

# OTIMIZAÇÃO DA MALHA METÁLICA DE DEDOS COLETORES PARA O CONTATO ELÉTRICO FRONTAL DE CÉLULAS SOLARES POR ALGORITMOS GENÉTICOS

**Roberto Carlos Pejendino Jojoa** – rcarlospj@gmail.com

**Jose Eduardo Ruiz Rosero** – joseruiz1989@hotmail.com

**Eleonora Cominato Weiner** – noracw@gmail.com

**Patrícia Lustoza de Souza** – plustoza@cetuc.puc-rio.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Laboratório de Semicondutores.

**Daniel Neves Micha** – daniel.micha@cefet-rj.br

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Coordenação do Curso de Licenciatura em Física.

**Mauricio Pamplona Pires** – pires@if.ufrj.br

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Física.

**Resumo.** *Altas resistências elétricas em série e baixas resistências em paralelo são fontes de perdas em dispositivos fotovoltaicos. Em dispositivos que operam sob concentração, esses costumam ser os principais fatores limitantes para o aumento da eficiência de conversão. Excluindo fatores externos associados a falhas no processo de produção, a resistência elétrica em série depende de fatores intrínsecos aos materiais e à estrutura de camadas do dispositivo fotovoltaico. Dessa forma, para minimizar o seu valor é extremamente importante planejar adequadamente esses parâmetros construtivos antes da produção dos dispositivos. Um dos fatores mais impactantes na resistência em série é o desenho da malha de dedos coletores do contato elétrico frontal. Por outro lado, minimizar a resistência em série do contato elétrico requer o aumento da área metálica da superfície frontal, que serve de janela para a radiação solar. Portanto, deve haver um compromisso na redução das perdas elétricas e ópticas. Nesse trabalho, apresentamos os resultados da otimização do desenho da malha de dedos coletores para o contato elétrico frontal para três diferentes geometrias obtidas por algoritmos genéticos. As geometrias escolhidas foram a retangular, tradicional para a produção desse tipo de dispositivo, a hexagonal e a diamante. Além disso, comparamos os resultados obtidos com os de um dispositivo produzido com uma malha otimizada por um método de cálculo analítico. Ao final, discutimos as melhorias introduzidas pelas novas geometrias e apresentamos a configuração otimizada, que foi obtida com a geometria hexagonal que reduziu as perdas em 47,71%.*

**Palavras-chave:** *Células fotovoltaicas, Dedos Coletores, Otimização por Algoritmos Genéticos.*

## 1. INTRODUÇÃO

O uso da energia fotovoltaica tem crescido exponencialmente nos últimos anos, tendo ultrapassado os 300 GWp acumulados em todo o mundo até 2016 (Phillipps e Warmuth, 2017). Em 2016, a tecnologia dominante no mercado foi o silício cristalino, com uma fatia de 93% da produção anual global. Em seguida veio o CdTe, com 3,1% do mercado, o CIGS com 1,3% e o silício amorfo com 0,5%. Tecnologias que apresentam maiores eficiências, tais como as células de múltiplas junções com concentradores, tiveram um aumento de produção considerável até 2012, atingindo os 200 MWp acumulados, mas houve uma queda no ritmo nos anos seguintes e a produção em 2016 foi de apenas 13 MWp. Esta tecnologia, contudo, é muito promissora, pois o custo de produção dos módulos vem caindo ao longo do tempo, atingindo valores próximos dos sistemas de captação planos (Horowitz, Woodhouse, *et al.*, 2015). Porém, ainda há de se considerar os custos de operação de sistemas envolvendo o uso de concentradores no preço final da energia, pois os mesmos requerem rastreadores solares para acompanhar o movimento aparente do sol ao longo do dia.

O aumento na produção e instalação de sistemas fotovoltaicos no mundo vem sendo motivado pela redução no custo da energia elétrica advinda desta fonte. O custo nivelado da energia elétrica (LCOE, da sigla em inglês par *Levelized Cost of Electricity*) obtida pela rota fotovoltaica depende de muitos fatores, os principais sendo a energia produzida pelos sistemas, os custos de operação ao longo de sua vida útil e os investimentos financeiros iniciais (Fraunhofer - ISE, 2015). Quanto maior a energia produzida, menor o valor final da LCOE. Em contrapartida, quanto mais caros os módulos e outros itens do sistema, mais cara a eletricidade se torna. Desta forma, a escolha de locais com altos índices de irradiância para instalação e a escolha de uma tecnologia de alta eficiência de conversão a um custo baixo devem ser os guias para a implantação de sistemas mais efetivos.

Aumentar a eficiência das células e dos módulos fotovoltaicos tem sido o grande objetivo de pesquisadores dessa área nos últimos anos. A eficiência  $\eta$  de uma célula solar é parametrizada pelas suas figuras de mérito, tais como a tensão de circuito aberto ( $V_{OC}$ ), a densidade de corrente de curto-circuito ( $J_{SC}$ ) e o fator de forma ( $FF$ , da sigla em inglês para *Fill Factor*), conforme a equação 1. O fator de normalização  $P_{inc}$  é a irradiância incidente, no caso, a solar.

$$\eta = \frac{V_{OC} J_{SC} FF}{P_{inc}} \quad (1)$$

A  $V_{OC}$  é uma medida direta das recombinações de pares elétron-buraco que prejudicam a captação de corrente no dispositivo, assim como também tem uma relação com o(s) *gap*(s) de energia do(s) material(is) ativo(s). Quanto maior o *gap* de energia do material, maior será a  $V_{OC}$ , e quanto maiores forem as taxas de recombinação, menor será a  $V_{OC}$ . Desta forma, reduzir a densidade de defeitos, que atuam como centros de recombinação nos dispositivos, aumenta a eficiência do dispositivo. A  $J_{SC}$  é uma medida direta da absorção da energia solar pelos materiais do dispositivo, bem como da extração dos portadores de carga elétrica gerados até os contatos elétricos sob a forma de corrente. Assim, o aumento da taxa de injeção de fótons pela superfície frontal através da deposição de camadas anti-reflexivas, a redução da área dos contatos elétricos para reduzir o sombreamento e a utilização de materiais que absorvem mais e que criem caminhos de condução mais fáceis para os portadores de carga elétrica chegarem até os contatos, melhora a conversão fotovoltaica no dispositivo. Por fim, o  $FF$  depende da  $V_{OC}$  e das resistências elétricas parasíticas e intrínsecas que existem no dispositivo. As resistências intrínsecas são aquelas associadas às camadas e interfaces existentes no dispositivo. Como é muito difícil alterar a resistência dos materiais ativos, o aumento do  $FF$  vai depender basicamente da otimização da estrutura de contatos elétricos definidos no dispositivo. Já as resistências parasíticas estão associadas a erros no processo de produção dos contatos elétricos e da corrosão de camadas, o que pode ser minimizado.

A Fig. 1a apresenta um modelo elétrico para uma célula solar real, contendo um gerador de corrente  $I_L$  em paralelo com dois diodos, representando as fontes de recombinação radiativa de corrente  $I_{D1}$  e não radiativa  $I_{D2}$ , e um resistor  $R_{SH}$ , representando um caminho alternativo para a passagem da corrente elétrica  $I_{SH}$ . Em série há um resistor  $R_S$ , representando as resistências dos materiais e de suas interfaces à passagem da corrente elétrica  $I$  gerada. Neste modelo,  $V$  é a tensão elétrica entregue à carga. Levando em conta todos estes fatores, chega-se à equação 2, que descreve a corrente elétrica que se extrai do dispositivo como função da tensão elétrica em seus terminais:

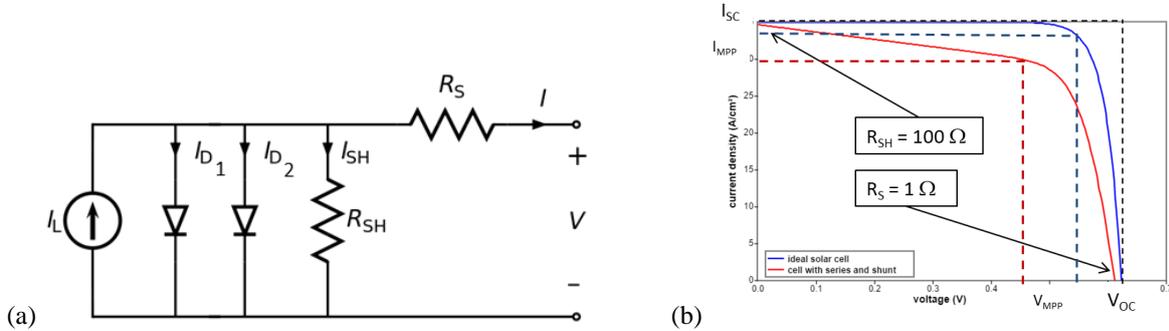


Figura 1: (a) Circuito equivalente de uma célula solar real e (b) curva  $IV$  de uma célula solar ideal sem resistências parasíticas (azul) e real com  $R_S = 1 \Omega$  e  $R_{SH} = 100 \Omega$  (vermelha). Fonte: PVEducation.

$$I = I_L - I_{D1} - I_{D2} - I_{SH} \quad (2a)$$

$$I = I_L - I_{01} \left[ e^{\frac{e(V+R_S I)}{kT}} - 1 \right] - I_{02} \left[ e^{\frac{e(V+R_S I)}{2kT}} - 1 \right] - \frac{V+R_S I}{R_{SH}} \quad (2b)$$

onde  $k$  é a constante de Boltzmann,  $T$  é a temperatura do dispositivo e  $I_{01}$  e  $I_{02}$  são as correntes de saturação reversa dos diodos.

A Fig. 1b mostra duas curvas  $IV$  (corrente por tensão) de dispositivos contendo os mesmos valores para os seguintes parâmetros,  $I_L = 35 \text{ mA/cm}^2$ ,  $I_{01} = 2 \times 10^{-10} \text{ mA/cm}^2$ ,  $I_{02} = 0 \text{ mA/cm}^2$  e  $T = 25^\circ\text{C}$ .  $R_S$  e  $R_{SH}$  na curva sólida azul apresentam valores ideais, ou seja,  $R_S = 0 \Omega$  e  $R_{SH} \rightarrow \infty$ , e na curva vermelha  $R_S = 1 \Omega$  e  $R_{SH} = 100 \Omega$ . Dessa forma, percebe-se como a resistência elétrica associada aos contatos elétricos é um fator de otimização importante para dispositivos fotovoltaicos.

Qualquer sistema fotovoltaico se beneficia de um alto valor de  $FF$ . Porém, em particular, sistemas que operam sob concentração dependem de forma mais sensível deste parâmetro (Zeitouny, Katz, *et al.*, 2017). Quando correntes elétricas muito elevadas passam em um dispositivo fotovoltaico, sua resistência em série passa a ser o grande fator limitador de eficiência, pois a potência perdida por efeito Joule nos contatos elétricos é muito alta. Dessa forma, os sistemas não atingem fatores de concentração ótimos muito altos e operam com concentrações de 10 a 500 sóis (Green, Emery, *et al.*, 2017), valores muito abaixo da concentração solar máxima de cerca de 46.000 sóis.

Diversos desenhos para os contatos elétricos de um dispositivo fotovoltaico já foram propostos. Porém, o desenho mais comum encontrado comercialmente é com uma cobertura metálica em toda a superfície traseira (por onde a radiação solar não entra) e um desenho com dedos coletores (*fingers*) e barramentos retangulares na superfície frontal, tal como ilustrado na Fig. 2. Pode-se citar outros desenhos mais avançados, porém de produção comercial mais complexa, tais como as células com contatos traseiros (Van Kerschaver e Beaucarne, 2006) e células convencionais com dedos coletores e barramentos com diferentes geometrias (Serreze, 1978; Wen, Yueqiang, *et al.*, 2010).

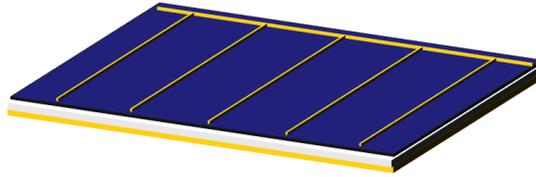


Figura 2: Esquema ilustrativo da configuração elétrica de uma célula solar com a malha frontal metálica de dedos coletores e a superfície traseira completamente coberta com camada metálica.

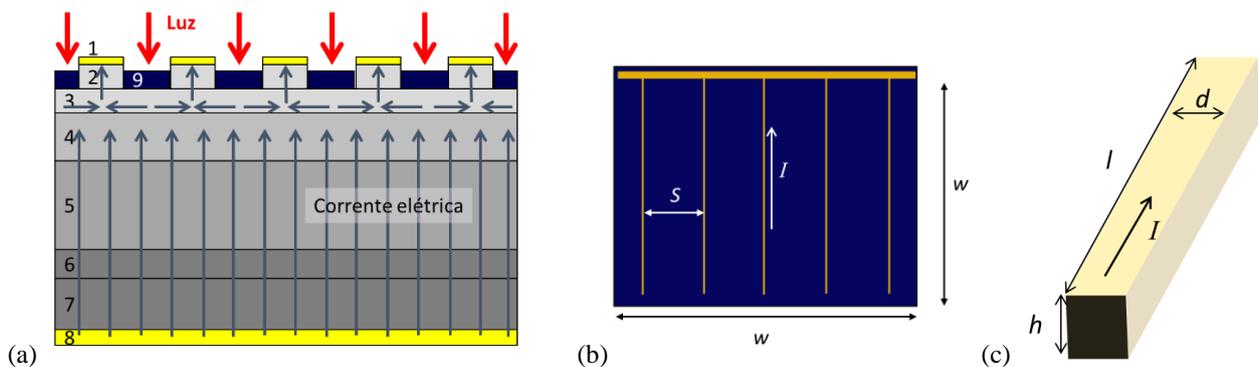
Quando se desenha uma estrutura de dedos coletores, depara-se com um problema de otimização. Há um compromisso entre reduzir a resistência elétrica em série que a célula solar apresenta e, com isso, aumentar o  $FF$ , e aumentar a injeção de radiação solar por esta superfície e, com isso, aumentar a  $V_{OC}$  e  $I_{SC}$ . Dedos coletores mais largos e mais numerosos e com um espaçamento pequeno entre eles fazem a resistência elétrica ser reduzida. Em contrapartida, quanto mais metal na superfície frontal, menor é a injeção de radiação solar. Para cada conjunto de parâmetros de transporte dos materiais semicondutores e metálicos utilizados em um dispositivo, deve haver um conjunto ótimo de parâmetros para o desenho dos dedos coletores que aumenta a eficiência de conversão do dispositivo. Uma forma de realizar esta otimização é através de algoritmos genéticos (GAs), uma das possíveis abordagens para o aprendizado de máquina, ou *machine learning*.

Os GAs são uma poderosa ferramenta que atende a múltiplas aplicações. Ela se baseia na busca de uma solução ótima para um problema específico ou na otimização de um processo, uma configuração ou o resultado de uma função com múltiplas variáveis. Surgidos nos anos 1970 (Holland, 1975), os GAs receberam essa denominação por serem inspirados na evolução biológica natural das espécies. Os GAs evoluem uma população inicial de indivíduos através de ações aleatórias semelhantes àquelas que atuam nos mecanismos da evolução, tais como mutações, recombinações genéticas, reprodução, cruzamento e seleção em função de algum critério. Assim, são selecionados os indivíduos com maior aptidão (maximização ou minimização de uma função-objetivo) e descartados os que menos se adaptam à otimização do problema. Isto é repetido um número determinado de vezes (gerações), até atingir um valor ótimo ou até se cumprir um critério de parada. Finalmente, é obtido um indivíduo evoluído que oferece a melhor solução possível para o problema dentro das condições estipuladas.

Neste trabalho, apresentamos os resultados de um processo de otimização baseado em GA no desenho da malha metálica de dedos coletores a serem produzidos como o contato elétrico frontal de uma célula solar. Nas simulações, utilizamos parâmetros específicos baseados em dispositivos reais fabricados em nosso laboratório, com os quais comparamos nossos resultados. Além do tradicional desenho retangular de dedos coletores, testamos outras geometrias e apresentamos seus resultados.

## 2. MODELAGEM DO CONTATO ELÉTRICO FRONTAL DE CÉLULAS SOLARES COM DEDOS COLETORES RETANGULARES

Uma célula solar é composta por uma série de camadas, conforme o exemplo da Fig. 3a. Neste exemplo, muito comum para células produzidas por epitaxia, estão representadas as seguintes camadas: (1) Malha frontal de contatos elétricos (dedos coletores), (2) Camada de contato, (3) Janela, (4) Emissor, (5) Base, (6) *Back Surface Field*, (7) Substrato, (8) Contato elétrico traseiro e (9) Camada anti-reflexiva. Além disso, estão representadas por setas as direções e locais de entrada da radiação solar (setas vermelhas espessas) e o caminho percorrido pela corrente elétrica no dispositivo (setas azuis finas) até o contato elétrico frontal. Quando a corrente elétrica chega aos dedos coletores, elas viajam lateralmente até os barramentos, como apresentado nas Figs. 3b e 3c. As Figs. 3b e 3c apresentam também detalhes geométricos da superfície frontal do dispositivo e de um dedo coletor, respectivamente, onde  $w$  é a dimensão lateral do dispositivo,  $N$  é o número de dedos coletores,  $S$  é a distância entre dois dedos coletores e  $l$ ,  $d$  e  $h$  são o comprimento, a largura e a altura de um dedo coletor, respectivamente.





para o caso ideal, ou seja, sem a contribuição de resistências. Para isso, faz-se  $I_{02} = 0 \text{ mA/cm}^2$ ,  $R_{SH} \rightarrow \infty$  e  $R_S = 0 \Omega$  na equação 2b.

Além das perdas pela resistência em série, deve-se considerar as perdas elétricas pelo sombreamento causado pelos dedos coletores na superfície frontal.  $X_O$ , que é a fração sombreada da área total conforme a equação 6.

$$X_O = \frac{A_{sombra}}{A_{total}} = \frac{Ndl}{w^2} \quad (6)$$

Finalmente, pode-se definir a função objetivo que o GA deve minimizar: a perda total  $X$ , definida pela equação 7.

$$X = X_O + (1 - X_O)X_R \quad (7)$$

### 3. ALGORITMOS GENÉTICOS APLICADOS AO PROBLEMA DE GEOMETRIA RETANGULAR

Um esquema representativo do processo de GA é apresentado na Fig. 4. A população inicial de indivíduos é criada a partir dos dados iniciais fornecidos pelo usuário referentes a todos os parâmetros de construção do dispositivo padrão, tais como altura  $h$ , largura  $d$  e número de dedos coletores  $N$ , respeitando intervalos de valores impostos para o sistema em função de limitações físicas de construção dos dispositivos. A função objetivo, que, em nosso caso, é dada pela equação 7, para cada indivíduo é calculada e o valor é comparado com as condições e metas de otimização. Se os valores satisfazem as condições, o que muito dificilmente ocorrerá para a primeira geração de indivíduos, a simulação termina e os valores ótimos para os parâmetros são fornecidos. Caso contrário, operadores genéticos são aplicados aos indivíduos, gerando variações aleatórias dos parâmetros, essas variações geradas são combinadas com os melhores indivíduos da geração anterior produzindo, assim, uma nova geração de indivíduos. Os valores para cada variável são novamente limitados aos intervalos, definidos inicialmente. A função objetivo é, então, calculada para os parâmetros de cada indivíduo dessa nova geração e seu valor comparado com as condições estipuladas para a otimização. Novamente, se as condições forem satisfeitas, a simulação termina, senão, o processo se reinicia, até atingir os melhores resultados.



Figura 4: Fluxograma do processo de otimização realizado por um algoritmo genético na obtenção de soluções otimizadas para o problema de geometria retangular de dedos coletores.

O primeiro passo da aplicação do GA ao nosso sistema foi definir os limites (espaço de busca) e restrições ao problema. As faixas de valores para cada parâmetro são impostas para que se evite soluções que não são viáveis fisicamente, tal como uma quantidade e largura de dedos coletores que definem uma linha maior que a largura da célula solar ou que sejam tão pequenos que não possam ser fabricados com as técnicas atuais de fotolitografia disponíveis. Os limites de valores aplicados ao nosso problema seguem na Tab. 1.

Tabela 1: Valores limites para os parâmetros de construção dos dedos coletores na geometria retangular.

Parâmetro	Limite inferior	Limite superior
$d$	$d_{min} = 5 \mu\text{m}$	$w/2 = 1500 \mu\text{m}$
$N$	2	300
$h$	$0,1 \mu\text{m}$	$2 \mu\text{m}$

A largura  $d$  dos dedos coletores deve ser inferior à metade da dimensão lateral  $w$ , valor limite definido para o contato elétrico do dispositivo, e maior ou igual à resolução mínima  $d_{min}$  da técnica de litografia disponível. Como limite superior para  $N$ , definimos o valor de 300 unidades, uma vez que  $d \cdot N_{Max} = 1500 \mu\text{m}$  atinge o limite máximo para o contato definido anteriormente. O comprimento  $l$  dos dedos coletores é fixado como sendo o mesmo valor da dimensão lateral do dispositivo, ou seja,  $w$ . Por fim, a altura  $h$  dos dedos coletores é limitada por questões econômicas associadas à deposição de camadas muito espessas de metais nobres, tal como o ouro, que é utilizado nos contatos elétricos.

Para definir os parâmetros iniciais de entrada do GA, tomou-se como referência os dados de uma célula solar de GaAs produzida em nosso laboratório, cuja estrutura e otimização, baseada em métodos analíticos, são descritas em

detalhes na Ref. (Weiner, Micha, *et al.*, 2016). O barramento metálico tem 300  $\mu\text{m}$ . A Tab. 2 apresenta os outros parâmetros construtivos da malha de contatos realizada para esse dispositivo.

Tabela 2. Parâmetros dos contatos elétricos superiores da célula solar fabricada.

Símbolo	Valor
$w$ (mm)	3
$l$ (mm)	3
$d$ ( $\mu\text{m}$ )	15
$h$ ( $\mu\text{m}$ )	0,215
$N$ (unid)	4

Os dados referentes aos parâmetros elétricos de transporte tais como as mobilidades dos portadores de corrente nas camadas semicondutoras, foram medidos em amostras de calibração. Os valores desses parâmetros, bem como de outros, são apresentados na Tab. 3. Os mesmos foram utilizados como parâmetros de entrada na rotina de otimização.

Tabela 3: Dados experimentais da célula solar fabricada.

Dados experimentais	Valor
$\mu_3$ ( $\text{cm}^2/\text{V/s}$ )	158
$L_3$ (nm)	100
$D_3$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	2,16E+18
$\mu_2$ ( $\text{cm}^2/\text{V/s}$ )	110
$L_2$ (nm)	30
$D_2$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	4,10E+19
$\rho_1$ ( $\Omega\text{m}$ )	2,23E-8
$\rho_{1,2}$ ( $\Omega\text{cm}^2$ )	2,5E-5

A técnica utilizada para realizar o descarte de indivíduos de cada geração que não satisfazem as condições de otimização foi a elitista, que consiste em salvar o(s) melhor(es) indivíduo(s) de uma geração e reproduzi-los na seguinte, evitando perder soluções importantes presentes em indivíduos com uma alta aptidão e que podem ser perdidos durante os processos de seleção e cruzamento, garantindo assim que a geração evoluída seguinte tenha um resultado igual ou melhor que a anterior, nunca pior.

O GA é configurado através do software MATLAB, utilizando as perdas totais do simulador previamente programado como função objetivo no processo de otimização. A função de otimização dentro do algoritmo genético chamada "*gaoptimset*" é usada para configurar a informação dos operadores genéticos.

O tamanho da população escolhido para a otimização tem 120 indivíduos por 70 gerações, produzindo um total de 7.200 classificações. Em relação aos operadores, a fração de *crossover* usada é 0,9 do tipo de ponto único. Dez indivíduos com os melhores valores de aptidão em uma determinada geração são escolhidos para sobreviver e fazer parte da geração seguinte. Também foram realizados testes com diferentes valores populacionais, número de geração e fração de cruzamento, obtendo o mesmo resultado atingindo um mínimo comum.

No processo de simulação, um gráfico é gerado representando a eficiência do GA em função do número de ciclos ou gerações. Este gráfico é mostrado na Fig. 5. À medida que o número de gerações aumenta, as perdas são reduzidas. No entanto, é alcançado um ponto a partir do qual as perdas totais permanecem constantes, independentemente do número de gerações. Os valores médios (losangos azuis) são a média entre os melhores indivíduos (quadrados pretos) de cada geração. De acordo com esse resultado, 30 gerações no algoritmo genético foram suficientes para minimizar as perdas.

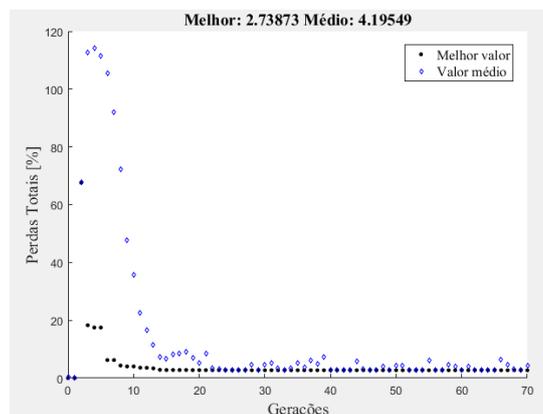


Figura 5: Gráfico de eficiência do algoritmo genético.

**Resultados obtidos pela otimização.** A Tab. 4 apresenta os resultados obtidos com o GA para os parâmetros construtivos da malha de dedos coletores na geometria retangular usadas no contato elétrico frontal de células solares e um resumo das perdas na situação simulada. Além disso, são apresentados os valores utilizados na fabricação do dispositivo utilizado como referência para o estudo. É possível perceber que as perdas totais são bastante reduzidas de 5,03% para 2,74% para a configuração otimizada, uma diferença de 45,5% em relação à configuração usada do dispositivo.

Tabela 4: Comparação dos parâmetros construtivos dos dedos coletores na célula solar fabricada e as obtidas pelo GA.

Parâmetro	Célula solar fabricada	Resposta GA
$d$ ( $\mu\text{m}$ )	15	5
$H$ ( $\mu\text{m}$ )	0,215	2,00
$N$ (und)	4	7
$X_O$ [%]	2,00	1,17
$X_R$ [%]	3,09	1,59
$X$ [%]	5,03	2,74

Com os novos parâmetros obtidos pelo GA, obtivemos os novos valores de resistência, de acordo com as equações 3 e 4. Os dados obtidos são mostrados na Tab. 5.

Tabela 5: Comparação das resistências elétricas de cada camada e a total na célula solar fabricada e as obtidas pelo GA.

Parâmetro	Célula solar fabricada	Resposta GA
$R_{met}$ ( $\Omega$ )	5,21	1,00
$R_{emissor}$ ( $\Omega$ )	9,40	3,05
$R_{cont. front.}$ ( $\mu\Omega$ )	9,22	27,00
$R_{cont. tras.}$ ( $m\Omega$ )	5,55	5,55
$R_S$ ( $\Omega$ )	14,62	4,06

Olhando detalhadamente as Tab.s 4 e 5, percebemos que o valor ótimo obtido para  $d$  foi o limite inferior imposto. Isso faz com que as perdas por sombreamento sejam reduzidas, uma vez que a quantidade  $d \cdot N$  para a configuração do GA é inferior à da célula fabricada. Apesar desse valor de  $d$  gerar um aumento na resistência elétrica frontal, como essa contribuição é irrisória para a resistência total, as perdas totais da função objetivo são pouco afetadas. O valor de  $h$  para a configuração otimizada atingiu o limite superior. Como esse fator não influencia no sombreamento e quanto mais espesso o dedo coletor metálico, menor é a resistência elétrica, é natural que esse limite otimize a geometria, pois conforme mostrado na Tab. 6, a medida que  $h$  aumenta, as perdas diminuem. A redução na resistência do emissor é consequência da diminuição da distância percorrida pelos elétrons no emissor até encontrar um dedo metálico coletor. Por fim, o valor otimizado para  $N$  respeita o compromisso entre a otimização óptica e elétrica.

O valor limite utilizado para  $h = 2 \mu\text{m}$ , não é um limite físico, apenas econômico. Se, porventura, for possível aumentar a altura dos dedos coletores, com certeza as perdas por resistência elétrica no dispositivo serão menores.

Tabela 6: Resultados obtidos pelo GA para os parâmetros construtivos dos dedos coletores com variação do limite máximo de sua altura.

Parâmetro	Célula solar fabricada $h = 0,215 \mu\text{m}$	Resposta GA			
		$h = 0,215 \mu\text{m}$	$h = 0,5 \mu\text{m}$	$h = 1 \mu\text{m}$	$h = 2 \mu\text{m}$
$d$ ( $\mu\text{m}$ )	15	5	5	5	5
$N$ (und)	4	9	8	7	7
$X_O$ [%]	2.00	1,5	1,33	1,17	1,17
$X_R$ [%]	3.09	2,26	1,84	1,73	1,59
$X$ [%]	5.03	3,72	3,14	2,87	2,74
Redução nas perdas (%)	0	26,0	37,6	42,9	45,5

#### 4. APLICAÇÕES DA OTIMIZAÇÃO POR ALGORITMO GENÉTICO A OUTRAS GEOMETRIAS

A geometria retangular para a construção dos dedos coletores é, de fato, a mais fácil de ser produzida. Porém, outras geometrias podem ser utilizadas e acabar resultando em maiores eficiências de conversão para o dispositivo fotovoltaico. Outro motivo para testar outras geometrias é a alta resistência elétrica apresentada pelo emissor na

configuração retangular. Isso se deve às grandes distâncias que o portador majoritário deve percorrer até atingir um dedo coletor. Utilizar outro desenho geométrico pode ajudar a reduzir essa distância.

Para testar essa possibilidade, resolvemos simular outras geometrias para a malha de dedos coletores, tais como a de estrutura hexagonal, apresentada na Fig. 6a, e a de estrutura diamante, apresentada na Fig. 6b. As malhas formadas por essas estruturas são representadas ao lado do desenho que definem as unidades dos dedos coletores.

Os parâmetros de interesse para otimização das estruturas hexagonal e diamante são, conforme ilustrados pelas Figs. 6a e 6b, respectivamente: a altura  $h$  do metal e a diferença  $T$  entre os raios circunscrito  $R_a$  e inscrito  $R_b$  que passam pelos vértices interno e externo das figuras, respectivamente, ou seja,  $T = R_a - R_b$ .

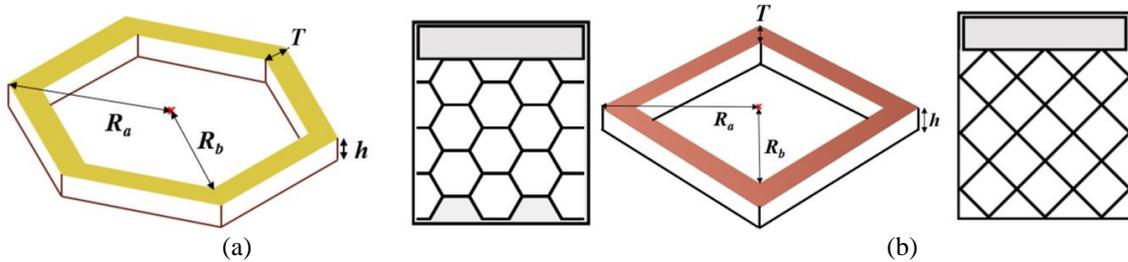


Figura 6: Exemplos de possíveis geometrias para os dedos coletores: (a) estrutura hexagonal e (b) estrutura diamante.

As equações que definem as resistências elétricas das camadas do metal e do emissor para as novas configurações são ligeiramente alteradas por conta da nova geometria. Os conjuntos de equações 8 e 9 apresentam as novas equações que substituem a equação 3b para as estruturas hexagonal e diamante, respectivamente.

$$R_3^{HEX} = \frac{\rho s_3 (\sqrt{3})}{6 \cdot 32} \tag{8}$$

$$R_3^{DIA} = \frac{\rho s_3 (\sqrt{2})}{4 \cdot 16} \tag{9}$$

onde as variáveis são as mesmas definidas nas equações 3a a 3e. A resistência final das configurações continua sendo calculada como na equação 4, onde  $N$  passa a ser o número de hexágonos ou o número de diamantes para cada uma das configurações. Os valores mínimos e máximos definidos para os parâmetros construtivos dessas geometrias, que também são fruto de limitações físicas ou técnicas para os dispositivos, são apresentados na Tab. 7.

Tabela 7: Valores limites para os parâmetros de construção dos dedos coletores nas geometrias hexagonal e diamante.

Parâmetro	Limite inferior	Limite superior
Geometria hexagonal		
$T$	$T_{min} = 5 \mu\text{m}$	1500 $\mu\text{m}$
$R_a$	100 $\mu\text{m}$	1500 $\mu\text{m}$
$h$	0,1 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$
Geometria diamante		
$T$	$T_{min} = 5 \mu\text{m}$	1500 $\mu\text{m}$
$R_a$	100 $\mu\text{m}$	1500 $\mu\text{m}$
$h$	0,1 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$

As Tab.s 8 e 9 apresentam os resultados otimizados para os parâmetros de construção dos dedos coletores nas geometrias hexagonal e diamante, respectivamente, obtidos pelo GA.

Tabela 8: Resultados obtidos pelo GA para os parâmetros construtivos dos dedos coletores com geometria hexagonal com variação do limite máximo de sua altura.

Parâmetro	Célula solar fabricada $h = 0,215 \mu\text{m}$	Resposta GA			
		$h = 0,215 \mu\text{m}$	$h = 0,5 \mu\text{m}$	$h = 1 \mu\text{m}$	$h = 2 \mu\text{m}$
$T$ ( $\mu\text{m}$ )	NA	7.62	7.13	5.64	5.00
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	NA	0.327	0.418	0.498	0.599
$X_O$ [%]	2.00	2.19	1.69	1.32	1.02
$X_R$ [%]	3.09	2.35	1.88	1.75	1.64
$X$ [%]	5.03	4.48	3.58	3.02	2.63
Redução nas perdas (%)	0	10.93	28.83	39.96	47.71

Tabela 9: Resultados obtidos pelo GA para os parâmetros construtivos dos dedos coletores com geometria diamante com variação do limite máximo de sua altura.

Parâmetro	Célula solar fabricada $h = 0,215 \mu\text{m}$	Resposta GA			
		$h = 0,215 \mu\text{m}$	$h = 0,5 \mu\text{m}$	$h = 1 \mu\text{m}$	$h = 2 \mu\text{m}$
$T$ ( $\mu\text{m}$ )	NA	6.37	6.20	6,20	5,64
$R_i$ [mm]	NA	0.388	0,500	0.471	0,532
$X_O$ [%]	2.00	1.72	1.42	1.42	1.25
$X_R$ [%]	3.09	2.68	2.09	1.70	1.63
$X$ [%]	5.03	4.35	3.48	3.09	2.86
Redução nas perdas (%)	0	13.52	30.81	38.56	43.14

Durante o processo de otimização de cada uma das geometrias, o GA seleciona o limite máximo de espessura como o parâmetro ótimo. Quanto maior a espessura, uma maior diminuição nas perdas totais é conseguida. Portanto, a espessura dos dedos coletores é importante no processo de otimização. Este parâmetro deve ser levado em consideração na fabricação de células solares. A saída do processo de otimização de cada uma das geometrias são os parâmetros otimizados com essas novas dimensões. Com as equações 3a-e, 8 e 9 podemos calcular as resistências de cada camada. Os valores de resistência obtidos estão na Tab. 10.

Tabela 10: Resistências elétricas de cada camada e a total na célula solar fabricada e as obtidas pelo GA para as geometrias testadas.

Parâmetro	Célula solar fabricada $h = 2 \mu\text{m}$	Resposta GA, $h = 2 \mu\text{m}$		
		geometria retangular	geometria hexagonal	geometria diamante
$R_{met}$ ( $\Omega$ )	5.21	1.00	2.76	1.76
$R_{emissor}$ ( $\Omega$ )	9.40	3.05	1.70	2.54
$R_{cont. front.}$ ( $\mu\Omega$ )	9.22	27.00	8.27	3.53
$R_{cont. tras.}$ ( $\text{m}\Omega$ )	5.55	5.55	5.55	5.55
$R_S$ ( $\Omega$ )	14.64	4.06	4.47	4.31

Fazendo uma comparação da resistência das diferentes camadas de cada uma das geometrias com a célula solar de referência há uma redução significativa nas resistências. O valor de resistência de  $R_{met}$  é menor na geometria retangular em comparação com as outras geometrias porque o comprimento dos dedos é menor. A geometria hexagonal apresenta maior redução na  $R_{emissor}$ , em função da menor distância a ser percorrida pelos elétrons antes de serem coletados pelos dedos. A resistência total  $R_S$  é menor na geometria retangular. Porém, como veremos essa não é necessariamente a estrutura ideal porque devemos ainda levar o sombreamento em consideração.

A Tabela 11 resume os resultados obtidos do processo de otimização das três geometrias. Ao analisá-la, é possível comparar os resultados finais associados às perdas e avaliar a melhor geometria.

Tab. 11: Melhores resultados obtidos pelo GA para as geometrias testadas.

Parâmetro	Célula solar fabricada $h = 2 \mu\text{m}$	Resposta GA, $h = 2 \mu\text{m}$		
		geometria retangular	geometria hexagonal	geometria diamante
$X_O$ [%]	2.00	1,17	1.02	1.25
$X_R$ [%]	3.09	1,59	1.65	1.63
$X$ [%]	5.03	2.74	2.65	2.86
Redução nas perdas (%)	0	45.53	47.71	43.14

Na Tab. 11, pode-se observar que todas as percentagens de perda, tanto por sombreamento quanto por resistência, são mais baixas do que as da célula de referência. Também percebe-se que a percentagem de perdas por sombreamento obtido pelo GA com a geometria hexagonal é a menor em comparação com as outras duas geometrias, mas a percentagem de perdas por resistência é maior, já que durante o processo de otimização se obtém uma  $R_{met}$  considerável. Com respeito às perdas totais, obtém-se uma melhor relação entre sombreamento e resistência na configuração hexagonal, o que leva a uma boa diminuição na percentagem de perdas totais.

## 5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste trabalho, mostramos que algoritmos genéticos são úteis no processo de otimização da malha de dedos coletores para o contato elétrico frontal, levando a minimização de perdas por resistência elétrica e por sombreamento em dispositivos fotovoltaicos. Em nossa análise, utilizamos o algoritmo de otimização para encontrar os melhores parâmetros de construção dos dedos coletores em três diferentes geometrias, a retangular, a hexagonal e a do tipo diamante. Uma redução nas perdas totais de mais de 40% foi observada para as três geometrias otimizadas em relação à estrutura retangular utilizada na fabricação de uma célula solar que utilizamos para comparação. Essa estrutura foi confeccionada baseada em métodos analíticos. Para alcançar esses resultados otimizados, apenas cerca de 30 gerações de indivíduos foram necessárias no código do algoritmo genético, revelando uma convergência muito rápida.

Reduzir as perdas relacionadas à geometria e aos parâmetros construtivos da malha de dedos coletores é de suma importância na melhoria da eficiência das células solares. Na geometria hexagonal, melhor estrutura encontrada, uma redução de 47,71% nessas perdas leva a um aumento de 2,21% na eficiência. Uma célula solar com as dimensões otimizadas para a malha de dedos coletores será fabricada para verificar experimentalmente a validade dos resultados teóricos obtidos.

### **Agradecimentos**

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FAPERJ, CNPq, FINEP e CAPES.

### **REFERÊNCIAS**

- Fraunhofer - ISE, 2015. Current and Future Cost of Photovoltaics. Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems. Study on behalf of Agora Energiewende, Freiburg, Germany.
- Green, M. A., 2017. Solar cell efficiency tables (version 49), Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 25, pp. 3-13.
- Holland, J. H., 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press.
- Horowitz, A. W., 2015. A bottom-up cost analysis of a high concentration PV module - 11th International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems, Aix-le-Bains, França.
- Phillipps, S., Warmuth, W., 2017. Fraunhofer ISE: Photovoltaics Report, updated: 12 July 2017.
- Serreze, H., 1978. Optimizing Solar Cell Performance by Simultaneous Consideration of Grid Pattern Design and Interconnect Configuration. 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. Washington DC, USA. pp. 609-614.
- Silvaco, 2015. Optimizing Solar Cell Top Metal Contact Design Introduction. Simulation Standard, vol. 25, n. 2, pp. 12-15.
- Kerschaver, E.V., Beaucarne, G., 2006. Back Contact Solar Cell: a Review. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 14, pp. 107-123.
- Weiner, E. et al., 2016. Improving the Figures of Merit of Intermediate Band Solar Cells by Controlling the Capping Procedure of the Quantum Dots. 43th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), pp. 2080–2083, Portland, OR.
- Wen, L. et al., 2010. Optimization of grid design for solar cells. Journal of Semiconductors, vol. 31, n. 1.
- Zeitouny, J. et al., 2017. Band Gap Engineering of Multi-Junction Solar Cells: Effects of Series Resistances and Solar Concentration. Scientific Reports, 7, n. 1766.

### **OPTIMIZATION OF METAL GRID OF FINGER COLLECTORS FOR FRONTAL ELECTRICAL CONTACT OF SOLAR CELLS BY GENETIC ALGORITHMS**

**Abstract.** High series resistance and low parallel resistance are sources of loss in photovoltaic devices. For devices operating under concentration, these are the main limiting factors for the enhancement of conversion efficiency. Excluding external factors associated to production process failures, the electrical series resistance depends on intrinsic factors related to the materials and the layers composing the structure of the photovoltaic devices. In this way, to minimize its value it is extremely important to plan adequately the cell structure prior to the production of the devices. One of the most impacting factors in the series resistance is the grid design for the fingers at the frontal electric contact. On the other side, to minimize the contact series resistance requires the increase of the metallic area on the front surface, which is also the window for solar radiation. Therefore, there should be a trade-off between the electrical and optical losses. In this work, we show the results of the optimization of the grid design for the front electric contact for three different geometries by genetic algorithms. The tested geometries were the rectangular, traditional for solar cell production, the hexagonal and the diamond-like. Moreover, we compare the results with a solar cell produced in our lab where the frontal grid was optimized using a trial and error method. Finally, we discuss the improvements obtained for the new geometries and present the optimized configuration, which was obtained with the hexagonal geometry and reduced the losses by 47.71%.

**Key words:** Photovoltaic cells, fingers, genetic algorithm optimization.