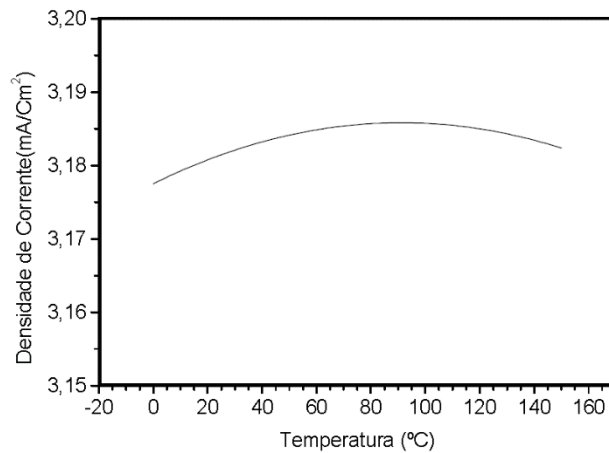
A resposta espectral  $RS$  (c) é definida como a razão entre a corrente elétrica produzida e a irradiância incidente para cada comprimento de onda. A integral da resposta espectral multiplicada pelo espectro solar é aproximadamente igual a da densidade de corrente de curto-circuito, isto é, a corrente de curto-circuito dividida pela área da célula:

$$J_{SC} \cong J_L = \int_0^{\infty} RS(\lambda)ES\lambda d\lambda \quad (3.5)$$

Consequentemente a  $J_{sc}$  é sensível às variações do espectro da irradiância incidente. Além disso, a densidade de corrente de curto-circuito aumenta ligeiramente com o aumento da temperatura. Um aumento da temperatura faz com que o gap de energia do material semiconductor diminua e, por consequência, a corrente tem um pequeno acréscimo para uma determinada variação de temperatura. A partir de simulações realizadas com o programa PC-1D, que simula células solares, verificou-se que a  $J_{sc}$  aumenta ligeiramente até uma temperatura da ordem de 120 °C. Para temperaturas superiores, observou-se um decréscimo da  $J_{sc}$ , conforme a Figura 2.4.



Figura 2.4 – Densidade de corrente em função do aumento da temperatura



Fonte: (EBERHARDT, 2005).

#### 2.2.4.2 TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO

A estrutura básica de uma célula solar é, na definição, a estrutura de um diodo. Portanto, a curva da corrente elétrica em função da tensão (I-V) medida no escuro (sem iluminação) corresponde à característica exponencial de um diodo:

$$I = I_0(T) \left( \exp\left(\frac{eV}{mkT}\right) - 1 \right) \quad (3.4)$$

Sendo  $m$  o fator de idealidade do diodo e um valor compreendido tipicamente entre 1 e 2. O parâmetro  $I_0(T)$  é a corrente inversa de saturação do diodo e é um parâmetro fortemente dependente da temperatura [18]:

$$I_0(T) \approx \exp\left(\frac{-E_G}{kT}\right) \quad (3.5)$$

Na medida da curva no escuro, através do valor do parâmetro  $I_0(T)$ , podem-se obter informações sobre as recombinações que ocorrem na célula. Para obter a corrente elétrica da célula iluminada e sob uma tensão  $V$ , subtrai-se desta a corrente que passaria pela mesma se não estivesse iluminada e sob a mesma tensão  $V$ . Desta forma, tem-se que:

$$I = I_L - I_0 \left( \exp\left(\frac{eV}{mkT}\right) - 1 \right) \quad (3.6)$$

Para tensões próximas a zero  $I \approx I_L = I_{sc}$ . À medida que a tensão cresce, o segundo termo da Equação 3.6 aumenta e, conseqüentemente, a corrente diminui. Dado o caráter

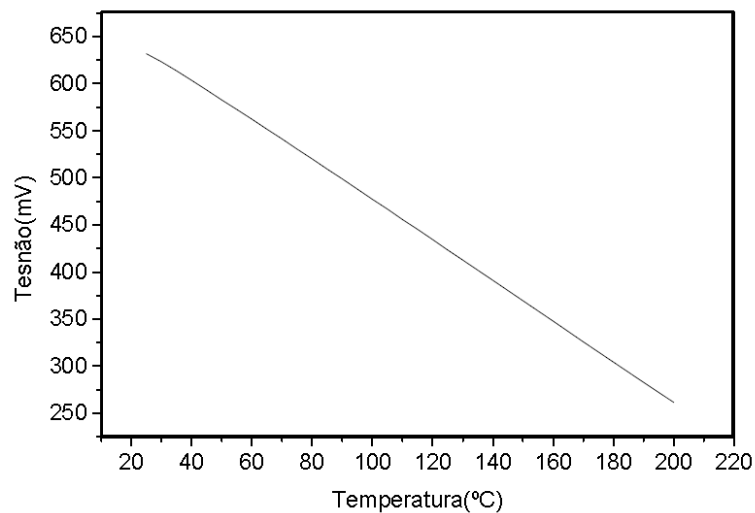
exponencial deste termo, a diminuição ocorre de forma brusca. Portanto, a tensão de circuito aberto é dada pela expressão:

$$V_{OC} = \frac{mkT}{e} \ln\left(\frac{I_L}{I_0(T)}\right) \quad (3.7)$$

Assim percebe-se que quanto maior a recombinação na célula, maior  $I_0(T)$  e menor será a tensão de circuito aberto.

A tensão de circuito aberto também depende da temperatura da célula solar e diminui da ordem de milivolts para um aumento de um grau Celsius. Esta variação da temperatura é linear, como mostra a Figura 2.5.

Figura 2.5 – Dependência da tensão de circuito aberto com a temperatura para uma célula de silício monocristalino



Fonte: (EBERHARDT, 2005).

#### 2.2.4.3 FATOR DE FORMA, RESISTÊNCIAS SÉRIE E PARALELO.

O fator de forma (FF) definido anteriormente pode ser calculado aproximadamente por:

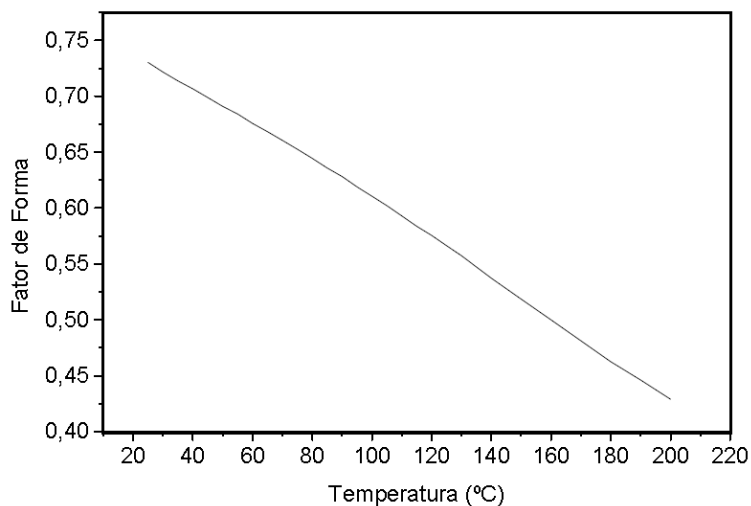
$$FF_0 = \frac{v_{OC} - \ln(v_{OC} + 0,72)}{v_{OC} + 1} \quad (3.8)$$

Sendo  $v_{OC} = \frac{V_{OC} \cdot e}{mkT}$ .

A Figura 2.6 apresenta a variação do FF em relação ao aumento da temperatura. Nota-se que o fator de forma diminui de forma linear, similarmente tensão de circuito aberto.

A resistência série e a resistência paralela são fatores que alteram a curva característica ideal de uma célula solar. Estes dois fatores afetam, sobre tudo, o FF e, através deste, a eficiência da célula.

Figura 2.6 - Fator de forma em função da temperatura para uma célula de silício monocristalino

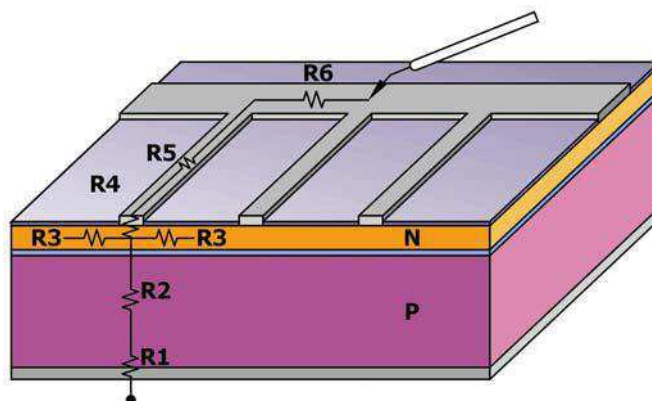


Fonte: (EBERHARDT, 2005).

A resistência série ( $R_s$ ) de uma célula é uma resistência interna da célula e deve-se a malha de metalização, a resistência nos contatos e a resistência do próprio semicondutor, conforme ilustra a Figura 2.7.

A resistência em paralelo ( $R_p$ ) tem sua origem nas imperfeições da junção pn, que permitem a existência de fugas de corrente. Na Figura 2.8 apresenta-se o circuito equivalente de uma célula solar.

Figura 2.7 – Esquema dos componentes da resistência série em uma célula solar



Fonte: (EBERHARDT, 2005).

Estes dois fatores podem ser considerados e, portanto, a característica I-V da célula solar torna-se:

$$I = I_L - I_0(T) \left\{ \exp \left[ \frac{eV + R_S I}{mkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + R_S I}{R_P} \quad (3.9)$$

Sendo:

$I_L$  – Corrente fotogerada (A);

$I_0$  – Corrente reversa de saturação no diodo (A);

$q$  – Carga do elétron ( $1,6 \times 10^{19}$  C);

$k$  – Constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$ );

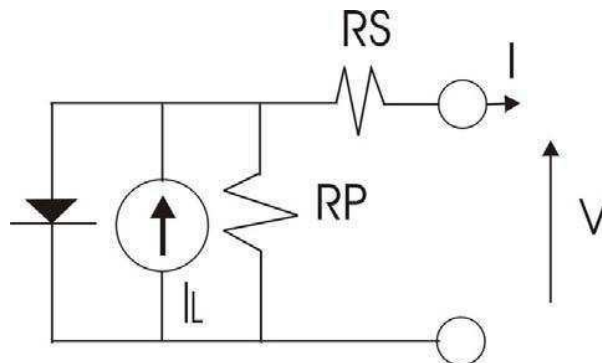
$T$  – Temperatura absoluta (K);

$V$  – Tensão nos terminais da célula;

$R_S$  – Resistência série;

$R_P$  – Resistência paralelo.

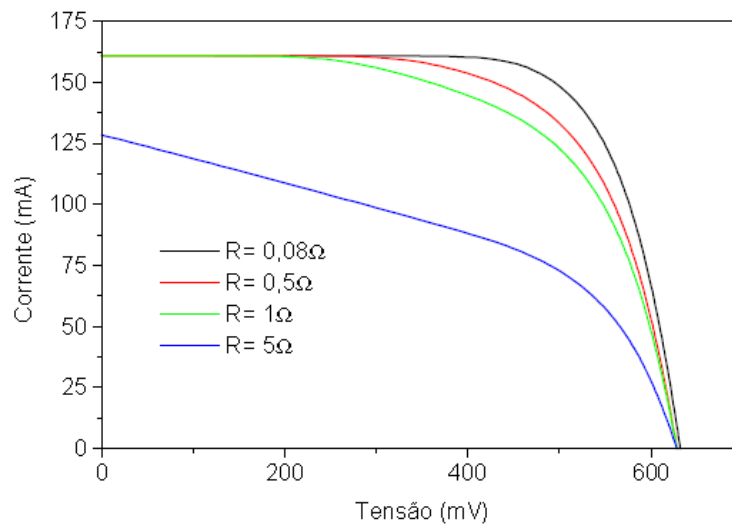
Figura 2.8 – Circuito elétrico representativo de uma célula solar



Fonte: (EBERHARDT, 2005).

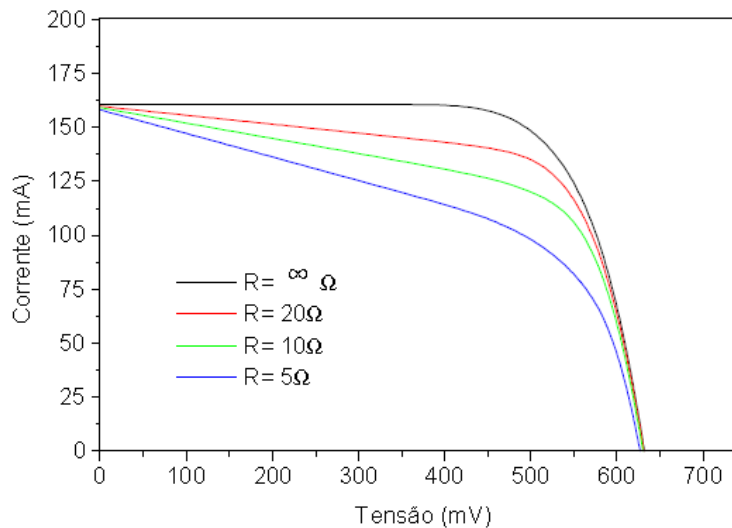
Nas Figuras 2.9 e 2.10 mostram-se os resultados das influências das resistências série e paralela na curva I-V da célula solar de  $4 \text{ cm}^2$  sob uma condição padrão.

Figura 2.9 – Influência da resistência série na característica I-V de uma célula solar



Fonte: (EBERHARDT, 2005).

Figura 2.10 – Influência da resistência em paralelo na característica I-V de uma célula solar



Fonte: (EBERHARDT, 2005).

#### 2.2.4.4 EFICIÊNCIA

A eficiência de uma célula solar, geralmente, é citada na literatura sem limite da incerteza da medida. O conhecimento da incerteza é essencial na comparação de medidas da eficiência dentro e entre os laboratórios especializados em desenvolver células solares. De qualquer modo, os laboratórios de referência para este tipo de medição realizam medias comparativas.

A primeira etapa para verificar a incerteza é listar todas as fontes possíveis do erro. O diagrama representado na Tabela 2.1 apresenta os itens que devem ser

considerados para que se possa analisar para a medição da eficiência de uma célula solar, bem como os cuidados com o uso dos equipamentos e as referências.

Tabela 2.1 - Fatores que influenciam na determinação da eficiência

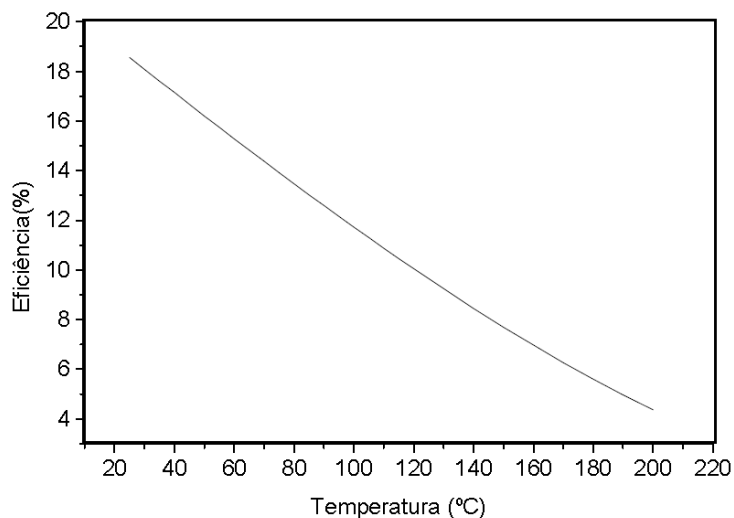
|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| (Definições das Condições padrão | ➤ Distribuição espectral de referência                          |
|                                  | ➤ Irradiância total de referência                               |
|                                  | ➤ Temperatura de referência                                     |
|                                  | ➤ Definição da área   |
| Medição da Curva IxV             | ➤ Instrumentação  |
|                                  | ➤ Contatos elétricos e mecânicos                                |
|                                  | ➤ Medida e controle de temperatura                              |
|                                  | ➤ Corrente e tensão sob regime permanente                       |
| Fonte de Iluminação              | ➤ Uniformidade espacial   |
|                                  | ➤ Estabilidade temporal   |
|                                  | ➤ Dependência angular   |
|                                  | ➤ Erro relativo à distribuição da resposta espectral            |
|                                  | ➤ Relação entre a irradiância espectral de referência e a fonte |
| Medida de área                   | ➤ Instrumentação  |
|                                  | ➤ Determinação do limite do dispositivo                         |
| Sensor de Referência             | ➤ Método de calibração e incerteza da medida                    |
|                                  | ➤ Linearidade   |
|                                  | ➤ Temperatura   |
|                                  | ➤ Dependência angular   |
|                                  | ➤ Degradação  |
|                                  | ➤ Sensibilidade do sensor                                       |

Fonte: (EBERHARDT, 2005).

O controle da temperatura é um parâmetro importante na medição da eficiência de células solares. Portanto, durante a medição da curva IxV é necessário manter a temperatura constante, sendo necessário refrigerar a célula solar, pois a mesma é aquecida pela irradiância incidente.

Na Figura 2.11 é apresentada a variação da eficiência em função da temperatura. Nota-se que a eficiência decresce. Para uma célula solar de silício, o decréscimo da eficiência é da ordem de 0,4% a 0,5% por grau Celcius de aumento de temperatura.

Figura 2.11 – Variação da eficiência em função da temperatura, para uma célula de silício de estrutura n+pp+ com uma área de 4 cm<sup>2</sup> e metalização de titânio e prata



Fonte: (EBERHARDT, 2005).

## 2.2.5 TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA

As células fotovoltaicas utilizadas no mercado podem ser classificadas em grupos (ou gerações) de acordo com as tecnologias utilizadas em suas composições e fabricações. As três principais gerações de células solares são: a primeira geração, é constituída pelos módulos de fatias de silício; a segunda geração, composta pelos filmes finos; e a terceira geração, de células sensibilizadas por corante (ORTEGA, 2013).

### 2.2.5.1 PRIMEIRA GERAÇÃO

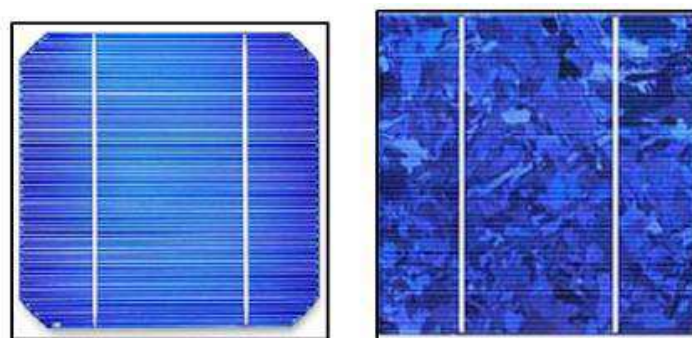
A primeira geração de células fotovoltaicas é composta por material semicondutor de silício cristalino. Esta tecnologia representa mais de 85% do mercado, por ter uma tecnologia considerada consolidada e confiável. Podem ser encontradas em duas formas diferentes:

- Monocristalino (m-Si): apresenta uma estrutura homogênea (uniforme). Para este fim, é necessário que o cristal de silício tenha um grau de pureza

de 99,9999%. Alcançar este nível de pureza torna essa tecnologia eficiente, porém com um preço elevado.

- Policristalino (p-Si): apresentam eficiência menor comparando às células de silício monocristalino, porém possuem um menor custo de produção por necessitar de menos energia em sua fabricação. Isso se dá pela imperfeição do cristal, devido ao sistema de fabricação. Uma vantagem de optar pela produção de células solares policristalinas a monocristalinas é diminuir as falhas na contaminação com metais e estruturas de cristal.

Figura 2.12 – Células de silício monocristalino (à esquerda) e policristalino (à direita)



Fonte: (VIRIDIAN, 2011).

#### 2.2.5.2 SEGUNDA GERAÇÃO

A segunda geração das células solares é caracterizada pela tecnologia de filme fino. São células flexíveis que precisam de uma área maior para atingir a mesma potência das células de silício, são menos sensíveis a altas temperaturas e sofrem menos alterações na sua eficiência de conversão pelo sombreamento (LUQUE, 2003). As formas mais comuns encontradas no mercado são:

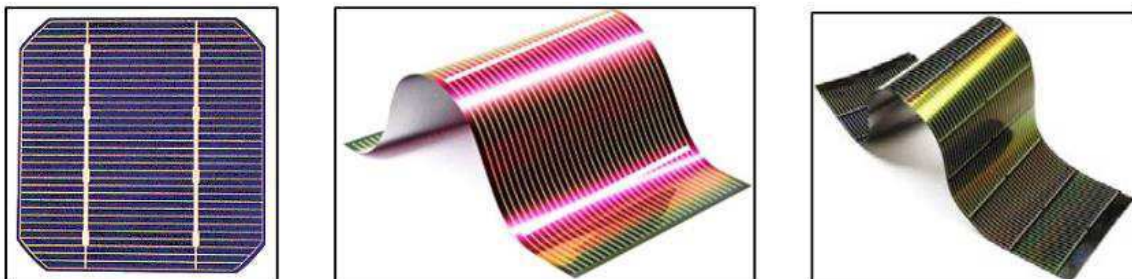
- Silício Amorfo (a-Si): diverge da tecnologia do silício cristalino com o fato de que os átomos de silício estão localizados de forma aleatória em relação aos outros. Essa aleatoriedade afeta as propriedades eletrônicas do material, causando um maior band-gap (1,7 eV) em comparação ao silício cristalino (1,1 eV).
- Disseleneto de Cobre e Índio (CIS): contém elementos semicondutores com características elétricas e coeficientes de elevada absorção óptica.



Isso favorece a eficiência quântica e, portanto, a eficiência da conversão de energia. O Índio, por ser um material raro, é mais caro que o Silício.

- Disseleneto de Cobre, Índio e Gálio (CIGS): ao contrário da célula de silício, estas possuem um modelo heterogêneo multifacetado. O desafio dessa tecnologia tem sido a capacidade limitada para ampliar o processo de alto rendimento a baixo custo.
- Telureto de Cádmio (CdTe): possui o band-gap ideal (1,45 eV) e um elevado coeficiente de absorção direta para um material absorvente de luz solar. A principal desvantagem está relacionada a toxicidade do Cádmio (Cd) e os temas ambientais relacionados ao seu processo de fabricação e reciclagem.
- Multijunção de Silício (a-Si/uc-Si): é uma combinação das tecnologias do silício cristalino e amorfo, constituindo-se de heterojunções. A absorção de luz solar ocorre em uma lâmina de silício mono e policristalino. Ambos os lados dessa lâmina são contatados com filme de silício amorfo.

Figura 2.13 – Células PV de filme fino, da esquerda para a direita: Amorfo, CIGS e CdTe.



Fonte: (VIRIDIAN, 2011).

### 2.2.5.3 TERCEIRA GERAÇÃO

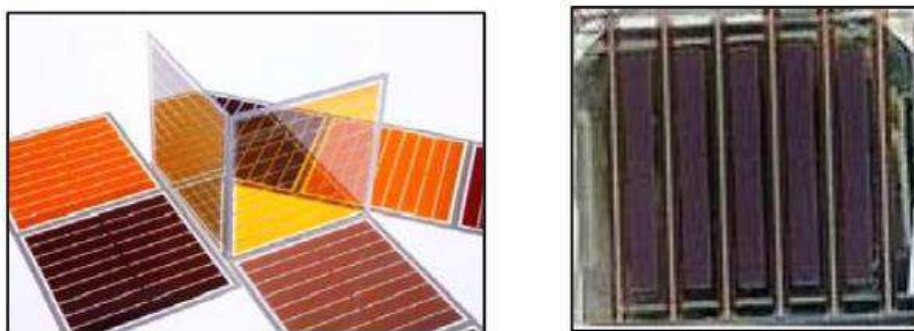
A terceira geração são conhecidas como células de tecnologia utilizando corantes. Dentre as mais importantes destacam-se:

- Células Solares Fotoeletroquímicas (Células de Gratzel): são células sensibilizadas por corantes nano-cristalinos, usam o mecanismo de regeneração rápida fotoeletroquímica. Utilizam a energia solar como força eletromotriz para promover reações eletroquímicas e se assemelham a uma bateria comum em operação, ao receber energia das descargas

elétricas dos reagentes químicos. O Dióxido de Titânio nanocristalino dopado com corante ( $\text{TiO}_2$ ), com um band-gap de 3,2 eV, tem sido usado como condutor. As eficiências tendem a situar-se entre 5% e 11% em nível celular. No entanto, o calor, a luz ultra-violeta (UV), e a interação dos solventes no encapsulamento das células são as questões negativas desta tecnologia.

- Células Solares Orgânicas e Células Solares de Polímero: são construídas a partir de películas finas (tipicamente 100 nm) de semicondutores orgânicos, tais como polímeros e compostos de pequenas moléculas, bem como pentaceno, polifenileno, vinileno, ftalocianina de cobre e fulerenos. A maior eficiência encontra-se entre 8% a 10%. No entanto, o interesse por este material é devido a sua flexibilidade mecânica e descartabilidade, uma vez que ele é, em grande parte, feito de plástico. Ao contrário do silício tradicional, o processo de fabricação é rentável (material de baixo custo e alto rendimento de produção), com desafios técnicos limitados (não requer condições de alta temperatura).

Figura 2.14 – Novas tecnologias PV: Gratzel (à esquerda) e Orgânica (à direita)



Fonte: (VIRIDIAN, 2011).

## 2.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA

### 2.3.1 ESCOLHA DO MATERIAL INICIAL

O silício é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, porém tem que ser produzido com alta pureza para produzir células solares de alta performance. Este elemento pode ser mono ou policristalinos. Os monocristalinos tem capacidade de

produzir células com maior eficiência energética, contudo são mais caros. A menor eficiência nas células de silício policristalino é consequência do maior nível de impurezas e das imperfeições no cristal, como os limites dos grãos entre os cristais adjacentes.

Serras de fio são utilizadas para cortar lingotes de silício monocristalino ou tijolos de silício policristalino em fatias mais finas, denominados *wafers* (pastilhas) ou lâminas. O processo de corte desperdiça silício e também introduz danos à superfície das lâminas de silício, conhecido como *danos de serra*, que tem que ser removidos no processo de fabricação da célula. A substituição das serras de fio por lâminas cobertas em diamante reduz a perda de corte e os danos à superfície.

A maioria das células fabricadas usam lâminas do tipo p com uma resistividade de 1 a 3  $\Omega$  cm. A resistividade da lâmina está diretamente relacionada à concentração de dopante de boro na superfície de silício, que é inversamente proporcional à corrente de saturação gerada dentro da pastilha de silício e, conseqüentemente, inversamente proporcional à tensão de circuito aberto da célula. Embora isto possa sugerir que concentrações mais elevadas de boro devem resultar em células solares com tensões mais altas, há um limite. O desempenho das células fotovoltaicas diminui a concentrações de boro muito elevadas devido à vida útil reduzida das transportadoras minoritárias dentro do material de silício. Esse tempo de vida se refere ao tempo que um portador de carga foto-gerado sobrevive antes de se recombinar com um portador de polaridade oposta. Isso degrada a capacidade de geração de corrente da célula fotovoltaica, apesar do efeito benéfico do aumento da dopagem de boro.

### 2.3.2 REMOÇÃO DAS SUPERFÍCIES DEFEITUOSAS

Inevitavelmente, a etapa de corte dos lingotes ou blocos de silício resulta em danos à superfície das lâminas de silício. Quando serras de fio são utilizadas, as regiões danificadas são penetradas normalmente em até 10  $\mu$ m. Danos de serra residuais resultam em uma alta recombinação de portadores de carga minoritária na superfície da lâmina de silício e reduzem o desempenho da célula solar. Por isso, são removidos cerca de 10 a 15  $\mu$ m material de cada face da lâmina, por meio da imersão em superfícies alcalinas.

O composto químico usualmente utilizado no banho químico é o hidróxido de sódio (NaOH) concentrado (~30% p/v), que é mantido a 90 °C para remover as regiões danificadas de ambas as superfícies da pastilha a uma taxa de ~2  $\mu$ m por minuto. Este processo de remoção de danos de serra também atua para remover quaisquer impurezas

metálicas das superfícies do wafer que podem ser introduzidas durante o processo de corte.

### 2.3.3 TEXTURIZAÇÃO

É um processo químico úmido que é designado a reduzir a quantidade de luz que é refletida das superfícies da lâmina de silício, ou seja, aumentar a fotocorrente gerada pela célula solar. Existem dois tipos de texturização neste processo:

#### 2.3.3.1 ÁCIDA

Normalmente, as lâminas de silício multicristalinas são texturizadas em soluções ácidas contendo ácido fluorídrico (HF) e ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) em água. O ácido nítrico oxida a superfície de silício e então o ácido fluorídrico dissolve o silício oxidado. Uma superfície de wafer texturizada por ácidos reduz o índice de refletância de 36% para aproximadamente 24% em um comprimento de onda de 400 a 1100nm.

A texturização ácida acontece utilizando um equipamento que alinha 4 a 8 lâminas de silício, os quais são transportados através da solução de texturização de modo que todas as superfícies dos wafers sejam texturizadas. A solução de texturização compreende 10-25% de concentração de HF e 40-50% de HNO<sub>3</sub> diluídos em água. É necessário controlar a temperatura e o tempo da texturização para manter um bom resultado.

#### 2.3.3.2 ALCALINA

Os wafers monocristalinos são texturizados em soluções alcalinas que interceptam o plano do silício, criando pirâmides na superfície das lâminas para diminuir as perdas de luz por refletância. Essa redução acontece devido ao efeito do salto duplo (do inglês, *double-bounce effect*), que é uma segunda chance de absorção da luz, quando a mesma incide normalmente sobre uma pirâmide e ao invés de refletir para fora, é refletida obliquamente e encontra uma pirâmide adjacente. O efeito do salto duplo na texturização é ilustrado na Figura 2.15. Como consequência à formação de pirâmides, há uma redução na reflexão da superfície de 36% em um comprimento de onda de 400 a 1100nm para 11-12%.

Figura 2.15 – Efeito da texturização: salto duplo



Fonte: (LUQUE e HEGEDUS, 2011).

A implementação da texturização alcalina é similar à remoção de dano de serras, com variações na concentração da solução alcalina e a utilização de aditivos para formar as pirâmides na superfície do wafer. Normalmente, 2% da solução é composta por sódio ou hidróxido de potássio utilizado em um banho químico a 80-90 °C para garantir uma boa taxa de formação das pirâmides. Os wafers são colocados em cassetes que suportam cerca de 100 unidades desses e todos são texturizados simultaneamente.

As banheiras de texturização têm de ser ventiladas para remover os vapores da solução alcalina quente e o gás hidrogênio gerado pela reação química. Aditivos, como Isopropanol (IPA), são necessários para que se tenha uma texturização uniforme na superfície da lâmina de silício. Um fator de custo do processo é que para altas temperaturas, o IPA tem uma alta taxa de evaporação e, por isso, alguns fabricantes escolhem por um adicional alternativo. Um bom processo de texturização cobre 100% do wafer de silício com pirâmide de 5 µm de altura.

#### 2.3.4 BANHO QUÍMICO COM HF:HCL

Antes das lâminas de silício serem transferidas para altas temperaturas, suas superfícies precisam estar limpas de todas as impurezas. Algumas destas impurezas são originadas da texturização, que libera resíduos de silício na superfície, e das impurezas do metal, que se tornam aderentes e se unem aos óxidos nativos das superfícies das pastilhas de silício. Antigamente, as pastilhas eram imersas em soluções de HF a temperatura ambiente, eram lavados em água desionizada, imersas em HCl e novamente lavados. Como uma alternativa econômica, as indústrias atuais imergem as pastilhas em uma solução combinada de HF e HCl a temperatura ambiente.

Os íons cloreto (do HCl) são efetivos quelantes dos íons metálicos. Eles agem formando complexos com os íons metálicos, prevenindo a adesão a superfície do wafer de silício. Além disso, os íons cloreto são úteis reduzindo a concentração dos íons de potássio e sódio remanescentes da texturização. Se as impurezas do metal não forem removidas da superfície da pastilha antes do processo de difusão, elas podem difundir-se com a pastilha e impactar o tempo de vida dos portadores de carga minoritários da célula solar. Então, caso haja um atraso entre o processo de limpeza e o início do processo de difusão em alta temperatura, as pastilhas têm de estar armazenadas em ambientes bastante limpos ou serem limpas novamente logo antes do processo de difusão.

### 2.3.5 DIFUSÃO DE FÓSFORO

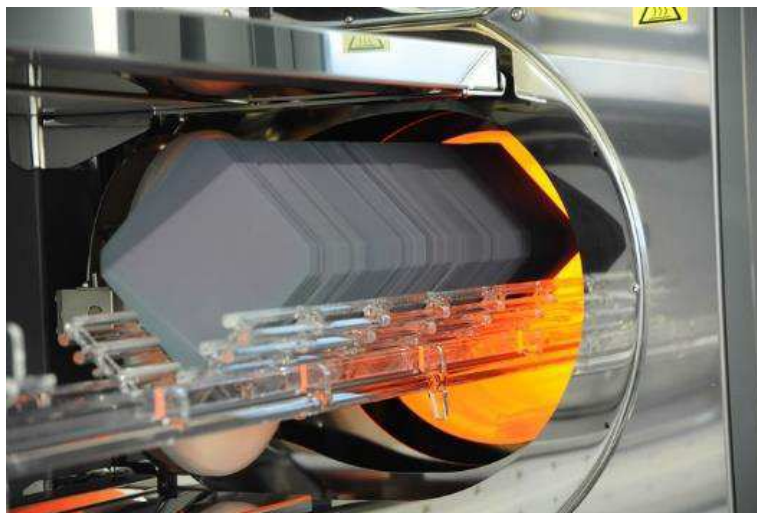
A operação de uma célula solar de silício se dá pela foto incidência absorvida pelo silício para gerar pares de elétrons-lacunas. Para extrair corrente da célula fotovoltaica, esses portadores de carga devem ser separados. Uma maneira de separá-los é formar uma junção p-n em um semicondutor. O campo elétrico formado por essa junção age coletando os elétrons em uma região negativa (tipo-n) e as lacunas na região positiva (tipo-p) do dispositivo. A maioria das células solares monocristalinas manufaturadas usam pastilhas tipo-p e requerem a formação de uma camada tipo-n para formar a junção p-n.

As camadas tipo-n são produzidas por difusão de fósforo em estado sólido, de um vidro de silicato de fósforo da superfície do wafer, a temperatura altíssimas (800-900 °C). A alta temperatura garante a penetração dos dopantes na superfície do wafer. Como a concentração dos dopantes de fósforo tipo-n difundidos é muito maior que os dopantes tipo-p, a superfície difundida se torna tipo-n. Esta camada da superfície é chamada comumente de emissor.

O processo de difusão pode ser feito usando um forno tubular em um processo de produção onde 300 a 600 wafers estão unidos em um barco como na Figura. A camada PSG é formada de uma reação de alta temperatura de cloreto de fosforila ( $\text{POCl}_3$ ), que é injetado como vapor no forno tubular. Alternativamente, os wafers são revestidos com uma fonte de fósforo, tipicamente ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), colocados em um cinto ou esteira e *convergidos* através de um forno em linha comprimindo um número de zonas quentes arranjados sequencialmente. A camada PSG nesse caso é formada ao passo que os wafers seguem através da zona de baixa temperatura no forno.

Uma alternativa à difusão em linha é usar um tubo de difusão de quartzo. Neste caso, as lâminas de silício são montadas verticalmente em barcos de quartzo como mostrado na Figura 2.16.

Figura 2.16 – Tubo de difusão de quartzo



Fonte: (PV Factory).

O processo de difusão pode ser caracterizado medindo o perfil dos dopantes de fósforo no wafer de silício, a resistência da folha da camada de dopantes de fósforo e a profundidade da junção pn. Estas propriedades do emissor impactam a qualidade fotovoltaica da célula solar, a condutividade lateral do emissor (e consequentemente o espaçamento do eletrodo de metal) e a *habilidade de contatar a superfície emissora pelo metal serigrafado*.

### 2.3.6 REMOÇÃO DA CAMADA DE ÓXIDO DE FÓSFORO

Durante a difusão do fósforo, uma camada de óxido de fósforo, chamada fosfosilicato de vidro – PSG (do inglês, phosphosilicate glass), se forma na superfície do wafer de silício. A camada PSG é essencial porque fornece uma fonte de átomos dopante de fósforo para o processo de difusão. Entretanto, o excesso da camada PSG tem que ser removido antes do processo subsequente porque contém traços de metal, que se unem à superfície durante a difusão.

Normalmente, a camada PSG é removida imergindo os wafers a temperatura ambiente em uma solução de 1-5% de ácido hidrossulfúrico (HF) e então lavada em água desionizada.

### 2.3.7 ISOLAMENTO COM PLASMA DA BORDA

A maioria dos processos de difusão de fósforo leva a difusão de fósforo em todas as superfícies da placa, incluindo a traseira e as bordas. Por isso, é necessário isolar o emissor da superfície frontal para prevenir que os elétrons foto-gerados pela junção dianteira fluam para a superfície traseira pelo fósforo difundido das bordas. Estes elétrons que fluem para a superfície traseira não contribuem para a potência de saída da célula solar.

Uma abordagem para atingir este isolamento é usar plasma para eliminar o silício indesejado difundido pelo fósforo, corroendo-o. Primeiro, remove-se quimicamente os residuais nativos ou óxidos difundidos e empilham-se os wafers de silício como se fossem moedas. Então a pilha de wafers é colocada numa câmara de plasma. Deve-se ter cuidado com a potência e o tempo de exposição ao plasma. Se a potência for muito alta ou o tempo de gravura for muito longo, o plasma iria danificar o silício resultando numa alta taxa de recombinação de junção. E se a potência for muito baixa ou o tempo de gravura for muito curto, o plasma não iria remover completamente o silício indesejado, resultando em uma resistência shunt baixa que também impactaria na eficiência elétrica da célula.

### 2.3.8 REVESTIMENTO DE NITRETO DE SILÍCIO

Um wafer de silício puro reflete mais de 30% dos raios incidentes sobre ele. Depois da texturização, isto pode ser reduzido para 11%. Porém, ao aplicar um revestimento dielétrico fino, isso pode diminuir mais ainda, se a espessura do revestimento for projetada para refletir a luz na interface silício-dielétrico defasando em 180 graus com a luz refletida pela interface dielétrico-ar. A interferência destrutiva resultante pode minimizar a reflexão em um único comprimento de onda (normalmente 600nm para células solares). Este revestimento dielétrico é chamado revestimento antirreflexo – ARC (do inglês, *AntiReflection Coating*). Quase todas as células solares impressas utilizam nitreto de silício como ARC porque, em complemento à redução de reflexão, o nitreto de silício pode reduzir a recombinação de portadores na interface silício-dielétrico. Na Figura 2.17 é mostrada a ferramenta PECVD em linha utilizada na UNSW para depositar camadas de nitreto de silício.



Figura 2.17 – Ferramenta Inline PECVD usada na UNSW



Fonte: (PV Factory).

Normalmente, o nitreto de silício é depositado usando deposição química por vapor de plasma melhorado - PECVD (do inglês, *plasma-enhanced chemical vapour deposition*). Nesse processo, os wafers são alocadas dentro do plasma e os gases de processamento são excitados por campos eletromagnéticos. Existem dois tipos diferentes de excitação que podem ser utilizados na ferramenta PECVD: plasma direto ou remoto. No primeiro, os wafers são alocados diretamente com o plasma. No segundo, o plasma é excitado a uma certa distância dos wafers, o que elimina os danos na superfície do wafer por bombardeamento de íons. As ferramentas de PECVD são geralmente grandes e complexos que requerem um sistema de segurança rigorosos.

### 2.3.9 IMPRESSÃO EM TELA

#### 2.3.9.1 SUPERFÍCIE INFERIOR

A serigrafia é uma maneira de depositar um material (por exemplo, uma pasta) sobre uma superfície de acordo com um padrão formado numa tela que compreende uma rede de fios ou cordões em malha. O padrão é formado em um polímero, chamado uma emulsão, que é espalhado em uma camada sobre e sob a tela. A emulsão é sensível à luz e quando irradiada de acordo com o padrão endurece e se liga à tela. As regiões não irradiadas podem então ser lavadas por pulverização com água deixando aberturas na emulsão. A pasta pode ser empurrada através das aberturas na emulsão utilizando um *rodo* para formar um padrão de pasta na superfície do wafer sob a tela. Para células

fotovoltaicas serigrafadas, as pastas utilizadas contêm componentes metálicos e orgânicos, tais como ligantes e solventes, sendo os componentes orgânicos necessários para permitir que as pastas sejam serigrafadas. Depois de as pastas terem sido impressas na célula solar, os componentes orgânicos precisam de ser removidos por secagem antes da pasta poder ser "queimada" para formar um contacto metálico.

A maioria da superfície traseira da célula é serigrafada com pasta de alumínio para formar o eletrodo traseiro, no entanto barras de barramento, ou segmentos curtos barramento chamado abas, também são impressos com pasta de prata para permitir que as células para ser interligado por solda.

#### 2.3.9.2 SUPERFÍCIE SUPERIOR

A prata é um condutor excelente e é usada para os contatos de superfície metálicos para células solares com tela impressa. No entanto, a pasta de prata é o segundo fator de custo mais elevado (após a lâmina de silício), devido ao alto custo da prata. Muitas das questões associadas com a serigrafia da pasta de prata são as mesmas que para a serigrafia de pasta de alumínio. O design das telas, entretanto, é mais crítico. A largura das linhas de prata impressas tem um impacto importante na percentagem da superfície frontal da célula que é coberta pelo metal, o que resulta em "perdas de sombreamento" causadas pela luz de bloqueio de contacto para a célula solar. As linhas de metal, que normalmente são chamadas de dedos, têm tipicamente uma largura de 55 a 80  $\mu\text{m}$  e transportam a corrente das regiões periféricas da célula para as barras mais largas que correm perpendicularmente aos dedos.

As grelhas de metal dianteiras são tipicamente impressas com 2 ou mais barramentos, sendo que o maior número de barramentos requer uma altura reduzida dos dedos impressos por tela para uma perda resistiva constante. Quando as células são interconectadas para formar módulos, a fita de interconexão é soldada às barras e se conecta aos contatos do tipo p na superfície traseira da célula adjacente em uma seqüência de células.

O padrão de prata é impresso directamente sobre o revestimento anti-reflexo de nitreto de silício e, portanto, não está em contacto eléctrico directo com o silício. A conclusão do contato frontal é realizada quando o contato é co-disparado em um forno de queima em linha junto com o contato traseiro.

### 2.3.10 FORNO DE QUEIMA DOS CONTATOS METÁLICOS

Após a impressão de tela traseira (alumínio e prata) e frente (prata), as células são queimadas em um forno infravermelho em linha onde experimentam uma temperatura máxima de queima na faixa de 750-870 °C por ~5 segundos. Este processo de queima resulta na formação do campo de superfície traseira e do eletrodo de alumínio, permitindo que a pasta de prata do lado frontal ataque através da camada de nitreto de silício para formar um contato ôhmico com o emissor do tipo-n de superfície frontal. A temperatura de queima depende: do tipo de pasta utilizada, de como elas foram serigrafadas, das propriedades do emissor e das propriedades do revestimento anti-reflexo de nitreto de silício. Normalmente, as células são queimadas com o alumínio impresso em contacto com a correia do forno.

Os fornos de queima têm várias zonas de aquecimento e arrefecimento e estão equipados com elementos de aquecimento infravermelhos nas zonas de aquecimento. As zonas de aquecimento iniciais podem ser utilizadas para volatilizar os solventes de pasta e queimar o ligante orgânico utilizado nas pastas. As restantes zonas de aquecimento podem ser ajustadas para obter um perfil de disparo desejado para as células. As correias podem ser metálicas ou cerâmicas e ser concebidas para uma ou mais faixas de células. As velocidades de rampa rápidas requerem tipicamente velocidades de correia rápidas, que determinam o comprimento total e o rendimento do forno de queima. Consequentemente, os fornos de queima são tipicamente muito longos, o que impacta o custo do processo devido a uma maior pegada na fábrica. É importante fornecer um suprimento de oxigênio suficiente durante a queima para manter no lugar a camada de pasta de alumínio aquecida.

## 3 FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO

### 3.1 PV FACTORY

#### 3.1.1 HISTÓRICO

A criação do *PV Factory* (do inglês, Fábrica Fotovoltaica) envolveu a interação da *Linha de Produção Virtual* da Universidade de Nova Gales do Sul (UNSW), na Austrália, com a plataforma do software na nuvem da *PV Lighthouse*.

A linha de produção virtual era um programa autônomo que simulava a linha de produção de células fotovoltaicas. Este software foi criado em 2001 por Stuart Wenham na UNSW e financiado pelo Conselho Australiano de Pesquisa, com o objetivo de educar estudantes e engenheiros sobre essa tecnologia. Esta é uma proposta atraente devido às despesas e perigos da produção de células solares.

Os algoritmos que representam cada etapa da produção foram desenvolvidos por Anna Bruce e Stuart Wenham a partir de dados experimentais fornecidos pelas empresas: Eurosolare, BP Solar, Tideland Signal e Suntech Power. Estes algoritmos fizeram a relação do estado físico de uma célula fotovoltaica às condições utilizadas em cada passo de produção. Por exemplo, uma equação particular daria a dependência da espessura do revestimento antirreflexo de uma célula com a potência de plasma utilizada quando se deposita o revestimento. Os resultados dos algoritmos foram então usados para criar o arquivo de entrada para o programa de simulação PC1D, que seria executado para determinar a eficiência da célula. No total, o programa usou cerca de 70 variáveis de entrada e 100 equações para captar as relações entre as condições de produção e o comportamento elétrico da célula solar.

Então em 2003 a Linha de Produção Virtual estava pronta para ser utilizada. O software era utilizado como base dos cursos de graduação em Fotovoltaicos na UNSW. Em consequência do grande sucesso e popularidade entre os estudantes, ele vem sendo utilizado neste local até os dias de hoje. Também está sendo usado na Universidade Estadual do Arizona (ASU), nos Estados Unidos, e por empresas de fabricação de células fotovoltaicas para treinar engenheiros.

Em função das mudanças rápidas na indústria fotovoltaica (as células aumentaram de 15% para 18% de eficiência entre 2001 e 2014), os algoritmos da Linha de Produção Virtual tiveram de ser revisados continuamente. Liderados pela Alison Lennon, nova informação foi adicionada e o conteúdo antiquado foi removido. Mantê-lo atualizado foi um grande investimento. Em 2013, a UNSW decidiu modernizar a Linha de Produção Virtual fundindo-o à plataforma de software online da *PV Lighthouse*. Assim foi realmente o início do projeto de criação da *PV Factory*, um programa na nuvem que poderia executar os algoritmos da Linha de Produção Virtual da UNSW e também ser capaz de adotar novos algoritmos para etapas de produção e linhas de produção inteiras. Com a inclusão da tecnologia da nuvem, alguns outros recursos foram desenvolvidos, como por exemplo: um portal de ensino, seção de avisos e tabelas de classificação (que gera competição entre os alunos e um melhor aprendizado).

Com o financiamento do *PV Lighthouse*, da UNSW e do Centro Australiano de Fotovoltaica Avançada (ACAP), o projeto de criação da *PV Factory* começou em fevereiro de 2014. O programa fez uma versão limitada em agosto de 2014 para testes beta e foi lançado gratuitamente em janeiro de 2015. Atualmente, a *PV Factory* é livremente acessível a todos os contribuintes.

### 3.1.2 SOFTWARE EM NUVEM

Softwares na nuvem estão sendo cada vez mais usados para muitas aplicações. Esta tecnologia traz muitos benefícios práticos, que incluem o controle de versão, a facilidade de atualização de software, segurança (algoritmos confidenciais, por exemplo) e o monitoramento de aprendizagem. O uso de simulações online estende este conjunto de ferramentas de aprendizagem para incluir a gamificação, em que os participantes na simulação podem competir uns com os outros em termos de uma métrica mensurável. No caso do *PV Factory*, a métrica selecionada é a eficiência da célula e os usuários exploram como eles podem mudar os processos químicos e físicos para melhorar a eficiência celular. Conforme os processos são otimizados, a expectativa é que os estudantes aprendam o que é crítico para a otimização dos processos individuais. Uma métrica mensurável igualmente relevante seria a lucratividade, tal como explorada por Cotter em seu *Virtual Manufacturing Execution System (VMES)*.

Os usuários acessam o PV Factory usando um navegador web, como ilustrado na Figura 3.1. O software é executado em um servidor, garantindo que os algoritmos de simulação permaneçam seguros. Para garantir tempos de resposta rápidos, algumas funcionalidades são escritas em JavaScript, que são automaticamente baixadas e armazenadas em cache no navegador para minimizar o número de pedidos e o volume de informações enviadas do e para o servidor através da internet.

Figura 3.1 - Página inicial do website do software virtual PV Factory



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.1.3 FUNCIONAMENTO

O PV Factory tenta reproduzir o ambiente de produção em que um engenheiro da área trabalharia. Em primeiro lugar, o escritório onde o engenheiro planeja seu trabalho, gerencia os lotes das células que foram produzidas e compara o desempenho com os registros históricos para sua linha de produção e concorrentes (o quadro de classificação,

do inglês, *leaderboard*). O estagiário de engenharia pode então fazer lotes de células solares na Linha de Produção, escolhendo desde o tipo do material de silício e depois selecionando os parâmetros para cada uma das etapas de processamento que são descritas como uma seqüência de ícones, como pode ser visto na Figura 3.2. Ele pode processar cada lote passo a passo, caracterizando as células em vários estágios no Laboratório de Caracterização (do inglês, *Characterisation Lab*).

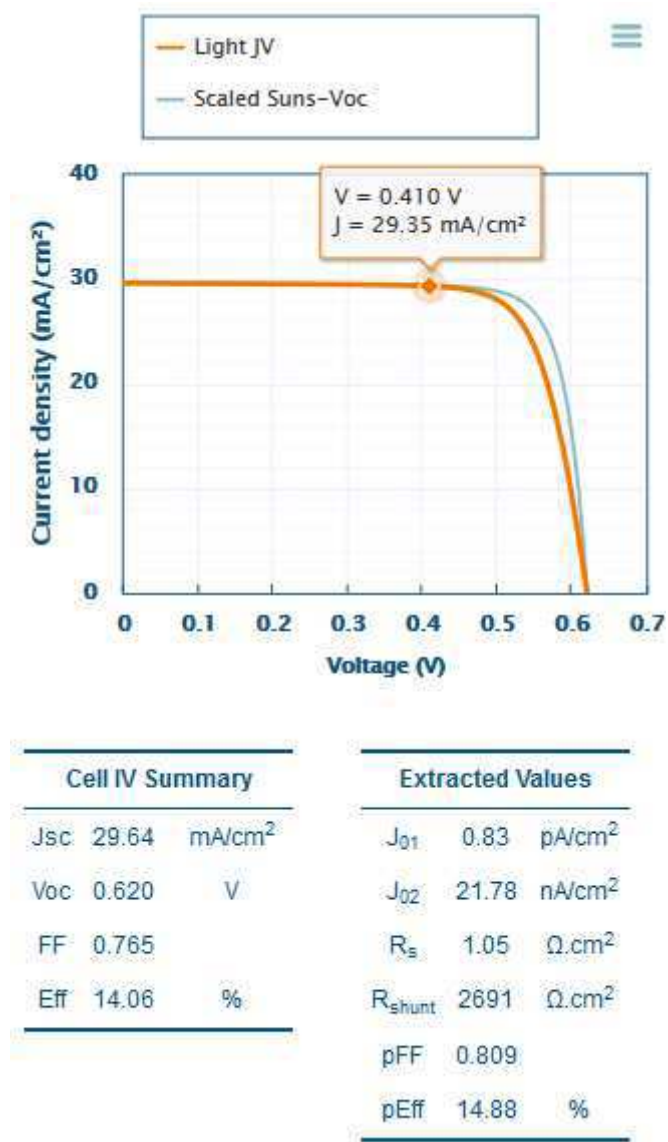
Figura 3.2 - Sequência das etapas de processamento, em que as etapas concluídas são indicadas em verde, a etapa atual em vermelho e as etapas seguintes em azul



Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma vez que um lote de células é fabricado, as respostas de tensão e de corrente de cada célula são medida usando um teste IV localizado no servidor e os resultados são apresentados ao engenheiro para analisar a fim de determinar as áreas em que o desempenho da célula podem ser melhoradas. Características como curvas corrente-tensão (Figura 3.3), eficiência, perfis de refletância e de dopagem podem ser medidos em células selecionadas usando o Laboratório de Caracterização. A qualquer momento, o engenheiro pode usar a Biblioteca PV Factory para aprender sobre os diferentes processos.

Figura 3.3 – Parte do Laboratório de Caracterização, ilustrando o quadro resumido de características e a curva densidade de corrente vs Tensão



Fonte: Elaborada pelo autor.

Há poucos livros atualizados sobre fabricação de células fotovoltaicas de silício disponíveis devido à rápida evolução da engenharia de processo nos últimos 10 anos, por isso, recursos técnicos online que podem ser prontamente atualizados são, sem dúvida, a melhor maneira em que divulgar informações.



### 3.1.4 LINHA DE PRODUÇÃO

A linha de produção de células fotovoltaicas de silício da UNSW possui doze etapas, começando pela escolha do material inicial, como sequenciado na Figura 3.4.

Cada processo de produção contém uma série de parâmetros de entrada que afetam propriedades do lote de células. Alguns valores de entradas são inseridos com uma barra de rolagem horizontal, outros em caixa de texto. Na Figura 3.5 é ilustrada um exemplo de entradas em um processo aleatório de texturização.

Como citado anteriormente, o software representa a situação em uma fábrica de células solares, onde existem muitos parâmetros de entradas para cada etapa de produção. Considerando a inserção de entradas (aproximadamente 70) e as interações que acontecem entre elas, seria preciso um número excessivo de lotes para determinar o valor ideal para cada entrada. Em vez disso, e como na realidade, o melhor meio para otimizar a eficiência celular é através de compreensão da física do dispositivo e experimentação para realizar a análise de perda.



Fonte: (ABBOTT et al., 2015).

Figura 3.5 – Ícones de navegação para uma das doze etapas da linha de produção da UNSW.

| Random pyramid texture bath |           |     |
|-----------------------------|-----------|-----|
| NaOH concentration          | 2         | %   |
| Isopropanol concentration   | 5         | %   |
| Etch temperature            | 100       | °C  |
| Etch time                   | 20        | min |
| Exhaust flow                | very high | ▼   |

Fonte: (ABBOTT et al., 2015).

## 4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

### 4.1 METODOLOGIA

A metodologia de estudo deste trabalho consiste, utilizando o software PV Factory, na variação manual dos parâmetros de entrada das etapas da linha de fabricação de células fotovoltaicas de silício da UNSW para que fossem observadas as informações de saída das mesmas, no caso, características físicas e elétricas.

Inicialmente, faz-se necessário adotar padrões nos parâmetros de entrada em cada uma das etapas e criar um lote referência de células solares, o qual serão utilizados para fins comparativos posteriormente. Assim sendo, para esses valores de entrada de referência existem valores de saída de referência relacionados, os quais correspondem as características físicas e elétricas da célula referência.

No Apêndice A deste trabalho podem ser vistas as etapas do processo de fabricação com seus respectivos parâmetros de entrada e as condições possíveis para os mesmos.

Os passos seguintes acontecem, individualmente, nas etapas do processo de produção. As variáveis de cada etapa são modificadas individualmente e as consequências destas variações são analisadas. Entende-se por “consequências” as alterações nas características físicas (espessura, resistividade, cristalinidade etc.) e nas características elétricas (curva IV, fator de preenchimento, eficiência etc.) das células fotovoltaicas. Por fim, os resultados são analisados e interpretados.

### 4.2 LOTE REFERÊNCIA DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Para que haja a possibilidade de comparar as células fabricadas virtualmente, é fundamental que um processo de produção de um determinado lote de células fotovoltaicas seja referência. Para isso, resolveu-se utilizar os valores padrões, que já estão inseridos desde o primeiro acesso ao software, como referência para os parâmetros de entrada de cada etapa do processo de fabricação. Os parâmetros para o lote referência de células solares podem ser visualizados no Apêndice A.

Com os valores desses parâmetros, o software PV Factory caracteriza o lote referência de células fotovoltaicas. Esta caracterização é composta pelas médias das características físicas e elétricas das células fotovoltaicas de um determinado lote. O software virtual também sequencia os lotes enumerando-os. O lote tomado como referência foi o Lote #11 e suas características podem ser visualizadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Caracterização do Lote #11 (Referência)

| <b>Característica</b>                     | <b>Unidade</b>          | <b>Valor</b> |
|---|-------------------------|--------------|
| <b>Características Físicas</b>            |                         |              |
| <b>Espessura média</b>                    | $\mu\text{m}$           | 199,6        |
| <b>Resistividade média</b>                | $\Omega\cdot\text{cm}$  | 0,996        |
| <b>Espessura depois do banho químico</b>  | $\mu\text{m}$           | 168          |
| <b>Altura média das micropirâmides</b>    | $\mu\text{m}$           | 2,6          |
| <b>Cobertura média das micropirâmides</b> | %                       | 43,9         |
| <b>Características Elétricas</b>          |                         |              |
| <b>Voc</b>                                | V                       | 0,62         |
| <b>Jsc</b>                                | $\text{mA}/\text{cm}^2$ | 29,54        |
| <b>FF</b>                                 |                         | 0,765        |
| <b>Eficiência</b>                         | %                       | 14,02        |
| <b>Células produzidas</b>                 | Un.                     | 30 de 30     |

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir deste ponto, as etapas iniciais da linha de produção das células fotovoltaicas foram analisadas. As condições de cada parâmetro foram variadas, para que se fosse observada a caracterização do lote de células fabricadas.

### 4.3 MATERIAL INICIAL

A primeira etapa consiste na escolha do material inicial, na qual os parâmetros de entrada e o intervalo em que estes podem ser variados estão informados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Material Inicial

| <b>Etapa</b>            | <b>Fatores</b>                                     | <b>Unidade</b> | <b>Variação</b>                                |
|-------------------------|--|----------------|--|
| <b>Material Inicial</b> | <b>Quantidade de lâminas de silício produzidas</b> | Un.            | 1 a 30   |
|                         | <b>Cristalinidade</b>                              |                | Silício mono ou multicristalino                |
|                         | <b>Método de obtenção das lâminas de silício</b>   |                | CZ padrão; CZ de alta performance; Fusão zonal |
|                         | <b>Tipo de serra</b>                               |                | Fio padrão; fio diamantado                     |
|                         | <b>Espessura</b>                                   | μm             | 160, 180, 200, 250                             |
|                         | <b>Resistividade</b>                               | Ω·cm           | 0,3; 1,0; 3,0                                  |

Fonte: Elaborada pelo autor.

A quantidade de lâminas de silício produzidas por lote teve seu valor fixado em 30 unidades para que as comparações tivessem melhores resultados. O silício utilizado foi monocristalino para todas as simulações realizadas, visto que há diferença entre os processos de produção que utilizam silício mono e multicristalino.

As simulações iniciaram-se pelo método de obtenção e seguiram até a mudança na resistividade das lâminas de silício, variando um parâmetro de cada vez. Todas as caracterizações dos lotes simulados referentes à esta seção estão dispostas no Apêndice B.

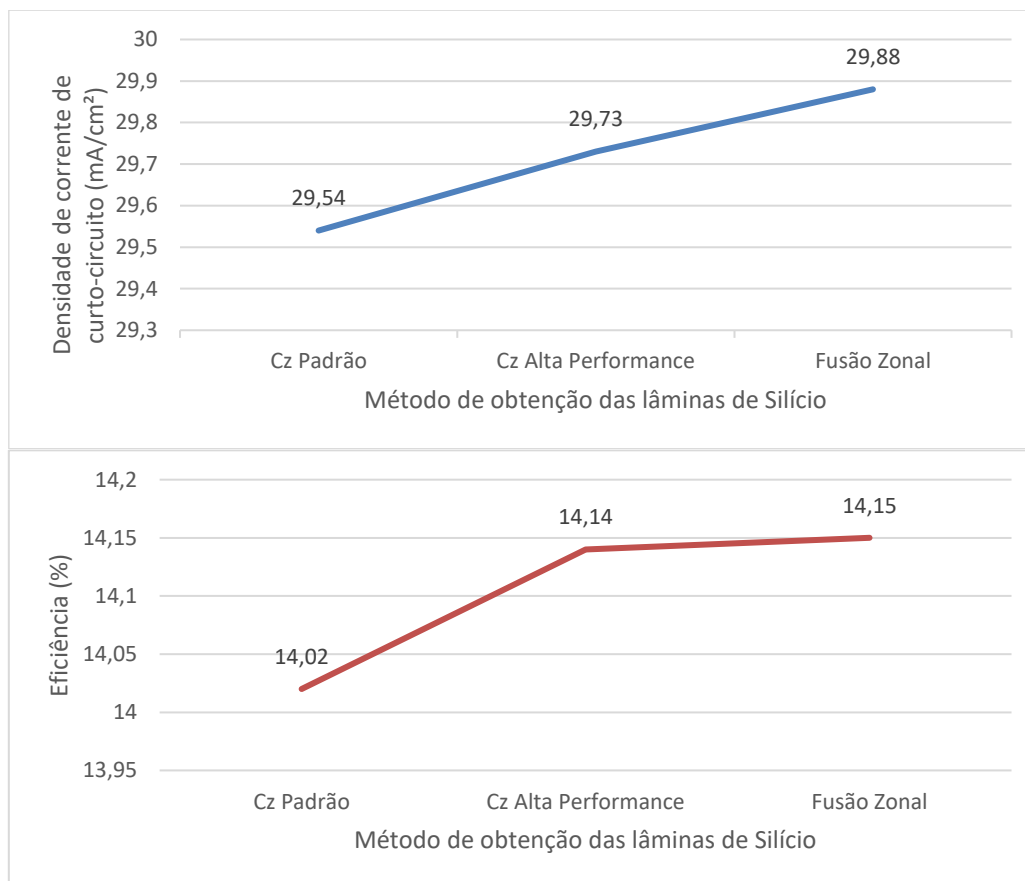
#### 4.3.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

- Modo de obtenção das lâminas de silício

Nas simulações realizadas, pode-se perceber que a densidade de corrente de curto-circuito das células solares produzidas aumenta ao passo que as lâminas de silício são obtidas com métodos mais recentes. Quando a eficiência é comparada, apenas o método

do Cz padrão possui um rendimento baixo diante das demais. Estes comportamentos são apresentados nos gráficos da Figura 4.1.

Figura 4.1 – Gráficos da influência do modo de obtenção das lâminas de silício



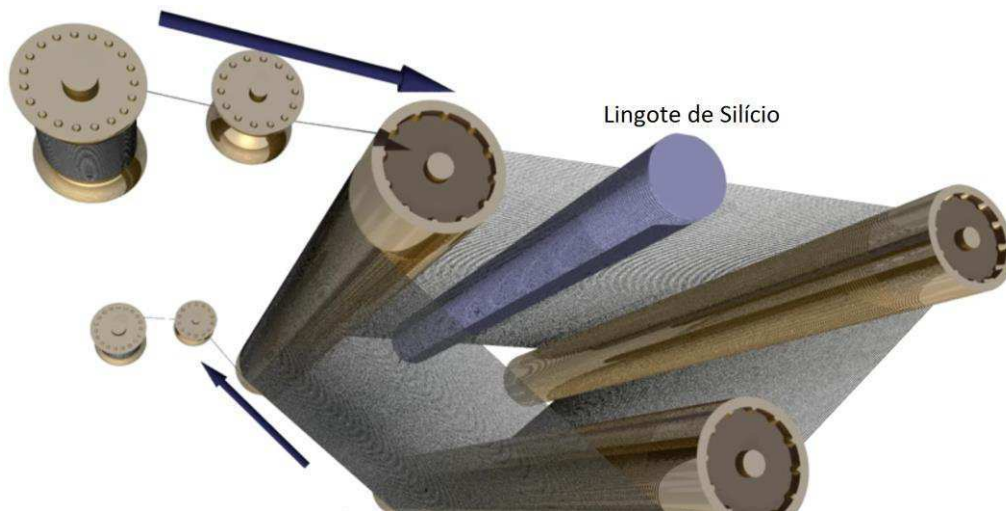
Fonte: Elaborada pelo autor.

- Tipo de Serra

O processo de corte do lingote de silício em lâminas é feito com fios de serra e está ilustrado na Figura 4.2. Esses fios podem ser normais ou cobertos com diamante. A Figura 4.3 mostra a ampliação da Figura 4.2 com o foco nos fios diamantados.

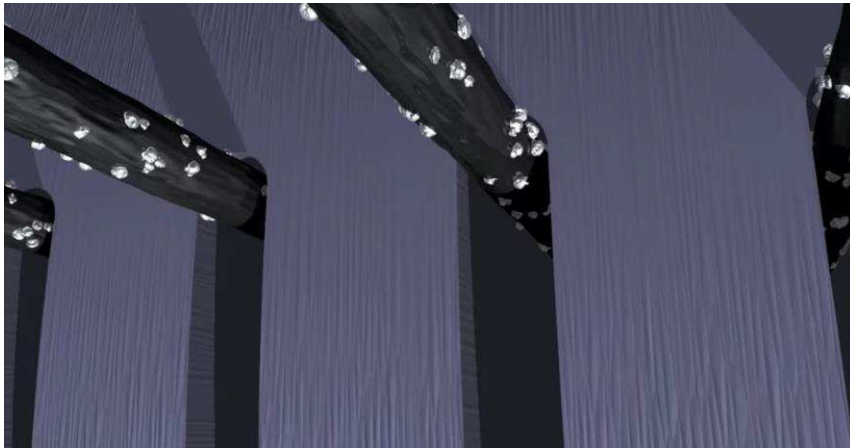
Individualmente, não é possível notar influência do tipo de corte nas características físicas e elétricas analisadas nas células fotovoltaicas. Vale salientar de que existem outras características desses tipos que, entretanto, não foram estudadas neste trabalho.

Figura 4.2 – Corte de um lingote de silício em lâminas



Fonte: Adaptado de (MicroChemicals).

Figura 4.3 – Corte feito com fios de serra diamantados



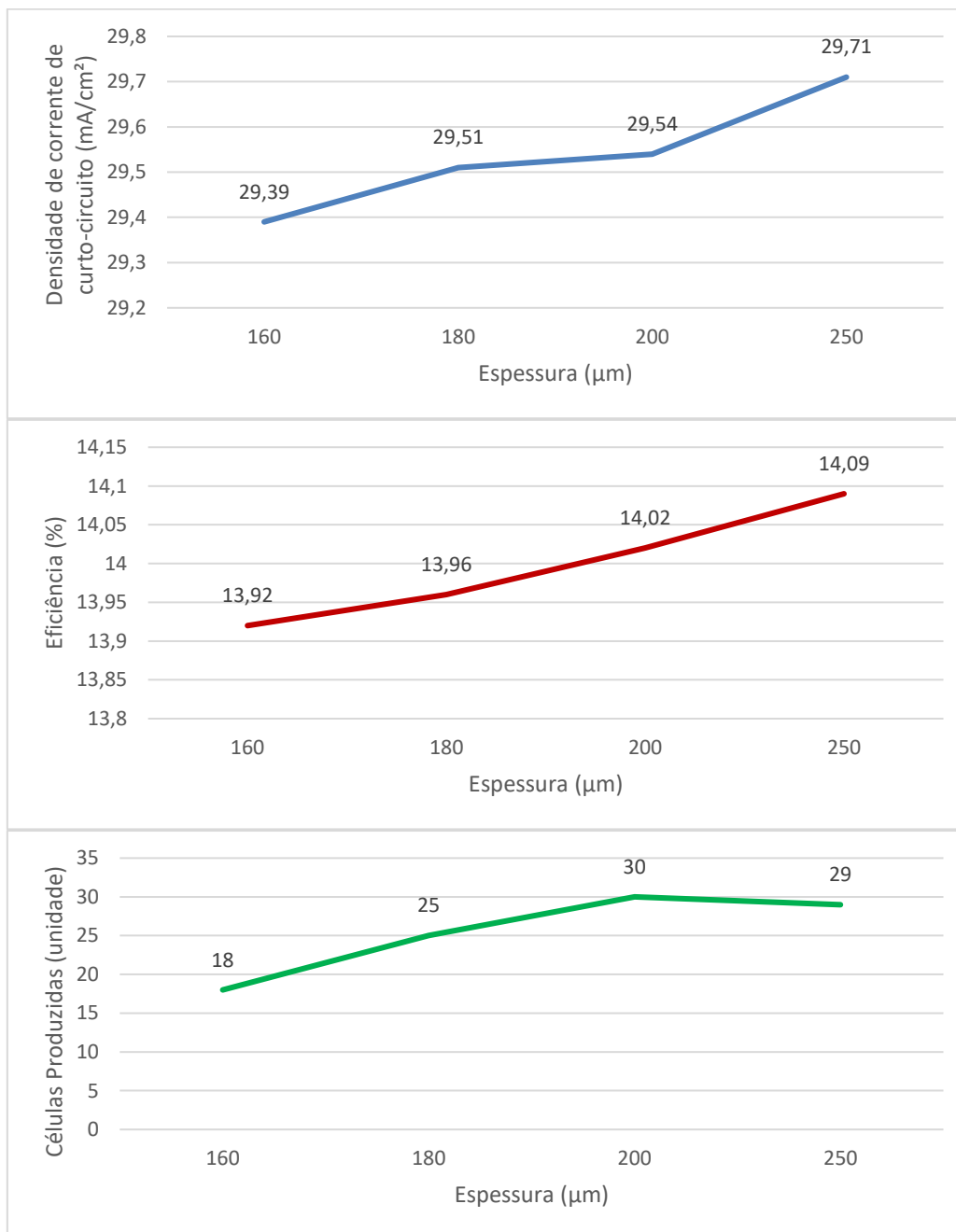
Fonte: Adaptado de (MicroChemicals).

- Espessura

Com o aumento da espessura, maiores são a densidade de corrente de curto-circuito, a eficiência e a quantidade de células produzidas com sucesso no final do processo. Na Figura 4.4 mostram-se estes resultados.

Os lotes simulados com células de 250  $\mu\text{m}$  de espessura são 0,17% mais eficientes que lotes com células de 160  $\mu\text{m}$ . Outra característica a ser observada é a fragilidade das células dos lotes com células menos espessas. Para células de 160  $\mu\text{m}$ , o lote produzido possuiu apenas 18 células fabricadas, enquanto que para células de 180  $\mu\text{m}$ , 25 foram produzidas.

Figura 4.4 – Gráficos da influência da espessura da lâmina de silício

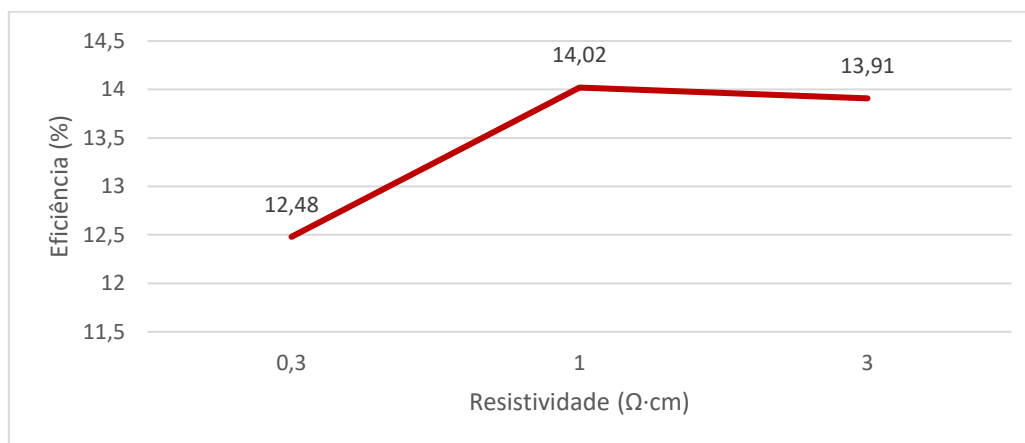


Fonte: Elaborada pelo autor.

- Resistividade

Como pode ser visualizado na Figura 4.5, as células simuladas com resistividade de  $0,3 \Omega \cdot \text{cm}$  são bem menos eficientes (aproximadamente 1,50%) que células com  $1,0$  ou  $3,0 \Omega \cdot \text{cm}$ .

Figura 4.5 – Gráfico da influência da resistividade das lâminas de silício



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.4 REMOÇÃO DE SUPERFÍCIES DEFEITUOSAS

A etapa de corte dos lingotes de silício em lâminas gera imperfeições em ambas as superfícies de cada lâmina. Para que estes defeitos sejam removidos, é necessário que sejam retiradas partes das superfícies das lâminas com um banho químico contendo hidróxido de sódio (NaOH). Conseqüentemente, a espessura da célula fotovoltaica produzida será reduzida. Em seguida, é feito um banho com água deionizada para limpeza. Os parâmetros de entrada e o intervalo em que eles podem ser variados nessa etapa estão informados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Remoção das Superfícies Defeituosas

| Etapa | Fatores                | Unidade | Varição | Referência |
|-------|------------------------|---------|---------|------------|
| 2     | Concentração de NaOH   | %       | 20 a 40 | 30         |
|       | Temperatura            | °C      | 0 a 90  | 50         |
|       | Tempo do banho químico | min     | 0 a 40  | 10         |
|       | Tempo de Limpeza       | min     | 0 a 10  | 5          |

Fonte: Elaborada pelo autor.

Esta etapa é meramente ilustrada nas Figuras 4.6.



Figura 4.6 – Imagens ilustrativas do banho químico para remoção das superfícies defeituosas



Fonte: Adaptado de (MicroChemicals).

#### 4.4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

- Concentração de NaOH

Com os valores de referência e variando-se apenas a concentração de hidróxido de sódio, não foi possível observar influência nas características físicas e elétricas analisadas nas células fotovoltaicas.

- Temperatura

É possível reparar que o aumento da temperatura é diretamente proporcional à perda de espessura, à densidade de corrente de curto-circuito, à eficiência e à fragilidade

das células produzidas.

Pode-se perceber nos gráficos da Figura 4.7 que a espessura final da célula produzida é menor com o aumento da temperatura e as células se tornam aproximadamente mais eficientes. No entanto, o aumento gradativo da temperatura faz com que ocorra a quebra de mais células no processo.

A espessura média ótima a ser removida nesse processo é de 10 a 15  $\mu\text{m}$  em cada superfície da célula. Então, como a espessura inicial de referência é de 200  $\mu\text{m}$ , a faixa da temperatura ótima para que seja retirada 20 a 30  $\mu\text{m}$  desta espessura é de 40 a 50  $^{\circ}\text{C}$ . A maior eficiência encontrada com a otimização deste processo foi de 13,94%

- Tempo do banho químico

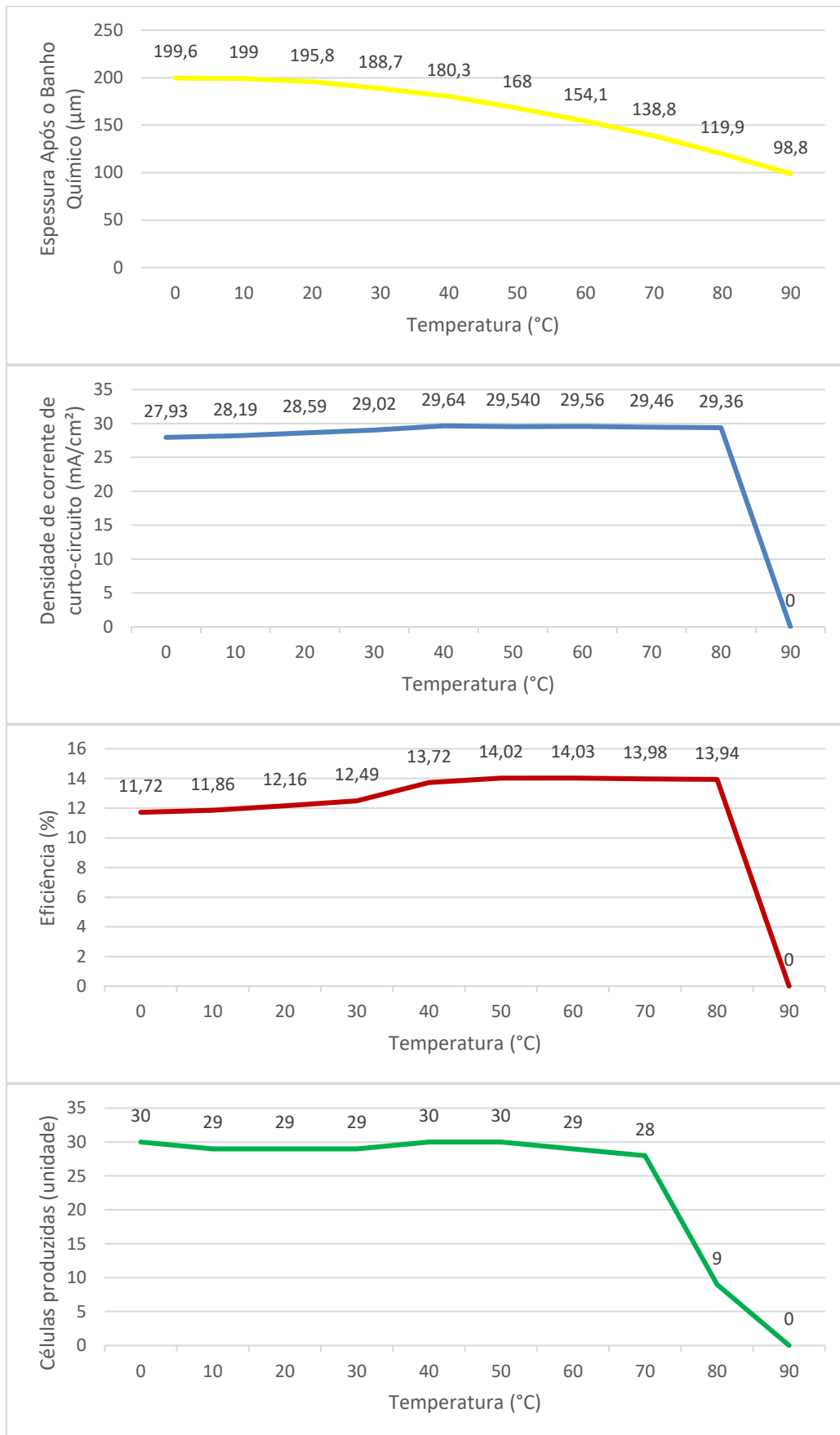
O comportamento do tempo em que as lâminas de silício ficam imersas no banho químico é similar ao da variação da temperatura. Um tempo maior resulta em valores crescentes para: a redução de espessura, a densidade de corrente de curto-circuito, a eficiência e a quantidade de células quebradas no processo. Isto pode ser visualizado na Figura 4.8.

A faixa o tempo ótimo para o banho químico para que seja retirada 20 a 30  $\mu\text{m}$  de espessura é 5 a 10 minutos. A maior eficiência encontrada com a otimização deste processo foi de 14,02%

- Tempo de Enxague

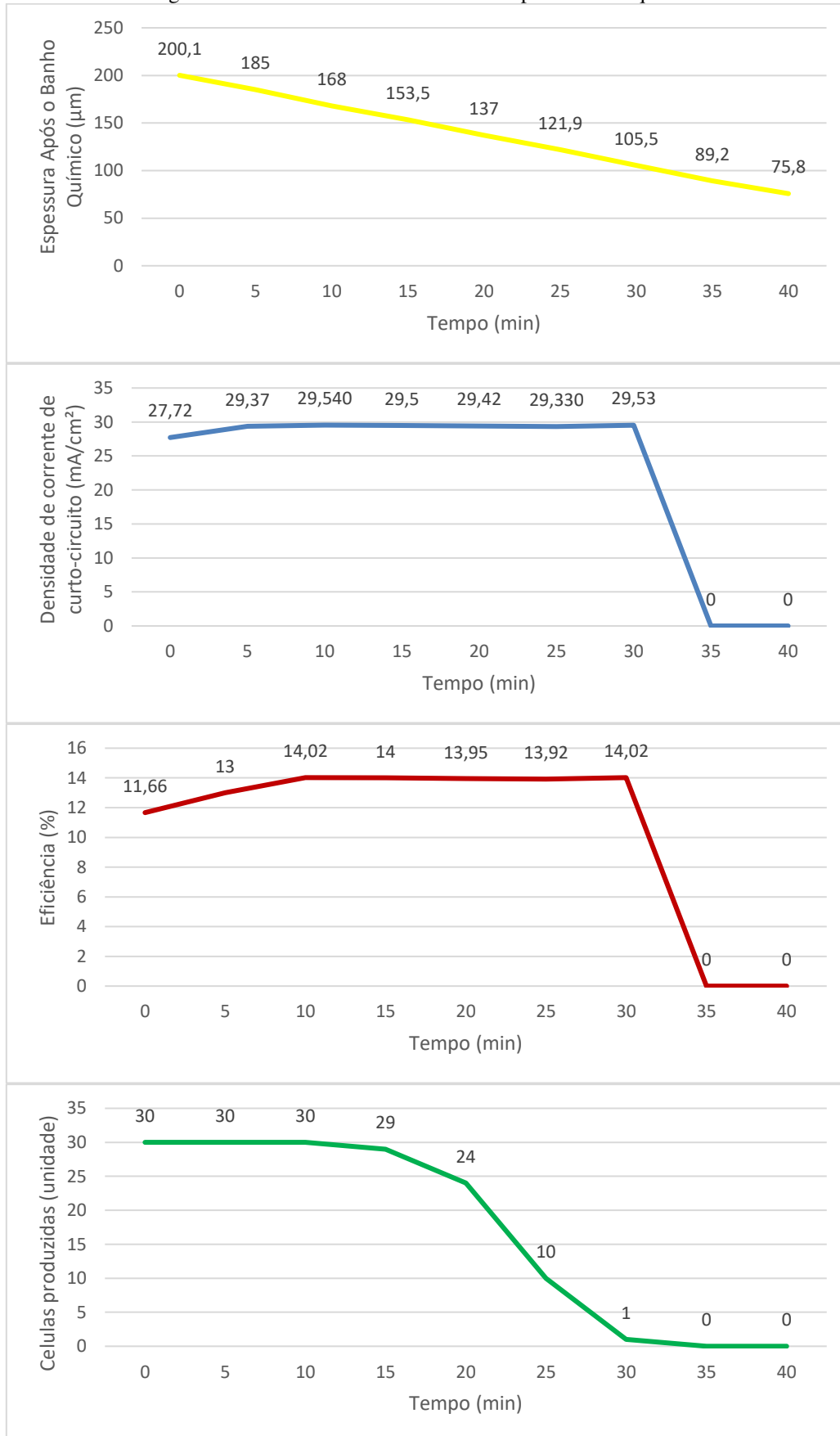
Individualmente, não foi possível notar influência da variação do tempo de limpeza nas características físicas e elétricas analisadas das células fotovoltaicas nas simulações.

Figura 4.7 – Gráficos de influência da temperatura do banho químico



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.8 – Gráficos de influência do tempo do banho químico



Fonte: Elaborada pelo autor

## 4.5 TEXTURIZAÇÃO

Essa etapa é composta pela imersão das lâminas de silício a soluções contendo hidróxido de sódio e isopropanol. Diferentemente do processo anterior, as concentrações de NaOH são menores. A texturização é caracterizada pela formação de micropirâmides nas superfícies das lâminas para reduzir o índice de reflexão da radiação solar. Os parâmetros de entrada e o intervalo em que estes podem ser variados estão informados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Texturização

| Etapa | Fatores               | Unidade                     | Variação | Referência                              |       |
|-------|-----------------------|-----------------------------|----------|---|-------|
| 3     | Texturização Alcalina | Concentração de NaOH        | %        | 1 a 3                                   | 2     |
|       |                       | Concentração de Isopropanol | %        | 0 a 10                                  | 5     |
|       |                       | Temperatura                 | °C       | 50 a 100                                | 70    |
|       |                       | Tempo do banho químico      | min      | 0 a 30                                  | 20    |
|       |                       | Fluxo de escape             |          | Nenhum, baixo, médio, alto e muito alto | Médio |

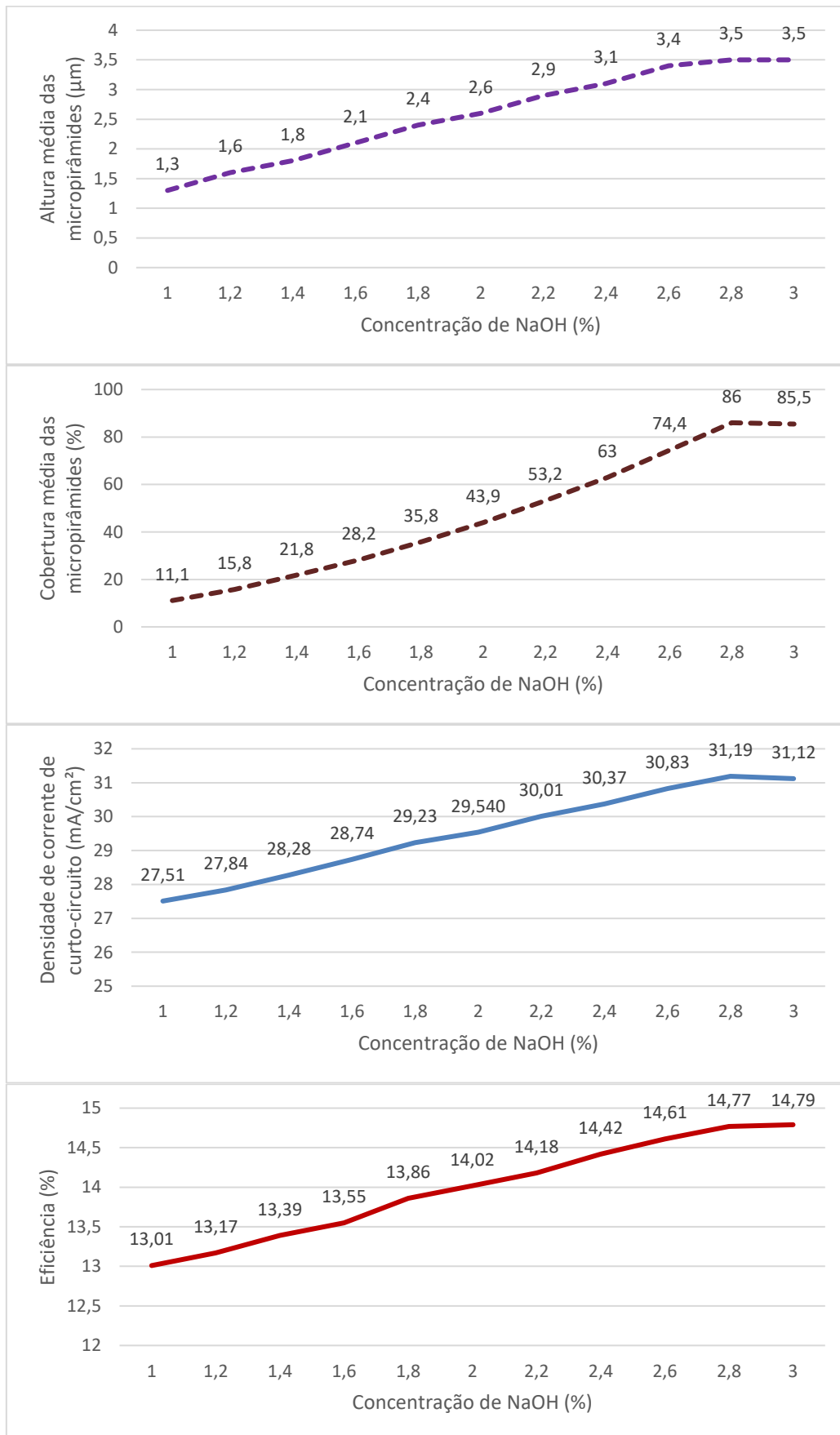
Fonte: Elaborada pelo autor

### 4.5.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

- Concentração de NaOH

Os resultados para a variação da concentração de hidróxido de sódio pode ser visto na Figura 4.9. Nota-se que a altura e a cobertura das pirâmides nas células apresentam um comportamento similar. Esses parâmetros aumentam gradualmente com o aumento da concentração de NaOH, assim como a densidade de corrente de curto-circuito e a eficiência. A altura média das micropirâmides e a cobertura média alcançaram cerca de 3,5  $\mu\text{m}$  e 85,5%, respectivamente. A máxima eficiência encontrada foi de 14,79%.

Figura 4.9 – Gráficos de influência da concentração de NaOH



Fonte: Elaborada pelo autor

- Concentração de Isopropanol

Os resultados das simulações podem ser analisados nos gráficos da Figura 4.10. Pode-se observar que o aumento da concentração de isopropanol provoca, inicialmente, um crescimento na cobertura das pirâmides, na densidade corrente de curto-circuito e na eficiência das células simuladas. Entretanto, não há influência na altura das micropirâmides até um certo ponto, em que a concentração se encontra entre 5 e 6%. A partir deste ponto ótimo, no qual as características observadas possuem os melhores valores, estes valores começam a serem minimizados. Os valores máximos para a altura das micropirâmides e a cobertura média destas na célula foram de 2,6  $\mu\text{m}$  e 74,6%, respectivamente. A maior eficiência encontrada foi de 14,02%.

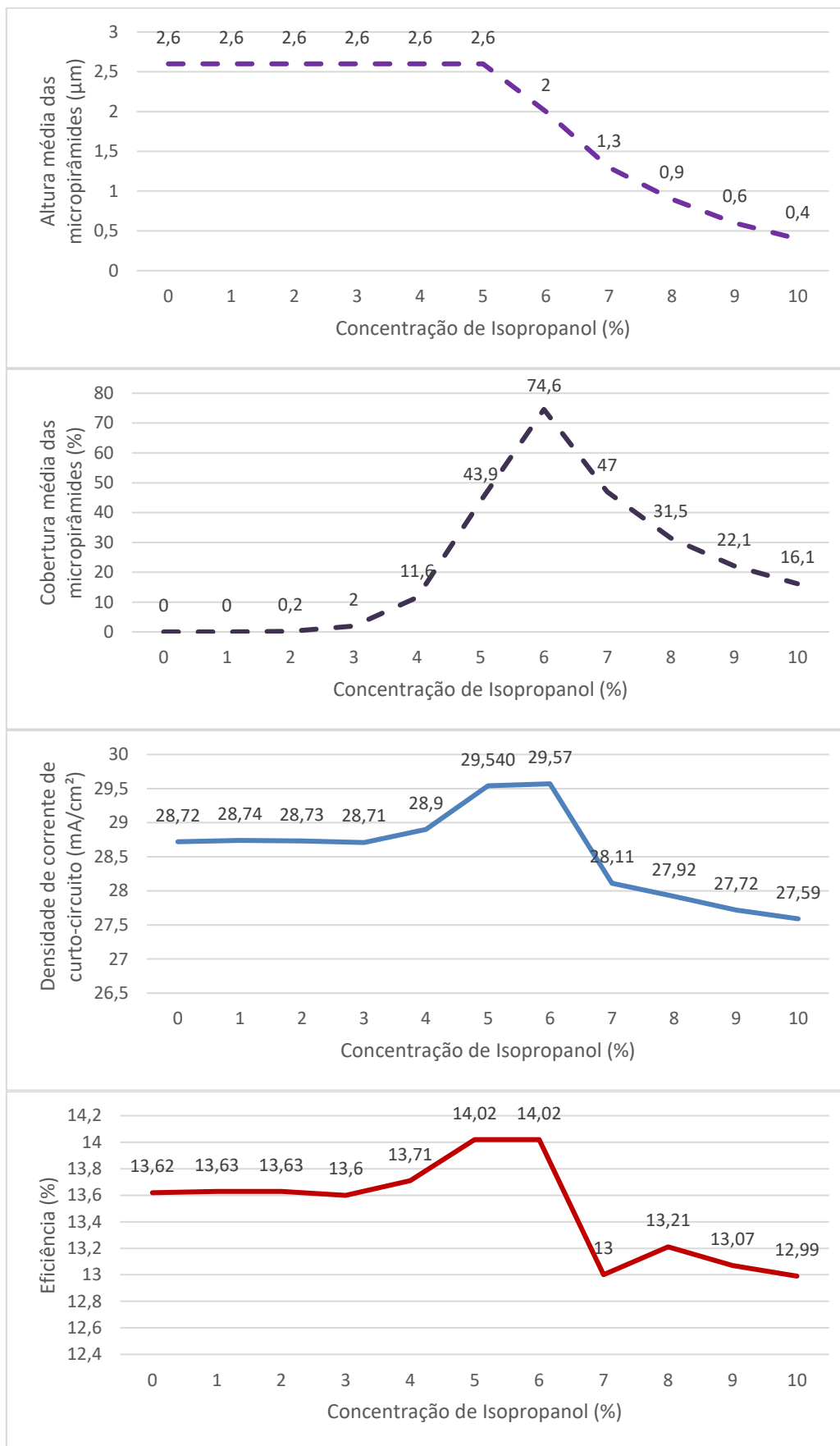
- Temperatura

O comportamento da temperatura do banho químico é similar ao das concentrações dos compostos químicos, porém, não dá para observar um ponto ótimo ainda, só o crescimento contínuo de todas as características analisadas. Os valores máximos para a altura das micropirâmides e a cobertura média destas na célula foram de 3,5  $\mu\text{m}$  e 88,9%, respectivamente. A maior eficiência encontrada foi de 14,84%. Estes resultados são mostrados na Figura 4.11.

- Tempo do banho químico

A variação do tempo da imersão das lâminas de silício no banho químico para a texturização possui uma influência semelhante à temperatura nas características consideradas. Observa-se na Figura 4.12 que os parâmetros crescem com o aumento do tempo do banho químico. A maior eficiência, de 14,79%, encontra-se no maior tempo do banho químico possível, juntamente com os parâmetros referência.

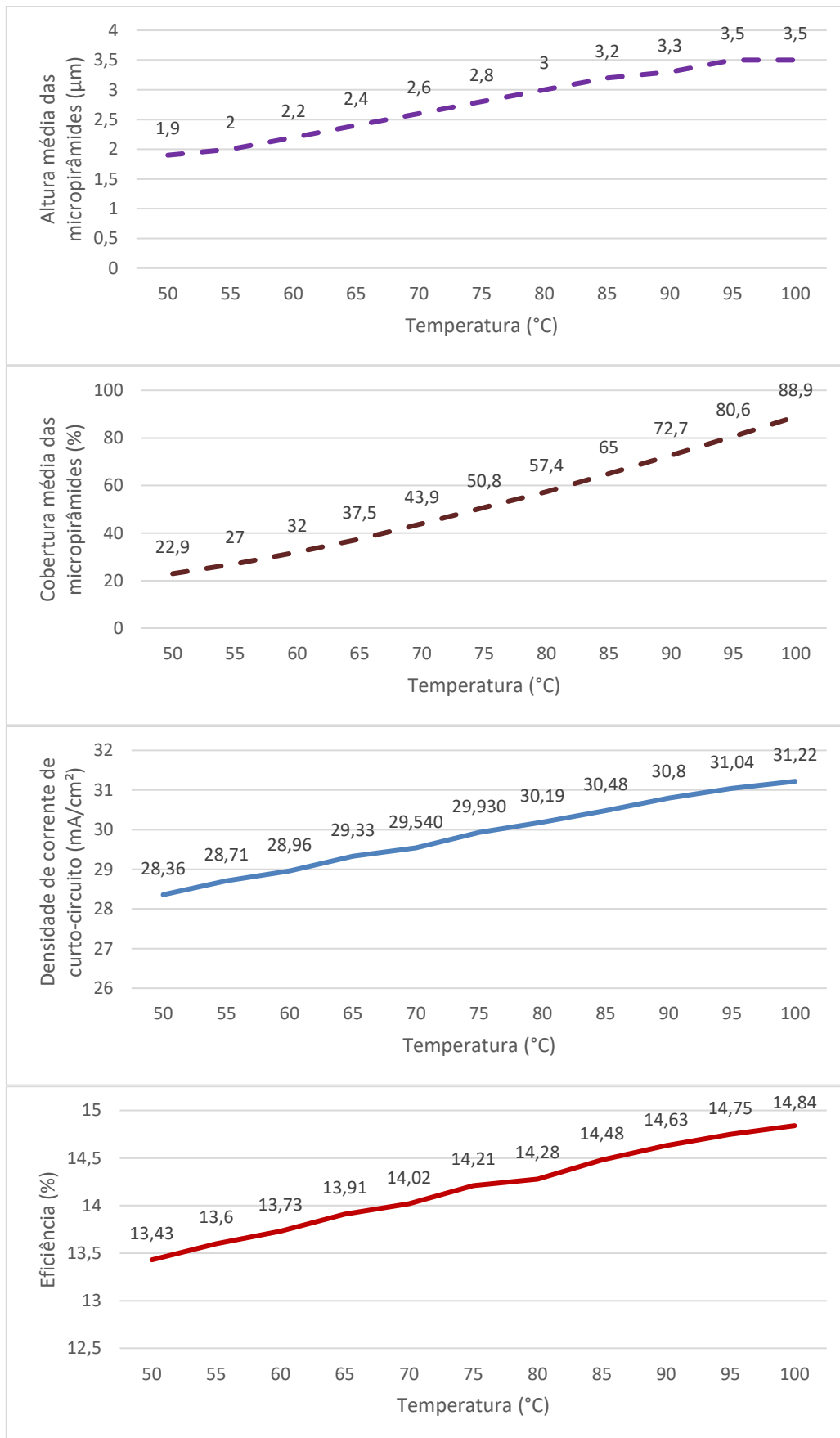
Figura 4.10 – Gráficos de influência da concentração de Isopropanol



Fonte: Elaborada pelo autor.

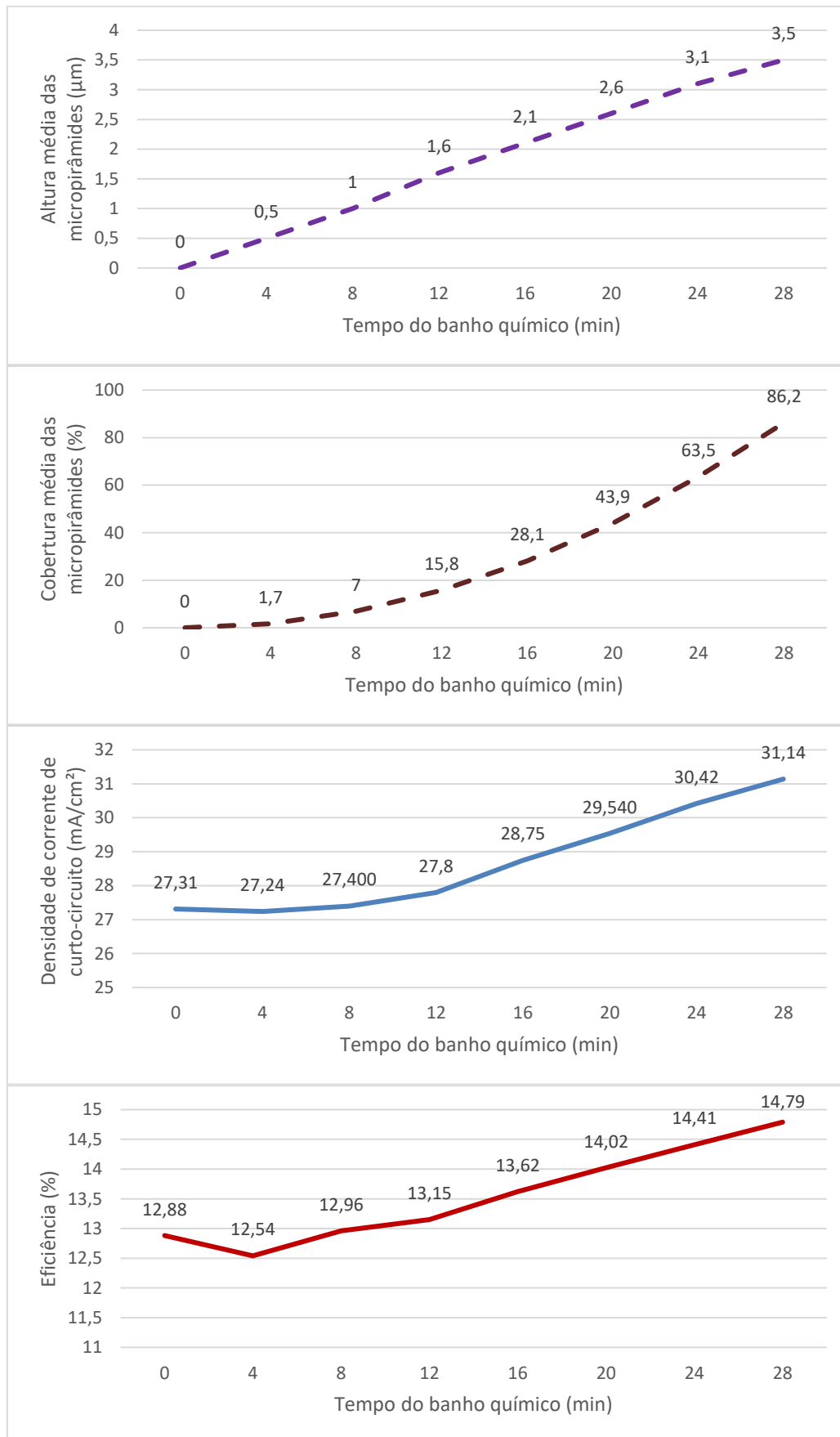


Figura 4.11 – Gráficos de influência da temperatura na remoção das superfícies defeituosas



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 4.12 – Gráficos de influência do tempo do banho químico na remoção das superfícies defeituosas

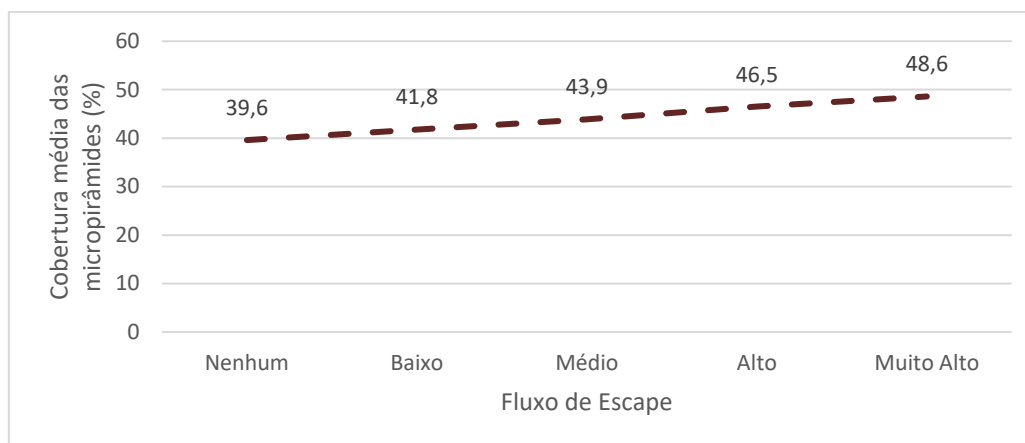


Fonte: Elaborada pelo autor.

- Fluxo do Escape

Da Figura 4.13 nota-se a influência do fluxo de escape dos gases na cobertura média das micropirâmides nas células produzidas, em que o maior valor para a cobertura é de 48,6% com o fluxo de escape muito alto.

Figura 4.13 – Gráfico da influência do fluxo de escape



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 5 CONCLUSÃO

No presente trabalho evidencia-se que a utilização do software virtual PV Factory permite uma melhor compreensão das três etapas iniciais do processo de fabricação das células fotovoltaicas, o que permite aprimorar as características físicas e elétricas das células solares produzidas na escolha do material inicial, na remoção das superfícies defeituosas e na técnica de texturização alcalina.

Ressalta-se que o software PV Factory se mostra uma ferramenta potente para explicitar a tecnologia envolvida em cada etapa da produção das células fotovoltaicas, fato este que sofre uma grande resistência dos fabricantes devido a segredos de fabricação.

As principais contribuições deste Trabalho de Conclusão de Curso são:

a) Na etapa da escolha do material inicial

- Demonstrar que a espessura das lâminas de silício monocristalino tem influência direta na eficiência e na fragilidade da célula fotovoltaica, visto que lâminas mais finas possuíram eficiências menores, além de danificaram-se mais no processo de fabricação. Para lâminas de 160  $\mu\text{m}$ , apenas 18 células foram produzidas (de um esperado de 30) e tiveram eficiência de 13,92%. Enquanto que para lâminas de 200  $\mu\text{m}$ , todas as 30 células foram produzidas, possuindo eficiência de 14,02%.
- Apresentar que lâminas de silício monocristalino com baixa resistividade possuem baixa eficiência (células com resistividade 0,3  $\Omega\cdot\text{cm}$  possuíram 12,48% de eficiência ao passo que com resistividade 1,0 e 3,0  $\Omega\cdot\text{cm}$  tiveram eficiência de 14,02 e 13,91%, respectivamente).

b) Na etapa da remoção das superfícies defeituosas

- Evidenciar uma forte correlação entre a temperatura e o tempo de exposição do banho químico e a quantidade de células fabricadas. Altas temperaturas e tempos elevados provocaram maiores danos nas células, reduzindo a quantidade de células que saíram do processo em bom estado.

Temperaturas de 70, 80 e 90 °C provocaram no processo a quebra de 2, 21 e 30 células, respectivamente. Tal como lotes de 30 células expostos ao banho químico por 10 e 25 minutos, respectivamente, tiveram 30 e 10 células produzidas.

c) Na etapa da texturização alcalina

- Destacar que, individualmente, a concentração de NaOH, a concentração de isopropanol, a temperatura e o tempo do banho químico são diretamente proporcionais à altura e à cobertura das micropirâmides formadas no processo de texturização alcalina até um certo ponto ótimo. Obtiveram-se alturas de até 3,5  $\mu\text{m}$  e coberturas de até 88,9% para as micropirâmides.

Como sugestões para desdobramentos futuros deste trabalho, propõe-se a realização do estudo, de forma análoga ao feito neste trabalho, para as demais etapas do processo de fabricação da célula fotovoltaica; e a elaboração de tutoriais em português a respeito do software virtual PV Factory, a fim de que este possa ser utilizado para aprendizado de terceiros.

## REFERÊNCIAS

ABOTT, M. D. et al. **Online education with PV Factory**. PV Lighthouse, UNSW, ASU, 2015.

BRAGA, R. P. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e aplicações**. Dissertação de Mestrado, UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

CHAAR, L. E.; LAMONT, L.A.; ZEIN, N.E. **Review of photovoltaic technologies**. Elsevier Ltd. 2011.

EBERHARDT, D. **Desenvolvimento de um Sistema Completo para Caracterização de Células Solares**. Dissertação para a obtenção do título de mestre em engenharia e tecnologia de materiais, Porto Alegre, 2005.

GARCIA, S. B. **Projeto e construção de um forno para processamento de células solares**. Dissertação para a obtenção do título de mestre em engenharia e tecnologia dos materiais, Porto Alegre, 2009.

GASPARIN, F. P. **Desenvolvimento de um traçador de curvas características de módulos fotovoltaicos**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

GOETZBERGER, A.; HEBLING, C.; SCHOCK, H-W. **Photovoltaic materials, history, status and outlook**. Materials Science and Engineering R 40, 1–46, 2003.

LENNON, A; ABBOTT, M.; MCINTOSH, K. **Chasing higher solar cell efficiencies**. School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering, University of UNSW. PV Lighthouse, Coledale. Artigo IEEE. China, 2015.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of photovoltaic science and engineering**. 2<sup>nd</sup> ed. 2010.

**MICROCHEMICALS**. Disponível em <<http://www.microchemicals.com/>>. Acesso em: 10/mar de 2017.

MONTEIRO, M. C. **Células fotovoltaicas de silício cristalino: tecnologias e processos de fabricação.** Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

MORAES, R. Jr; BAGNARA, M. **Os princípios químicos e físicos envolvidos no funcionamento das células fotovoltaicas.** UNIJUÍ, 2016.

ORTEGA, L. L. M. **Conversão fotovoltaica: comparação de modelos de PRIEB, C. W. M. Desenvolvimento de um sistema de ensaio de módulos fotovoltaicos.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

PINA, J.A.M. **Optimização de Células Fotovoltaicas.** Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Microelectrónica e Nanotecnologias. FCT, Lisboa, 2013.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** CEPEL-CRESESB. 2014.

PORTAL ENERGIA. **Energia fotovoltaica: manual sobre tecnologias, projecto e instalação.** Janeiro, 2004.

PV EDUCATION. Disponível em: <<http://www.pveducation.org/pvcdrom>>. Acesso em: 20/nov de 2016.

PV FACTORY. Disponível em: <<https://factory.pvlighthouse.com.au/#!>>. Acesso em: 20/nov de 2016.

WEHR, G. **Otimização e desenvolvimento de células solares industriais em substratos de silício multicristalino.** Dissertação de Mestrado – Puc-RS. Porto Alegre, 2008.

WENHAM, S.R. et al. **Applied photovoltaics.** 2nd ed. ARC Centre for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics, 2007.

## APÊNDICE A – PARÂMETROS DE REFERÊNCIA

Tabela A.1 – Parâmetros para lote referência de células fotovoltaicas

(continua)

| Etapa    | Fatores                                    | Unidade                                     | Variação               | Referência                                     |            |
|----------|--|---|------------------------|--|------------|
| <b>1</b> | <b>Material Inicial</b>                    | Quantidade de lâminas de silício produzidas | un.                    | 1 a 30   | 10         |
|          |  | Cristalinidade                              |                        | Mono ou multicristalino                        | Monocrist. |
|          |  | Método de obtenção das lâminas de silício   |                        | Cz padrão, Cz de alta performance, Fusão zonal | Cz padrão  |
|          |  | Tipo de serra                               |                        | Fio padrão ou fio diamantado                   | Fio padrão |
|          |  | Espessura                                   | $\mu\text{m}$          | 160, 180, 200, 250                             | 200        |
|          |  | Tipo de fio de serra                        | $\Omega\cdot\text{cm}$ | 0.3, 1.0, 3.0                                  | 1          |
| <b>2</b> | <b>Remoção das superfícies defeituosas</b> | Concentração de NaOH                        | %                      | 20 a 40  | 30         |
|          |  | Temperatura                                 | $^{\circ}\text{C}$     | 0 a 90   | 50         |
|          |  | Tempo do banho químico                      | min                    | 0 a 40   | 10         |
|          |  | Tempo de limpeza                            | min                    | 0 a 10   | 5          |
| <b>3</b> | <b>Texturização Alcalina</b>               | Concentração de NaOH                        | %                      | 1 a 3  | 2          |
|          |  | Concentração de Isopropanol                 | %                      | 0 a 10   | 5          |
|          |  | Temperatura                                 | $^{\circ}\text{C}$     | 50 a 100                                       | 70         |
|          |  | Tempo do banho químico                      | min                    | 0 a 30   | 20         |
|          |  | Fluxo de escape                             |                        | Nenhum, baixo, médio, alto, muito alto         | Médio      |
| <b>4</b> | <b>Banho Químico com HF:Hcl</b>            | Concentração de HF                          | %                      | 0 a 30   | 2          |
|          |  | Concentração de HCl                         | %                      | 0 a 30   | 2          |
|          |  | Tempo do banho químico                      | min                    | 0 a 10   | 5          |
|          |  | Tempo de limpeza                            | min                    | 0 a 10   | 5          |
| <b>5</b> | <b>Difusão de Fósforo</b>                  | Concentração de Fósforo                     | %                      | 10 a 100                                       | 100        |
|          |  | Fluxo de nitrogênio                         | l/s                    | 0 a 50   | 25         |
|          |  | Velocidade da correia                       | Cm/s                   | 0.1 a 1.0                                      | 0.5        |
|          |  | Temperatura de secagem                      | $^{\circ}\text{C}$     | 100 a 300                                      | 200        |
|          |  | Zona 1 de temperatura                       | $^{\circ}\text{C}$     | 500 a 800                                      | 800        |
|          |  | Zona 2 de temperatura                       | $^{\circ}\text{C}$     | 700 a 1000                                     | 980        |
|          |  | Zona 3 de temperatura                       | $^{\circ}\text{C}$     | 500 a 800                                      | 800        |



Tabela A.1 – Parâmetros para lote referência de células fotovoltaicas

(conclusão)

| Etapa                                 | Fatores                                       | Unidade                                    | Variação | Referência             |     |  |
|---------------------------------------|---|--|----------|------------------------|-----|--|
| 6                                     | <b>Remoção da camada de óxido de fósforo</b>  | Concentração de HF                         | %        | 0 a 30                 | 2   |  |
|                                       |   | Tempo do banho químico                     | min      | 0 a 10                 | 5   |  |
|                                       |   | Tempo de limpeza                           | min      | 0 a 10                 | 5   |  |
| 7                                     | <b>Isolamento com Plasma Da Borda</b>         | Potência                                   | W        | 150 a 1500             | 700 |  |
|                                       |   | Tempo                                      | min      | 2 a 20                 | 10  |  |
| 8                                     | <b>Revestimento de Nitreto De Silício</b>     | Tempo                                      | min      | 1 a 30                 | 15  |  |
|                                       |   | Temperatura                                | °C       | 0 a 400                | 150 |  |
|                                       |   | Fluxo de silano                            | A.u.     | 1 a 5                  | 3   |  |
|                                       |   | Fluxo de amônia                            | A.u.     | 1 a 5                  | 3   |  |
| <u>Dimensões da tela de Al</u>        |   |  |          |                        |     |  |
| 9                                     | <b>Impressão em Tela Traseira</b>             | Densidade da faixa                         | cm-1     | 50 a 250               | 100 |  |
|                                       |   | Diâmetro da vertente                       | µm       | 20, 30, 50, 80, 120    | 50  |  |
|                                       |   | <u>Entradas de tela de impressão de Al</u> |          |                        |     |  |
|                                       |   | Emulsão acima da malha                     | µm       | 0 a 30                 | 15  |  |
|                                       |   | Emulsão abaixo da malha                    | µm       | 0 a 30                 | 15  |  |
|                                       |   | Pressão do <i>Squeegee</i>                 | A.u.     | 1 a 10                 | 5   |  |
|                                       |   | Viscosidade da pasta                       | A.u.     | 1 a 10                 | 5   |  |
|                                       |   | Velocidade de impressão                    | A.u.     | 1 a 10                 | 5   |  |
| <u>Dimensões da tela Ag</u>           |   |  |          |                        |     |  |
| 10                                    | <b>Impressão em Tela Frontal</b>              | Foco de dedo                               | mm       | 1 a 6                  | 2   |  |
|                                       |   | Densidade da faixa                         | cm-1     | 50 a 250               | 100 |  |
|                                       |   | Diâmetro da vertente                       | µm       | 20, 30, 50, 80, 120    | 50  |  |
|                                       |   | Largura do dedo                            | µm       | 50, 100, 150, 200, 250 | 200 |  |
|                                       |   | <u>Entradas de impressão de tela Ag</u>    |          |                        |     |  |
|                                       |   | Emulsão acima da malha                     | µm       | 0 a 30                 | 20  |  |
|                                       |   | Emulsão abaixo da malha                    | µm       | 0 a 30                 | 20  |  |
|                                       |   | Pressão do rodo                            | A.u.     | 1 a 10                 | 5   |  |
|                                       |   | Viscosidade da pasta                       | A.u.     | 1 a 10                 | 5   |  |
|                                       |   | Velocidade de impressão                    | A.u.     | 1 a 10                 | 5   |  |
| <u>Entradas de disparo da correia</u> |   |  |          |                        |     |  |
| 11                                    | <b>Forno de Queima dos Contatos Metálicos</b> | Concentração de O <sub>2</sub>             | %        | 0 a 100                | 21  |  |
|                                       |   | N <sub>2</sub>                             | l/s      | 0 a 20                 | 10  |  |
|                                       |   | Velocidade da correia                      | Cm/s     | 1 a 10                 | 5   |  |
|                                       |   | Temperatura de secagem                     | °C       | 100 a 300              | 250 |  |
|                                       |   | Zona 1 de temperatura                      | °C       | 500 a 800              | 680 |  |
|                                       |   | Zona 2 de temperatura                      | °C       | 700 a 1000             | 830 |  |
| Zona 3 de temperatura                 | °C  | 500 a 800                                  | 680      |                        |     |  |

Fonte: Elaborada pelo autor.

## APÊNDICE B – ESCOLHA DO MATERIAL INICIAL

Os parâmetros variados, as condições que os mesmos puderam assumir e as caracterizações dos lotes simulados se encontram abaixo.

i. Método de obtenção das lâminas de silício:

- CZ padrão;
- CZ de alta performance;
- Float zone.

Tabela B.1 – Material inicial: Influência do método de obtenção das lâminas de silício

| <b>Características do Lote de Células Fabricadas</b> |                         |           |                        |             |
|--|-------------------------|-----------|------------------------|-------------|
| <b>Lote</b>  |                         | 11        | 12                     | 15          |
| <b>Método de obtenção das lâminas de silício</b>     |                         | Cz padrão | Cz de alta performance | Fusão zonal |
| <b>Características Físicas</b>                       |                         |           |                        |             |
| <b>Espessura média</b>                               | $\mu\text{m}$           | 199,6     | 199,9                  | 199,7       |
| <b>Resistividade média</b>                           | $\Omega\cdot\text{cm}$  | 0,996     | 1,002                  | 1           |
| <b>Espessura depois do banho químico</b>             | $\mu\text{m}$           | 168       | 168,3                  | 168,7       |
| <b>Altura média das micropirâmides</b>               | $\mu\text{m}$           | 2,6       | 2,6                    | 2,6         |
| <b>Cobertura média das micropirâmides</b>            | %                       | 43,9      | 43,9                   | 44,1        |
| <b>Características Elétricas</b>                     |                         |           |                        |             |
| <b>Voc</b>   | V                       | 0,62      | 0,622                  | 0,625       |
| <b>Jsc</b>   | $\text{mA}/\text{cm}^2$ | 29,54     | 29,73                  | 29,88       |
| <b>FF</b>  |                         | 0,765     | 0,765                  | 0,766       |
| <b>Eficiência</b>                                    | %                       | 14,02     | 14,14                  | 14,15       |
| <b>Células produzidas</b>                            | Un.                     | 30 de 30  | 29 de 30               | 28 de 30    |

Fonte: Elaborada pelo autor.

ii. Tipo de fio de serra:

- Fio padrão;
- Fio diamantado.

Tabela B.2 – Material inicial: Influência do tipo de fio de serra

| <b>Características do Lote de Células Fabricadas</b> |                         |            |                |
|--|-------------------------|------------|----------------|
| <b>Lote</b>  |                         | 11         | 17             |
| <b>Tipo de fio de serra</b>                          |                         | Fio padrão | Fio diamantado |
| <b>Características Físicas</b>                       |                         |            |                |
| <b>Espessura média</b>                               | $\mu\text{m}$           | 199,6      | 199,2          |
| <b>Resistividade média</b>                           | $\Omega\cdot\text{cm}$  | 0,996      | 1              |
| <b>Espessura depois do banho químico</b>             | $\mu\text{m}$           | 168        | 167,9          |
| <b>Altura média das micropirâmides</b>               | $\mu\text{m}$           | 2,6        | 2,6            |
| <b>Cobertura média das micropirâmides</b>            | %                       | 43,9       | 43,9           |
| <b>Características Elétricas</b>                     |                         |            |                |
| <b>Voc</b>   | V                       | 0,62       | 0,62           |
| <b>Jsc</b>   | $\text{mA}/\text{cm}^2$ | 29,54      | 29,63          |
| <b>FF</b>  |                         | 0,765      | 0,764          |
| <b>Eficiência</b>                                    | %                       | 14,02      | 14,04          |
| <b>Células produzidas</b>                            | Un.                     | 30 de 30   | 29 de 30       |

Fonte: Elaborada pelo autor.

iii. Espessura:

- 160  $\mu\text{m}$ ;
- 180  $\mu\text{m}$ ;
- 200  $\mu\text{m}$ ;
- 250  $\mu\text{m}$ .

Tabela B.3 – Material inicial: Influência da espessura

| <b>Características do Lote de Células Fabricadas</b> |                         |          |          |          |          |
|--|-------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Lote</b>  |                         | 20       | 21       | 11       | 25       |
| <b>Espessura (<math>\mu\text{m}</math>)</b>          |                         | 160      | 180      | 200      | 250      |
| <b>Características Físicas</b>                       |                         |          |          |          |          |
| <b>Espessura média</b>                               | $\mu\text{m}$           | 159,9    | 199,9    | 199,6    | 249,9    |
| <b>Resistividade média</b>                           | $\Omega\cdot\text{cm}$  | 1,002    | 1,002    | 0,996    | 1,002    |
| <b>Espessura depois do banho químico</b>             | $\mu\text{m}$           | 128,1    | 149,1    | 168      | 218,6    |
| <b>Altura média das micropirâmides</b>               | $\mu\text{m}$           | 2,6      | 2,6      | 2,6      | 2,6      |
| <b>Cobertura média das micropirâmides</b>            | %                       | 44       | 43,9     | 43,9     | 44,4     |
| <b>Características Elétricas</b>                     |                         |          |          |          |          |
| <b>Voc</b>   | V                       | 0,62     | 0,62     | 0,62     | 0,62     |
| <b>Jsc</b>   | $\text{mA}/\text{cm}^2$ | 29,39    | 29,51    | 29,54    | 29,71    |
| <b>FF</b>  |                         | 0,763    | 0,763    | 0,765    | 0,765    |
| <b>Eficiência</b>                                    | %                       | 13,92    | 13,96    | 14,02    | 14,09    |
| <b>Células produzidas</b>                            | Un.                     | 18 de 30 | 25 de 30 | 30 de 30 | 29 de 30 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

## iv. Resistividade

- 0,3  $\Omega\cdot\text{cm}$ ;
- 1,0  $\Omega\cdot\text{cm}$ ;
- 3,0  $\Omega\cdot\text{cm}$ .

Tabela B.4 – Material inicial: Influência da resistividade

| <b>Características do Lote de Células Fabricadas</b> |                         |          |          |          |
|--|-------------------------|----------|----------|----------|
| <b>Lote</b>  |                         | 27       | 11       | 29       |
| <b>Resistividade</b>                                 |                         | 0,3      | 1        | 3        |
| <b>Características Físicas</b>                       |                         |          |          |          |
| <b>Espessura média</b>                               | $\mu\text{m}$           | 199,6    | 199,6    | 198,6    |
| <b>Resistividade média</b>                           | $\Omega\cdot\text{cm}$  | 0,299    | 0,996    | 3,007    |
| <b>Espessura depois do banho químico</b>             | $\mu\text{m}$           | 168,3    | 168      | 167,6    |
| <b>Altura média das micropirâmides</b>               | $\mu\text{m}$           | 2,6      | 2,6      | 2,6      |
| <b>Cobertura média das micropirâmides</b>            | %                       | 43,7     | 43,9     | 44,3     |
| <b>Características Elétricas</b>                     |                         |          |          |          |
| <b>Voc</b>   | V                       | 0,616    | 0,62     | 0,606    |
| <b>Jsc</b>   | $\text{mA}/\text{cm}^2$ | 26,37    | 29,54    | 30,74    |
| <b>FF</b>  |                         | 0,768    | 0,765    | 0,747    |
| <b>Eficiência</b>                                    | %                       | 12,48    | 14,02    | 13,91    |
| <b>Células produzidas</b>                            | Un.                     | 30 de 30 | 30 de 30 | 29 de 30 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

## APÊNDICE C – REMOÇÃO DAS SUPERFÍCIES

### DEFEITUOSAS

i. Concentração de NaOH:

- Valor mínimo: 20%
- Valor máximo: 40%
- Variação entre um valor e outro: 2%

Tabela C.1 – Remoção das superfícies defeituosas: Influência da concentração de NaOH  
(continua)

| <b>Características do Lote de Células Fabricadas</b> |                         |          |          |          |          |          |          |
|--|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Lote</b>  |                         | 46       | 49       | 52       | 54       | 56       | 11       |
| <b>Concentração de NaOH (%)</b>                      |                         | 20       | 22       | 24       | 26       | 28       | 30       |
| <b>Características Físicas</b>                       |                         |          |          |          |          |          |          |
| <b>Espessura média</b>                               | $\mu\text{m}$           | 199      | 199,4    | 200,3    | 200      | 199,9    | 199,6    |
| <b>Resistividade média</b>                           | $\Omega\cdot\text{cm}$  | 1,001    | 0,998    | 1        | 1        | 0,998    | 0,996    |
| <b>Espessura depois do banho químico</b>             | $\mu\text{m}$           | 167,9    | 168,4    | 169,3    | 168,7    | 168,6    | 168      |
| <b>Altura média das micropirâmides</b>               | $\mu\text{m}$           | 2,6      | 2,6      | 2,6      | 2,6      | 2,6      | 2,6      |
| <b>Cobertura média das micropirâmides</b>            | %                       | 43,6     | 44,1     | 44       | 44,1     | 43,9     | 43,9     |
| <b>Características Elétricas</b>                     |                         |          |          |          |          |          |          |
| <b>Voc</b>   | V                       | 0,62     | 0,62     | 0,62     | 0,62     | 0,62     | 0,62     |
| <b>Jsc</b>   | $\text{mA}/\text{cm}^2$ | 29,58    | 29,59    | 29,56    | 29,59    | 29,63    | 29,540   |
| <b>FF</b>  |                         | 0,765    | 0,764    | 0,765    | 0,765    | 0,765    | 0,765    |
| <b>Eficiência</b>                                    | %                       | 14,03    | 14,03    | 14,03    | 14,04    | 14,06    | 14,02    |
| <b>Células produzidas</b>                            | Un.                     | 30 de 30 | 29 de 30 | 30 de 30 | 30 de 30 | 30 de 30 | 30 de 30 |

Tabela C.1 – Remoção das superfícies defeituosas: Influência da concentração de NaOH

| (conclusão)  |                         |          |          |          |          |          |
|--|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Características do Lote de Células Fabricadas</b> |                         |          |          |          |          |          |
| Lote   |                         | 59       | 60       | 61       | 63       | 64       |
| Concentração de NaOH (%)                             |                         | 32       | 34       | 36       | 38       | 40       |
| <b>Características Físicas</b>                       |                         |          |          |          |          |          |
| Espessura média                                      | $\mu\text{m}$           | 200,1    | 200      | 199,7    | 200,3    | 199,8    |
| Resistividade média                                  | $\Omega\text{-cm}$      | 1,001    | 1,001    | 0,998    | 1,001    | 1,002    |
| Espessura depois do banho químico                    | $\mu\text{m}$           | 168,7    | 168,5    | 168,2    | 169,2    | 168,2    |
| Altura média das micropirâmides                      | $\mu\text{m}$           | 2,6      | 2,6      | 2,6      | 2,6      | 2,6      |
| Cobertura média das micropirâmides                   | %                       | 43,8     | 44       | 44,2     | 43,8     | 44,6     |
| <b>Características Elétricas</b>                     |                         |          |          |          |          |          |
| Voc  | V                       | 0,62     | 0,62     | 0,62     | 0,62     | 0,62     |
| Jsc  | $\text{mA}/\text{cm}^2$ | 29,59    | 29,61    | 29,62    | 29,61    | 29,6     |
| FF   |                         | 0,765    | 0,765    | 0,765    | 0,764    | 0,765    |
| Eficiência   | %                       | 14,04    | 14,05    | 14,05    | 14,03    | 14,05    |
| Células produzidas                                   | Un.                     | 29 de 30 | 29 de 30 | 30 de 30 | 29 de 30 | 29 de 30 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

## ii. Temperatura

- Valor mínimo: 0 °C
- Valor máximo: 90 °C
- Variação entre um valor e outro: 10 °C

Tabela C.2 – Remoção das superfícies defeituosas: Influência da temperatura

(continua)

| <b>Características do Lote de Células Fabricadas</b> |                    |          |          |          |          |          |
|--|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Lote</b>  |                    | 68       | 70       | 71       | 72       | 74       |
| <b>Temperatura</b>                                   |                    | 0°C      | 10°C     | 20°C     | 30°C     | 40°C     |
| <b>Características Físicas</b>                       |                    |          |          |          |          |          |
| <b>Espessura média</b>                               | μm                 | 199,7    | 200,3    | 200,6    | 199,7    | 200,4    |
| <b>Resistividade média</b>                           | Ω·cm               | 1,004    | 1,002    | 1,003    | 1,001    | 0,997    |
| <b>Espessura depois do banho químico</b>             | μm                 | 199,6    | 199      | 195,8    | 188,7    | 180,3    |
| <b>Altura média das micropirâmides</b>               | μm                 | 2,6      | 2,6      | 2,6      | 2,6      | 2,6      |
| <b>Cobertura média das micropirâmides</b>            | %                  | 43,8     | 44,1     | 44,2     | 43,9     | 44,3     |
| <b>Características Elétricas</b>                     |                    |          |          |          |          |          |
| <b>Voc</b>   | V                  | 0,563    | 0,565    | 0,569    | 0,577    | 0,612    |
| <b>Jsc</b>   | mA/cm <sup>2</sup> | 27,93    | 28,19    | 28,59    | 29,02    | 29,64    |
| <b>FF</b>  |                    | 0,745    | 0,745    | 0,748    | 0,746    | 0,757    |
| <b>Eficiência</b>                                    | %                  | 11,72    | 11,86    | 12,16    | 12,49    | 13,72    |
| <b>Células produzidas</b>                            | Un.                | 30 de 30 | 29 de 30 | 29 de 30 | 29 de 30 | 30 de 30 |



Tabela C.2 – Remoção das superfícies defeituosas: Influência da temperatura

(conclusão)

| <b>Características do Lote de Células Fabricadas</b> |                    |          |          |          |         |         |
|--|--------------------|----------|----------|----------|---------|---------|
| <b>Lote</b>  |                    | 11       | 75       | 77       | 81      | 82      |
| <b>Temperatura</b>                                   |                    | 50°C     | 60°C     | 70°C     | 80°C    | 90°C    |
| <b>Características Físicas</b>                       |                    |          |          |          |         |         |
| <b>Espessura média</b>                               | μm                 | 199,6    | 199      | 199,5    | 199,6   | 200,3   |
| <b>Resistividade média</b>                           | Ω·cm               | 0,996    | 1        | 0,995    | 1,002   | 1,004   |
| <b>Espessura depois do banho químico</b>             | μm                 | 168      | 154,1    | 138,8    | 119,9   | 98,8    |
| <b>Altura média das micropirâmides</b>               | μm                 | 2,6      | 2,6      | 2,6      | 2,6     | 2,6     |
| <b>Cobertura média das micropirâmides</b>            | %                  | 43,9     | 44,2     | 44,2     | 44      | 43,8    |
| <b>Características Elétricas</b>                     |                    |          |          |          |         |         |
| <b>Voc</b>   | V                  | 0,62     | 0,62     | 0,621    | 0,62    | -       |
| <b>Jsc</b>   | mA/cm <sup>2</sup> | 29,540   | 29,56    | 29,46    | 29,36   | -       |
| <b>FF</b>  |                    | 0,765    | 0,756    | 0,765    | 0,765   | -       |
| <b>Eficiência</b>                                    | %                  | 14,02    | 14,03    | 13,98    | 13,94   | -       |
| <b>Células produzidas</b>                            | Un.                | 30 de 30 | 29 de 30 | 28 de 30 | 9 de 30 | 0 de 30 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

## iii. Tempo do banho químico

- Valor mínimo: 0 min
- Valor máximo: 40 min
- Variação entre um valor e outro: 4 min

Tabela C.3 – Remoção das superfícies defeituosas: Influência do tempo do banho químico  
(continua)

| <b>Características do Lote de Células Fabricadas</b> |                         |          |          |          |          |          |
|--|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Lote</b>  |                         | 83       | 86       | 11       | 88       | 90       |
| <b>Tempo do banho químico</b>                        |                         | 0 min    | 5 min    | 10 min   | 15 min   | 20 min   |
| <b>Características Físicas</b>                       |                         |          |          |          |          |          |
| <b>Espessura média</b>                               | $\mu\text{m}$           | 200,1    | 200,6    | 199,6    | 199,7    | 200,1    |
| <b>Resistividade média</b>                           | $\Omega\text{-cm}$      | 1        | 1,001    | 0,996    | 0,997    | 1,002    |
| <b>Espessura depois do banho químico</b>             | $\mu\text{m}$           | 200,1    | 185      | 168      | 153,5    | 137      |
| <b>Altura média das micropirâmides</b>               | $\mu\text{m}$           | 2,6      | 2,6      | 2,6      | 2,6      | 2,6      |
| <b>Cobertura média das micropirâmides</b>            | %                       | 43,8     | 43,9     | 43,9     | 43,6     | 44       |
| <b>Características Elétricas</b>                     |                         |          |          |          |          |          |
| <b>Voc</b>   | V                       | 0,562    | 0,592    | 0,62     | 0,62     | 0,62     |
| <b>Jsc</b>   | $\text{mA}/\text{cm}^2$ | 27,72    | 29,37    | 29,540   | 29,5     | 29,42    |
| <b>FF</b>  |                         | 0,749    | 0,748    | 0,765    | 0,765    | 0,764    |
| <b>Eficiência</b>                                    | %                       | 11,66    | 13       | 14,02    | 14       | 13,95    |
| <b>Células produzidas</b>                            | Un.                     | 30 de 30 | 30 de 30 | 30 de 30 | 29 de 30 | 24 de 30 |

Tabela C.3 – Remoção das superfícies defeituosas: Influência do tempo do banho químico  
(conclusão)

| <b>Características do Lote de Células Fabricadas</b> |                         |          |         |         |         |
|--|-------------------------|----------|---------|---------|---------|
| <b>Lote</b>  |                         | 91       | 92      | 93      | 95      |
| <b>Tempo do banho químico</b>                        |                         | 25 min   | 30 min  | 35 min  | 40 min  |
| <b>Características Físicas</b>                       |                         |          |         |         |         |
| <b>Espessura média</b>                               | $\mu\text{m}$           | 199,4    | 199,7   | 199,4   | 199,8   |
| <b>Resistividade média</b>                           | $\Omega\cdot\text{cm}$  | 0,999    | 1,002   | 1,004   | 0,999   |
| <b>Espessura depois do banho químico</b>             | $\mu\text{m}$           | 121,9    | 105,5   | 89,2    | 75,8    |
| <b>Altura média das micropirâmides</b>               | $\mu\text{m}$           | 2,6      | 2,6     | 2,6     | 0       |
| <b>Cobertura média das micropirâmides</b>            | %                       | 43,8     | 43,2    | 43,7    | 0       |
| <b>Características Elétricas</b>                     |                         |          |         |         |         |
| <b>Voc</b>   | V                       | 0,62     | 0,621   | -       | -       |
| <b>Jsc</b>   | $\text{mA}/\text{cm}^2$ | 29,330   | 29,53   | -       | -       |
| <b>FF</b>  |                         | 0,765    | 0,764   | -       | -       |
| <b>Eficiência</b>                                    | %                       | 13,92    | 14,02   | -       | -       |
| <b>Células produzidas</b>                            | Un.                     | 10 de 30 | 1 de 30 | 0 de 30 | 0 de 30 |

Fonte: Elaborada pelo autor.



Tabela C.4 – Remoção das superfícies defeituosas: Influência do tempo de limpeza  
(conclusão)

| <b>Características do Lote de Células Fabricadas</b> |                         |          |          |          |          |          |
|--|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Lote</b>  |                         | 105      | 106      | 108      | 112      | 114      |
| <b>Tempo de limpeza (min)</b>                        |                         | 6        | 7        | 8        | 9        | 10       |
| <b>Características Físicas</b>                       |                         |          |          |          |          |          |
| <b>Espessura média</b>                               | $\mu\text{m}$           | 200,6    | 199,9    | 199,2    | 200      | 200,5    |
| <b>Resistividade média</b>                           | $\Omega\cdot\text{cm}$  | 1,001    | 1,002    | 1        | 1        | 1,001    |
| <b>Espessura depois do banho químico</b>             | $\mu\text{m}$           | 169,4    | 168,6    | 167,8    | 168,5    | 168,6    |
| <b>Altura média das micropirâmides</b>               | $\mu\text{m}$           | 2,6      | 2,6      | 2,6      | 2,6      | 2,6      |
| <b>Cobertura média das micropirâmides</b>            | %                       | 43,8     | 44,2     | 43,9     | 43,9     | 44,2     |
| <b>Características Elétricas</b>                     |                         |          |          |          |          |          |
| <b>Voc</b>   | V                       | 0,62     | 0,62     | 0,62     | 0,62     | 0,62     |
| <b>Jsc</b>   | $\text{mA}/\text{cm}^2$ | 29,58    | 29,65    | 29,6     | 29,6     | 29,54    |
| <b>FF</b>  |                         | 0,763    | 0,764    | 0,764    | 0,765    | 0,765    |
| <b>Eficiência</b>                                    | %                       | 14       | 14,04    | 14,03    | 14,04    | 14,02    |
| <b>Células produzidas</b>                            | Un.                     | 29 de 30 | 30 de 30 | 29 de 30 | 30 de 30 | 30 de 30 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

## APÊNDICE D – TEXTURIZAÇÃO ALCALINA

### i. Concentração de NaOH

- Valor mínimo: 1 %
- Valor máximo: 3 %
- Variação entre um valor e outro: 0,2 %

Tabela D.1 – Texturização alcalina: Influência da concentração de NaOH

(continua)

| <b>Características do Lote de Células Fabricadas</b> |                         |          |          |          |          |          |          |
|--|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Lote</b>  |                         | 156      | 158      | 160      | 162      | 164      | 11       |
| <b>Concentração de NaOH (%)</b>                      |                         | 1        | 1,2      | 1,4      | 1,6      | 1,8      | 2        |
| <b>Características Físicas</b>                       |                         |          |          |          |          |          |          |
| <b>Espessura média</b>                               | $\mu\text{m}$           | 199,7    | 200      | 199,7    | 200,1    | 199,8    | 199,6    |
| <b>Resistividade média</b>                           | $\Omega\cdot\text{cm}$  | 0,999    | 0,999    | 0,998    | 1,002    | 1        | 0,996    |
| <b>Espessura depois do banho químico</b>             | $\mu\text{m}$           | 168,7    | 168,8    | 168,4    | 168,3    | 168,4    | 168      |
| <b>Altura média das micropirâmides</b>               | $\mu\text{m}$           | 1,3      | 1,6      | 1,8      | 2,1      | 2,4      | 2,6      |
| <b>Cobertura média das micropirâmides</b>            | %                       | 11,1     | 15,8     | 21,8     | 28,2     | 35,8     | 43,9     |
| <b>Características Elétricas</b>                     |                         |          |          |          |          |          |          |
| <b>Voc</b>   | V                       | 0,615    | 0,615    | 0,617    | 0,618    | 0,619    | 0,62     |
| <b>Jsc</b>   | $\text{mA}/\text{cm}^2$ | 27,51    | 27,84    | 28,28    | 28,74    | 29,23    | 29,540   |
| <b>FF</b>  |                         | 0,77     | 0,769    | 0,768    | 0,763    | 0,766    | 0,765    |
| <b>Eficiência</b>                                    | %                       | 13,01    | 13,17    | 13,39    | 13,55    | 13,86    | 14,02    |
| <b>Células produzidas</b>                            | Un.                     | 29 de 30 | 29 de 30 | 28 de 30 | 30 de 30 | 29 de 30 | 30 de 30 |

Tabela D.1 – Texturização alcalina: Influência da concentração de NaOH

(conclusão)

| <b>Características do Lote de Células Fabricadas</b> |                         |          |          |          |          |          |
|--|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Lote</b>  |                         | 165      | 168      | 169      | 171      | 173      |
| <b>Concentração de NaOH (%)</b>                      |                         | 2,2      | 2,4      | 2,6      | 2,8      | 3        |
| <b>Características Físicas</b>                       |                         |          |          |          |          |          |
| <b>Espessura média</b>                               | $\mu\text{m}$           | 200,2    | 199,6    | 200,2    | 199,7    | 199,9    |
| <b>Resistividade média</b>                           | $\Omega\cdot\text{cm}$  | 0,998    | 1,002    | 1,001    | 1        | 1        |
| <b>Espessura depois do banho químico</b>             | $\mu\text{m}$           | 168,9    | 168,6    | 168,9    | 168,4    | 168,4    |
| <b>Altura média das micropirâmides</b>               | $\mu\text{m}$           | 2,9      | 3,1      | 3,4      | 3,5      | 3,5      |
| <b>Cobertura média das micropirâmides</b>            | %                       | 53,2     | 63       | 74,4     | 86       | 85,5     |
| <b>Características Elétricas</b>                     |                         |          |          |          |          |          |
| <b>Voc</b>   | V                       | 0,621    | 0,622    | 0,624    | 0,624    | 0,624    |
| <b>Jsc</b>   | $\text{mA}/\text{cm}^2$ | 30,01    | 30,37    | 30,83    | 31,19    | 31,12    |
| <b>FF</b>  |                         | 0,761    | 0,763    | 0,762    | 0,76     | 0,761    |
| <b>Eficiência</b>                                    | %                       | 14,18    | 14,42    | 14,61    | 14,77    | 14,79    |
| <b>Células produzidas</b>                            | Un.                     | 27 de 30 | 29 de 30 | 28 de 30 | 27 de 30 | 29 de 30 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

## ii. Concentração de Isopropanol

- Valor mínimo: 0 %
- Valor máximo: 10 %
- Variação entre um valor e outro: 1 %

Tabela D.2 – Texturização alcalina: Influência da concentração de isopropanol

(continua)

| <b>Características do Lote de Células Fabricadas</b> |                         |          |          |          |          |          |          |
|--|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Lote</b>  |                         | 179      | 182      | 184      | 186      | 187      | 11       |
| <b>Concentração de Isopropanol (%)</b>               |                         | 0        | 1        | 2        | 3        | 4        | 5        |
| <b>Características Físicas</b>                       |                         |          |          |          |          |          |          |
| <b>Espessura média</b>                               | $\mu\text{m}$           | 200,2    | 200,4    | 200      | 199,7    | 199,4    | 199,6    |
| <b>Resistividade média</b>                           | $\Omega\cdot\text{cm}$  | 1        | 0,997    | 0,998    | 1        | 0,995    | 0,996    |
| <b>Espessura depois do banho químico</b>             | $\mu\text{m}$           | 168,9    | 168,9    | 168,7    | 168,3    | 168,5    | 168      |
| <b>Altura média das micropirâmides</b>               | $\mu\text{m}$           | 2,6      | 2,6      | 2,6      | 2,6      | 2,6      | 2,6      |
| <b>Cobertura média das micropirâmides</b>            | %                       | 0        | 0        | 0,2      | 2        | 11,6     | 43,9     |
| <b>Características Elétricas</b>                     |                         |          |          |          |          |          |          |
| <b>Voc</b>   | V                       | 0,619    | 0,62     | 0,62     | 0,619    | 0,62     | 0,62     |
| <b>Jsc</b>   | $\text{mA}/\text{cm}^2$ | 28,72    | 28,74    | 28,73    | 28,71    | 28,9     | 29,540   |
| <b>FF</b>  |                         | 0,766    | 0,766    | 0,766    | 0,765    | 0,766    | 0,765    |
| <b>Eficiência</b>                                    | %                       | 13,62    | 13,63    | 13,63    | 13,6     | 13,71    | 14,02    |
| <b>Células produzidas</b>                            | Un.                     | 30 de 30 | 29 de 30 | 29 de 30 | 29 de 30 | 30 de 30 | 30 de 30 |



Tabela D.2 – Texturização alcalina: Influência da concentração de isopropanol  
(conclusão)

| <b>Características do Lote de Células Fabricadas</b> |                         |          |          |          |          |          |
|--|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Lote</b>  |                         | 190      | 192      | 193      | 195      | 197      |
| <b>Concentração de Isopropanol (%)</b>               |                         | 6        | 7        | 8        | 9        | 10       |
| <b>Características Físicas</b>                       |                         |          |          |          |          |          |
| <b>Espessura média</b>                               | $\mu\text{m}$           | 199,9    | 199,6    | 200,1    | 200,2    | 199,7    |
| <b>Resistividade média</b>                           | $\Omega\cdot\text{cm}$  | 1,001    | 1,002    | 1,002    | 0,998    | 0,998    |
| <b>Espessura depois do banho químico</b>             | $\mu\text{m}$           | 168,9    | 168,1    | 169      | 168,4    | 168,1    |
| <b>Altura média das micropirâmides</b>               | $\mu\text{m}$           | 2        | 1,3      | 0,9      | 0,6      | 0,4      |
| <b>Cobertura média das micropirâmides</b>            | %                       | 74,6     | 47       | 31,5     | 22,1     | 16,1     |
| <b>Características Elétricas</b>                     |                         |          |          |          |          |          |
| <b>Voc</b>   | V                       | 0,619    | 0,611    | 0,615    | 0,615    | 0,615    |
| <b>Jsc</b>   | $\text{mA}/\text{cm}^2$ | 29,57    | 28,11    | 27,92    | 27,72    | 27,59    |
| <b>FF</b>  |                         | 0,766    | 0,752    | 0,769    | 0,767    | 0,766    |
| <b>Eficiência</b>                                    | %                       | 14,02    | 13       | 13,21    | 13,07    | 12,99    |
| <b>Células produzidas</b>                            | Un.                     | 29 de 30 | 30 de 30 | 30 de 30 | 30 de 30 | 30 de 30 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

## iii. Temperatura

- Valor mínimo: 50 °C
- Valor máximo: 100 °C
- Variação entre um valor e outro: 5 °C

Tabela D.3 – Texturização alcalina: Influência da temperatura

(continua)

| <b>Características do Lote de Células Fabricadas</b> |                         |          |          |          |          |          |          |
|--|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Lote</b>  |                         | 200      | 204      | 202      | 206      | 11       | 207      |
| <b>Temperatura (°C)</b>                              |                         | 50       | 55       | 60       | 65       | 70       | 75       |
| <b>Características Físicas</b>                       |                         |          |          |          |          |          |          |
| <b>Espessura média</b>                               | $\mu\text{m}$           | 200,7    | 199,9    | 199,7    | 201,1    | 199,6    | 200      |
| <b>Resistividade média</b>                           | $\Omega\cdot\text{cm}$  | 1        | 0,996    | 1        | 1,002    | 0,996    | 1,002    |
| <b>Espessura depois do banho químico</b>             | $\mu\text{m}$           | 169,6    | 168,7    | 168,1    | 169,5    | 168      | 169      |
| <b>Altura média das micropirâmides</b>               | $\mu\text{m}$           | 1,9      | 2        | 2,2      | 2,4      | 2,6      | 2,8      |
| <b>Cobertura média das micropirâmides</b>            | %                       | 22,9     | 27       | 32       | 37,5     | 43,9     | 50,8     |
| <b>Características Elétricas</b>                     |                         |          |          |          |          |          |          |
| <b>Voc</b>   | V                       | 0,617    | 0,618    | 0,618    | 0,619    | 0,62     | 0,621    |
| <b>Jsc</b>   | $\text{mA}/\text{cm}^2$ | 28,36    | 28,71    | 28,96    | 29,33    | 29,540   | 29,930   |
| <b>FF</b>  |                         | 0,768    | 0,767    | 0,766    | 0,765    | 0,765    | 0,764    |
| <b>Eficiência</b>                                    | %                       | 13,43    | 13,6     | 13,73    | 13,91    | 14,02    | 14,21    |
| <b>Células produzidas</b>                            | Un.                     | 28 de 30 | 30 de 30 | 29 de 30 | 29 de 30 | 30 de 30 | 30 de 30 |

Tabela D.3 – Texturização alcalina: Influência da temperatura

(conclusão)

| <b>Características do Lote de Células Fabricadas</b> |                         |          |          |          |          |          |
|--|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Lote</b>  |                         | 209      | 212      | 216      | 219      | 220      |
| <b>Temperatura (°C)</b>                              |                         | 80       | 85       | 90       | 95       | 100      |
| <b>Características Físicas</b>                       |                         |          |          |          |          |          |
| <b>Espessura média</b>                               | $\mu\text{m}$           | 198,8    | 200,1    | 200,1    | 200      | 200,4    |
| <b>Resistividade média</b>                           | $\Omega\text{-cm}$      | 0,999    | 1        | 1        | 1        | 1        |
| <b>Espessura depois do banho químico</b>             | $\mu\text{m}$           | 168,5    | 169,5    | 169      | 168,3    | 169,2    |
| <b>Altura média das micropirâmides</b>               | $\mu\text{m}$           | 3        | 3,2      | 3,3      | 3,5      | 3,5      |
| <b>Cobertura média das micropirâmides</b>            | %                       | 57,4     | 65       | 72,7     | 80,6     | 88,9     |
| <b>Características Elétricas</b>                     |                         |          |          |          |          |          |
| <b>Voc</b>   | V                       | 0,622    | 0,623    | 0,623    | 0,624    | 0,624    |
| <b>Jsc</b>   | $\text{mA}/\text{cm}^2$ | 30,19    | 30,48    | 30,8     | 31,04    | 31,22    |
| <b>FF</b>  |                         | 0,761    | 0,763    | 0,762    | 0,761    | 0,761    |
| <b>Eficiência</b>                                    | %                       | 14,28    | 14,48    | 14,63    | 14,75    | 14,84    |
| <b>Células produzidas</b>                            | Un.                     | 30 de 30 | 30 de 30 | 30 de 30 | 30 de 30 | 30 de 30 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

## iv. Tempo do banho químico

- Valor mínimo: 0 min
- Valor máximo: 40 min
- Variação entre um valor e outro: 4 min

Tabela D.4 – Texturização alcalina: Influência do tempo do banho químico

(continua)

| <b>Características do Lote de Células Fabricadas</b> |                         |          |          |          |          |          |
|--|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Lote</b>  |                         | 221      | 223      | 226      | 228      | 229      |
| <b>Tempo do banho químico (min)</b>                  |                         | 0        | 4        | 8        | 12       | 16       |
| <b>Características Físicas</b>                       |                         |          |          |          |          |          |
| <b>Espessura média</b>                               | $\mu\text{m}$           | 199,4    | 200,1    | 199,7    | 200      | 200,4    |
| <b>Resistividade média</b>                           | $\Omega\cdot\text{cm}$  | 0,999    | 0,997    | 0,998    | 1        | 1        |
| <b>Espessura depois do banho químico</b>             | $\mu\text{m}$           | 168,3    | 169      | 168,7    | 168,8    | 169,3    |
| <b>Altura média das micropirâmides</b>               | $\mu\text{m}$           | 0        | 0,5      | 1        | 1,6      | 2,1      |
| <b>Cobertura média das micropirâmides</b>            | %                       | 0        | 1,7      | 7        | 15,8     | 28,1     |
| <b>Características Elétricas</b>                     |                         |          |          |          |          |          |
| <b>Voc</b>   | V                       | 0,614    | 0,603    | 0,615    | 0,615    | 0,618    |
| <b>Jsc</b>   | $\text{mA}/\text{cm}^2$ | 27,31    | 27,24    | 27,400   | 27,8     | 28,75    |
| <b>FF</b>  |                         | 0,738    | 0,752    | 0,77     | 0,769    | 0,767    |
| <b>Eficiência</b>                                    | %                       | 12,88    | 12,54    | 12,96    | 13,15    | 13,62    |
| <b>Células produzidas</b>                            | Un.                     | 30 de 30 | 29 de 30 | 30 de 30 | 30 de 30 | 30 de 30 |

Tabela D.4 – Texturização alcalina: Influência do tempo do banho químico

(conclusão)

| <b>Características do Lote de Células Fabricadas</b> |                         |          |          |          |          |
|--|-------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Lote</b>  |                         | 11       | 230      | 231      | 232      |
| <b>Tempo do banho químico (min)</b>                  |                         | 20       | 24       | 28       | 30       |
| <b>Características Físicas</b>                       |                         |          |          |          |          |
| <b>Espessura média</b>                               | $\mu\text{m}$           | 199,6    | 199,6    | 200,4    | 200,7    |
| <b>Resistividade média</b>                           | $\Omega\cdot\text{cm}$  | 0,996    | 0,999    | 1,001    | 1,002    |
| <b>Espessura depois do banho químico</b>             | $\mu\text{m}$           | 168      | 168,3    | 169,4    | 169,3    |
| <b>Altura média das micropirâmides</b>               | $\mu\text{m}$           | 2,6      | 3,1      | 3,5      | 3,5      |
| <b>Cobertura média das micropirâmides</b>            | %                       | 43,9     | 63,5     | 86,2     | 85,7     |
| <b>Características Elétricas</b>                     |                         |          |          |          |          |
| <b>Voc</b>   | V                       | 0,62     | 0,622    | 0,624    | 0,624    |
| <b>Jsc</b>   | $\text{mA}/\text{cm}^2$ | 29,540   | 30,42    | 31,14    | 31,12    |
| <b>FF</b>  |                         | 0,765    | 0,761    | 0,761    | 0,761    |
| <b>Eficiência</b>                                    | %                       | 14,02    | 14,41    | 14,79    | 14,79    |
| <b>Células produzidas</b>                            | Un.                     | 30 de 30 | 30 de 30 | 30 de 30 | 30 de 30 |

Fonte: Elaborada pelo autor.

## v. Fluxo de Escape

- Nenhum
- Baixo
- Médio
- Alto
- Muito alto

Tabela D.5 – Texturização alcalina: Influência do fluxo de escape

| <b>Características do Lote de Células Fabricadas</b> |                         |          |          |          |          |          |
|--|-------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Lote</b>  |                         | 238      | 240      | 11       | 243      | 247      |
| <b>Fluxo de Escape</b>                               |                         | Nenhum   | Baixo    | Médio    | Alto     | M. alto  |
| <b>Características Físicas</b>                       |                         |          |          |          |          |          |
| <b>Espessura média</b>                               | $\mu\text{m}$           | 200,4    | 199,8    | 199,6    | 199,5    | 200      |
| <b>Resistividade média</b>                           | $\Omega\cdot\text{cm}$  | 1,001    | 1        | 0,996    | 0,998    | 0,998    |
| <b>Espessura depois do banho químico</b>             | $\mu\text{m}$           | 169,2    | 168,8    | 168      | 167,7    | 169,1    |
| <b>Altura média das micropirâmides</b>               | $\mu\text{m}$           | 2,6      | 2,6      | 2,6      | 2,6      | 2,6      |
| <b>Cobertura média das micropirâmides</b>            | %                       | 39,6     | 41,8     | 43,9     | 46,5     | 48,6     |
| <b>Características Elétricas</b>                     |                         |          |          |          |          |          |
| <b>Voc</b>   | V                       | 0,62     | 0,62     | 0,62     | 0,62     | 0,62     |
| <b>Jsc</b>   | $\text{mA}/\text{cm}^2$ | 29,55    | 29,59    | 29,540   | 29,65    | 29,6     |
| <b>FF</b>  |                         | 0,765    | 0,765    | 0,765    | 0,765    | 0,764    |
| <b>Eficiência</b>                                    | %                       | 14,02    | 14,02    | 14,02    | 14,07    | 14,03    |
| <b>Células produzidas</b>                            | Un.                     | 29 de 30 | 30 de 30 | 30 de 30 | 30 de 30 | 30 de 30 |

Fonte: Elaborada pelo autor.