



Adriel Barbosa de Souza

Otimização de Estruturas Fotovoltaicas

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC–Rio.

Orientador: Ivan Fabio Mota de Menezes

Rio de Janeiro
Dezembro de 2018

Agradecimentos

Ao meu pai, Felix Orlando de Souza, por ter me apoiado em todos os momentos da minha vida e por sempre ter batalhado pela minha felicidade, mesmo com toda a minha rebeldia. Espero, um dia, poder ser um pai igual a você.

À minha mãe, Ada Carmo Barbosa de Souza, por acreditar nos meus sonhos e por ser o meu anjo da guarda. Perdão por todas as vezes que não correspondi o seu amor.

Ao meu irmão, Felipe Barbosa de Souza, pelo apoio e companheirismo. O próximo TCC será o seu! Força e Feliz Natal!

Nenhuma palavra pode demonstrar a gratidão que tenho por tudo que fizeram por mim.

A todos os amigos que conquistei na PUC-Rio, que sempre me apoiaram e me proporcionaram momentos ímpares.

À Vice-reitoria comunitária por ter acreditado no meu potencial e por ter proporcionado a realização do meu sonho de concluir a graduação.

Ao meu orientador, Ivan Fabio Mota de Menezes, pela generosidade, paciência, confiança e aprendizado durante a realização desse projeto.

Resumo

Otimização de Estruturas Fotovoltaicas

Esse projeto está associado às questões ambientais, energéticas e humanitárias, além de ser uma tentativa de contribuição para a evolução humana. E foi inspirado pelo princípio do diamante, que usufrui de um corte otimizado que possui o objetivo de maximizar o seu brilho, e consequentemente, agregar valor.

Diferentemente dos sistemas atuais, essa tecnologia se preocupa com a luz desperdiçada na reflexão. Essa energia, que compõe boa parte da incidente, seria "recuperada". Ou seja, a estrutura teria a missão de reter o máximo de luz no seu interior. E com todo o material fotovoltaico dentro da estrutura, a absorção seria, em tese, maximizada. E uma boa analogia seria a de uma superfície isotérmica com apenas uma abertura, simulando então um corpo negro. , Certamente, a temperatura de seu interior seria elevada, o que seria prejudicial para a eficiência e para a vida útil dos painéis. Logo, o meio interno do sistema poderia ser composto por água, que teria a função de manter uma temperatura controlada dos painéis e seria a responsável de direcionar os raios solares para o interior da estrutura, de acordo com a Lei de Snell.

Palavras-chave

Painel solar; Otimização; Estrutura; Simulação;

Abstract

Optimization of Photovoltaic Structures

This project is associated with environmental, energy and humanitarian issues, as well as being an attempt to contribute to human evolution. And it was inspired by the principle of diamond cut, which enjoys an optimized cut that aims to maximize its brightness, and consequently add value.

Unlike current systems, this technology is concerned with the light that is wasted in reflection. This energy, which makes up much of the incident, would be "recovered". In other words, the structure would have the mission of retaining the maximum of light inside. And with all the photovoltaic material inside the structure, the absorption would, in theory, be maximized. And a good analogy would be an isothermal surface with only one aperture, simulating a black body.

The temperature inside it would be high, which would be detrimental to the efficiency and to the useful life of the panels. Thus, the internal medium of the system could be composed of water, which would have the function of maintaining a controlled temperature of the panels and would be responsible for directing the solar rays to the interior of the structure, according to Snell's Law.

Keywords

Solar Panel; Optimization; Estructure; Simulation;

Sumário

1	Introdução	8
1.1	Motivação	8
1.2	Objetivo	9
1.3	Organização de Trabalho	9
2	Sistemas fotovoltaicos	10
2.1	Painéis Solares	10
2.2	Células solares	14
3	Metodologia	19
3.1	Comparativo	36
3.2	Melhores Resultados	37
3.3	Conclusão	38

Lista de figuras

2.1	Painel solar convencional.	10
2.2	Exemplo de painel solar seguidor.	11
2.3	Protótipo 3DPV.	12
2.4	Exemplo de um CPV.	13
2.5	Célula solar Monocristalina.	14
2.6	Célula solar Policristalina.	15
2.7	Célula solar de Silício Amorfo.	16
2.8	Célula solar de CIS/CIGS.	17
2.9	Célula solar de CdTe.	18
3.1	Exemplo de cortes de diamante.	19
3.2	Exemplo de painel solar seguidor.	20
3.3	Exemplo de painel solar seguidor.	20
3.4	Comparações dos sistemas com variáveis totalmente randômicas.	21
3.5	Comparações dos sistemas com variáveis com um plano de simetria.	22
3.6	Comparações dos sistemas com variáveis em camadas simétricas.	23
3.7	Sequência de reflexões interiores à estrutura.	24
3.8	Lei de Snell	25
3.9	Lei de Fresnel	25
3.10	Exemplos de reflexões totais.	26
3.11	Modelagem.	28
3.12	Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 2 camadas.	29
3.13	Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 3 camadas.	29
3.14	Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 4 camadas.	30
3.15	Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 5 camadas.	30
3.16	Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 6 camadas.	30
3.17	Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 7 camadas.	31
3.18	Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 8 camadas.	31
3.19	Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 9 camadas.	31
3.20	Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 10 camadas.	32
3.21	Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 11 camadas.	32
3.22	Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 12 camadas.	32
3.23	Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 13 camadas.	33
3.24	Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 14 camadas.	33
3.25	Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 15 camadas.	33
3.26	Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 16 camadas.	34
3.27	Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 17 camadas.	34
3.28	Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 18 camadas.	34
3.29	Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 19 camadas.	35
3.30	Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 20 camadas.	35
3.31	Gráfico comparativo com as populações entre as estruturas.	36
3.32	Ilustração das melhores estruturas.	37

Lista de tabelas

2.1	Comparativo entre células fotovoltaicas.	18
-----	--	----

1

Introdução

Segundo o *Centro de Pesquisas de Energia Elétrica*[1], a energia proveniente do sol, tanto calor como luz, é uma das alternativas mais promissoras no campo do desenvolvimento da humanidade. Vale lembrar, que, praticamente, todas as fontes de energia terrestres são provenientes do Sol. Ou seja, efeitos de evaporação da hidroeletricidade, indução da circulação atmosférica para energia eólica, decomposição de animais e plantas para a formação de petróleo, carvão e gás natural, entre outros, só foram possíveis devido à relação direta ou indireta com a energia solar.

1.1

Motivação

Com o crescimento da demanda energética, alguns países têm sido forçados a desenvolver novas formas de produzir e armazenar energia. No Brasil, os sistemas fotovoltaicos representam apenas 0,93% de toda matriz energética nacional, equivalente a 1,48 GW de potência(ANEEL). Infelizmente, o custo ainda é o principal obstáculo desse ramo. Porém, com o decorrer dos anos, foi observada uma queda significativa nos preços, além de um encarecimento dos outros sistemas geradores de energia. Ou seja, o mercado mundial está sedento por novas tecnologias e grandes empresas estão migrando para esse setor. O Brasil não está de fora dessa competição, visto que há uma certa vantagem sobre os países que já tem essa tecnologia disseminada. Atualmente, há vários centros de pesquisa espalhados pelo país, que atuam no desenvolvimento de novas tecnologias e estudo de suas aplicações. Essa tendência se justifica devido à larga extensão territorial, alto índice de insolação (horas de sol por dia) e por ser um dos países com a maior taxa de irradiação solar do mundo, com média entre $1500 - 2500 kWh/m^2$ e máxima localizada na região nordeste, com cerca de $6,5 kWh/m^2$. [2]

1.2

Objetivo

Este trabalho pretende simular o comportamento de estruturas fotovoltaicas, afim de criar, por meio de algoritmo genético, estruturas geométricas capazes de absorver o máximo de energia solar e térmica, tendo o custo de produção, complexidade e compatibilidade geométrica como limitantes.

Com isso, outra forma de captação de energia torna-se possível, facilitando o aprimoramento e desenvolvimento de outros métodos.

1.3

Organização de Trabalho

- No capítulo 2 são apresentadas algumas soluções que são usualmente utilizadas em sistemas solares.
- O capítulo 3 está direcionado para o método de otimização escolhido.
- Todo o processo de modelagem matemática, paralelização, implementação de algoritmo genético, dificuldades encontradas e soluções, são mostrados no capítulo 4.
- Os resultados das simulações são apresentados no capítulo 5.
- E por fim, as conclusões são apresentadas no capítulo 6.

2

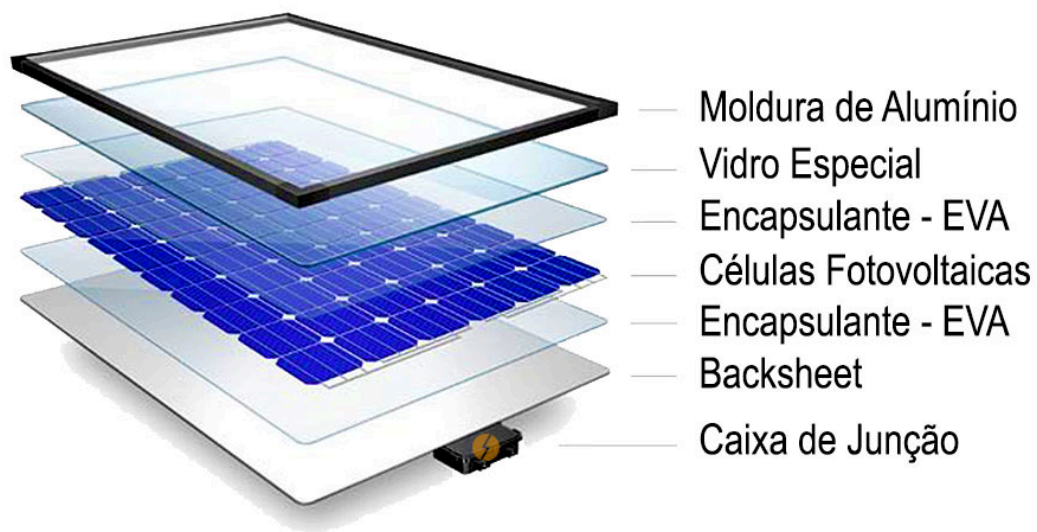
Sistemas fotovoltaicos

2.1

Painéis Solares

2.1.1

Painel Solar convencional



Fonte: [https://https://www.portalsolar.com.br](https://www.portalsolar.com.br)

Figura 2.1: Painel solar convencional.

Os painéis solares convencionais são dispositivos formados por conjuntos de células fotovoltaicas, responsáveis em converter energia solar em energia elétrica pelo efeito fotovoltaico, e uma estrutura de junção e proteção, conforme a figura 2.1. [3]

Geralmente são colocados em pontos estratégicos, que tenham o máximo de luz solar por dia, e apontados para o norte geográfico com uma angulação aproximadamente igual a latitude do local.

2.1.2

Painel seguidor solar



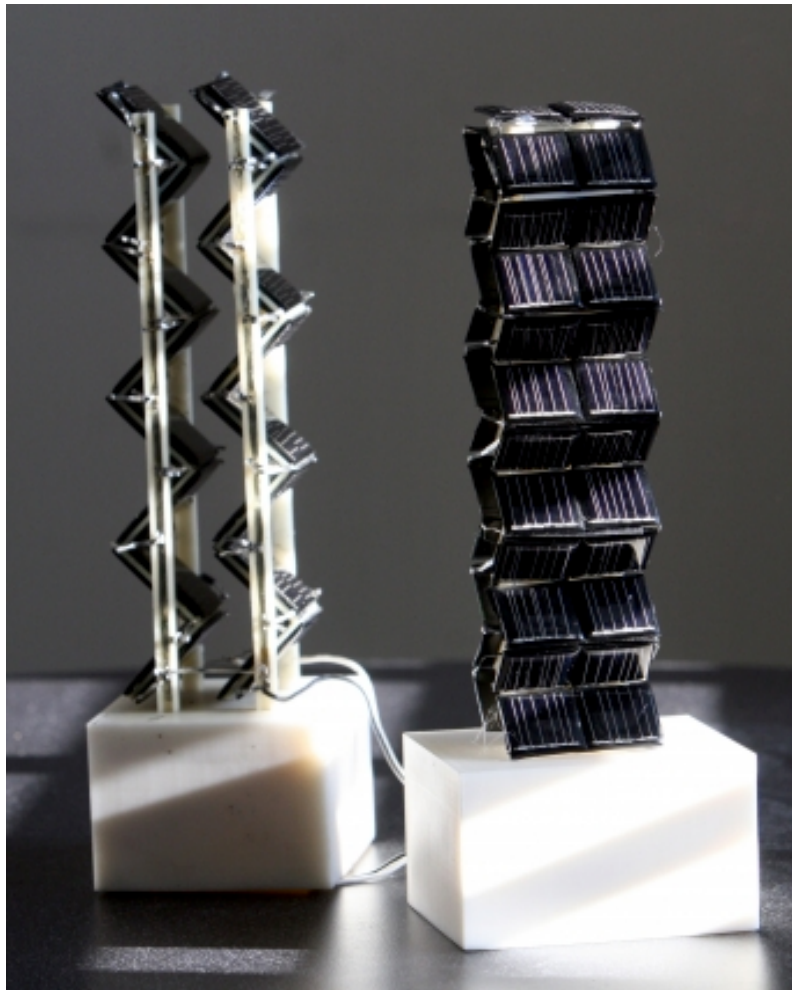
Fonte: <http://qualitysolar.com>

Figura 2.2: Exemplo de painel solar seguidor.

Os seguidores ou rastreadores solares foram criados com o intuito de aumentar a eficiência dos painéis solares convencionais e tem a capacidade de modificar o ângulo/direção conforme a maior incidência de radiação solar, como ilustrado na figura 2.2.

Em outras palavras, esse sistema altera a posição dos painéis solares com o decorrer do dia, rastreando os raios solares de modo a diminuir o ângulo de incidência entre os raios e o painel solar, aumentando a produção de energia.

2.1.3 3DPV



Fonte:[https://http://news.mit.edu/2012/three-dimensional-solar-energy-0327](https://news.mit.edu/2012/three-dimensional-solar-energy-0327)

Figura 2.3: Protótipo 3DPV.

Pesquisadores do MIT(Massachusetts Institute of Technology) desenvolveram um protótipo capaz de captar até 20 vezes mais energia solar, comparado com o tradicional painel solar. [4]

Esse projeto se baseia na absorção e reflexão provenientes dos painéis solares espalhados pela estrutura. O formato foi otimizado por GA(Algoritmo Genético) afim de proporcionar melhor eficiência, de acordo com a figura 2.3.

2.1.4

Painel fotovoltaico de concentracao



Fonte: <https://www.greentechmedia.com>

Figura 2.4: Exemplo de um CPV.

O sistema CPV (Concentrator Photovoltaics) é um tipo de painel solar que utiliza instrumentos ópticos como espelhos curvados e lentes para concentrar uma boa parcela de radiação solar incidida em uma pequena célula solar para gerar energia.[5]

Comparando com o método convencional (figura 2.1), o CPV possibilita a diminuição dos custos de investimento, visto que utiliza uma área menor de material fotovoltaico. Podendo ser classificado em:

- LCPV (Sistema Fotovoltaico de baixa concentração)
- CPV (Sistema Fotovoltaico em média concentração)
- HCPV (Sistema Fotovoltaico em alta concentração)
- LSC (Concentradores solares luminescentes)

2.2

Células solares

2.2.1

Si Monocristalino(m-Si)



Fonte:<http://www.portalsolar.com.br>

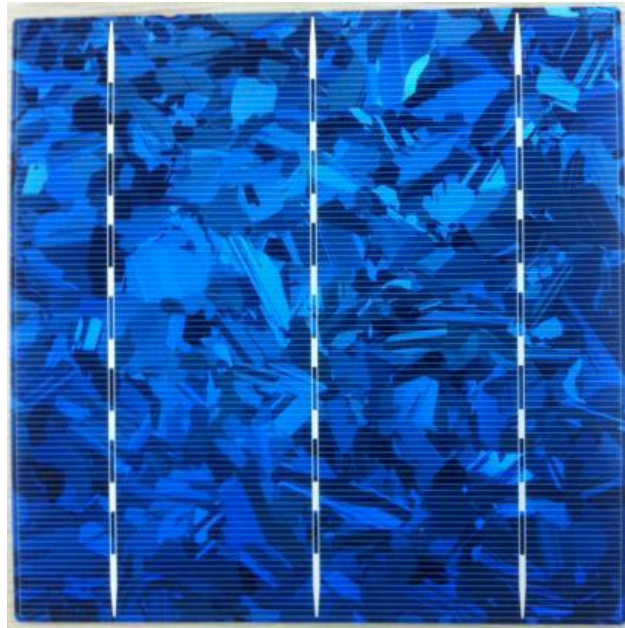
Figura 2.5: Célula solar Monocristalina.

Esse tipo de célula solar é uma das mais usadas ultimamente, representa aproximadamente 80% do mercado global. Com uma vida útil mínima de 25 anos e eficiência máxima entre 23,0% e 24,7%, a célula de m-Si lidera as concorrentes comerciais.[6]

Cada célula é fabricada a partir de um único cristal (figura 2.5) de silício cilíndrico (lingotes) com diâmetro de 10 a 15 cm, que passa por uma etapa de seccionamento para obter as lâminas de silício com 3mm de espessura e, por fim, cada lâmina é tratada e transformada em uma célula fotovoltaica. [7]

2.2.2

Si Policristalino(p-Si)



Fonte:<http://www.portalsolar.com.br>

Figura 2.6: Célula solar Policristalina.

Com o intuito de reduzir custos, aumentar a produção e evitar perdas de material, foi desenvolvida a técnica da célula policristalina de silício. Essa técnica consiste em fundir pequenos cristais de silício em diferentes orientações. Esse tipo de célula possui eficiência de, aproximadamente, 15%, menos eficiente que a monocristal. [6]

Ou seja, o processo de fabricação das células policristalinas se dá pela fusão de cristais de silício em um bloco, permitindo a formação de múltiplos cristais, que podem ser observados após a etapa de seccionamento (figura 2.6).

2.2.3

Filme fino

- Silício amorfo(a-Si):



Fonte: <http://www.openpr.com>

Figura 2.7: Célula solar de Silício Amorfo.

Essa tecnologia é uma das mais recentes e promissoras no campo dos filmes finos. Corresponde a 3.7% das células fotovoltaicas e, mesmo com a eficiência variando entre 5-10%, seu crescimento tem sido notório. Atualmente, diversos centros de pesquisa desenvolvem maneiras de potencializar a eficiência e viabilizar a fabricação em grande escala. [6]

Diferentemente das células baseadas nos monocristais e policristais de silício, apresentados anteriormente, os átomos da célula de silício amorfo(a-Si) não possuem nenhuma organização, causando influência em suas propriedades elétricas e uniformidade em sua coloração (figura 2.7).

- Disseleneto de cobre e índio($CuInSe_2$ ou CIS) ou Disseleneto de cobre, índio e gálio(CIGS):



Fonte:<http://www.newsandpr.com>

Figura 2.8: Célula solar de CIS/CIGS.

Por possuir elementos dos grupos I,III e VI da tabela periódica, essa tecnologia demonstra enorme vantagem comparada com as demais células. Seus coeficientes de absorção de luz e a sua afinidade eletrônica permitem a flexibilidade da célula e a economia de materiais na produção, visto que é necessário, aproximadamente, $1\mu m$ de espessura, enquanto sistemas baseados em silício necessitam de 200 a $300\mu m$.

Mesmo com uma eficiência competitiva de 20% para áreas pequenas e 13% para grandes áreas, sua comercialização ainda constitui menos de 5% do mercado geral. Seu custo é relativamente alto devido aos elementos constituintes, dado que o Índio é um elemento raro e é largamente utilizado em telas de smartphones. Porém, vários centros de pesquisa estudam maneiras de viabilizar a produção em alta escala, pois diferentemente dos sistemas de silício, não há a degradação do material com a ação da luz. [6]

- Telureto de Cádmio (CdTe):



Fonte: <http://www.cleantechnica.com>

Figura 2.9: Célula solar de CdTe.

As células de CdTe, até o momento, são as mais promissoras por possuírem excelente coeficiente de absorção e afinidade elétrica ideal. Além de possuírem fácil deposição, que favorece sua produção em larga escala, e eficiência entre 16.1% e 19.5%.

Porém, sua comercialização se torna preocupante devido à toxicidade do cádmio. Consequentemente, sua representação no mercado corresponde a 1.1%. [6]

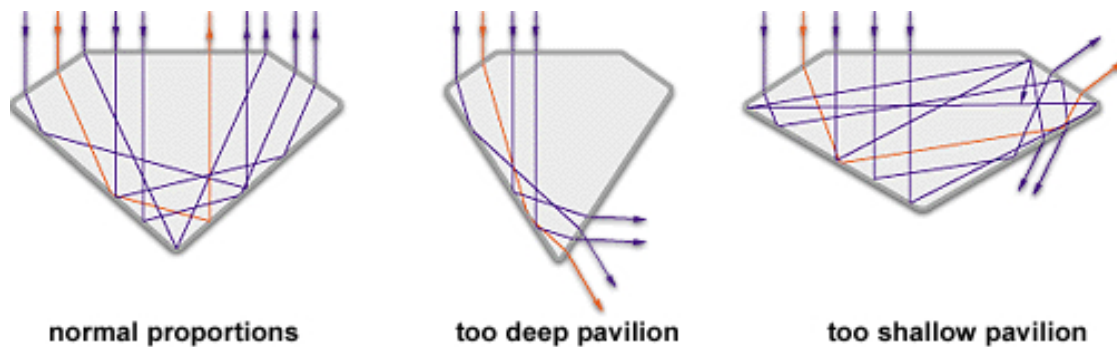
2.2.4 Comparativo

	m-Si	p-Si	a-Si	CIGS	CdTe
Eficiência	20-25%	13-18%	5-10%	10-12%	9-20%
Custo por Watt	\$2.5-3.1	\$3-3.5	\$2-2.5	\$0.6	\$1-1.3
Toxicidade	—	—	—	Cd/Se	Ca/Te
Confiabilidade	Excelente	Excelente	Boa	Boa	Boa

Tabela 2.1: Comparativo entre células fotovoltaicas.

3 Metodologia

3.0.1 Inspiração



Fonte: <https://www.quora.com>

Figura 3.1: Exemplo de cortes de diamante.

O mundo das joias está repleto de variedades de gemas e formatos que tiram o fôlego de qualquer pessoa. E a complexidade da lapidação é fundamental para definir o valor da peça, pois leva em consideração o tipo de pedra, inclusões, ângulos e especificidades, além da melhor maneira de realizá-la sem grande perda de material, de acordo com a figura 3.1.

Logo, foi proposto o estudo de um capturador solar com princípio inverso ao do diamante. Em que pudesse "aprisionar" os raios solares por maior tempo possível em estruturas com formatos ótimos (otimização).

3.0.2

Descrição do sistema e modelagem inicial

Esse novo conceito seria composto de uma tampa de vidro, para a entrada dos raios solares, e um conjunto interno de painéis solares triangulares, dispostos conforme o estudo proposto. Tais componentes estariam montados em uma estrutura firme e teriam como aliado a água. Esse item extra seria crucial para a máxima eficiência do projeto, pois forçaria o feixe a penetrar mais na estrutura, e regularia a temperatura do sistema.

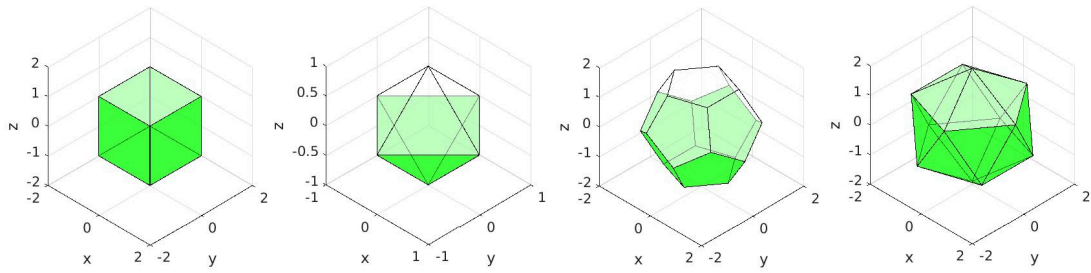


Figura 3.2: Exemplo de painel solar seguidor.

Como modelo inicial, foram propostas estruturas com geometrias conhecidas (cubo, octaedro, dodecaedro e icosaedro) com o intuito de evitar qualquer erro matemático nos cálculos dos ângulos de incidência, refração, reflexão, zenital(entre raios solares e o eixo vertical) e azimuthal(projeção do raio solar no plano horizontal). Em seguida, a geometria foi modificada para o formato tubular hexagonal para se adequar melhor ao propósito.

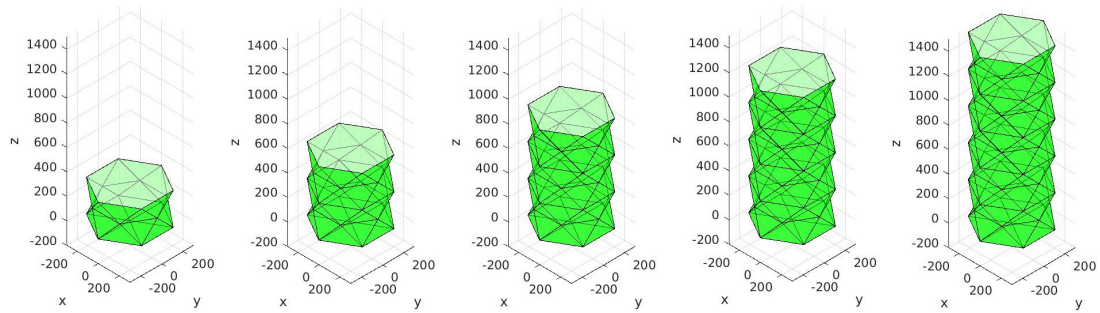


Figura 3.3: Exemplo de painel solar seguidor.

3.0.3 Otimização

Otimização forçada

Com o intuito de obter melhores resultados iniciais, foram introduzidos ao código rotinas de chute aleatório às variáveis. Com isso, foi possível comparar com os tradicionais sistemas fotovoltaicos.

Para uma melhor compreensão do problema, foram criadas três estratégias para a organização, com o objetivo de diminuir o número de variáveis.

– Totalmente Randômico

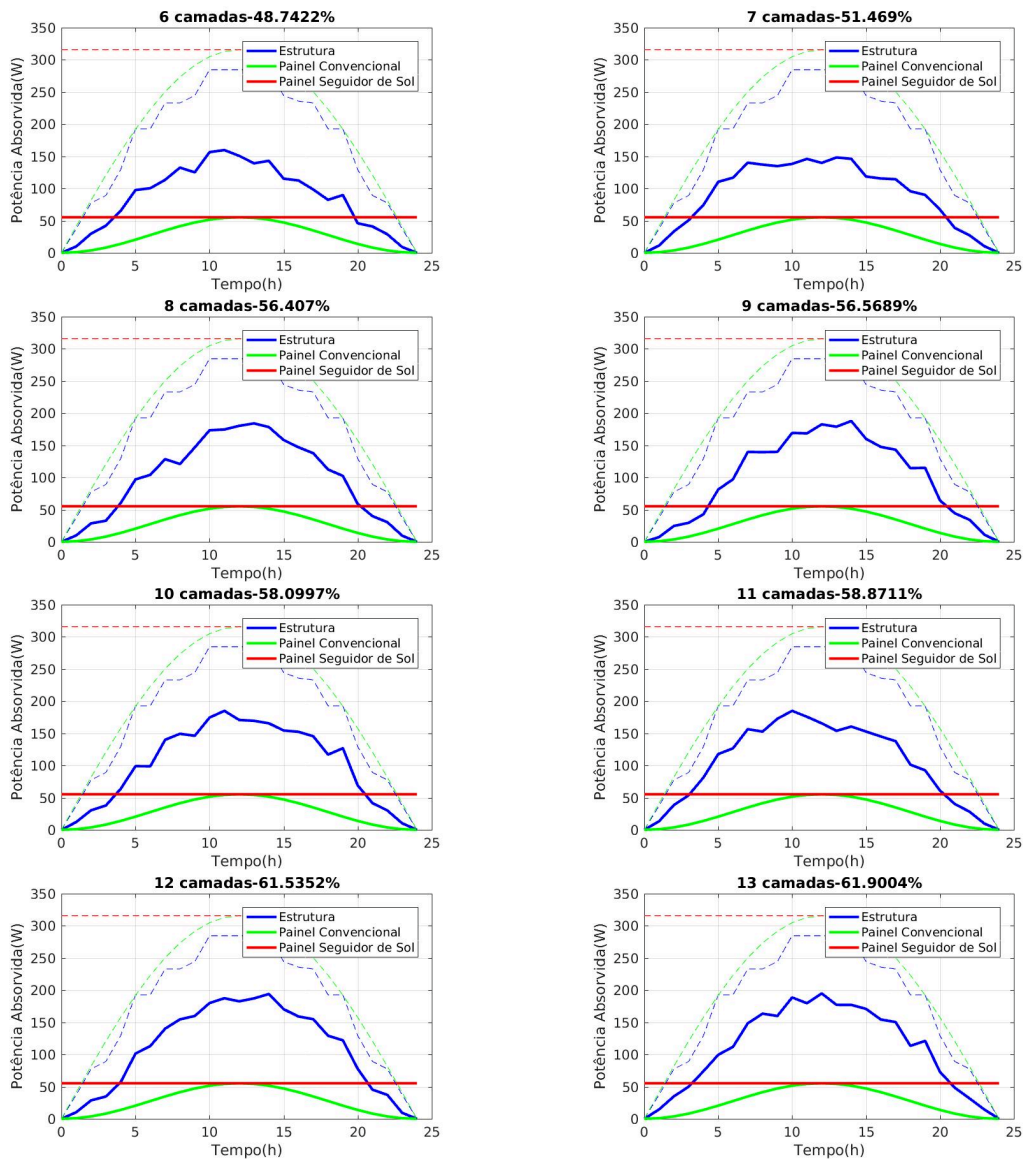


Figura 3.4: Comparações dos sistemas com variáveis totalmente randômicas.

– Randômico e simétrico com um plano de simetria

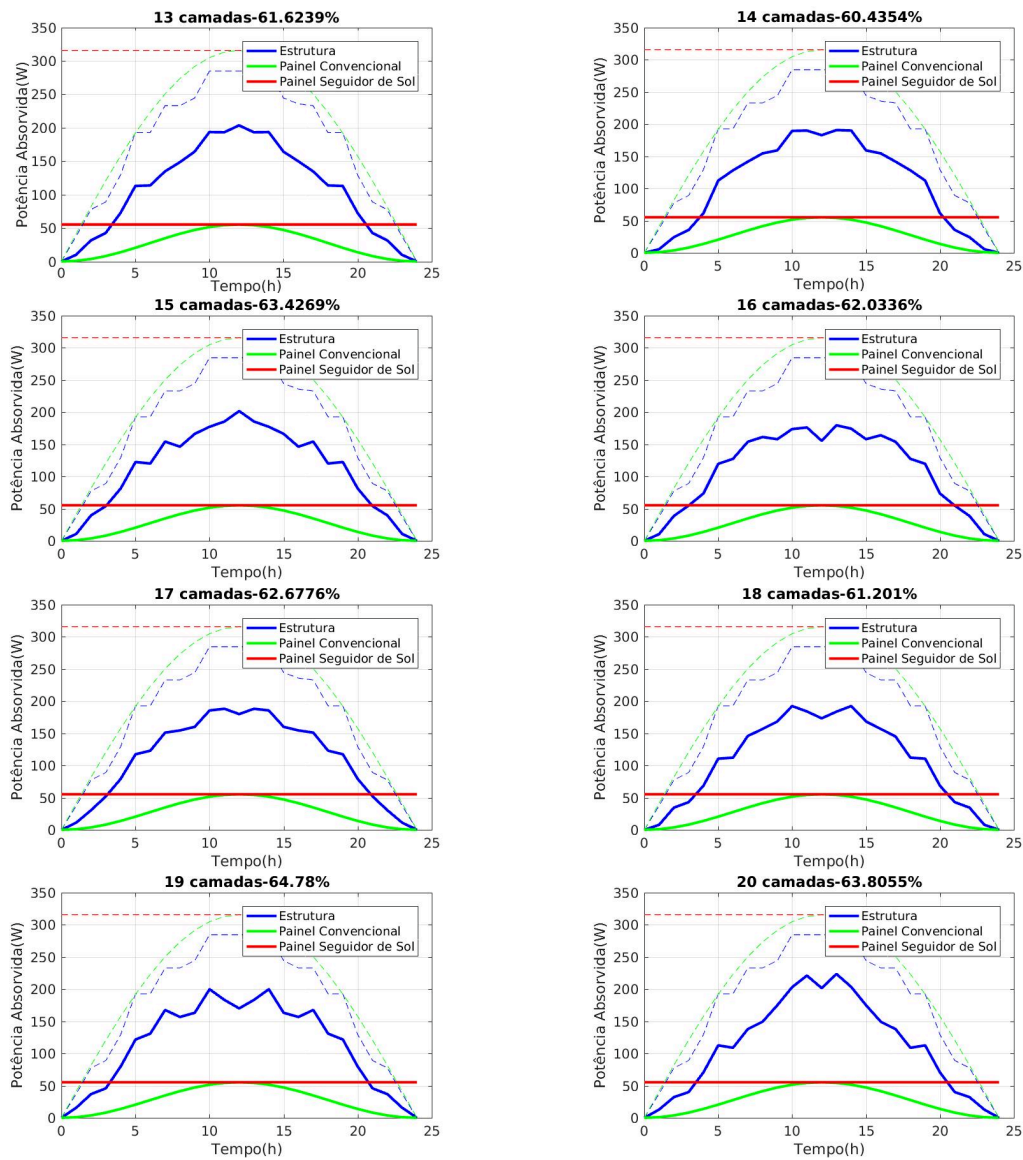


Figura 3.5: Comparações dos sistemas com variáveis com um plano de simetria.

– Randômico e com camadas simétricas

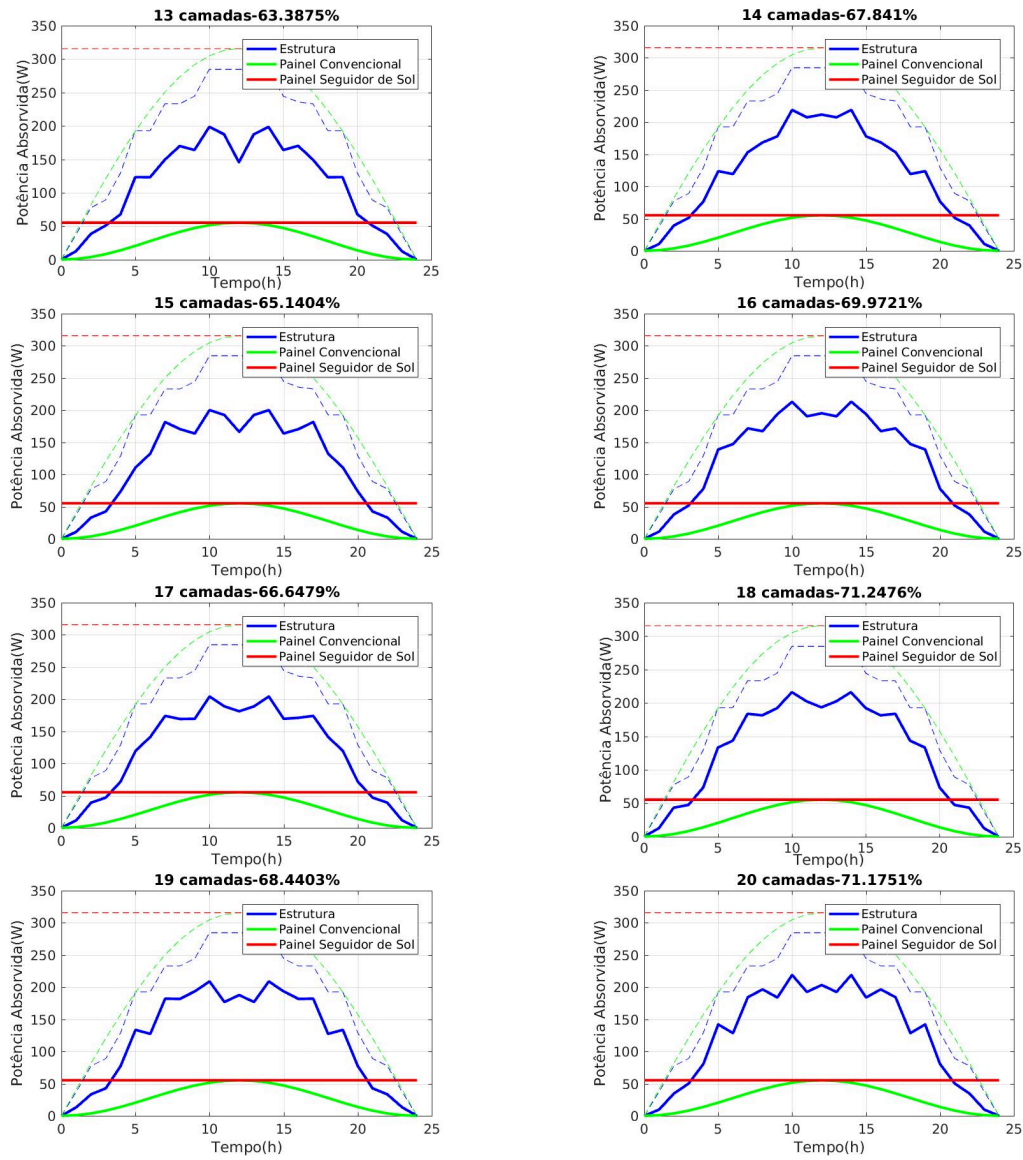


Figura 3.6: Comparações dos sistemas com variáveis em camadas simétricas.

Com o objetivo de simplificar o problema e minimizar o tempo computacional, foi escolhido o modelo de camadas simétricas por conter o menor número de variáveis.

Definição de um problema de otimização

Encontrar $X = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$ que maximize ou minimize $f(X)$.

Tendo como restrições:

$$\begin{cases} h_k(X) = 0 & k = 1 \dots m \\ c_l(X) \leq 0 & l = 1 \dots p \\ x_i^l \leq x_i \leq x_i^u & i = 1 \dots n \end{cases} \quad (3-1)$$

Onde:

- f : Função objetivo;
- X : Vetor de variáveis do projeto;
- h : Restrições de igualdade;
- c : Restrições de desigualdade;
- x_i^l e x_i^u : Limite inferior e superior.

Formulação matemática e simulação

O problema proposto consiste em simular, a partir do software comercial MATLAB, a diária de uma estrutura fotovoltaica quando submetida a raios solares discretizados, com o intuito de maximizar a sua eficiência. E para isso, será utilizada a função GA (Algoritmo Genético) para obter o melhor resultado.

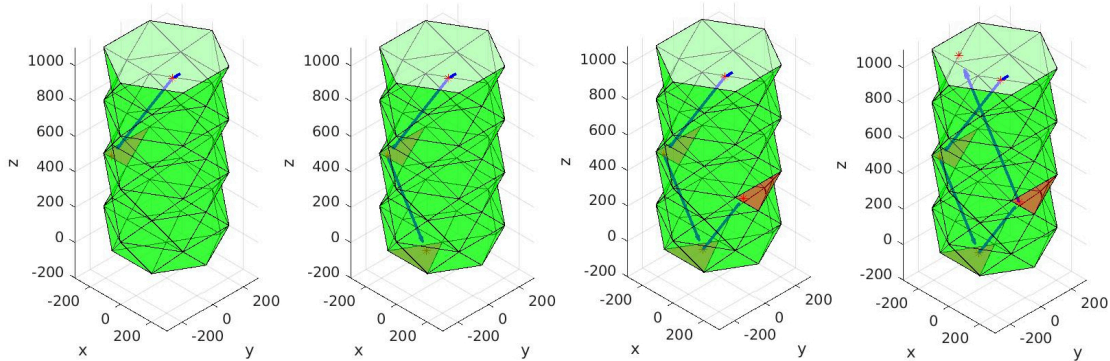
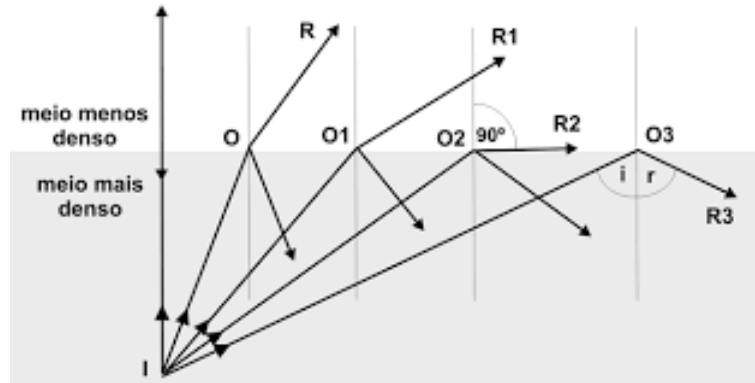


Figura 3.7: Sequência de reflexões interiores à estrutura.

A simulação se baseia na penetração dos raios solares na parte superior da estrutura e absorção/reflexão dos painéis solares internos. Ou seja, de acordo com alguns horários do dia, os raios solares cobrirão o topo da estrutura, em seguida cada raio discretizado sofrerá refração para a água, que resfriará o sistema e forçador, de acordo com as leis:

– **Lei de Snell:**



Fonte: <https://www.Scielo.br>

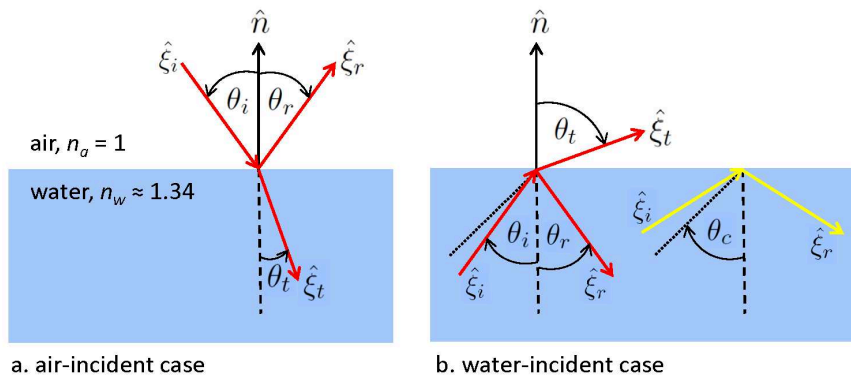
Figura 3.8: Lei de Snell

A lei de Snell descreve o que acontece entre os ângulos de incidência e refração, quando percorrem uma fronteira entre dois meios diferentes, explicando o porque de haver água no interior da estrutura:

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2$$

Em que θ_1 e θ_2 são os ângulos de incidência e refração, respectivamente, e n_1 e n_2 os índices de refração dos dois meios.

– **Lei de Fresnel:**



a. air-incident case

b. water-incident case

Fonte: <http://www.oceanopticsbook.info>

Figura 3.9: Lei de Fresnel

A intensidade dos feixes é determinada a partir dos coeficientes de reflexão(R) e de transmissão(T), que analogamente à Lei de Snell, dependem dos meios e do ângulo de incidência.

Quando o feixe incidente tem polarização perpendicular ao plano de incidência:

$$R_p = \frac{(n_2 \cdot \cos \theta_i - n_1 \cdot \cos \theta_t)^2}{(n_2 \cdot \cos \theta_i + n_1 \cdot \cos \theta_t)^2}$$

$$T_p = 1 - R_p$$

Quando o feixe incidente tem polarização paralela ao plano de incidência:

$$R_s = \frac{(n_1 \cdot \cos \theta_i - n_2 \cdot \cos \theta_t)^2}{(n_1 \cdot \cos \theta_i + n_2 \cdot \cos \theta_t)^2}$$

$$T_s = 1 - R_s$$

Em seguida, por fim, a reflexão e absorção de cada raio nos painéis, como mostrado na figura 3.7.

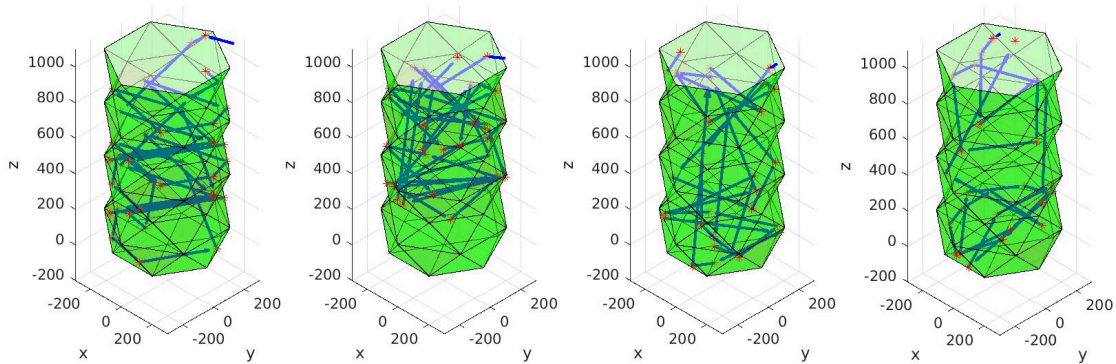


Figura 3.10: Exemplos de reflexões totais.

Em outras palavras, para cada ponto do teto haverá um raio de sol percorrendo um caminho similar aos da figura 3.10. Em cada instante da simulação, cada face acumulará a parcela de intensidade absorvida em cada reflexão dos raios. Por fim, compara-se a quantidade total absorvida com a total incidente, obtendo o valor da eficiência.

Porém, cada simulação demorava alguns minutos para gerar resultados. Então, foi implementada a função SPMD no MATLAB, afim de distribuir as tarefas entre os núcleos e executá-las simultaneamente.

Discretização dos raios solares Diária Absorvido Total

$$\begin{array}{c}
 \left\{ \begin{array}{ccccc}
 R_1 & R_2 & R_3 & R_4 & R_5 \\
 R_6 & R_7 & R_8 & R_9 & R_{10} \\
 R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} & R_{15} \\
 R_{16} & R_{17} & R_{18} & R_{19} & R_{20} \\
 R_{21} & R_{22} & R_{23} & R_{24} & R_{25}
 \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{array}{cc}
 \text{Diria} & \text{Ncleo}_1 \\
 \text{Diria} & \text{Ncleo}_2 \\
 \text{Diria} & \text{Ncleo}_3 \\
 \text{Diria} & \text{Ncleo}_4
 \end{array} \Rightarrow \begin{array}{c}
 \text{Output}_1 \\
 + \\
 \text{Output}_2 \\
 + \\
 \text{Output}_3 \\
 + \\
 \text{Output}_4
 \end{array} \Rightarrow \begin{array}{c}
 \text{Output} \\
 \text{Total}
 \end{array}
 \end{array}$$

Com isso, cada otimização que demorava no mínimo 14 horas para gerar resultados, mesmo com alguns métodos de melhoramento de código, passou a ter tempo mínimo de simulação estabilizou para 3h.

Parâmetros

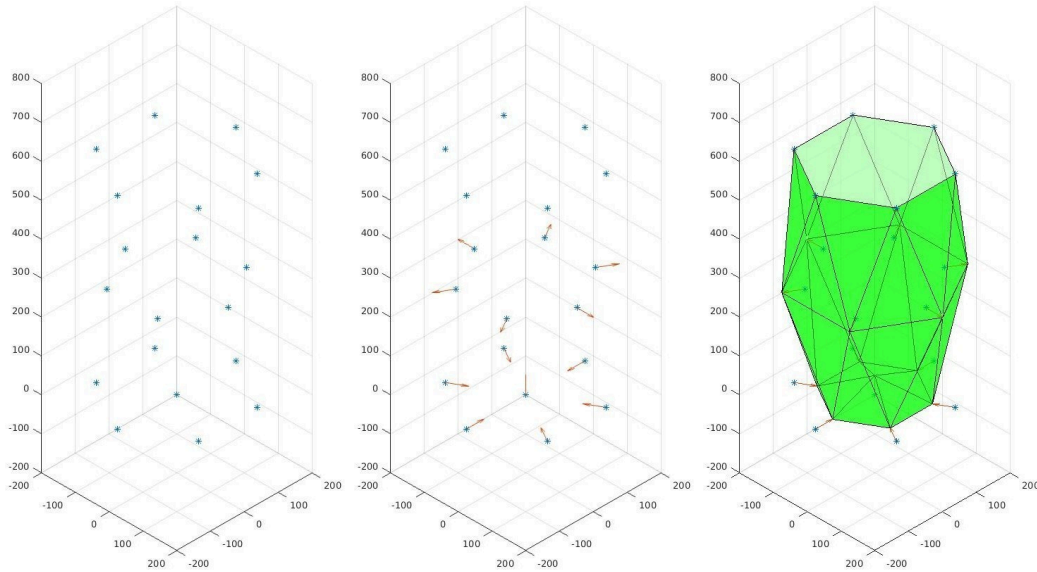


Figura 3.11: Modelagem.

A construção de cada estrutura partirá de um conjunto de pontos fixos distribuídos por andares. Onde o primeiro andar será formado por 7 pontos coplanares, sendo seis deles formadores de um hexágono regular de lado 225mm e um central. E os demais andares estarão espaçados de 225mm de altura e terão apenas seis vértices formando um hexágono regular, análogo ao primeiro andar, rotacionado de 30° (com relação ao andar anterior), vide figura 3.11.

As variáveis de posição terão módulos iguais ao dos vetores deslocamento de cada vértice e sinais positivos e negativos para aproximação e afastamento, respectivamente, ao eixo central. Sendo cada vetor horizontal, com exceção do vetor central do primeiro andar que será vertical. E cada vetor terá módulo inteiro, resolução de 50mm e limites de 75mm.

As variáveis de tamanho estarão ligadas à diferença de tamanho da base e da altura de cada painel solar, obedecendo às mesmas restrições impostas às variáveis de posição.

Resultados

Com o uso do MATLAB, foram plotadas as populações de cada parcela da otimização para estruturas de duas a vinte camadas. As populações foram plotadas conforme a sua ordem e tempo de trabalho, sendo cada população equivalente a cinquenta simulações.

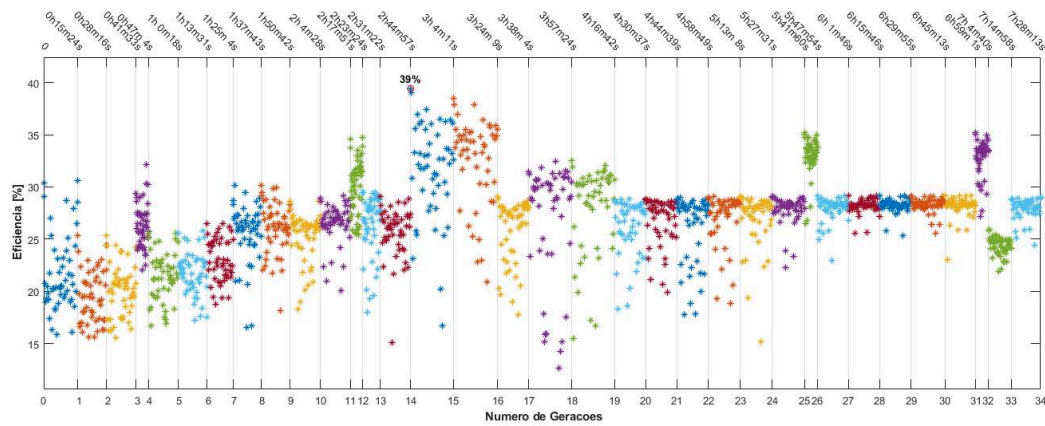


Figura 3.12: Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 2 camadas.

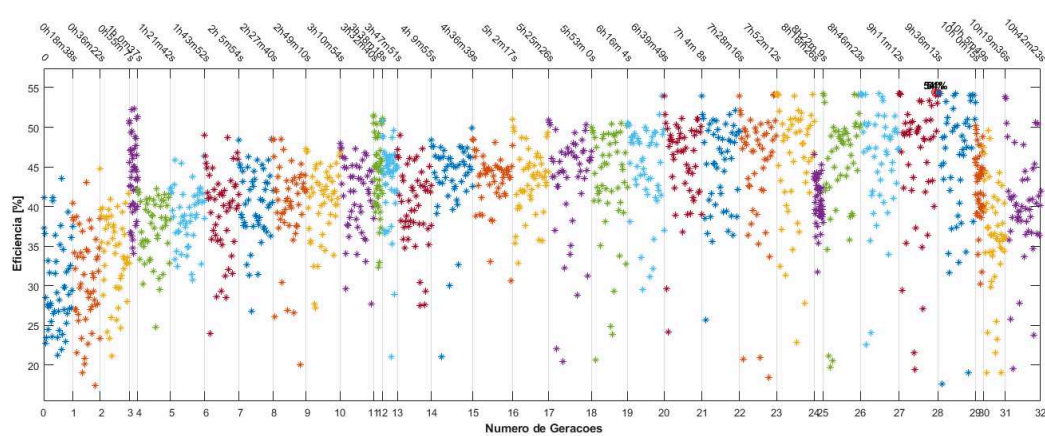


Figura 3.13: Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 3 camadas.

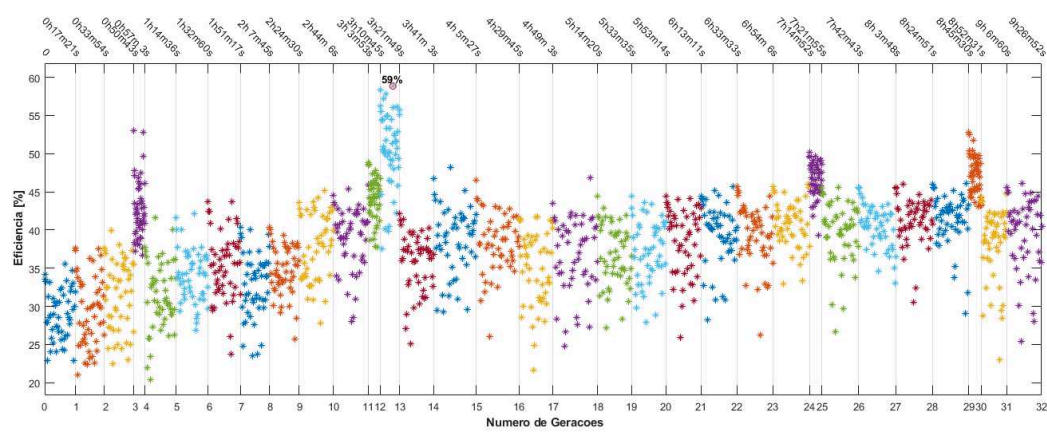


Figura 3.14: Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 4 camadas.

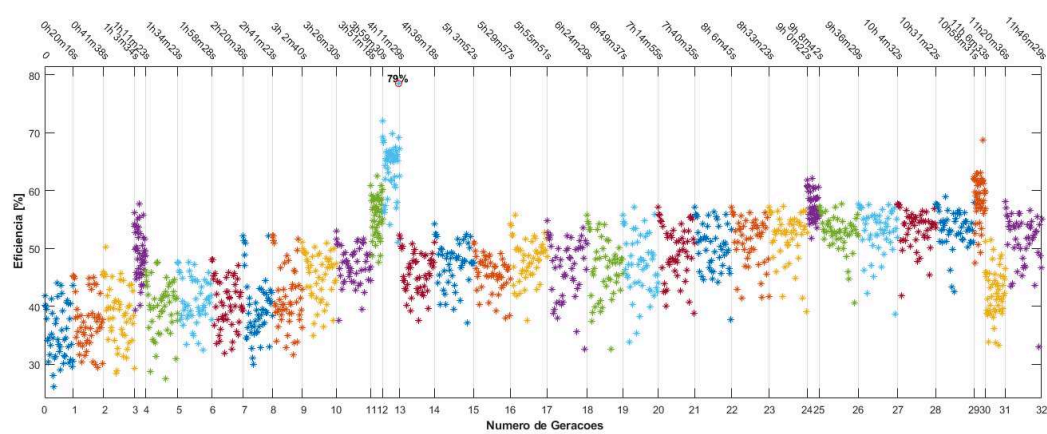


Figura 3.15: Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 5 camadas.

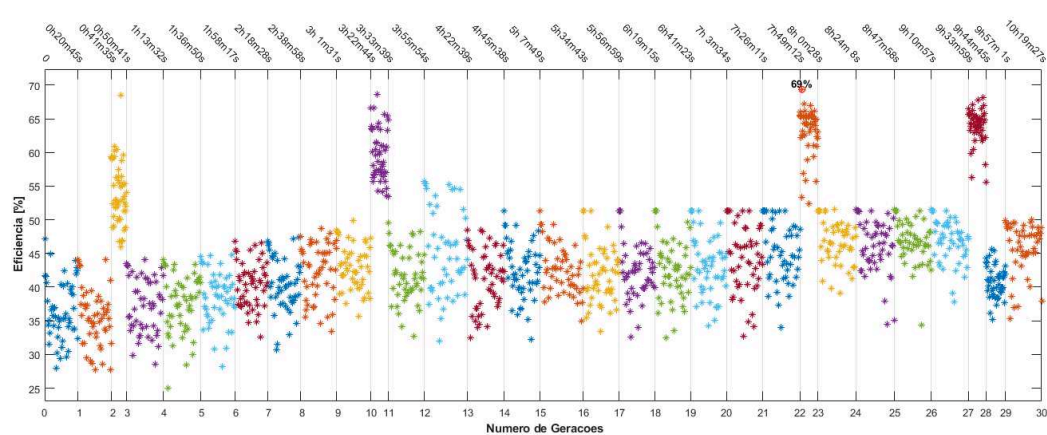


Figura 3.16: Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 6 camadas.

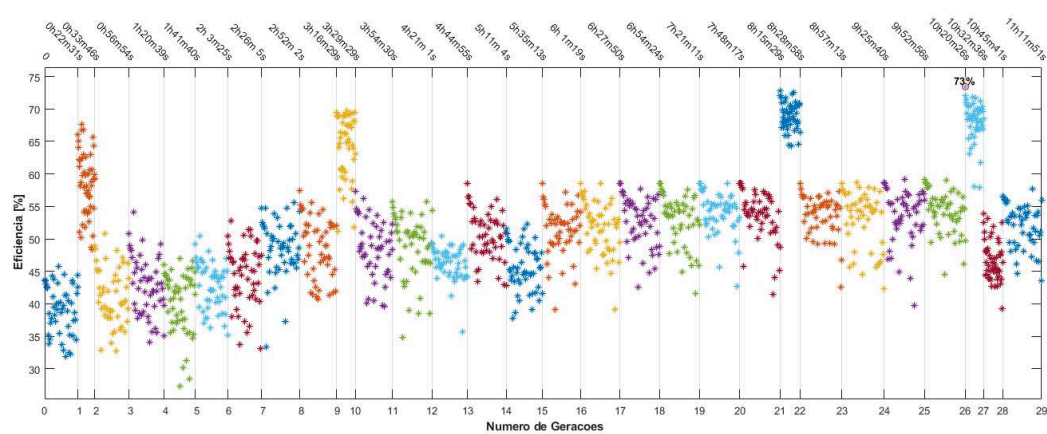


Figura 3.17: Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 7 camadas.

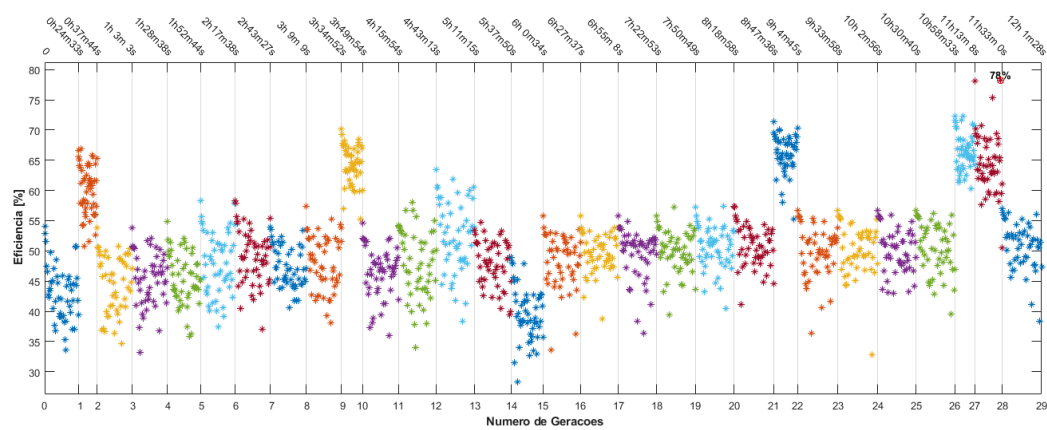


Figura 3.18: Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 8 camadas.

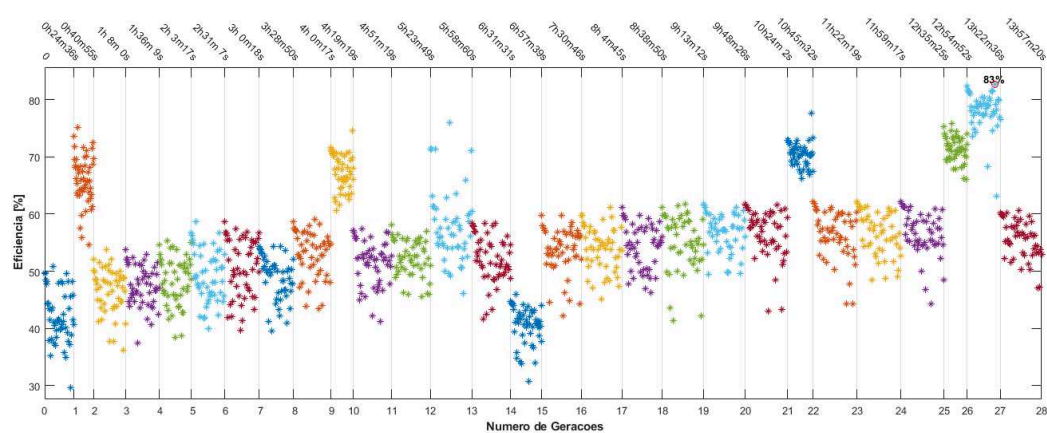


Figura 3.19: Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 9 camadas.

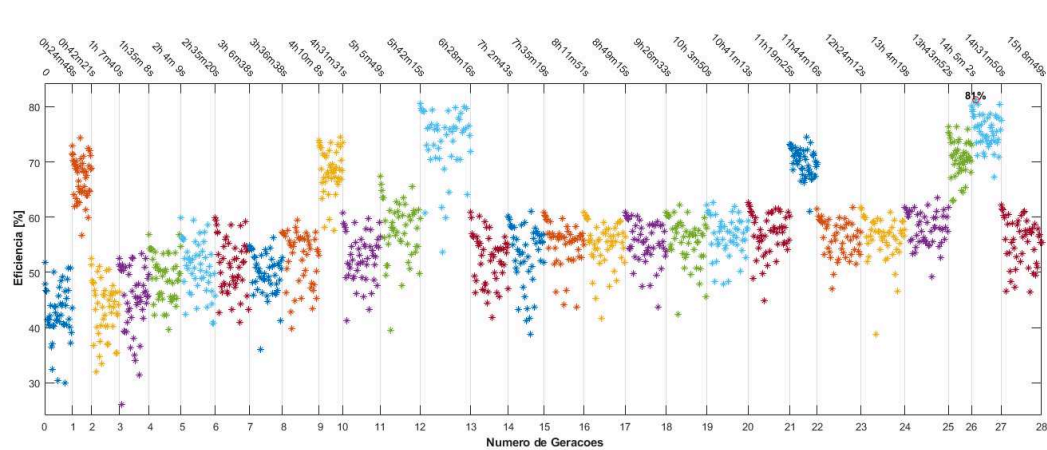


Figura 3.20: Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 10 camadas.

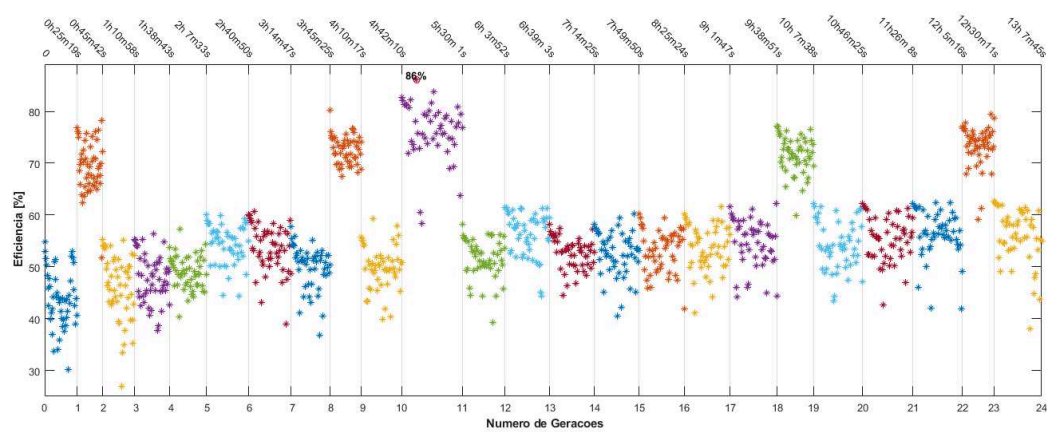


Figura 3.21: Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 11 camadas.

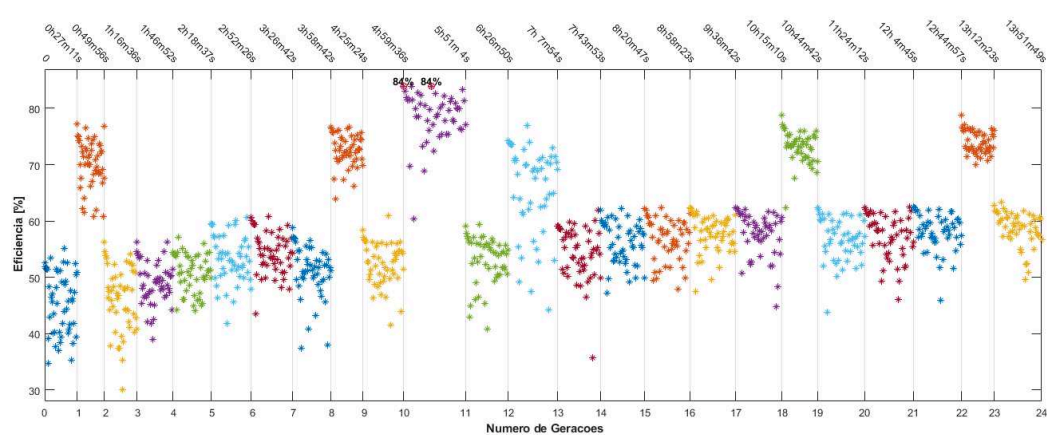


Figura 3.22: Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 12 camadas.

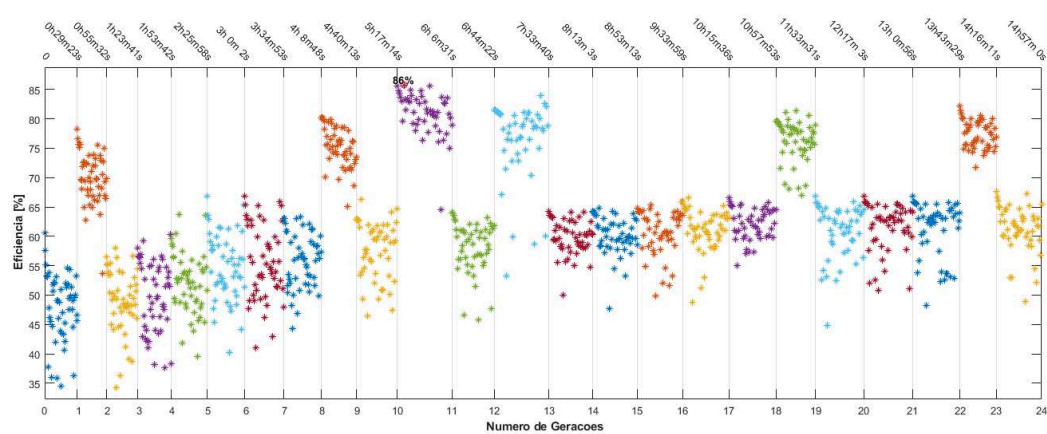


Figura 3.23: Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 13 camadas.

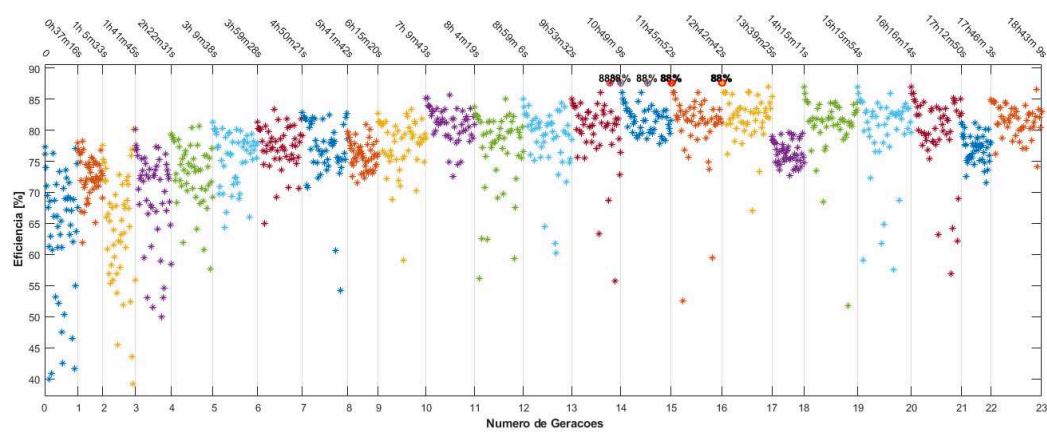


Figura 3.24: Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 14 camadas.

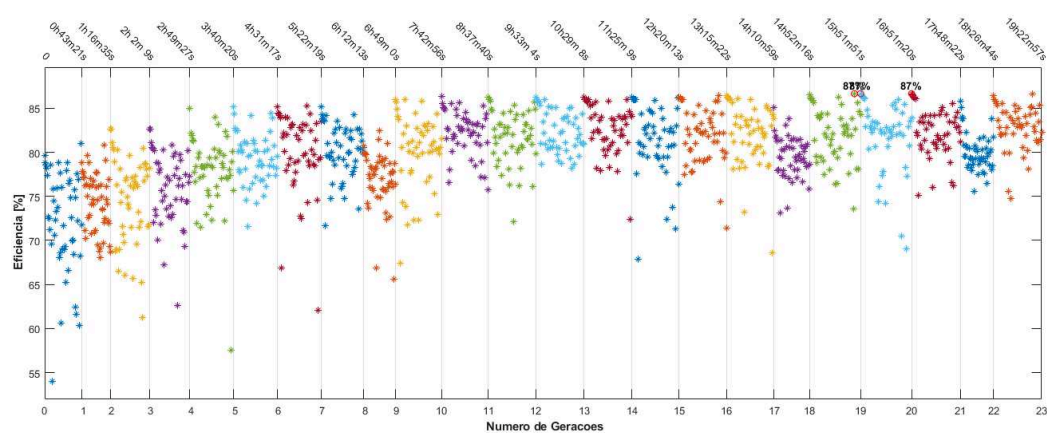


Figura 3.25: Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 15 camadas.

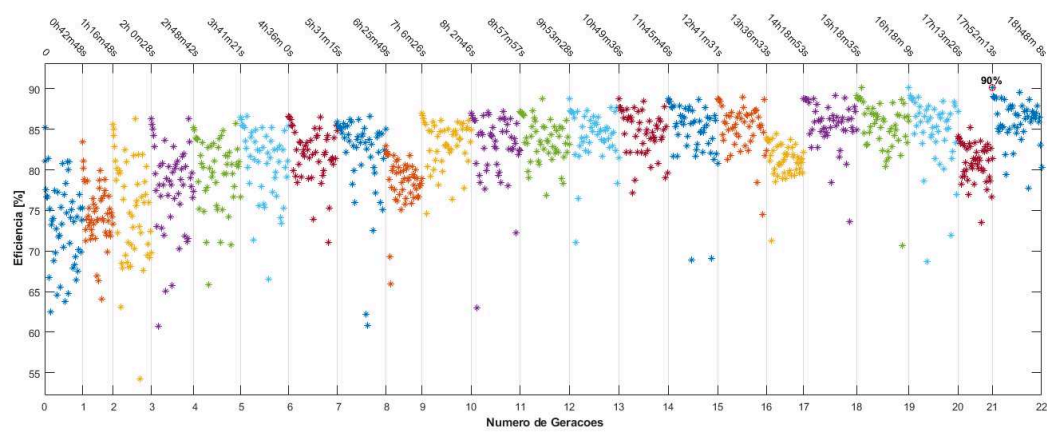


Figura 3.26: Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 16 camadas.

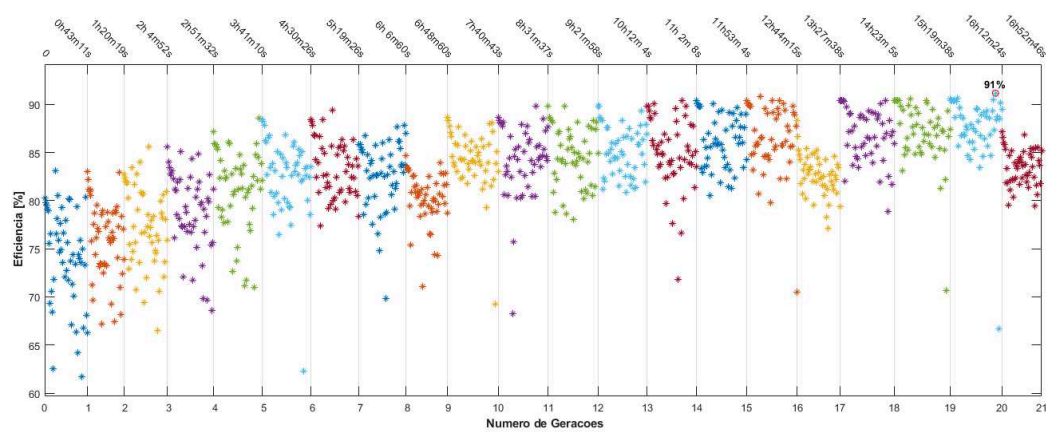


Figura 3.27: Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 17 camadas.

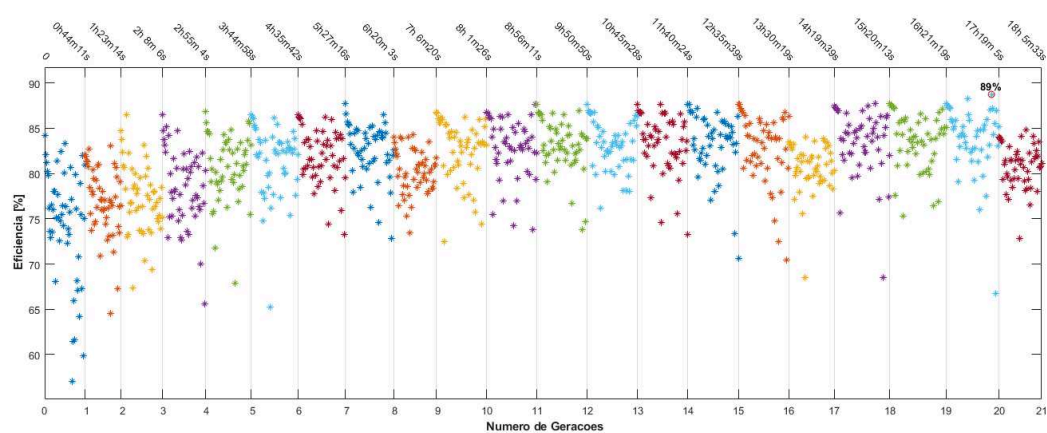


Figura 3.28: Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 18 camadas.

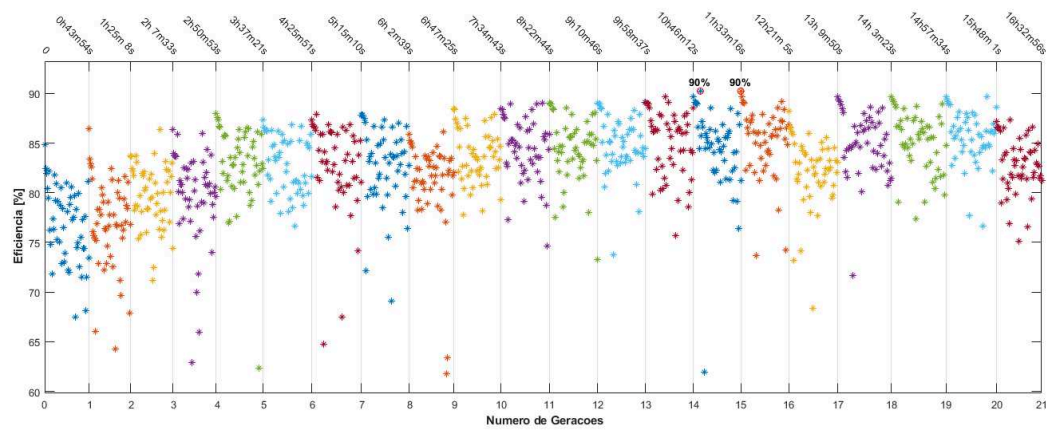


Figura 3.29: Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 19 camadas.

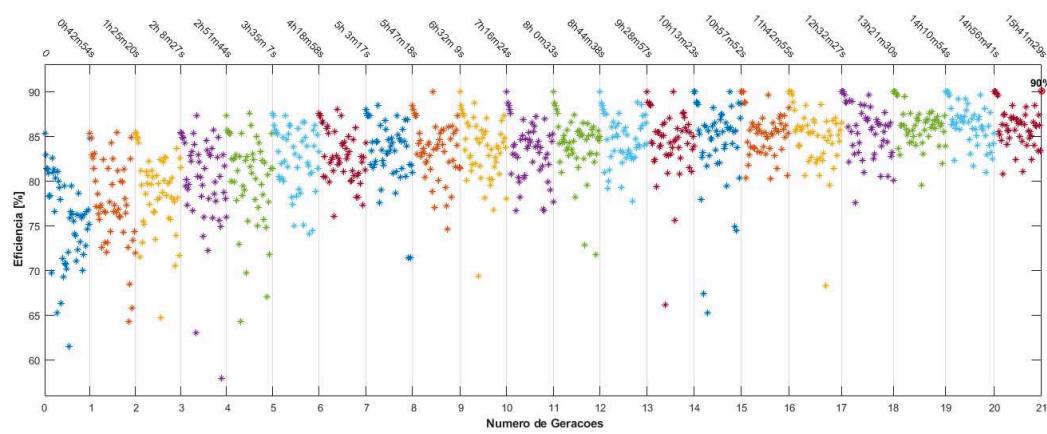


Figura 3.30: Gráfico das etapas de otimização para estruturas de 20 camadas.

3.1 Comparativo

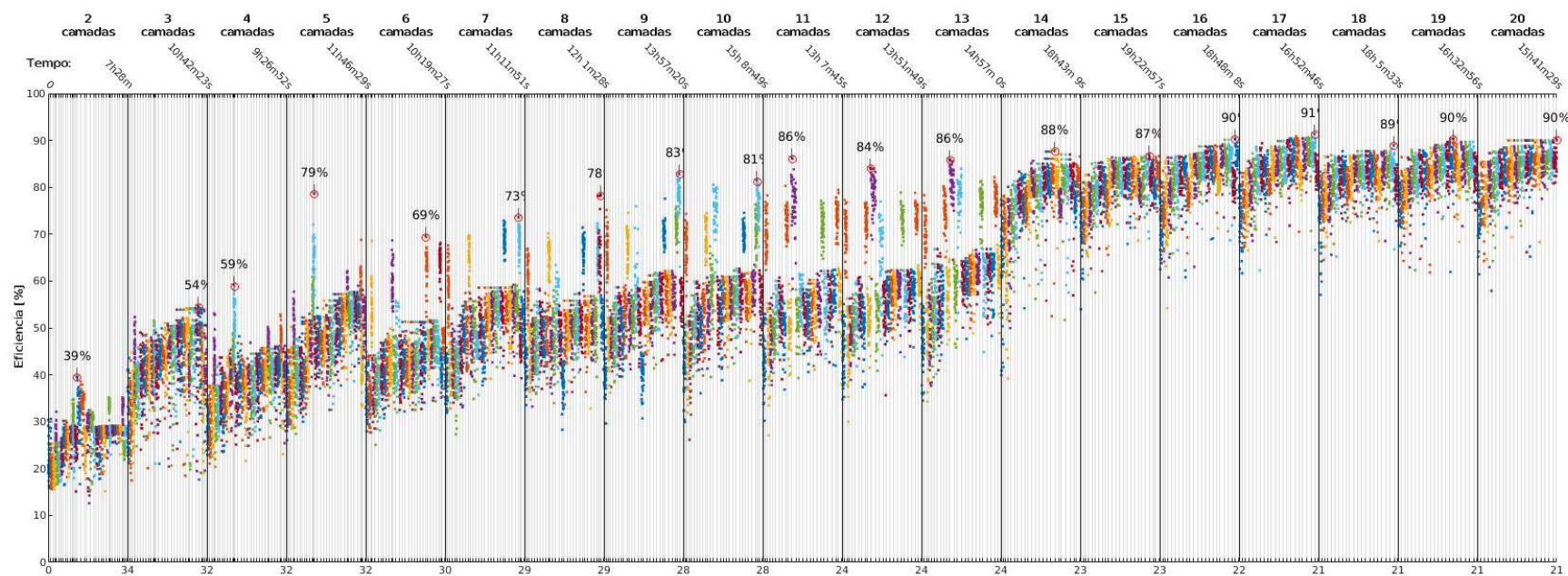


Figura 3.31: Gráfico comparativo com as populações entre as estruturas.

3.2 Melhores Resultados

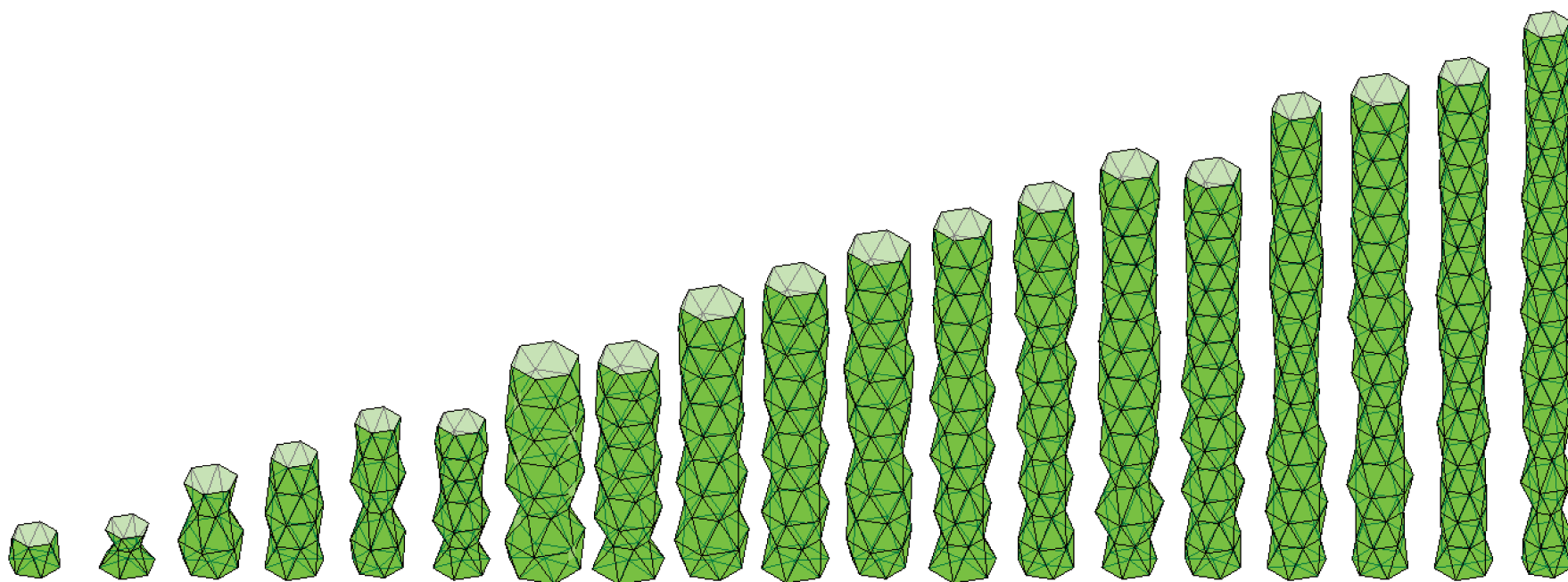


Figura 3.32: Ilustração das melhores estruturas.

3.3

Conclusão

A análise dos resultados se mostrou bastante satisfatória, visto que a eficiência de absorção de algumas simulações (figura 3.31) superaram 90%. Isso mostra o potencial desse estudo e necessidade de maior pesquisa.

Os gráficos comparativos de camada simétrica (figura 3.0.3) demonstram um aumento na quantidade de horas solares por dia, indicando maior período de trabalho da estrutura.

Esse novo conceito de captação solar se mostrou capaz de substituir alguns painéis solares convencionais, permitindo a redução de custos e melhor reaproveitamento de espaço.

Os diferentes formatos (figura 3.2) favorecem inúmeras aplicações, por exemplo usos domiciliares, pois além de fornecerem eletricidade, proporcionam o aumento de temperatura da água utilizada no resfriamento.

Referências Bibliográficas

- [1] DE ENERGIA SOLAR, GRUPO DE TRABALHO. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. *CRESCER*, Rio de Janeiro, 2004.
- [2] MARTINS, FERNANDO RAMOS AND PEREIRA, ENIO BUENO AND DE ABREU, SAMUEL LUNA AND COLLE, SERGIO. Brazilian atlas for solar energy resource: Swera results. In *Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I–Vol. V)*, pages 2651–2655. Springer, 2008.
- [3] ZWEIBEL, KENNETH AND HERSCH, PAUL. *Basic photovoltaic principles and methods*. Van Nostrand Reinhold Company, 1984.
- [4] BERNARDI, MARCO AND FERRALIS, NICOLA AND WAN, JIN H AND VILLALON, RACHELLE AND GROSSMAN, JEFFREY C. Solar energy generation in three dimensions. *Energy & Environmental Science*, 5(5):6880–6884, 2012.
- [5] KURTZ, SR AND OTHERS. *Opportunities and challenges for development of a mature concentrating photovoltaic power industry*. Citeseer, 2012.
- [6] EL CHAAR, L AND EL ZEIN, N AND OTHERS. Review of photovoltaic technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(5):2165–2175, 2011.
- [7] ISABELLA, OLINDO AND SMETS, ARNO AND JÄGER, KLAUS AND ZEMAN, MIRO AND VAN SWAAIJ, RENÉ. Solar energy: The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems. *UIT Cambridge Limited*, pages 47–52, 2016.