

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA
FILHO”**

FACULDADE DE ENGENHARIA – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

GABRIEL DE FREITAS TEIXEIRA

**ALOCÇÃO OTIMIZADA DE FONTES DE ENERGIA FOTOVOLTAICA
PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

Ilha Solteira – SP, 04 de janeiro de 2023

GABRIEL DE FREITAS TEIXEIRA

**ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE FONTES DE ENERGIA
FOTOVOLTAICA PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA**

Trabalho de Graduação apresentado à
Faculdade de Engenharia de Ilha
Solteira – Unesp como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Nome do orientador:

Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Júnior

Ilha Solteira
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

T266a Teixeira, Gabriel de Freitas.
Alocação otimizada de fontes de energia fotovoltaica para iluminação pública / Gabriel de Freitas Teixeira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
89 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Dionízio Paschoareli Júnior

Inclui bibliografia

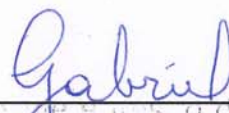
1. Geração distribuída. 2. Microrredes. 3. Sistemas fotovoltaicos isolados. 4. Algoritmo genético. 5. Alocação de fontes de energia renovável.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos Treze dias do mês de janeiro do ano de dois mil e vinte e três, o discente **Gabriel de Freitas Teixeira**, matriculado sob o nº 151050491, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Junior, a Prof.^a Dr.^a. Anna Diva Plasencia Lotufo e a Prof.^a Dr.^a. Mara Lúcia Martins Lopes, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado **"ALOCUÇÃO OTIMIZADA DE FONTES DE ENERGIA FOTOVOLTAICA PARA ILUMINAÇÃO PÚBLICA"** obtendo a nota 9,0 (Nove) e conceito APROVADO.



Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Junior
 - Orientador -



Gabriel de Freitas Teixeira
 - Discente -



Prof.^a Dr.^a. Anna Diva Plasencia Lotufo



Prof.^a Dr.^a. Mara Lúcia Martins Lopes

- Membro da Banca -

- Membro da Banca -

Faculdade de Engenharia – Departamento de Engenharia Elétrica

Avenida Professor José Carlos Rossi, 1370 - CEP 15.385-000, Ilha Solteira - SP - Brasil

Tel (18) 37431150 - Fax (18) 3742-2735 - www.feis.unesp.br

Prof.^a Dr.^a. Anna Diva Plasencia Lotufo

- Membro da Banca -

Prof.^a Dr.^a. Mara Lúcia Martins Lopes

- Membro da Banca -

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por minha vida e por ser minha âncora durante esses anos e à Ele devo tudo.

Aos meus professores que tanto me ensinaram durante essa caminhada longa, porém maravilhosa, da graduação, em especial ao meu orientador deste trabalho o professor Dionízio Paschoareli, que me deu espaço para trabalhar com um tema muito caro à mim, me aconselhou, e me colocou no caminho mais correto possível; ao professor José Roberto Mantovani, que me ensinou muito durante a iniciação científica e não me permitiu entregar nada menos que o meu melhor; e por fim, ao professor Antonio Marcos Cossi por ter me ajudado com conselhos técnicos e imprescindíveis a este trabalho.

Agradeço ao apoio da minha família, minha mãe Maria Cristina, meu pai Ailton, que me ajudaram e me mantiveram firmes durante essa jornada e nunca me deixaram em necessidades.

À minha namorada, Iara, cujo apoio emocional é minha base de sustentação e minha inspiração diária a nunca desistir, jamais.

E a todos os meus colegas da turma 15/1 que estiveram comigo nessa luta, e me ajudaram a ser um aluno e um engenheiro cada vez melhor.

Agradeço imensamente a todos vocês, sem os quais eu jamais chegaria ao fim disso tudo maior do que entrei. Muito obrigado!

“Uma vida não investigada não vale a pena ser vivida”. Sócrates

Resumo

No contexto da geração distribuída, o uso de fontes de energia fotovoltaicas vem crescendo nos últimos anos. A geração distribuída e as microrredes, recentemente foram regulamentadas no Brasil, dando início à produção, principalmente de energia elétrica proveniente da energia fotovoltaica por todo país. Com isso, os preços dos módulos fotovoltaicos estão se tornando mais acessíveis. Neste trabalho, foi realizado um algoritmo genético para alocação otimizada de fontes de energia elétrica renovável, neste caso sistemas fotovoltaicos isolados, para uma rede de iluminação pública de 99 lâmpadas de LED, ou seja um sistema em corrente contínua. Foram dimensionados os principais equipamentos do sistema fotovoltaico, sendo eles: módulo fotovoltaico, bateria e controlador de carga. Concluiu-se que houve uma economia no custo de instalação, para caso fosse alocado um sistema fotovoltaico por lâmpada, e também que houve a maior economia no custo de controlador de carga e módulos fotovoltaicos.

Palavras-chave: geração distribuída, microrredes, sistemas fotovoltaicos isolados, algoritmo genético, alocação de fontes de energia renovável.

Abstract

The application of renewable energy in distributed generation has been growing in the past decades. Recently, in Brazil, microgrids and distributed generation were regulated and the production of energy by renewable sources began all over the country. Therefore, the prices of photovoltaic modules are lowering their prices. This work is oriented in developing a genetic algorithm to optimize the allocation of electrical energy sources, utilizing isolated photovoltaic systems, for public lighting systems. The algorithm was simulated in a lighting system of 99 lamps. The main equipment dimensioned for the systems were: photovoltaic modules, batteries and solar charge controller. After the simulations, there were economic savings with the optimized allocations and it was concluded the higher savings were in solar charge controllers and photovoltaic modules.

Keywords: distributed generation, microgrids, isolated photovoltaic systems, genetic algorithm, allocation of renewable sources of energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Oferta interna de energia elétrica por fonte.....	10
Figura 2 – Comparativo de fontes de energia elétrica no Brasil entre 2020 e 2021.....	11
Figura 3 – Esquema dos SEE convencional.....	13
Figura 4 – Esquema não-convencional de produção de energia elétrica.....	14
Figura 5 – Exemplo de microrrede conectada a uma rede principal de distribuição.....	17
Figura 6 – Curva $I \times V$ de uma célula fotovoltaica STC.....	21
Figura 7 – Curva $I \times V$ da célula fotovoltaica para diferentes irradiâncias solares	22
Figura 8 – Curva $I \times V$ considerando diferentes temperaturas na célula fotovoltaica.....	23
Figura 9 - Exemplo de recombinação em um ponto de corte.....	29
Figura 10 - Exemplo de representação esquemática de uma microrrede de 6 nós.....	31
Figura 11 - Codificação binária da matriz de tensões.....	33
Figura 12 - Diagrama de blocos do algoritmo genético.....	36
Figura 13 - Diagrama unifilar do sistema teste de 99 nós radial	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de irradiação solar para Ilha Solteira.....	44
Tabela 2 - Parâmetros utilizados no AG para o sistema com carga de 30 W...	45
Tabela 3 - Módulos fotovoltaicos escolhidos para 30W.....	46
Tabela 4 - Banco de baterias e controladores escolhidos para 30W.....	47
Tabela 5 - Dimensionamento sistema fotovoltaico alocação convencional 30 W	49
Tabela 6 - Comparativo entre os dois tipos de alocação com lâmpadas de 30W	50
Tabela 7 - Dimensionamento sistema fotovoltaico alocação convencional 50 W	51
Tabela 8 - Comparativo entre os dois tipos de alocação com lâmpadas de 50W	52
Tabela 9 - Dimensionamento sistema fotovoltaico alocação convencional 100 W.....	54
Tabela 10 - Comparativo entre os dois tipos de alocação com lâmpadas de 100	54

SUMÁRIO

1. Importância das energias renováveis no Brasil e no mundo	10
1.1. Objetivos gerais do trabalho	12
1.2. Objetivos específicos do trabalho	12
2. Geração distribuída, microrredes e energia fotovoltaica	13
2.1. Introdução à microgeração e minigeração distribuída	13
2.2. Introdução às Microrredes e suas características	15
2.3. Características das células fotovoltaicas	19
2.4. Curvas características e sistemas fotovoltaicos	20
3. Algoritmo genético para alocação de fontes de energia e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos	25
3.1. Introdução à computação evolutiva	25
3.2. Forma geral dos algoritmos genéticos	27
3.3. Modelo matemático para alocação de fontes de energia elétrica	31
3.4. Algoritmo genético para alocação de fontes de energia elétrica	36
4. Método de dimensionamento para sistema fotovoltaico isolado	38
4.1. Método de cálculo para o módulo fotovoltaico	39
4.2. Método de cálculo para o banco de baterias e controlador de carga	41
5. Resultados das simulações num sistema de iluminação pública	44
5.1. Resultado da simulação para lâmpadas de 30 W	45
5.1.1. Alocação pelo algoritmo genético para lâmpadas de 30 W	45
5.1.2. Dimensionamento convencional para lâmpadas de 30 W e comparativo	49
5.2. Resultado da simulação para lâmpadas de 50 W	50
5.2.1. Alocação pelo algoritmo genético para lâmpadas de 50 W	50
5.2.2. Dimensionamento convencional para lâmpadas de 50 W e comparativo	51
5.3. Resultado da simulação para lâmpadas de 100 W	52
5.3.1. Alocação pelo algoritmo genético para lâmpadas de 100 W	52
5.3.2. Dimensionamento convencional para lâmpadas de 100 W e comparativo	53
6. Conclusão	56
7. Referências	57
Apêndice A - Resultados parâmetros elétricos sistema 30 W	60
Apêndice B - Módulos fotovoltaicos, baterias e controladores escolhidos para 50W.....	64
Apêndice C - Resultados parâmetros elétricos sistema 50 W	68

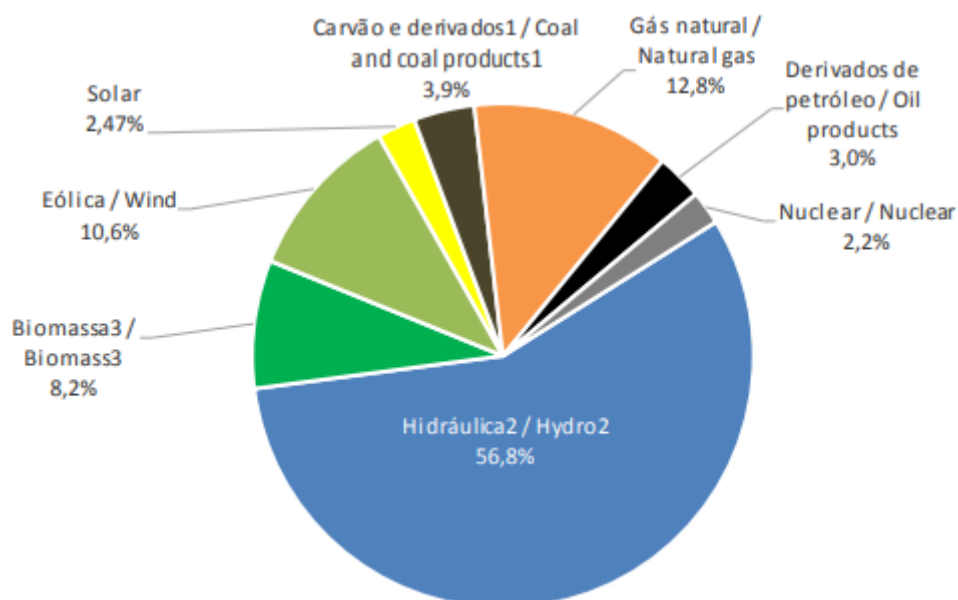
Apêndice D - Módulos fotovoltaicos, baterias e controladores escolhidos para 10W.....	72
Apêndice E - Resultados parâmetros elétricos sistema 100 W	77
Anexo A - Dados de linha para o sistema de iluminação pública utilizado	81
Anexo B - Dados técnicos dos painéis fotovoltaicos escolhidos nas simulações.....	85

1. Importância das energias renováveis no Brasil e no mundo

Durante a pandemia da COVID-19 o mundo passou por uma desaceleração econômica. O setor de energia elétrica também sofreu as consequências da pandemia, e de inúmeros outros fatores que conjuntamente agravaram a produção de energia elétrica. Mesmo após o retorno gradual do pós-pandemia, a oferta de energia não vem sendo suficiente para cumprir a demanda. Nota-se que houve aumento nos preços de combustíveis após a retomada da economia em todo o mercado global, fazendo com que haja aumento na inflação trazendo outros graves problemas econômicos no mundo todo (BAGOLIN et al, 2021).

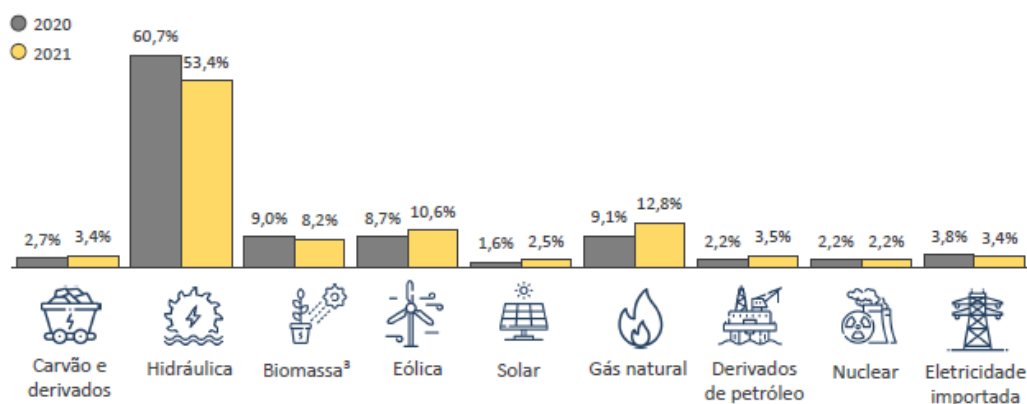
A crise energética também atinge o Brasil, e aqui é causada pela escassez hídrica que o país teve, e recorrentemente enfrenta. Na figura 1, tem-se a oferta interna de energia elétrica por fonte no ano de 2021 e na figura 2, vê-se a mudança com relação ao ano de 2020.

Figura 1 – Oferta interna de energia elétrica por fonte no ano de 2021.



Fonte: (EMPRESA DE ENERGIA ELÉTRICA, 2022).

Figura 2 – Comparativo de fontes de energia elétrica no Brasil entre 2020 e 2021.



Fonte: (EMPRESA DE ENERGIA ELÉTRICA. Balanço Energético Nacional -Síntese, 2022).

Nota-se que as usinas hidrelétricas compõem ainda a maior parte da oferta de energia elétrica no Brasil (56,8%) e, a despeito de ser uma fonte de energia renovável, a produção dessas usinas cai por conta de períodos de escassez hídrica, exigindo que o sistema elétrico brasileiro recorra às usinas que utilizam fontes não-renováveis, principalmente gás natural (12,8%) que além de ser importado, e portanto encarece a produção e o preço final da energia ajudando a elevar a inflação do país, além de ser um combustível poluente (INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2021).

Em contrapartida, ao longo dos últimos anos percebe-se um aumento na produção das energias renováveis no Brasil. Apenas em 2021 houve crescimento de 26,7% na oferta de geração de energia eólica em relação à 2020 e a geração solar total avançou 55,9%, segundo dados do Balanço Energético Nacional (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2022). O crescimento dessas fontes de energia renováveis é crucial para a maior diversificação da matriz energética brasileira, e medidas que visem favorecer a produção dessas energias renováveis no Brasil visam aumentar a segurança energética do sistema elétrico brasileiro considerando os cenários futuros desfavoráveis aos recursos hídricos e sabendo-se que as usinas termelétricas

não são as substitutas ideais (INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2021).

Ainda considerando os dados do Balanço Energético Nacional de 2022, em se tratando das fontes de energia solar, temos as usinas centralizadas e a MMGD (Mini e Microgeração Distribuída), que somadas compõem atualmente 2,47% da oferta de energia elétrica do país. As MMGD possuem 8.965MW de potência instalada, e as fontes de energia fotovoltaicas são responsáveis por aproximadamente 98% dessa categoria de geração, revelando a importância das fontes de energia fotovoltaicas no contexto da geração distribuída.

1.1. Objetivos gerais do trabalho

Considerando o papel das energias renováveis no cenário apresentado, o objetivo do trabalho a ser desenvolvido é o estudo das microrredes e sistemas fotovoltaicos com o intuito de realizar a elaboração de um *software* de alocação de fontes de energia elétrica renováveis.

1.2. Objetivos específicos do trabalho

A realização, como parte de uma otimização da geração distribuída, de um algoritmo genético para a alocação de fontes de energia elétrica em um sistema de iluminação pública, bem como o dimensionamento do custo dessa alocação e a avaliação do custo benefício dessa alocação comparada com uma alocação convencional.

2. Geração distribuída, microrredes e energia fotovoltaica

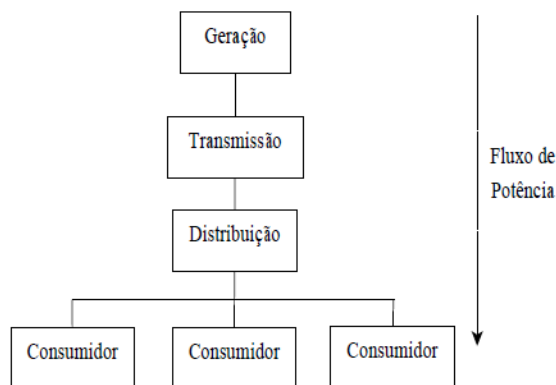
2.1. Introdução à microgeração e minigeração distribuída

A Geração Distribuída (GD), que pode ser definida como: “[...] uma fonte de energia elétrica inserida na rede de distribuição ou no lado do consumidor final [...]”. (ACKERMAN, ANDERSSON, SADER, 2001).

Este modo alternativo de geração começou a ser regulamentado no Brasil após a publicação da Resolução Normativa 482 de 2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Convencionalmente os Sistemas de Energia Elétrica eram pensados da seguinte maneira: centros geradores produzem em quantidade suficiente para serem transmitidos aos centros de carga, e por fim ocorre a distribuição para os consumidores finais. A figura 3 esquematiza esse sistema clássico.

Figura 3 – Esquema dos SEE convencional.

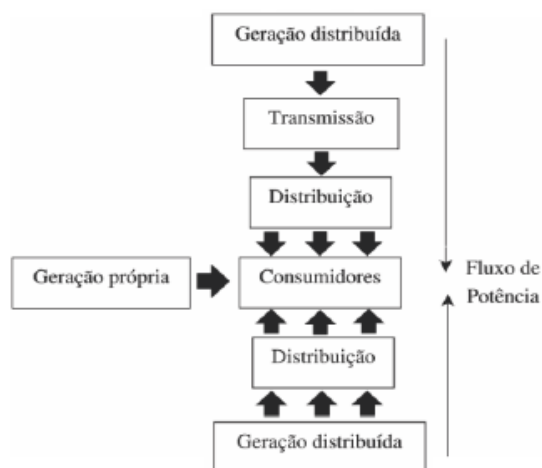


Fonte: Fagundes, 2014.

Nota-se que esse sistema de produção de energia elétrica mostrado na figura 3 é “verticalizado”, com a geração ocorrendo somente antes da transmissão (FAGUNDES, 2014). Com a introdução de outras fontes de energia, principalmente as renováveis, e com os problemas já mencionados anteriormente de escassez de combustíveis, poluição e até uma perda mais elevada, sistemas de geração de energia elétrica distribuída começaram a ser

estudados e popularizados. Na figura 4, tem-se um esquema de como é essa concepção de produção de energia elétrica.

Figura 4 – Esquema não-convencional de produção de energia elétrica



Fonte: Fagundes (2014).

Na Resolução Normativa 482 de 2012 da ANEEL foram estabelecidas condições para a realização da microgeração (potência instalada menor que 75 kW) e minigeração distribuída (potência instalada entre 75 kW e 3 MW para fontes hídricas ou 5 MW para as demais), além de instituir o Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Com isso, ocorreu não só o surgimento desse mercado, como um aumento bastante considerável dos investimentos em MMGD. A Resolução Normativa 687 de 2016 trouxe algumas atualizações à Resolução 482, e com isenções tributárias para energia solar, compra de materiais e equipamentos, por meio do Convênio ICMS 16/15 promoveu ainda mais crescimento do mercado de geração distribuída (BOCUZZI et al, 2020).

Atualmente está instituído o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS), contido na Lei nº 14.300 de 2022. Este marco tem o intuito essencial de dar segurança jurídica aos empreendimentos em geração distribuída no país, uma vez que antes havia apenas resoluções da ANEEL. Também fez algumas alterações na forma de cobrança, do consumidor-gerador, colocando uma regra de transição para os projetos solicitados até 12 meses da entrada da lei em vigor e retirando as isenções que haviam anteriormente (GREENER, 2022).

2.2. Introdução às Microrredes e suas características

Segundo o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, a definição de microrrede é a seguinte:

XII - microrrede: integração de vários recursos de geração distribuída, armazenamento de energia elétrica e cargas em sistema de distribuição secundário capaz de operar conectado a uma rede principal de distribuição de energia elétrica e também de forma isolada, controlando os parâmetros de eletricidade e provendo condições para ações de recomposição e de autorrestabelecimento; (BRASIL. Diário Oficial da União. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022).

Pode-se também entender as microrredes como “sistemas elétricos completos, locais, delimitados, pequenos e controláveis que podem operar ilhados ou conectados à rede elétrica convencional” (JUNIOR; FREITAS, 2020). Explicando cada um dos termos dessa definição, tem-se que as microrredes são:

- completas porque possuem de forma conjunta produção de energia, o fornecimento ou distribuição e o consumo de energia em uma entidade.
- locais, pois, em geral as fontes de geração se localizam próxima dos consumidores podendo ser adaptadas a esse local.
- delimitadas uma vez que requerem um espaço reduzido, o sistema tenha uma quantidade restrita de integrantes (não apenas consumidores).
- pequenas tanto em tamanho, geralmente são muito menores que as usinas convencionais, dada a natureza de suas fontes; como também em produção de energia elétrica, que em geral fica na casa das dezenas de MW.
- controláveis porque são comandadas e reguladas por dispositivos de supervisão que estão na própria microrrede.

Devido a suas características, segundo Junior e Freitas (2020), as microrredes possuem algumas vantagens em relação aos sistemas elétricos convencionais. Um primeiro aspecto é a proximidade da geração à carga, que provoca uma diminuição efetiva das perdas elétricas, e, portanto, melhoram a eficiência do sistema (JUNIOR; FREITAS, 2020).

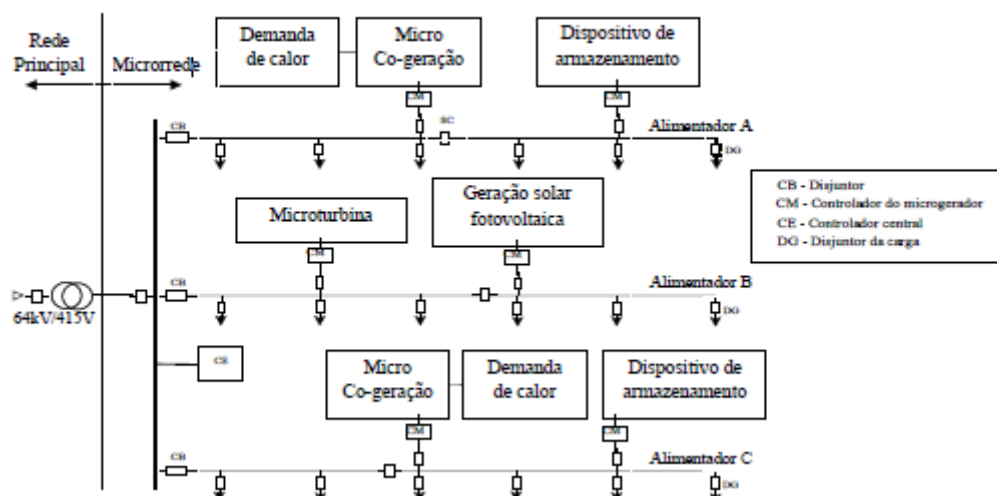
A segunda característica que pode ser vantajosa das microrredes, dada a sua definição, é a maior facilidade em se incorporar fontes de energia renováveis, que é um dos objetivos da expansão da utilização da geração distribuída, estimular o uso de energias menos poluentes ao meio ambiente (JUNIOR; FREITAS, 2020).

As microrredes também possuem uma flexibilidade maior quanto aos parâmetros elétricos. Elas podem ser em corrente alternada, corrente contínua, ou híbrida, além de poderem ser projetadas de acordo com a carga e as especificidades de onde será instalada (JUNIOR; FREITAS, 2020).

E por fim, um terceiro aspecto, que inclusive se torna até sinônimo de microrredes atualmente, é que elas podem ser inteligentes. Considerando-se os avanços em eletrônica de potência das últimas décadas. Podem ser incorporadas e automatizadas nas microrredes controles relativos à tensão para um sistema ilhado com cargas constantes ou variáveis com um ou múltiplos geradores, ou controle *droop* para microrredes na forma híbrida CA-CC, controladores de fluxo interno e de energia de baterias em microrredes. Também se abrem possibilidades de autonomia do sistema para gestão de comércio de energia e redução de poluição que podem ser feitos de maneira automática e otimizada por processos computacionais mais avançados (JUNIOR; FREITAS, 2020).

Na figura 5 temos uma esquematização de microrredes que exemplifica as várias possibilidades de como elas podem operar.

Figura 5 – Exemplo de microrrede conectada a uma rede principal de distribuição.



Fonte: Chowdhury, Chowdhury e Crossley (2009).

Sabe-se que as microrredes são redes de distribuição constituídas por um conjunto de sistemas de GD e estão, geralmente, no nível de tensão de distribuição. Em ilhamento, a microrrede opera de forma autônoma, ou seja, independente da rede principal, e o controle das gerações distribuídas, as cargas, e os armazenadores de energia são o que mantém o funcionamento da microrrede (VAN DOORN et al, 2010 e SALOMONSSON; SODER; SANNINO, 2008).

Neste trabalho os modelos para alocação de fontes de energia elétrica são microrredes em corrente contínua (CC) operando de forma autônoma. Existem algumas vantagens apresentadas pelas microrredes CC como: melhoria nos índices de qualidade de energia, maior capacidade de transferência de energia; possibilidade de uso de diferentes níveis de tensão sem utilização de transformadores; não há necessidade sincronização entre as fontes de GD; são reduzidas as flutuações da potência gerada pelas fontes distribuídas, distúrbios no nível de tensão e de corrente (JUNIOR; FREITAS, 2020).

Entretanto, deve-se ter em consideração que as microrredes em corrente alternada (CA) possuem mais tempo de utilização, e, portanto, estão mais consolidadas no mercado; ela é mais conveniente na interligação de todas as fontes distribuídas com a rede, já que esta também opera em CA; e,

por fim, se as microrredes CC possuem menores problemas quanto ao afundamento de tensão e distúrbios, a proteção de redes CA é mais fácil de ser realizada, por ser mais simples e menos custosa. Com isso, tem-se que apesar de suas boas características, as redes CC precisam ainda de bastante estudo em temas como controle, estabilidade, confiabilidade, proteção, qualidade, entre outros (JUNIOR; FREITAS, 2020).

Outra característica importante das microrredes CC, é o fato de que uma grande quantidade de cargas, a exemplo do modelo de iluminação pública que será visto adiante neste trabalho, são de corrente contínua, como equipamentos eletrônicos e acionamentos elétricos em indústrias, bem como outras necessidades até residenciais..

Em relação aos sistemas isolados, a Resolução Normativa nº 1.000/2021 define atualmente os procedimentos e regras para o fornecimento de energia pelos dois sistemas no Brasil, MIGDI - Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica –, e SIGFI - Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente, incluindo o uso de corrente contínua por ambos os modos. Na resolução as definições de MIGDI e SIGFI, são, respectivamente:

XXX - microssistema isolado de geração e distribuição de energia elétrica – MIGDI: sistema isolado de geração de energia elétrica com fonte de energia renovável intermitente, utilizado para o atendimento de mais de uma unidade consumidora e associado a microrrede de distribuição de energia elétrica; (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, Resolução Normativa nº 1.000/2021)

XLVII - sistema individual de geração de energia elétrica com fonte intermitente – SIGFI: sistema de geração de energia elétrica exclusivamente por meio de fonte de energia renovável intermitente, utilizado para o atendimento de uma unidade consumidora; (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, Resolução Normativa nº 1.000/2021)

Acrescenta-se à definição dada que ambos os tipos de sistema devem garantir disponibilização de energia, dependendo do porte do sistema, entre 45 kWh a 180 kWh mensais. No Art. 522 desta resolução tem-se que os dois tipos

de sistemas devem garantir uma autonomia de 36 horas para fonte solar, quando há ausência total da fonte primária. Além disso, é definido que o sistema MIGDI deve ter potência instalada menor ou igual a 100kW, podendo ser maior se aprovado pelo poder concedente da ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, 2021).

2.3. Características das células fotovoltaicas

Inicialmente a utilização principal das células fotovoltaicas não era como gerador de energia, apenas como sensor de luminosidade. Contudo, durante a década de 60, o uso de células fotovoltaicas em programas espaciais e satélites fez aumentar o desenvolvimento dessa tecnologia tornando-as ainda mais eficientes. Nos anos 70, devido às graves crises energéticas, foram feitos estímulos à utilização e produção de células fotovoltaicas para uso terrestre. Assim, o custo médio das células reduziu consideravelmente, e continua sendo até hoje (CRESESB, 2006).

O principal material do qual são feitas as células fotovoltaicas é o silício, o segundo elemento mais abundante da Terra, e são feitas de lâminas de silício monocristalino ou policristalino. Há também as células de película fina que podem ser: silício amorfo (a-Si), disseleneto de cobre índio e gálio (CIS-CIGS) ou de telureto de cádmio (CdTe), entre outras tecnologias que estão sendo desenvolvidas e que se baseiam no efeito fotovoltaico (BLUESOL, 2017)

Considerando então o funcionamento da célula fotovoltaica, cada uma, individualmente, produz cerca de 0,5 V; e para que seja possível seu uso para gerar uma maior quantidade de energia, faz-se a conexão de várias dessas células em série e paralelo (FAGUNDES, 2014). As ligações em paralelo de células fotovoltaicas somam a corrente fornecida ao circuito ligado nas placas, fazendo com que, um módulo fotovoltaico seja composto de células em série e paralelo, para aumento da tensão e corrente produzidas. As células mais comuns no mercado possuem a partir de 36 células fotovoltaicas no arranjo.

Outro fator importante a ser lembrado é que as placas fotovoltaicas produzem energia elétrica em corrente contínua, sendo, portanto, necessário

que se utilize inversores CC-CA caso se queira utilizar os módulos nas redes de distribuição ou para cargas que precisem ser alimentadas em corrente alternada. Essa característica torna prático o uso de módulos fotovoltaicos com baterias, ou diretamente nas cargas já que um grande número delas é feita para utilizar corrente contínua.

2.4. Curvas características e sistemas fotovoltaicos

Sabe-se que uma célula fotovoltaica no escuro possui comportamento idêntico ao de um diodo, sendo assim, a partir da Equação de Shockley para a corrente do diodo ideal. tem-se:

$$I = I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT} - 1\right) \right] \quad (1)$$

Sendo:

I_L : Corrente fotogerada (A);

I_o : Corrente de saturação reversa do diodo (A);

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

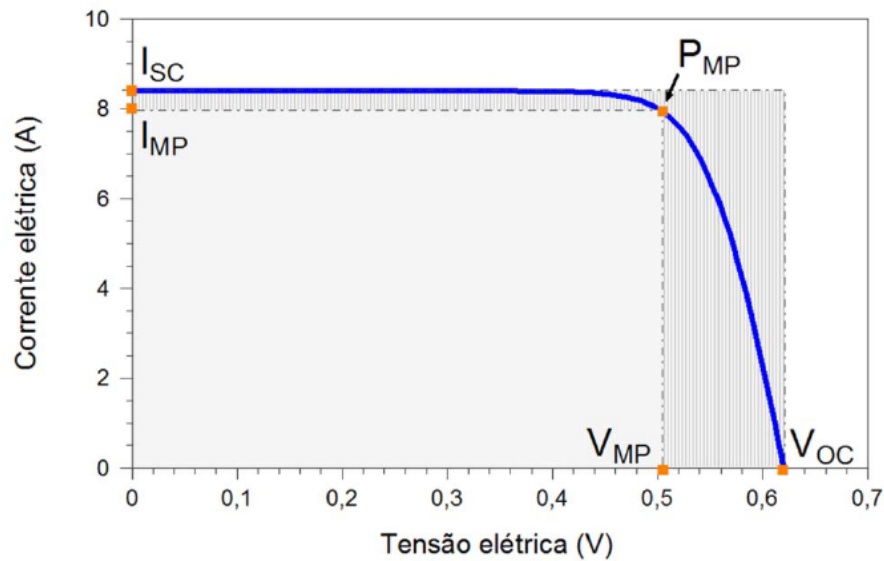
k : Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K);

T : Temperatura (K);

n : fator de idealidade do diodo, adimensional e experimental.

A partir da equação (1), pode-se ver a curva característica de tensão e corrente em uma célula fotovoltaica genérica sob condições padrão de ensaio, apresentada na figura 6.

Figura 6 – Curva IxV de uma célula fotovoltaica STC.



Fonte: (PINHO e GALDINO, 2014).

Da figura 6, tem-se que I_{SC} é a corrente de curto-circuito da célula e V_{OC} a tensão de circuito aberto. Nota-se que para valores próximos à máxima tensão (V_{OC}) que a célula pode produzir, o valor da corrente fotogerada reduz drasticamente. Existe um ponto de máxima potência nas células fotovoltaicas, apontado na figura 6 como P_{MP} , o ponto de máxima potência ou potência de pico, no qual tem-se uma corrente de máxima potência (I_{MP}), para uma tensão de máxima potência (V_{MP}).

Considerando então o efeito da irradiância solar na célula, mantida sob temperatura constante de 25 °C, a tensão de circuito aberto V_{OC} , considerando a equação (1), terá um comportamento de aumento logarítmico (uma vez que esta é a tensão para corrente igual a zero) com o aumento da irradiância solar (PINHO e GALDINO, 2014). A corrente por sua vez terá um aumento linear, como mostra a figura 10, e é dada pela equação (2).

$$I_{SC} = I_{SC_{STC}} * \frac{G}{1000} \quad (2)$$

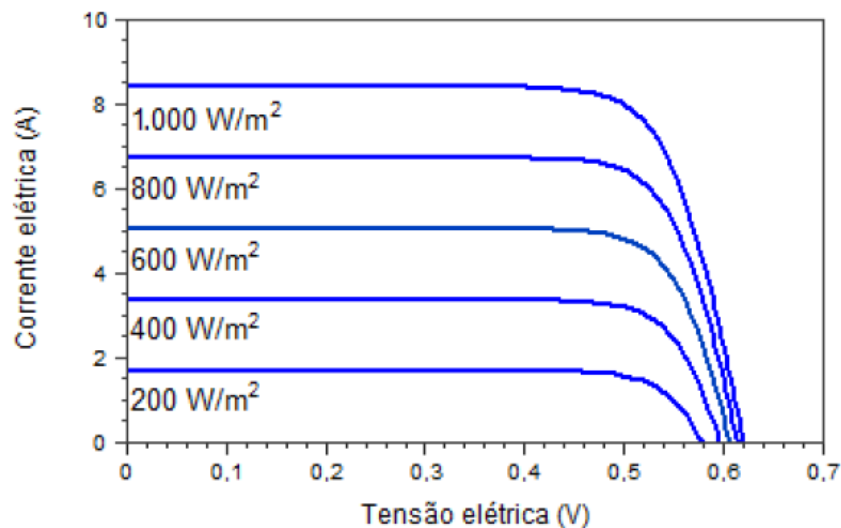
Sendo:

I_{SC} : Corrente de curto circuito para uma irradiância G qualquer (A);

$I_{SC_{STC}}$: Corrente de curto circuito nas condições padrão de ensaio;

G: Irradiância solar incidente na célula fotovoltaica (W/m^2).

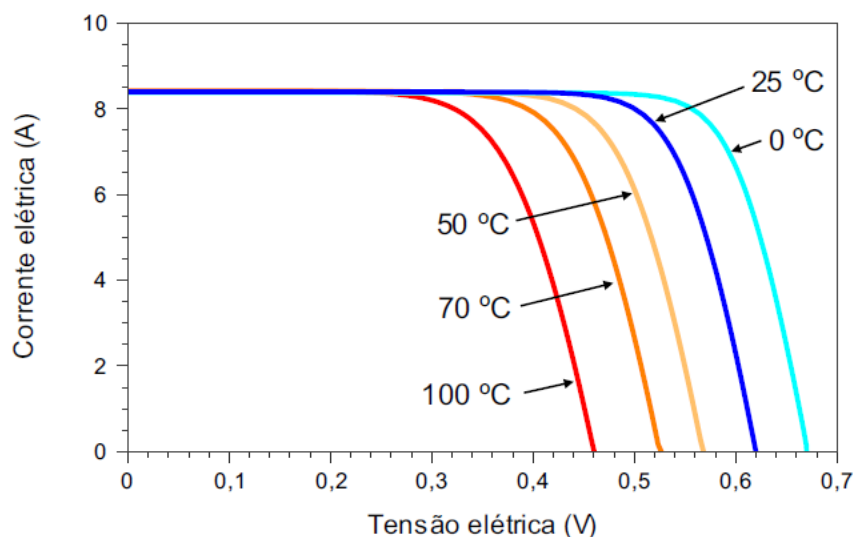
Figura 7 – Curva IxV da célula fotovoltaica para diferentes irradiâncias solares.



Fonte: (PINHO e GALDINO).

Em relação a variações na temperatura, dessa vez considerando a irradiância constante em 1000 W/m^2 , tem-se o seguinte efeito na célula fotovoltaica, ela perde eficiência, uma vez que com o aumento da temperatura a corrente gerada aumenta, mas não de forma significativa, porém a tensão reduz de forma mais drástica. Desse modo, a figura 8 apresenta o comportamento da curva IxV para diferentes temperaturas, e observa-se que a máxima potência gerada (P_{MP}) pela célula vai aumentando conforme cai a temperatura.

Figura 8 – Curva IxV considerando diferentes temperaturas na célula fotovoltaica.



Fonte: (PINHO e GALDINO, 2014).

Por fim, utilizando-se das células fotovoltaicas, são feitos painéis fotovoltaicos com a junção dessas células em série e paralelo, para assim conseguir-se as tensões e correntes maiores. A partir deste painéis fotovoltaicos tem-se os sistemas fotovoltaicos que são conjuntos de painéis e outros dispositivos necessários para transformar a radiação solar em energia elétrica utilizável.

Pode-se classificar em dois tipos básicos de sistemas fotovoltaicos:

- Sistemas Isolados
- Sistemas *On-grid* (conectados à rede de distribuição elétrica)

Os sistemas fotovoltaicos isolados são, em essência, sistemas que não estão conectados à rede de distribuição de energia elétrica e podem ou não ter outra fonte de energia elétrica atuando conjuntamente no sistema, o que seria o caso de **sistemas híbridos**. No caso de **sistemas puros** existem dois tipos: sistema com ou sem armazenamento. O primeiro acontece em usos nos quais o sistema precisa utilizar energia elétrica em horários sem sol e geralmente possuem baterias que armazenam energia para uso da energia produzida nos horários de sol; já os sistemas sem armazenamento são os que a energia

elétrica é produzida e consumida durante o período com luz solar (BLUESOL, 2017).

O componentes que formam o sistema fotovoltaico isolado, de interesse para este trabalho, são os seguintes:

1. **Painéis fotovoltaicos:** componente que produz a energia elétrica a partir da incidência de luz solar.
2. **Controlador de carga:** possuem a principal função de evitar danos ao sistema de armazenamento, controlando possíveis sobrecargas ou descarga profunda.
3. **Inversores CC/CA:** para uso de cargas em CA, o uso de inversores se faz necessário, uma vez que a corrente produzida pela célula fotovoltaica é CC.
4. **Armazenamento:** sistemas autônomos que precisam funcionar em horas em que não há sol necessitam utilizar algum tipo de armazenamento, sendo o mais comum o uso de baterias, normalmente de chumbo-ácido ou lítio.
5. **Cargas:** são os consumidores da energia produzida pelo sistema e como visto podem ser tanto CC quanto CA, demandando as adaptações necessárias ao sistema como uso de inversor CC/CA ou não.

3. Algoritmo genético para alocação de fontes de energia e dimensionamento de sistemas fotovoltaicos

No estudo de otimização, a qual busca o melhor elemento de um conjunto de possíveis alternativas por meio de uma função objetivo que se aproxima de uma maximização ou minimização, tem-se a otimização estocástica campo que tem como objeto de estudos casos com restrições ou parâmetros que dependem de variáveis aleatórias.

As metaheurísticas, se encontram no estudo de otimização estocástica e são métodos que tentam se aproximar de uma solução ótima, ainda que possuindo grande aleatoriedade na busca. Desse modo, metaheurísticas têm por objetivo chegar a um resultado de otimização satisfatória, porém sem garantir que a resposta será um ótimo global, dentro do espaço de busca. Em geral, esses algoritmos são utilizados para problemas muito complexos que possuem pouca ou nenhuma informação que guie a busca, e portanto seria necessário um esforço computacional consideravelmente mais alto, que muitas vezes é impraticável, para se chegar à solução exata.

Sendo assim, esses algoritmos metaheurísticos possuem uma simplicidade maior que outros tipos de busca heurística, gerando resultados satisfatórios de otimização com tempo computacional relativamente mais baixo. Em geral, as metaheurísticas se baseiam em analogias com processos naturais de otimização, como a observação do comportamento de formigas no algoritmo *Ant Colony Optimization* (Otimização de colônia de formigas) ou, como no caso do algoritmo utilizado neste trabalho, o algoritmo genético, baseado na biologia e estudos evolutivos.

3.1. Introdução à computação evolutiva

Os algoritmos genéticos estão inseridos no contexto da computação evolutiva surgida em meados da década de 50 e vem sendo utilizado em várias disciplinas desde então. Aplica-se o processo de evolução natural baseado na teoria darwinista como um paradigma para solução de problemas complexos. Como é característico de metaheurísticas, uma das vantagens do uso desse

tipo de algoritmo é que não há necessidade de se saber todo um processo específico de solução para cada problema. O algoritmo possui uma sequência esquemática a ser seguida de forma generalista, o que facilita sua aplicação para diversos casos diferentes (VON ZUBEN, 2000).

Deve-se entender, então, os algoritmos evolutivos como um elenco de procedimentos facilmente adaptáveis a cada problema que se tenta resolver um problema mediante duas informações de entrada:

- População de indivíduos, são as soluções-candidatas do problema e que passam por processos similares aos biológicos.
- Uma função de adaptação, que mede a adequação dos indivíduos e simula o ambiente externo que pressiona essa população a se adaptar.

A teoria de Darwin para o processo de seleção natural se baseia em alguns fatores (VON ZUBEN, 2000):

1. As gerações sucessoras (filhos) tendem a ser mais numerosas que as antecessoras.
2. A quantidade de indivíduos de uma espécie tende a permanecer constante.
3. Haverá uma luta pela sobrevivência desses indivíduos
4. Na espécie, os indivíduos apresentam algumas poucas diferenças entre si que podem, muitas vezes, estar nos pais.

Esta teoria, embora indique uma competição pela sobrevivência de sistemas de reprodução da informação limitados por um espaço finito, não representa atualmente uma teoria para explicação da origem das espécies, como propunha Darwin. Para que esta possa ser uma teoria completa de seleção natural deve-se levar em conta os seguintes fatores: processo de variação contínua que introduza novas informações genéticas nos indivíduos, numa sucessão de variações ilimitadas e que as novas informações sejam preservadas caso correspondam a maior adaptação (mecanismo da seleção natural) (VON ZUBEN, 2000).

Devido a analogia com os processos biológicos, alguns termos são utilizados para representar entidades computacionais que simulam entidades biológicas reais, tais como:

- Gene: unidade básica e funcional de armazenamento de informação genética, cada gene se encontra em uma posição específica (locus) de um cromossomo.
- cromossomo: são conjuntos de genes e trazem a informação do indivíduo.
- *locus*: posição do gene no cromossomo.
- genótipo: é uma codificação dada ao problema e que é expressa nos genes.
- fenótipo: uma representação de uma solução-candidata do problema, dada pelo genótipo.

3.2. Forma geral dos algoritmos genéticos

O algoritmo genético (AG), de acordo com o breve exposto sobre a teoria darwiniana, funciona como uma analogia trazida ao universo computacional, dos processos biológicos vistos na teoria de seleção natural.

O mecanismo de seleção natural privilegia os indivíduos aptos e com maior probabilidade de reprodução. Esses indivíduos que se reproduzem, perpetuam seus códigos genéticos nas próximas gerações, códigos esses representados pelos cromossomos. No AG, portanto, o cromossomo nesse caso é uma estrutura de dados que representa uma possível solução do problema (PACHECO, 1999).

Sendo o indivíduo da população representado pelo cromossomo, estes são geralmente representados como listas de vetores, sendo que cada unidade que compõe esse vetor representa o gene. O valor contido no gene deve ser uma codificação do problema a ser resolvido, que é uma representação genética (genótipo) escolhida de forma a facilitar o processo de busca da solução.

Outro fator importante do algoritmo genético é a busca por um equilíbrio entre dois objetivos de busca conflitantes: aproveitar as melhores soluções encontradas e uma busca ampla pelo espaço de soluções (VON ZUBEN, 2000). Uma vez que ao ser ampliado o espaço de busca tem-se uma aproximação cada vez maior de outras soluções boas, deve-se entender que o algoritmo genético, e as metaheurísticas em geral, buscam soluções satisfatórias sem a garantia de encontrar o ótimo global, sendo assim, se manter próximo de ótimas soluções candidatas também garante uma solução mais satisfatória ao final do processo.

Logo, a estrutura que forma um algoritmo genético pode ser descrita pelas seguintes etapas:

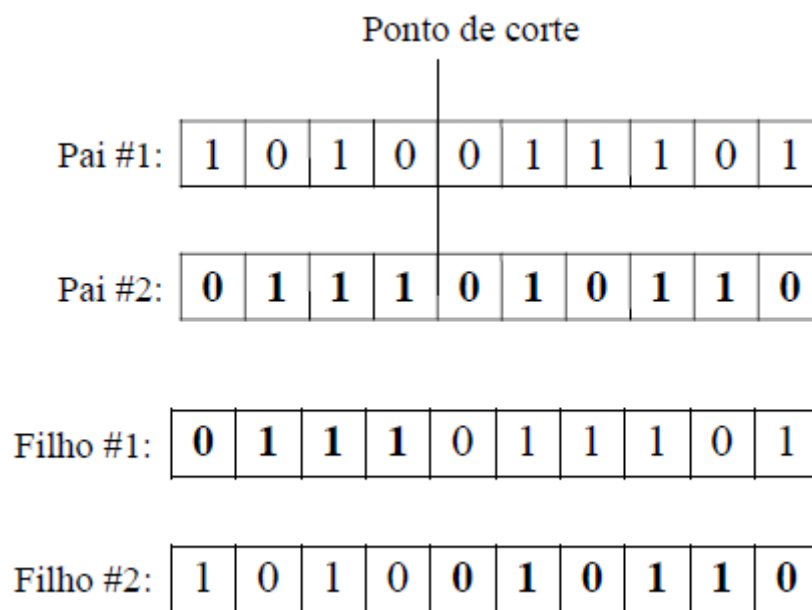
1. Inicialização da população;
2. Verificação da probabilidade de realização dos operadores genéticos;
3. Realização dos operadores genéticos;
4. Avaliação da população;
5. Seleção da população;
6. Condição de parada do algoritmo.

Por se tratar de um algoritmo baseado em evolução populacional, deve-se atentar ao item 1, em relação ao tamanho da população a ser escolhido, que não pode ser muito pequeno, porém se for excessivamente grande pode fazer com que o tempo computacional seja muito grande, uma vez que a utilização desse tipo de algoritmo é justamente para ser mais rápido que métodos clássicos. Ademais, a inicialização dos primeiros cromossomos pode seguir algum critério específico que possa ajudar na convergência do AG a um ótimo melhor. Em geral, inicia-se a população com cromossomos preenchidos aleatoriamente.

Para os itens 2 e 3, deve-se entender o que são os operadores genéticos, afinal, são as partes principais do AG. Os operadores genéticos são os mecanismos que farão a modificação dos genes para que haja a “seleção natural” dos indivíduos, como mostrado ser necessário no item 3.1, em relação às melhorias na teoria darwiniana. Os operadores genéticos são: **recombinação e mutação**.

A recombinação, ou *crossover*, é o operador considerado mais importante. A recombinação funciona basicamente trocando alguns genes de dois cromossomos entre si, como mostra a figura 9, no qual foi definido um ponto de recombinação e codificação binária. A recombinação é feita selecionando um ou mais pontos, ou *locus*, nos cromossomos pais e trocando-se esses genes nos seus respectivos *locus*. Após a recombinação é obtido um par de cromossomos filhos. Este operador genético possui uma probabilidade de ocorrer no algoritmo, definido pelo programador do AG, que em geral fica entre 50% a 100% de probabilidade de ocorrer, simulando o que ocorre em um ambiente natural. Esta probabilidade é chamada de **taxa de recombinação**.

Figura 9 - Exemplo de recombinação em um ponto de corte.



Fonte: (PACHECO, 1999).

O operador mutação é o que modifica aleatoriamente um ou mais genes de um cromossomo. A mutação, tal qual ocorre na realidade biológica, gera uma variabilidade na população, fazendo com que alguns indivíduos mantenham uma diversidade genética, importante para que o AG possa explorar mais o espaço de busca, sem entrar em um ponto de ótimo local rapidamente. Assim como o operador recombinação, o operador mutação também ocorre dentro de uma probabilidade que é bem menor do que a

recombinação, pois se for alta demais pode-se perder muito do progresso realizado pela recombinação já feita anteriormente. Essa probabilidade é chamada **taxa de mutação**.

A seleção da população pode ocorrer antes da recombinação ou após a recombinação, já com a nova geração criada (BUENO, 2009). Os indivíduos são avaliados por uma função objetivo ou função adequação (*fitness*) e alguns métodos de seleção podem ser utilizados para que nas próximas gerações os melhores indivíduos passem pelos operadores genéticos. Alguns métodos de seleção comuns dos AGs:

- Seleção por torneio: faz-se um torneio entre alguns indivíduos selecionados de maneira aleatória, e os indivíduos cuja função objetivo ou adequação forem mais adequados se reproduzem. Em geral cada torneio é composto por 3 indivíduos ou mais, assim consegue-se uma grande variabilidade de cromossomos, e alguns poucos não dominam a população causando rápida convergência (BUENO, 2009).
- Seleção por vizinhança: ou seleção local, definem-se intervalos aleatórios na população e os indivíduos dessas “vizinhanças” ou intervalos realizam crossover entre si (BUENO, 2009).
- Seleção por roleta (*roulette wheel*): nesse método, tendo o valor da função objetivo do indivíduo, calcula-se uma relação entre esse valor e o somatório da adequação de todos os outros indivíduos, tendo-se assim uma probabilidade daquele indivíduo fazer parte da próxima geração, conforme esta probabilidade seja mais alta.
- Seleção por diversidade: escolhe-se por algum critério de maior diversidade entre os indivíduos dessa população (VON ZUBEN, 2000)
- Seleção aleatória: são selecionados aleatoriamente n indivíduos da população. Pode ser salvacionista, que preserva o indivíduo de melhor função objetivo daquela geração, ou não (VON ZUBEN, 2000)
- Seleção bi-classista: escolhe-se uma porcentagem dos melhores e dos piores indivíduos dessa população, garantindo diversidade, porém garantindo que bons indivíduos continuem passando pelas gerações (VON ZUBEN 2000).

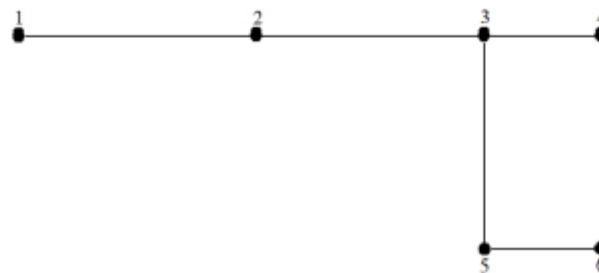
Essa exposição genérica do funcionamento e dos elementos que compõem um AG são utilizadas para fazer um algoritmo de alocação de fontes de energia elétrica em uma microrrede, como proposto no objetivo e explicado no item 3.3.

3.3. Modelo matemático para alocação de fontes de energia elétrica

Primeiramente, deve-se conhecer o modelo feito para a microrrede e como este será traduzido para os componentes do AG.

Uma microrrede em corrente contínua como a da figura 10 pode ser entendida como um sistema de distribuição de energia elétrica radial, conforme o exemplo esquemático apresentado na figura 10, de um sistema de 6 pontos de carga.

Figura 10 - Exemplo de representação esquemática de uma microrrede de 6 nós.



Fonte: (FAGUNDES, 2014).

Todos esses pontos de carga podem ser alimentados por alguma fonte de energia elétrica. A equação de circuitos elétricos que pode ser utilizada para determinar os parâmetros elétricos de tensão e corrente dessa rede é dada pela equação 3, que é uma análise nodal do sistema e é baseada nas Leis de Kirchhoff das Correntes.

$$[I] = [G_{Bus}] \cdot [V] \quad (3)$$

Em que

$[I]$: Matriz coluna das correntes fornecidas ao sistema pelas fontes;

$[G_{Bus}]$: Matriz de condutâncias;

$[V]$: Matriz das tensões fornecidas ao sistema.

A matriz de condutâncias, presente na equação (3) é determinada pelas resistências nominais das cargas e das linhas de distribuição, calculados por: (FAGUNDES, 2014).

$$G_{bus} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_{12}} & \frac{-1}{R_{12}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-1}{R_{12}} & \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_{23}} & \frac{-1}{R_{23}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{R_{23}} & \ddots & \frac{-1}{R_{34}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \frac{1}{R_{n-2n-1}} + \frac{1}{R_{n-1}} + \frac{1}{R_{n-1n}} & \frac{-1}{R_{n-1n}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{R_{n-1n}} & \frac{1}{R_n} + \frac{1}{R_{n-1n}} \end{bmatrix}$$

Na matriz de condutâncias, a diagonal principal é composta pela soma da condutância (inverso da resistência) da carga no nó e das condutâncias das linhas que se ligam àquele nó. Os elementos fora da diagonal principal são formados pela soma das condutâncias das linhas que se ligam àquele nó.

O cálculo da resistência da carga é dado pela equação (4).

$$R_{Carga} = \frac{V_{nom}^2}{P_{cc}} \quad (4)$$

Sendo:

V_{nom} : Tensão nominal do sistema, em [V];

P_{cc} : Potência da carga em corrente contínua, em [W].

Para calcular a resistência das linhas utiliza-se a equação (5).

$$R_l = \frac{A_c \cdot \rho}{l} \quad (5)$$

Em que:

l : comprimento do condutor, que é a distância entre dois nós, em [m];

ρ : resistividade do material utilizado como condutor. No caso do condutor de cobre é $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$;

A_c : Área da seção transversal do condutor, em [m²].

A matriz de tensões é o problema a ser resolvido neste caso. As tensões são preenchidas com o valor nominal das fontes. A quantidade de fontes e a posição delas na matriz de tensão é o que será determinado pelo processo do AG. Desse modo, pode-se definir a codificação do algoritmo de forma binária, sendo o número 0 a indicação de que não há fonte a ser alocada na posição e 1 o contrário. Na figura 11 é mostrado um exemplo dessa codificação para o exemplo de 6 nós.

Figura 11 - Codificação binária da matriz de tensões.

Nó	1	2	3	4	5	6
Cod.	1	0	1	0	0	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Da figura 11 entende-se que para cada nó do sistema, o valor binário associado indica que ali deve-se ou não colocar uma fonte de tensão.

Portanto, para o algoritmo genético o exemplo da figura 11 se comporta como um cromossomo, e cada *locus* preenchido por um valor binário é um gene. Tendo-se um conjunto desses cromossomos criados, forma-se uma população de indivíduos. O valor dos genes é determinado pela alocação.

Contudo para que se possa resolver a equação (3), uma vez que precisa-se dos valores dos parâmetros elétricos do circuito para avaliação do indivíduo, é necessário que se acrescente equações ao sistema linear pois não são conhecidas as correntes geradas pelas fontes, apenas são conhecidas as tensões dos nós onde houve alocação. Desse modo, para cada nó alocado, acrescenta-se uma equação no sistema linear, de modo a que se iguale o número de incógnitas e o número de equações. No exemplo da figura 10, inicialmente tem-se 6 valores de tensão e 6 valores de corrente a serem determinados. Considerando a matriz de tensões formada pela alocação da figura 11, são feitas 3 alocações, o que reduz o número de correntes geradas para 3 apenas. Assim, no exemplo citado há 6 fontes e 3 correntes a serem determinadas, portanto, acrescentam-se mais 3 equações ao sistema linear do exemplo, como mostram as equações (6), (7) e (8).

$$V_1 = 12 \quad (6)$$

$$V_3 = 12 \quad (7)$$

$$V_6 = 12 \quad (8)$$

Consequentemente, há no exemplo, 9 equações e 9 incógnitas e com isso, o sistema linear da equação (3) pode ser resolvido, e os resultados obtidos de tensão e corrente são utilizados para a avaliação da função objetivo do problema.

A função objetivo (FO) utilizada neste problema de alocação de fontes de energia elétrica é dada pela equação 9, e é inspirada na FO presente em Fagundes (2014) . Esta FO tem como objetivo minimizar as alocações de fontes na microrrede e garantir a distribuição de energia dentro dos parâmetros elétricos adequados, e já contém as restrições como penalizações embutidas.

$$FO = \sum_{i \in \Omega n} n_i + \sum_{ij \in \Omega l} \frac{(V_i - V_j)^2}{R_{ij}} + k_1 + k_2 \quad (9)$$

Sendo:

k_1 - Se $V_i < V_{Nom} * 0,95$; $k_1 = 1000000$. Se $V_i > V_{Nom} * 0,95$; $k_1 = 0$.

k_2 - Se $I_{ij} > I_c$; $k_2 = 100000$. Se $I_{ij} < I_c$; $k_2 = 0$.

Em que:

V_{Nom} : Tensão nominal do sistema (V);

I_{ij} : Corrente da linha ij (A);

I_c : Corrente máxima permitida pelo condutor (A);

n_i : Variável binária que indica a alocação;

Ωn : Conjunto de nós do sistema;

Ωl : Conjunto de linhas do sistema;

V_i : Tensão do sistema no nó i. (V);

R_{ij} : Resistência da linha ij. (Ω).

A função objetivo definida para este trabalho possui 3 parcelas. A primeira refere-se à soma de alocações feitas no sistema, ou seja cada alocação feita aumenta o valor da FO tornando o indivíduo menos adaptado.

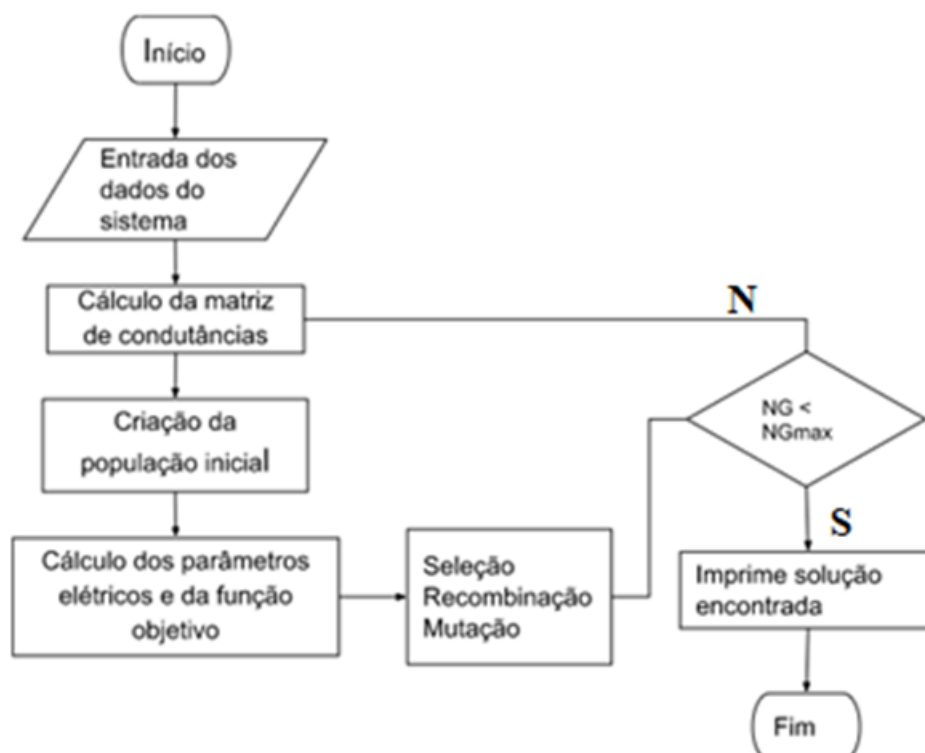
A segunda parcela é referente às perdas no sistema, uma vez que duas ou mais soluções-candidatas podem apresentar o mesmo número de alocações, avaliando-se as perdas de cada uma delas tem-se diferenciações dessas soluções-candidatas. Dessa maneira, é garantido que das soluções-candidatas semelhantes em número de alocações, será escolhida a que possui menores perdas, ou seja, um custo ainda mais reduzido.

A terceira e quarta parcelas são referentes à penalizações aplicadas para afundamentos de tensão e correntes muito altas. No caso da penalização da tensão, caso em algum nó haja tensões abaixo de 5% do valor nominal da carga, a FO será aumentada para um valor muito alto, o que tornará a solução-candidata muito ruim e o algoritmo passará a não considerá-la apta. No caso da corrente, há o limitante da corrente máxima permitida no condutor, então para correntes muito altas, a FO também é penalizada.

3.4. Algoritmo genético para alocação de fontes de energia elétrica

Partindo do modelo matemático da microrrede e da função objetivo mostrada no item 3.3, aplica-se o procedimento do algoritmo genético introduzido no item 3.2. O algoritmo está sumarizado no diagrama de blocos da figura 12.

Figura 12 - Diagrama de blocos do algoritmo genético.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O primeiro bloco do algoritmo é dedicado a se carregar os dados referentes à microrrede como distância entre os nós, seção do condutor utilizado e todos os dados necessários para os cálculos do algoritmo conforme explicitado no item 3.3.

No segundo bloco tem-se a rotina que calcula a matriz de condutâncias do sistema, matriz essa que é usada durante todo o algoritmo.

Para o terceiro bloco, de criação da população inicial, o tamanho da população deve ser adequado para cada tamanho de microrrede. É importante ressaltar que se a população for pequena, ocorre pouca diversidade na população o que faz o algoritmo convergir muito rapidamente; caso a população seja excessivamente grande, o algoritmo tornar-se-á mais lento, comprometendo um dos objetivos do AG que é encontrar uma resposta satisfatória num tempo razoável. Neste trabalho a população inicial será formada por cromossomos aleatórios.

O cálculo dos parâmetros elétricos no quarto bloco é o momento onde se descobrem as tensões e correntes na microrrede, bem como a potência gerada em cada nó e as perdas nas linhas, por cada cromossomo da população, desse modo tornando possível se avaliar cada indivíduo, conforme mostrado o cálculo no item 3.3.

No quinto bloco está resumido o processo característico do AG.

- Seleção: foi escolhido o método de seleção por torneio, descrito no item 3.2. Escolhe-se 3 indivíduos aleatoriamente e distintos. Há uma **taxa de seleção**, escolhida em 70%, de chance do melhor indivíduo ser selecionado, e consequentemente, 30% de chances de escolher o pior indivíduo dos 3 selecionados; desse modo escolhe-se indivíduos piores mas que podem ajudar na recombinação, por meio de diversidade, a que se encontrem indivíduos melhores, fazendo uma busca mais ampla no espaço de soluções.
- Recombinação: conforme explicado no item 3.2, a recombinação é feita com os “casais” de cromossomos selecionados anteriormente, e a recombinação é feita com corte em 1 ponto apenas.

- Mutação: explicado no item 3.2, alguns poucos indivíduos que passaram ou não por recombinação, podem sofrer mutação e um dos genes, e este é o último operador genético utilizado.

No sexto bloco, o de decisão do AG, ou seja a condição de parada, possui apenas uma condição, o número de gerações. É definido inicialmente um número fixo de gerações e após atingir esse número a solução mais bem adaptada   escolhida e salva. Pode-se utilizar outro critério: um número máximo de gerações sem mudança na melhor solução. Contudo, para este algoritmo específico, não foi utilizado este critério devido ao fato de, nos testes do AG, ter sido constatado que o algoritmo converge para soluções satisfatórias até próximo do fim do número de gerações, sendo, portanto, desnecessário neste caso.

4. Método de dimensionamento para sistema fotovoltaico isolado

A fonte de energia elétrica escolhida para alimentar as microrredes das simulações é a energia fotovoltaica, devido à sua simplicidade e custo relativamente baixo, e também por ser uma energia proveniente de fonte renovável, sendo, portanto, ambientalmente limpa e sustentável.

Os componentes necessários para o sistema fotovoltaico foram expostos no item 2.4 de forma geral. Para os sistemas de iluminação pública do item 4, as cargas serão em corrente contínua, o que dispensa a necessidade do inversor CC/CA. Portanto, os equipamentos principais e necessários para o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos neste trabalho são: painéis fotovoltaicos, controladores de carga e baterias. As baterias serão de chumbo-ácido, por serem as mais comuns e possuírem uma boa quantidade de armazenamento de energia.

Para o cálculo dos sistemas fotovoltaicos será considerado o método do mês crítico. Este método considera um balanço energético durante o período do ano em que ocorrem as piores médias de incidência de energia solar para o sistema, sendo assim dimensionando para o pior caso, durante o resto do ano as condições serão favoráveis e o sistema atenderá à demanda de energia das cargas, considerando que as cargas possuem valor constante (PINHO e GALDINO, 2014).

4.1. Método de cálculo para o módulo fotovoltaico

De modo simples, utilizam-se os valores médios de irradiação solar e demanda da carga, sendo o valor de irradiação no mês de condição mais desfavorável. Por conseguinte, haverá um excesso de energia nos outros meses.

Primeiramente calcula-se a demanda de energia necessária diariamente, dada pela equação (10).

$$E_{dia} = \frac{P_d * t_{uso}}{\eta_{bat}} \quad (10)$$

Em que:

P_d : Potência da carga (W);

t_{uso} : Tempo de uso da carga por dia (h/dia);

η_{bat} : Eficiência da bateria (%). A sugestão dada por (PINHO e GALDINO, 2014) é um valor de 86%.

Para determinar o módulo fotovoltaico utiliza-se a equação (11).

$$P_m = \frac{E_{diária}}{HSP * fr1 * fr2} \quad (11)$$

Na qual:

P_m : Potência mínima do módulo fotovoltaico (Wp);

$E_{diária}$: Energia diária consumida pelo sistema diariamente (Wh/dia);

HSP : Quantidade de horas de sol pleno no mês de pior irradiação (h/dia);

$fr1$: fator de redução da potência dos módulos devido ao acúmulo de sujeira, degradação física, perdas devido a temperatura e tolerância de fabricação para menos. O valor sugerido por (PINHO e GALDINO, 2014) é de 0,75;

$fr2$: fator de redução da potência devido a perdas no sistema (fios, diodos, controlador, entre outros). Recomenda-se em (PINHO e GALDINO, 2014) o valor de 0,9.

Para determinar o valor de horas de pleno sol (HSP) é o intervalo de tempo em horas no qual a irradiação solar se manteria constante em 1000 W/m², porém sendo equivalente à energia acumulada ao longo do dia (López, 2014).

Desse modo, é necessário conhecer o valor da irradiação solar diária média mensal na região. Para isso, utiliza-se o programa SunData 3.0, disponibilizado gratuitamente pela CRESESB (GUIMARÃES; GALDINO, 2017). Basta fornecer ao programa as coordenadas de latitude e longitude da região. Serão então fornecidos os valores para diferentes inclinações de superfícies da irradiação solar diária média mensal. Para este trabalho foi escolhida a maior média anual.

O cálculo das horas de pleno sol é dado pela equação (12).

$$HSP = \frac{\min(ISDMM)}{1000} \quad (12)$$

Em que:

$\min(ISDMM)$: mínimo valor de Irradiância solar diária média mensal, dado pelo programa SunData 3.0 (Wh/m²).

Com o resultado da equação (12), pode ser resolvida a equação (11). Por meio deste, escolhe-se um painel fotovoltaico cuja potência nominal seja maior que a potência mínima dada pela equação (11) (P_m). Caso seja necessário utilizar mais de um módulo, devido à necessidade de potência, os módulos devem ser conectados em paralelo, e, a soma das potências nominais, ultrapassar a potência mínima (P_m).

4.2. Método de cálculo para o banco de baterias e controlador de carga

No dimensionamento do banco de baterias, são utilizados os resultados da energia diária demandada calculada pela equação (10). Para calcular a capacidade da bateria, dada em Ah, tem-se a equação (13).

$$CB = \frac{E_{diária} \cdot N}{P_d \cdot V_{nom}} \quad (13)$$

Na qual:

$E_{diária}$: Energia diária consumida, dada pela equação 10 (Wh/dia);

N : tempo de autonomia do sistema (dias);

P_d : Profundidade de descarga da bateria, geralmente considerado 30%, conforme recomendado em (PINHO e GALDINO, 2014);

V_{nom} : Tensão nominal do sistema (V).

Por meio da equação (13), é obtida a capacidade mínima do banco de baterias. Esta equação já contempla o tempo de autonomia do sistema, que é necessário para o caso de sistemas isolados. A profundidade de descarga é uma porcentagem da carga que é retirada da bateria numa descarga. Quanto menor a profundidade de descarga maior é a vida útil de uma bateria.

Uma vez que a tensão nominal do sistema neste trabalho é sempre fixa, não será necessário colocar baterias em série, uma vez que este tipo de ligação tem o intuito de aumentar a tensão fornecida ao sistema. Contudo, podem ser necessárias ligações em paralelo, já que nesse caso somam-se as correntes das baterias. Para calcular a quantidade de baterias em paralelo necessárias, utiliza-se a equação (14).

$$N^{\circ} \text{ de baterias} = \frac{CB}{CB_{bat}} \quad (14)$$

Em que:

CB : Capacidade do banco de baterias necessário, dado pela equação (13); (Ah)

CB_{bat} : Capacidade nominal da bateria escolhida (Ah).

Pela equação (14), nota-se que deve-se escolher as baterias que se pretende usar no sistema previamente.

Por fim, o último equipamento a ser dimensionado é o controlador de carga. Para calcular o controlador de carga é necessário utilizar o valor da corrente de curto circuito (I_{SC}) explicado no item 2.3, do módulo fotovoltaico escolhido. A equação para o cálculo da corrente do controlador de carga é dada pela equação (15).

$$I_c = 1,25 \cdot N^{\circ} \text{ mód em paralelo} \cdot I_{sc} \quad (15)$$

Nota-se na equação (15), que há um fator de segurança para a corrente do controlador para o caso de possíveis sobrecargas momentâneas.

5. Resultados das simulações num sistema de iluminação pública

Para avaliar o algoritmo e as alocações feitas pela metaheurística escolhida, foram realizados testes em um sistema modelo de iluminação pública. O AG foi desenvolvido e programado pelo autor deste trabalho, conforme o item 3.4, no *software* OCTAVE, e o computador utilizado para as simulações possui processador Intel(R) Core(TM) i7-7500U CPU @ 2.70GHz 2.90 GHz e 8MB de memória RAM. O dimensionamento do sistema fotovoltaico, como explicitado nos itens 4.1 e 4.1 foram feitos no *software* Microsoft Excel.

O sistema de iluminação pública utilizado como modelo para as simulações é de um loteamento residencial do município de Ilha Solteira - SP. As coordenadas utilizadas para a obtenção dos parâmetros de irradiação solar no programa SunData 3.0, explicado no item 4.1, são: latitude 20°25'58" sul e a uma longitude 51°20'33" oeste. Com estas coordenadas obtém-se a tabela 1.

Tabela 1 - Dados de irradiação solar para Ilha Solteira.

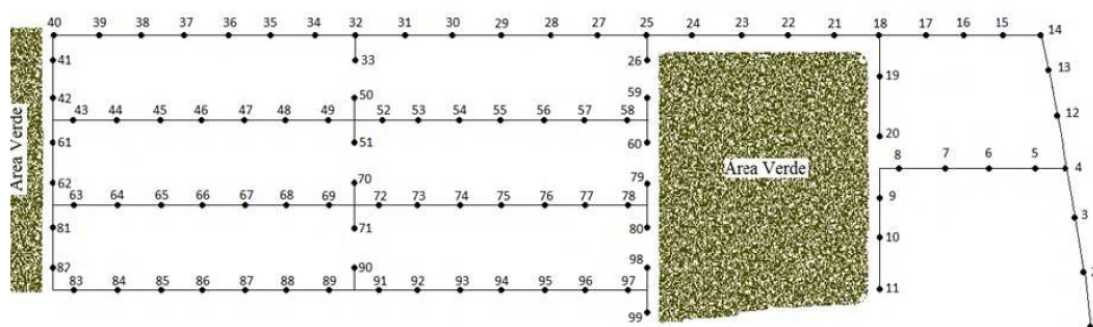
Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												Média	Delta
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
Plano Horizontal	0° N	5,86	6,03	5,49	4,95	4,17	3,83	4,02	4,97	4,91	5,60	5,98	6,35	5,18	2,52
Ângulo igual a latitude	20° N	5,34	5,76	5,62	5,52	5,02	4,80	4,96	5,78	5,17	5,47	5,51	5,69	5,39	,97
Maior média anual	19° N	5,38	5,79	5,63	5,51	4,99	4,76	4,93	5,75	5,17	5,49	5,55	5,73	5,39	1,02
Maior mínimo mensal	27° N	5,07	5,56	5,55	5,61	5,21	5,04	5,18	5,93	5,15	5,31	5,25	5,36	5,35	,89

Fonte: CRESESB. Potencial Solar SunData v 3.0, 2017. Disponível em : <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>>. Acesso em: 28 de novembro de 2022.

Logo, será considerado para horas de pleno sol (*HSP*), dado pela equação (12), o valor de 4,76 h.

Este sistema teste é composto por 297 lâmpadas, ou nós. Devido ao tamanho relativamente alto do sistema, serão feitos testes com esta rede reduzida. Os testes serão feitos em sistemas 99 nós, cujos dados foram obtidos de (FAGUNDES, 2014) e esquematizado na figura 13, que é a representação reduzida do sistema completo. No anexo A, tem-se os dados de linha para o sistema.

Figura 13 - Diagrama unifilar do sistema teste de 99 nós radial.



Fonte: (FAGUNDES, 2014).

Serão feitos 3 testes considerando diferentes potências de lâmpadas de LED: 30 W, 50 W e 100 W. Desse modo pode-se avaliar o custo benefício da alocação à medida que a carga aumenta no sistema. O custo benefício da alocação otimizada será comparado a um dimensionamento de sistemas fotovoltaicos específico para todas as lâmpadas, que é referida neste relatório como alocação convencional.

Os condutores utilizados são de 10mm² de seção transversal. A tensão nominal do sistema é 12V CC, e a queda de tensão permitida é de 5% (11,4V). As alocações feitas pelo AG poderão ser feitas em quaisquer nós do sistema, sem restrições.

5.1. Resultado da simulação para lâmpadas de 30 W

5.1.1. Alocação pelo algoritmo genético para lâmpadas de 30 W

Os parâmetros utilizados no AG para esta simulação são mostrados na tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros utilizados no AG para o sistema com carga de 30 W

Tam. População	Taxa de recombinação	Taxa de mutação	Taxa de seleção	Nº de gerações
100	0,9	0,3	0,7	2000

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para este teste, foram feitas 28 alocações, mostradas na tabela 3. E o tempo computacional da simulação foi de 2461,6 s. O número de alocações representa menos de 30% do total de alocações do sistema. O valor das perdas para esta alocação é 30,4778 W. A menor tensão encontrada foi de 11,69V no nó 38, que representa uma queda de tensão de 2,5%, abaixo dos 5% permitidos para a alocação.

Na tabela 3 encontram-se os dados do dimensionamento dos painéis fotovoltaicos para este sistema nos nós especificados. Na terceira coluna da tabela 3 é mostrada a potência do painel escolhido, baseado em opções encontradas no mercado.

Tabela 3 - Módulos fotovoltaicos escolhidos para 30W.

Nó	Pm (Wp)	Painel escolhido (Wp)
2	147,46	210
4	238,96	280
7	167,40	210
10	181,53	210
15	231,90	280
19	204,92	280
22	179,51	210
25	235,30	280
29	176,41	210
32	235,36	280
36	205,13	280
40	230,91	280
43	177,67	210
46	176,61	210
49	291,10	345
54	207,82	280

58	263,54	345
63	181,85	210
66	176,61	210
69	291,10	345
74	207,82	280
78	263,54	345
82	231,03	280
86	205,21	280
89	204,11	280
92	149,44	210
95	147,48	210
97	205,71	280

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os painéis escolhidos são:

- Resun RS7E-210M - 210W. Custo: 600 reais.
- OSDA - ODA280-30-P - 280W. Custo: 800 reais.
- Half-Cell - ZnShine Solar Series ZXP6-H144 - 345W. Custo: 900 reais.

Os dados dos fabricantes desses painéis fotovoltaicos estão no anexo B. Os valores de tensão, corrente e potência para o sistema se encontram no apêndice A.

Na tabela 4 é apresentado o dimensionamento do banco de baterias e do controlador de carga do sistema com lâmpadas de 30W.

Tabela 4 - Banco de baterias e controladores escolhidos para 30W

Nó	Isc (A)	Ic (A)	Controlador (A)	Qtde controla dores	CB (Ah)	Cbbat (Ah)	Qtde de baterias
2	11,07	13,84	20	1	577,7	220	3

4	9,41	11,76	20	1	936,2	220	5
7	11,07	13,84	20	1	655,8	220	3
10	11,07	13,84	20	1	711,2	220	4
15	9,41	11,76	20	1	908,5	220	5
19	9,41	11,76	20	1	802,8	220	4
22	11,07	13,84	20	1	703,3	220	4
25	9,41	11,76	20	1	921,8	220	5
29	11,07	13,84	20	1	691,1	220	4
32	9,41	11,76	20	1	922,1	220	5
36	9,41	11,76	20	1	803,7	220	4
40	9,41	11,76	20	1	904,7	220	5
43	11,07	13,84	20	1	696,1	220	4
46	11,07	13,84	20	1	691,9	220	4
49	9,28	11,60	20	1	1140,5	220	6
54	9,41	11,76	20	1	814,2	220	4
58	9,28	11,60	20	1	1032,5	220	5
63	11,07	13,84	20	1	712,4	220	4
66	11,07	13,84	20	1	691,9	220	4
69	9,28	11,60	20	1	1140,5	220	6
74	9,41	11,76	20	1	814,2	220	4
78	9,28	11,60	20	1	1032,5	220	5
82	9,41	11,76	20	1	905,1	220	5
86	9,41	11,76	20	1	803,9	220	4
89	9,41	11,76	20	1	799,6	220	4
92	11,07	13,84	20	1	585,4	220	3
95	11,07	13,84	20	1	577,8	220	3
97	9,41	11,76	20	1	805,9	220	4

Fonte: Elaborado pelo autor.

O controlador de carga escolhido é o PWM 20A 12/24V - EPEVER VIEWSTAR VS2024U. O custo do controlador é de 330 reais.

A bateria escolhida foi a Bateria Estacionária Freedom DF4100 - 220Ah/240Ah, com custo de 1550 reais.

5.1.2. Dimensionamento convencional para lâmpadas de 30 W e comparativo

O dimensionamento feito para a alocação convencional, ou seja alocando-se 1 sistema fotovoltaico por lâmpada, é apresentado na tabela 5.

Tabela 5 - Dimensionamento sistema fotovoltaico alocação convencional 30 W

Nó	P _m (Wp)	Painel (Wp)	I _{sc} (A)	I _c (A)	Controla dor (A)	Qtde controla dores	CB (Ah)	CBbat (Ah)	Qtde baterias
1	59,36	100	6,84	8,55	10	1	232,6	150	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesta alocação convencional, todos os nós possuem a mesma demanda de potência do nó 1 e, portanto, têm os mesmos equipamentos escolhidos para este nó.

O painel fotovoltaico escolhido é o Resun RSM-100P - 100W. O custo deste painel é de 360 reais.

O controlador de carga escolhido é o PWM 10A 12/24V - EPEVER VIEWSTAR VS1024U. O custo deste controlador é de 250 reais.

A bateria escolhida para o banco é a Bateria Estacionária Freedom DF2500 - 150Ah/165Ah. O custo dessa bateria é de 1230 reais.

Neste tipo de alocação, pressupõe-se que o valor de perdas deve ser desprezível, em comparação com a alocação otimizada.

Logo o comparativo entre o custo total dos dois tipos de alocação, com algoritmo genético e a convencional, é apresentado na tabela 6.

Tabela 6 - Comparativo entre os dois tipos de alocação com lâmpadas de 30W

Comparativo		
Alocação Convencional	Valor em Reais	% de economia
Valor total dos painéis	35.640,00	
Valor total do controlador	24.750,00	
Valor total do banco de baterias	243.540,00	
Valor total dos equipamentos	303.930,00	
Alocação Algoritmo Genético		
Valor total dos painéis	20.600,00	42,20%
Valor total do controlador	9.240,00	62,67%
Valor total do banco de baterias	186.000,00	23,63%
Valor total dos equipamentos	215.840,00	28,98%
Economia	Valor em reais	
Economia em painéis	15.040,00	
Economia controlador	15.510,00	
Economia baterias	57.540,00	
Economia no total	88.090,00	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se pela tabela 6 houve uma economia total de aproximadamente 29% no custo do sistema com o uso da alocação otimizada pelo AG. As economias em controlador e módulos fotovoltaicos são, aproximadamente, 63% e 42%, respectivamente. Contudo, a economia do banco de baterias, que é de aproximadamente 24%, é menor que a economia total do sistema, e por causa do alto custo das baterias, acaba por diminuir a economia total obtida com a alocação otimizada.

5.2. Resultado da simulação para lâmpadas de 50 W

5.2.1. Alocação pelo algoritmo genético para lâmpadas de 50 W

Os parâmetros utilizados no AG para esta simulação são os mesmos da simulação feita no item 5.1.1 e estão presentes na tabela 2.

Para este teste, foram feitas 37 alocações e o tempo computacional da simulação foi de 1744 s. O total de alocações feita pelo AG é menor que 40% do total de alocações possível para o sistema. O valor das perdas para esta alocação é 51,3724 W. A menor tensão encontrada foi de 11,68V nos nós 98 e

99, o que representa uma queda de tensão de 2,5%, abaixo dos 5% permitidos para a alocação.

No apêndice B encontram-se os dados do dimensionamento dos painéis fotovoltaicos para este sistema nos nós especificados.

Os painéis escolhidos nesse dimensionamento são:

- Resun RS7E-210M - 210W. Custo: 600 reais.
- OSDA - ODA280-30-P - 280W. Custo: 800 reais.
- Half-Cell - ZnShine Solar Series ZXP6-H144 - 345W. Custo: 900 reais.
- OSDA ODA420-36V-PH - 420W. Custo: 1200 reais.
- OSDA ODA465-36V-MH - 465W. Custo: 1500 reais.

Os dados dos fabricantes desses painéis fotovoltaicos estão no anexo B. Os valores de tensão, corrente e potência para o sistema se encontram no apêndice C.

No apêndice B também é apresentado o dimensionamento do banco de baterias, conforme feito no item 5.1.1, e do controlador de carga do sistema com lâmpadas de 50W.

As baterias e controladores escolhidos são os mesmos do item 5.1.1.

5.2.2. Dimensionamento convencional para lâmpadas de 50 W e comparativo

O dimensionamento feito para a alocação convencional é apresentado na tabela 7.

Tabela 7 - Dimensionamento sistema fotovoltaico alocação convencional 50 W.

Nó	Pm (Wp)	Painel (Wp)	Isc (A)	Ic (A)	Contr olador (A)	Qtde controla dores	CB(Ah)	CBbat (Ah)	Qtde bateria s
1	98,93	155	8,31	10,39	20	1	387,6	220	2

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como já explicado no item 5.1.2, o dimensionamento dos componentes do sistema é igual para todos os nós.

O painel fotovoltaico escolhido é o Resun RS6E-155M - 155W. O custo deste painel é de 480 reais. A bateria e o controlador escolhidos são os mesmos do item 5.1.1.

Fazendo-se o comparativo entre o custo total dos dois tipos de alocação, obtém-se a tabela 8.

Tabela 8 - Comparativo entre os dois tipos de alocação com lâmpadas de 50W.

Comparativo		
Alocação Convencional	Valor em Reais	% de economia
Valor total dos painéis	47.520,00	
Valor total controladores	32.670,00	
Valor total do banco de baterias	306.900,00	
Valor total dos equipamentos	387.090,00	
Alocação Algoritmo Genético		
Valor total dos painéis	32.500,00	31,61%
Valor total controladores	12.210,00	62,63%
Valor total do banco de baterias	297.600,00	3,03%
Valor total dos equipamentos	342.310,00	11,57%
Economia		
Economia em painéis	15.020,00	
Economia em controlador	20.460,00	
Economia baterias	9.300,00	
Economia no total	44.780,00	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que assim como no sistema com lâmpadas de 30 W, neste também foi possível obter uma economia total no custo dos equipamentos, com as maiores economias sendo nos painéis e controladores. Novamente, a economia em baterias foi menor que a economia total do sistema.

5.3. Resultado da simulação para lâmpadas de 100 W

5.3.1. Alocação pelo algoritmo genético para lâmpadas de 100 W

Os parâmetros utilizados no AG para esta simulação são os mesmos da simulação feita no item 5.1.1 e estão presentes na tabela 2.

Para este teste, foram feitas 56 alocações e o tempo computacional da simulação foi de 1981,14 s. É notável que neste sistema a relação de alocações feitas e o máximo possível é de aproximadamente 56%. O valor das perdas para esta alocação é 87,0467 W. A menor tensão encontrada foi de 11,64 V nos nós 48 e 68, o que representa uma queda de tensão de 3%, abaixo dos 5% permitidos para a alocação.

No apêndice D encontram-se os dados do dimensionamento dos painéis fotovoltaicos para este sistema nos nós especificados.

Os painéis escolhidos nesse dimensionamento são:

- Resun RS7E-210M - 210W. Custo: 600 reais.
- OSDA - ODA280-30-P - 280W. Custo: 800 reais.
- Half-Cell - ZnShine Solar Series ZXP6-H144 - 345W. Custo: 900 reais.
- OSDA ODA420-36V-PH - 420W. Custo: 1200 reais.
- OSDA ODA465-36V-MH - 465W. Custo: 1500 reais.
- OSDA ODA550-36V-MH - 550W. Custo: 1800 reais.
- Luxen Solar Series 5 - 595W Monocristalina. Custo: 1900 reais.

Os dados dos fabricantes desses painéis fotovoltaicos estão no anexo B. Os valores de tensão, corrente e potência para o sistema se encontram no apêndice E.

No apêndice D é apresentado o dimensionamento do banco de baterias e do controlador de carga do sistema com lâmpadas de 100 W.

As baterias e os controladores continuam sendo os mesmos já apresentados no item 5.1.1.

5.3.2. Dimensionamento convencional para lâmpadas de 100 W e comparativo

O dimensionamento feito para a alocação convencional é apresentado na tabela 9.

Tabela 9 - Dimensionamento sistema fotovoltaico alocação convencional 100 W.

Nó	Pm (Wp)	Painel (Wp)	Isc (A)	Ic (A)	Controlador	CB (Ah)	CBbat (Ah)	Qtde de baterias
1	197,87	280	9,41	11,76	20	775,2	220	4

Fonte: Elaborado pelo autor.

O painel fotovoltaico escolhido é o OSDA - ODA280-30-P - 280W, com custo de 280 reais. Bateria e controlador mantêm-se os mesmos do dimensionamento do item 5.1.1.

Fazendo-se o comparativo entre o custo total dos dois tipos de alocação, obtém-se os valores apresentados na tabela 10.

Tabela 10 - Comparativo entre os dois tipos de alocação com lâmpadas de 100.

Comparativo		
Alocação Convencional	Valor em Reais	% de economia
Valor total dos paineis	79.200,00	
Valor total controladores	32.670,00	
Valor total do banco de baterias	613.800,00	
Valor total dos equipamentos	725.670,00	
Alocação Algoritmo Genético	Valor em Reais	% de economia
Valor total dos paineis	63.100,00	20,33%
Valor total controladores	18.480,00	43,43%
Valor total do banco de baterias	575.050,00	6,31%
Valor total dos equipamentos	656.630,00	9,51%
Economia	Valor em Reais	
Economia em paineis	16.100,00	
Economia em controlador	14.190,00	
Economia baterias	38.750,00	
Economia no total	69.040,00	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela tabela 10, vê-se uma economia total de aproximadamente 10% no custo do sistema com o uso da alocação otimizada pelo AG, bastante reduzida em relação à economia do sistema com lâmpadas de 30 W.

As economias com painéis e controlador de carga continuam sendo as maiores, e continuam contribuindo com a economia do sistema, enquanto nota-se o custo das baterias neste teste reduzindo consideravelmente a economia total. Logo, percebe-se que um fator que reduz a economia gerada neste sistema com lâmpadas de 100 W é o fato de haver um aumento na necessidade de baterias para o sistema, já que a potência necessária para alimentar as cargas aumentou. Porém como as baterias se limitam às de capacidade nominal 220 Ah encontradas no mercado, há uma dificuldade em reduzir o preço do sistema total, o que não acontece com os valores dos painéis fotovoltaicos.

6. Conclusão

Após a obtenção dos resultados das simulações pode-se observar alguns aspectos da otimização da alocação de fontes de energia elétrica em microrredes. O AG foi capaz de fornecer uma alocação para um sistema de iluminação pública de 99 lâmpadas de LED em um tempo factível. O AG clássico deste trabalho foi capaz de reduzir o custo do dimensionamento dos sistemas de iluminação pública de três diferentes cargas de lâmpadas, porém foi visto que o principal componente limitante da redução do custo foi o banco de baterias. Para o sistema de com lâmpadas de 30, 50 e 100 W, geraram economias de aproximadamente 29, 12 e 10% no custo do dimensionamento. A economia em sistemas com lâmpadas de menor carga se deve ao menor número de alocações, 28 para 37 e 56 feitas nos sistemas de 50 e 100 W, respectivamente, e também à menor necessidade de corrente. Este último fator, relaciona-se com o custo e potência das baterias, que limita-se a apenas baterias de no máximo 220 Ah (com profundidade de descarga de 30%), o que reduz o custo total do sistema para cargas maiores. As perdas nos sistemas foram minimizadas pelo algoritmo, tornando-as muito pequenas e gerando um baixo custo com perdas ao longo dos anos.

7. Referências

ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. **Distributed generation: a definition**. Electric Power Systems Research, v. 57, n. __, p. 195-204. 2001.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução nº 1.000/2021, de 07 de dezembro de 2021**. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica; revoga as Resoluções Normativas ANEEL nº 414, de 9 de setembro de 2010; nº 470, de 13 de dezembro de 2011; nº 901, de 8 de dezembro de 2020 e dá outras providências. [S. l.], 7 dez. 2021.

BAGOLIN, Dalci de Jesus et al. **Crise energética: impactos e oportunidades ao agronegócio brasileiro**. . Centro de Agronegócio Global do Insper e a Fundação Alexandre de Gusmão (FUNAG). TCC (Curso executivo). 2021.

BLUESOL. **Os sistemas de energia solar fotovoltaica: Livro digital de introdução aos sistemas solares**. Editora Blue Sol Energia Solar.2017. *Ebook*.

BOCUZZI, Dennis; MONACO, Pedro; SANTOS, Joviano; BONALDO, Filipe. **“Geração Distribuída: Evolução Brasileira e Perspectivas”**. Agência Canal Energia. Rio de Janeiro. 2020.

BRASIL. DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. **LEI Nº 14.300, DE 6 DE JANEIRO DE 2022**. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. [S. l.], 7 jan. 2022.

BUENO, Fabrício. **Métodos Heurísticos: Teoria e Implementações**. IFSC. Araranguá. 2009.

PINHO, João; GALDINO, Marco (org.). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro. 2014.

CHOWDHURY, S.; CHOWDHURY, S.; CROSSLEY, P. Microgrids and active distribution networks.In: . [S.l.]: Stevenage: IET Publisher, 2009.

CRESESB. **Energia solar princípios e aplicações**. 2006.

EMPRESA DE ENERGIA ELÉTRICA. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL**. Rio de Janeiro. 2022

EMPRESA DE ENERGIA ELÉTRICA. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL - SÍNTESE**. Rio de Janeiro. 2022.

FAGUNDES, Minéia Capellari. **OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA PARA ALOCAÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS EM MICRORREDES DE CORRENTE CONTÍNUA**. Tese (Doutorado). – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, FEIS – Unesp, Ilha Solteira. 2014.

GREENER. **Análise do Marco Legal da Geração Distribuída: sancionado o PL 5.829/2019 que institui o Marco Legal da MMGD**. 2022.

GUIMARÃES, Ana Paula; GALDINO, Marco. **Potencial solar - SunData v 3.0**. CRESESB, 2017. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 28 de novembro de 2022.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. **Crise hídrica, termelétricas e renováveis: considerações sobre o planejamento energético e seus impactos ambientais e climáticos**. São Paulo - SP. 2021

JUNIOR, Marcus; FREITAS, Luiz. **Microrredes: Estado da arte, desafios e tendências para geração, distribuição e uso sustentável de energia elétrica**. Brazilian Applied Science Review, Curitiba. 2020.

LÓPEZ, Julián. **Sistemas autônomos de iluminação pública em corrente contínua**. Dissertação (Mestrado). - Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, FEIS – Unesp, Ilha Solteira. 2014.

PACHECO, M.A.C. **Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações**, INTERCON 99: V Congresso Internacional de Ingeniería Electrónica, Elétrica Y Sistemas. Lima. 1999.

SALOMONSSON, D.; SODER, L.; SANNINO, A. **An adaptive control system for a dc microgrid for data centers**. Industry Applications, IEEE Transactions. New York. 2008.

VAN DOORN, T.; RENDERS, B.; DEGROOTE, L.; MEERSMAN, B.; VANDEVELDE, L. **Power balancing in islanded microgrids by using a dc-bus voltage reference**. In: POWER ELECTRONICS ELECTRICAL DRIVES AUTOMATION AND MOTION - SPEEDAM. Naples. 2010.

VON ZUBEN, F. J. **Computação Evolutiva: Uma Abordagem Pragmática**. Unicamp. Campinas. 2000.

Apêndice A - Resultados parâmetros elétricos sistema 30 W

Nó	Tensão (V)	Corrente injetada (A)	Potência (W)
1	11,84717149	-2,84217E-14	-3,36717E-13
2	12	6,210371033	74,52445239
3	11,92521894	0	0
4	12	10,06377937	120,7653524
5	11,86723916	5,68434E-14	6,74574E-13
6	11,85486891	0	0
7	12	7,050069019	84,60082823
8	11,8555647	0	0
9	11,87124342	5,68434E-14	6,74802E-13
10	12	7,645175429	91,74210515
11	11,86395993	2,84217E-14	3,37194E-13
12	11,79855556	-2,84217E-14	-3,35335E-13
13	11,73446855	0	0
14	11,79004429	-1,13687E-13	-1,34037E-12
15	12	9,766687614	117,2002514
16	11,79749852	0	0
17	11,73450246	0	0
18	11,81715457	2,84217E-14	3,35864E-13
19	12	8,630379368	103,5645524
20	11,8304305	-2,84217E-14	-3,36241E-13
21	11,8259435	-1,13687E-13	-1,34445E-12
22	12	7,560303959	90,72364751
23	11,83461131	0	0
24	11,83461131	2,84217E-14	3,3636E-13
25	12	9,9097813	118,9173756

26	11,90190844	-5,68434E-14	-6,76545E-13
27	11,8304305	-5,68434E-14	-6,72482E-13
28	11,8304305	2,84217E-14	3,36241E-13
29	12	7,42934604	89,15215248
30	11,8304305	0	0
31	11,8304305	0	0
32	12	9,912398005	118,9487761
33	11,90190844	-5,68434E-14	-6,76545E-13
34	11,84717149	2,84217E-14	3,36717E-13
35	11,84717149	5,68434E-14	6,73434E-13
36	12	8,639265762	103,6711891
37	11,77268518	-2,84217E-14	-3,346E-13
38	11,69723799	5,68434E-14	6,64911E-13
39	11,77268518	0	0
40	12	9,725003086	116,700037
41	11,85940779	0	0
42	11,81841996	2,84217E-14	3,359E-13
43	12	7,482600701	89,79120842
44	11,85136414	0	0
45	11,85136414	-2,84217E-14	-3,36836E-13
46	12	7,438068392	89,25682071
47	11,85136414	-5,68434E-14	-6,73672E-13
48	11,85136414	-2,84217E-14	-3,36836E-13
49	12	12,25994973	147,1193967
50	11,84717149	0	0
51	11,84717149	8,27939E-15	9,80873E-14
52	11,83800393	-2,84217E-14	-3,36456E-13

53	11,84472566	2,84217E-14	3,36647E-13
54	12	8,75255874	105,0307049
55	11,7788703	-5,68434E-14	-6,69551E-13
56	11,70546727	2,84217E-14	3,32689E-13
57	11,7788703	0	0
58	12	11,09911654	133,1893985
59	11,82207773	0	0
60	11,82207773	-2,01407E-14	-2,38105E-13
61	11,75597246	-8,52651E-14	-1,00237E-12
62	11,80571606	-8,52651E-14	-1,00662E-12
63	12	7,658457448	91,90148938
64	11,85136414	2,84217E-14	3,36836E-13
65	11,85136414	-5,68434E-14	-6,73672E-13
66	12	7,438068392	89,25682071
67	11,85136414	5,68434E-14	6,73672E-13
68	11,85136414	2,84217E-14	3,36836E-13
69	12	12,25994973	147,1193967
70	11,84717149	2,84217E-14	3,36717E-13
71	11,84717149	6,37049E-15	7,54723E-14
72	11,83800393	0	0
73	11,84472566	5,68434E-14	6,73295E-13
74	12	8,75255874	105,0307049
75	11,7788703	0	0
76	11,70546727	2,84217E-14	3,32689E-13
77	11,7788703	-2,84217E-14	-3,34776E-13
78	12	11,09911654	133,1893985
79	11,82207773	2,84217E-14	3,36004E-13

80	11,82207773	2,97788E-14	3,52047E-13
81	11,86541675	0	0
82	12	9,729890725	116,7586887
83	11,7788703	0	0
84	11,70546727	2,84217E-14	3,32689E-13
85	11,7788703	-5,68434E-14	-6,69551E-13
86	12	8,642285016	103,7074202
87	11,85136414	0	0
88	11,85136414	-2,84217E-14	-3,36836E-13
89	12	8,596109737	103,1533168
90	11,84717149	0	0
91	11,92026666	0	0
92	12	6,29350827	75,52209923
93	11,85136414	0	0
94	11,85136414	0	0
95	12	6,211244502	74,53493403
96	11,92521894	2,84217E-14	3,38935E-13
97	12	8,663732533	103,9647904
98	11,81165334	2,84217E-14	3,35707E-13
99	11,81165334	2,84217E-14	3,35707E-13

Apêndice B - Módulos fotovoltaicos, baterias e controladores escolhidos para 50W.

Nó	Pm (Wp)	Painel (Wp)
2	244,74	280
4	292,75	345
6	190,27	210
7	256,63	280
8	185,17	210
10	294,35	345
14	299,80	345
17	250,11	280
28	196,70	280
30	196,70	280
35	196,82	280
36	244,80	280
37	196,82	280
39	228,34	280
42	297,57	345
43	342,10	420
44	201,25	280
46	262,79	345
53	200,07	280
54	388,87	420
55	244,80	280
58	338,36	420
62	301,85	345
64	249,20	280

66	269,22	345
67	244,80	280
69	388,59	420
73	248,03	280
76	278,17	345
78	200,07	280
79	155,14	210
80	155,14	210
82	387,26	420
83	289,57	345
86	435,21	465
94	244,80	280
95	294,14	345

Nó	Isc (A)	Ic (A)	Controlador (A)	Qtde de controladores	CB (Ah)	CBbat (Ah)	Qtde de baterias
2	9,41	11,76	20	1	958,8	220	5
4	9,28	11,60	20	1	1146,9	220	6
6	11,07	13,84	20	1	745,4	220	4
7	9,41	11,76	20	1	1005,4	220	5
8	11,07	13,84	20	1	725,4	220	4
10	9,28	11,60	20	1	1153,2	220	6
14	9,28	11,60	20	1	1174,5	220	6

17	9,41	11,7 6	20	1	979,9	220	5
28	9,41	11,7 6	20	1	770,6	220	4
30	9,41	11,7 6	20	1	770,6	220	4
35	9,41	11,7 6	20	1	771,1	220	4
36	9,41	11,7 6	20	1	959,1	220	5
37	9,41	11,7 6	20	1	771,1	220	4
39	9,41	11,7 6	20	1	894,6	220	5
42	9,28	11,6 0	20	1	1165,8	220	6
43	11,21	14,0 1	20	1	1340,2	220	7
44	9,41	11,7 6	20	1	788,4	220	4
46	9,28	11,6 0	20	1	1029,5	220	5
53	9,41	11,7 6	20	1	783,8	220	4
54	11,21	14,0 1	20	1	1523,5	220	7
55	9,41	11,7 6	20	1	959,1	220	5
58	11,21	14,0 1	20	1	1325,6	220	7
62	9,28	11,6 0	20	1	1182,5	220	6
64	9,41	11,7 6	20	1	976,3	220	5
66	9,28	11,6	20	1	1054,7	220	5

		0					
67	9,41	11,7 6	20	1	959,1	220	5
69	11,21	14,0 1	20	1	1522,4	220	7
73	9,41	11,7 6	20	1	971,7	220	5
76	9,28	11,6 0	20	1	1089,8	220	5
78	9,41	11,7 6	20	1	783,8	220	4
79	11,07	13,8 4	20	1	607,8	220	3
80	11,07	13,8 4	20	1	607,8	220	3
82	11,21	14,0 1	20	1	1517,2	220	7
83	9,28	11,6 0	20	1	1134,4	220	6
86	11,78	14,7 3	20	1	1705,0	220	8
94	9,41	11,7 6	20	1	959,1	220	5
95	9,28	11,6 0	20	1	1152,4	220	6

Apêndice C - Resultados parâmetros elétricos sistema 50 W

Nó	Tensão (V)	Corrente injetada (A)	Potência (W)
1	11,74743025	0	0
2	12	10,30742032	123,6890439
3	11,87588055	0	0
4	12	12,38783204	148,6539844
5	11,883271	0	0
6	12	8,013172958	96,1580755
7	11,86886552	0	0
8	12	7,798272028	93,57926433
9	11,87705053	0	0
10	12	10,80813443	129,6976131
11	11,77496729	0	0
12	11,7897921	-5,68434E-14	-6,70172E-13
13	11,80442811	0	0
14	12	12,62605583	151,51267
15	11,76807094	0	0
16	11,76807094	0	0
17	12	10,5336196	126,4034352
18	11,8587718	5,68434E-14	6,74093E-13
19	12	11,06747792	132,809735
20	11,7200217	0	0
21	11,79205756	-5,68434E-14	-6,70301E-13
22	12	11,33841077	136,0609292
23	11,72686184	0	0
24	11,72686184	-2,84217E-14	-3,33297E-13
25	12	14,40744488	172,8893385

26	11,83740016	0	0
27	11,8583585	-5,68434E-14	-6,7407E-13
28	12	8,284152255	99,40982707
29	11,8583585	0	0
30	12	8,284152255	99,40982707
31	11,8583585	0	0
32	12	12,39679354	148,7615225
33	11,83740016	-5,68434E-14	-6,72878E-13
34	11,872372	-2,84217E-14	-3,37433E-13
35	12	8,289018056	99,46821667
36	11,872372	-2,84217E-14	-3,37433E-13
37	12	8,289018056	99,46821667
38	11,872372	-5,68434E-14	-6,74866E-13
39	12	9,61670701	115,4004841
40	11,7901615	-5,68434E-14	-6,70193E-13
41	11,81804898	5,68434E-14	6,71778E-13
42	12	12,53210235	150,3852283
43	11,86472417	0	0
44	12	8,475558335	101,7067
45	11,87588055	0	0
46	12	10,30980649	123,7176779
47	11,75430243	0	0
48	11,75430243	8,52651E-14	1,00223E-12
49	12	18,32896583	219,94759
50	11,74743025	0	0
51	11,74743025	1,68708E-16	1,98188E-15
52	11,86769715	5,68434E-14	6,746E-13

53	12	8,42617318	101,1140782
54	11,87588055	5,68434E-14	6,75066E-13
55	12	10,30980649	123,7176779
56	11,75430243	2,84217E-14	3,34077E-13
57	11,75430243	2,84217E-14	3,34077E-13
58	12	16,37744205	196,5293046
59	11,70636534	0	0
60	11,70636534	-1,56859E-14	-1,83625E-13
61	11,90728974	0	0
62	12	12,71229715	152,5475658
63	11,86472417	0	0
64	12	10,49512853	125,9415423
65	11,75430243	2,84217E-14	3,34077E-13
66	11,75430243	0	0
67	12	10,30980649	123,7176779
68	11,87588055	2,84217E-14	3,37533E-13
69	12	16,30939564	195,7127477
70	11,74743025	-2,84217E-14	-3,33882E-13
71	11,74743025	-5,84407E-14	-6,86529E-13
72	11,86769715	0	0
73	12	10,44574337	125,3489205
74	11,75430243	0	0
75	11,75430243	0	0
76	12	11,71535977	140,5843172
77	11,79126625	-2,84217E-14	-3,35128E-13
78	11,82900271	-1,13687E-13	-1,3448E-12
79	12	6,53373876	78,40486512

80	12	6,53373876	78,40486512
81	11,76756708	2,84217E-14	3,34454E-13
82	11,7623822	5,68434E-14	6,68614E-13
83	12	12,19516113	146,3419336
84	11,75430243	0	0
85	11,75430243	5,68434E-14	6,68155E-13
86	12	12,32937669	147,9525202
87	11,75430243	0	0
88	11,75430243	0	0
89	12	14,249997	170,999964
90	11,74743025	0	0
91	11,86769715	-2,84217E-14	-3,373E-13
92	12	8,42617318	101,1140782
93	11,87588055	2,84217E-14	3,37533E-13
94	12	10,30980649	123,7176779
95	11,75430243	-5,68434E-14	-6,68155E-13
96	11,75430243	2,84217E-14	3,34077E-13
97	12	16,3656186	196,3874232
98	11,68933957	0	0
99	11,68933957	0	0

Apêndice D - Módulos fotovoltaicos, baterias e controladores escolhidos para 10W.

Nó	Pm (Wp)	Painel (Wp)
1	293,39	345
3	400,39	465
5	419,19	465
7	402,46	465
9	388,18	420
11	288,59	345
13	462,16	550
15	380,60	420
17	356,58	420
19	274,45	345
20	197,87	280
21	351,50	420
23	391,24	420
25	583,76	595
28	391,12	420
30	391,12	420
32	583,93	595
35	391,58	420
37	391,58	420
39	294,72	345
40	293,32	345
42	377,04	420
43	294,78	345
45	391,69	420

47	434,51	465
50	282,87	345
51	282,87	345
52	371,28	420
54	294,78	345
55	294,78	345
57	367,83	420
59	258,75	280
60	258,75	280
62	392,71	420
63	294,78	345
65	391,69	420
67	434,51	465
70	282,87	345
71	282,87	345
72	371,28	420
74	391,69	420
76	391,69	420
78	294,78	345
79	197,87	280
80	197,87	280
82	410,24	465
84	391,69	420
86	391,69	420
88	363,27	420
90	264,46	345
91	257,80	280

92	294,78	345
94	391,69	420
96	370,45	420
98	257,39	280
99	257,39	280

Nó	Isc (A)	Ic (A)	Controlador (A)	CB (Ah)	CBbat (Ah)	Qtde baterias
1	9,28	11,60	20	1149,4	220	6
3	11,78	14,73	20	1568,6	220	8
5	11,78	14,73	20	1642,3	220	8
7	11,78	14,73	20	1576,7	220	8
9	11,21	14,01	20	1520,8	220	7
11	9,28	11,60	20	1130,6	220	6
13	14,01	17,51	20	1810,6	220	9
15	11,21	14,01	20	1491,1	220	7
17	11,21	14,01	20	1397,0	220	7
19	9,28	11,60	20	1075,2	220	5
20	9,41	11,76	20	775,2	220	4
21	11,21	14,01	20	1377,1	220	7
23	11,21	14,01	20	1532,7	220	7
25	14,63	18,29	20	2287,0	220	11
28	11,21	14,01	20	1532,3	220	7
30	11,21	14,01	20	1532,3	220	7
32	14,63	18,29	20	2287,7	220	11
35	11,21	14,01	20	1534,1	220	7
37	11,21	14,01	20	1534,1	220	7

39	9,28	11,60	20	1154,6	220	6
40	9,28	11,60	20	1149,2	220	6
42	11,21	14,01	20	1477,1	220	7
43	9,28	11,60	20	1154,9	220	6
45	11,21	14,01	20	1534,5	220	7
47	11,78	14,73	20	1702,3	220	8
50	9,28	11,60	20	1108,2	220	6
51	9,28	11,60	20	1108,2	220	6
52	11,21	14,01	20	1454,6	220	7
54	9,28	11,60	20	1154,9	220	6
55	9,28	11,60	20	1154,9	220	6
57	11,21	14,01	20	1441,1	220	7
59	9,41	11,76	20	1013,7	220	5
60	9,41	11,76	20	1013,7	220	5
62	11,21	14,01	20	1538,5	220	7
63	9,28	11,60	20	1154,9	220	6
65	11,21	14,01	20	1534,5	220	7
67	11,78	14,73	20	1702,3	220	8
70	9,28	11,60	20	1108,2	220	6
71	9,28	11,60	20	1108,2	220	6
72	11,21	14,01	20	1454,6	220	7
74	11,21	14,01	20	1534,5	220	7
76	11,21	14,01	20	1534,5	220	7
78	9,28	11,60	20	1154,9	220	6
79	9,41	11,76	20	775,2	220	4
80	9,41	11,76	20	775,2	220	4
82	11,78	14,73	20	1607,2	220	8

84	11,21	14,01	20	1534,5	220	7
86	11,21	14,01	20	1534,5	220	7
88	11,21	14,01	20	1423,2	220	7
90	9,28	11,60	20	1036,1	220	5
91	9,41	11,76	20	1010,0	220	5
92	9,28	11,60	20	1154,9	220	6
94	11,21	14,01	20	1534,5	220	7
96	11,21	14,01	20	1451,3	220	7
98	9,41	11,76	20	1008,4	220	5
99	9,41	11,76	20	1008,4	220	5

Apêndice E - Resultados parâmetros elétricos sistema 100 W

Nó	Tensão (V)	Corrente injeta (A)	Potência (W)
1	12	12,35604441	148,2725329
2	11,75091373	1,20391E-14	1,4147E-13
3	12	16,86234955	202,3481946
4	11,73563949	-3,17251E-14	-3,72314E-13
5	12	17,65433516	211,8520219
6	11,73718274	-2,79126E-14	-3,27615E-13
7	12	16,94968636	203,3962363
8	11,71447255	5,68434E-14	6,65891E-13
9	12	16,34833816	196,1800579
10	11,78970657	3,87803E-14	4,57209E-13
11	12	12,15407157	145,8488589
12	11,65079253	4,75259E-14	5,53714E-13
13	12	19,46404776	233,5685731
14	11,79511813	-1,42109E-14	-1,67619E-13
15	12	16,02908621	192,3490345
16	11,76807094	-4,26326E-14	-5,01703E-13
17	12	15,01758195	180,2109834
18	11,83912485	-8,52651E-14	-1,00946E-12
19	12	11,5585769	138,7029228
20	12	8,333333333	100
21	12	14,8034184	177,6410208
22	11,72686184	3,88108E-15	4,55129E-14
23	12	16,47698739	197,7238487
24	11,72686184	3,42433E-14	4,01567E-13
25	12	24,58513169	295,0215802

26	11,67914785	-2,22904E-14	-2,60333E-13
27	11,7200217	1,23395E-13	1,44619E-12
28	12	16,47223729	197,6668475
29	11,7200217	-4,45329E-14	-5,21926E-13
30	12	16,47223729	197,6668475
31	11,7200217	-2,13163E-14	-2,49827E-13
32	12	24,59227349	295,1072819
33	11,67914785	-8,76436E-16	-1,0236E-14
34	11,74743025	2,86879E-14	3,37009E-13
35	12	16,49127101	197,8952521
36	11,74743025	7,98672E-16	9,38234E-15
37	12	16,49127101	197,8952521
38	11,74743025	2,66224E-16	3,12745E-15
39	12	12,41230217	148,947626
40	12	12,35341425	148,240971
41	11,8409656	4,31133E-15	5,10503E-14
42	12	15,87914961	190,5497953
43	12	12,41468834	148,9762601
44	11,75430243	1,42109E-14	1,67039E-13
45	12	16,49604335	197,9525202
46	11,75430243	4,26326E-14	5,01116E-13
47	12	18,29947588	219,5937106
48	11,64573579	-2,76215E-14	-3,21673E-13
49	11,77832803	1,1819E-13	1,39208E-12
50	12	11,91330694	142,9596832
51	12	11,91330694	142,9596832
52	12	15,63666459	187,639975

53	11,75430243	7,3226E-14	8,60721E-13
54	12	12,41468834	148,9762601
55	12	12,41468834	148,9762601
56	11,75430243	1,63826E-14	1,92566E-13
57	12	15,49145364	185,8974436
58	11,81477873	-7,10543E-15	-8,39491E-14
59	12	10,89730441	130,7676529
60	12	10,89730441	130,7676529
61	11,81600104	-5,25321E-14	-6,20719E-13
62	12	16,53888961	198,4666753
63	12	12,41468834	148,9762601
64	11,75430243	1,52967E-14	1,79802E-13
65	12	16,49604335	197,9525202
66	11,75430243	4,37184E-14	5,1388E-13
67	12	18,29947588	219,5937106
68	11,64573579	2,81361E-14	3,27665E-13
69	11,77832803	7,10543E-15	8,36901E-14
70	12	11,91330694	142,9596832
71	12	11,91330694	142,9596832
72	12	15,63666459	187,639975
73	11,75430243	1,52967E-14	1,79802E-13
74	12	16,49604335	197,9525202
75	11,75430243	-1,52967E-14	-1,79802E-13
76	12	16,49604335	197,9525202
77	11,75430243	1,3125E-14	1,54275E-13
78	12	12,41468834	148,9762601
79	12	8,333333333	100

80	12	8,333333333	100
81	11,81600104	1,42109E-14	1,67915E-13
82	12	17,27724021	207,3268825
83	11,75430243	-1,42109E-14	-1,67039E-13
84	12	16,49604335	197,9525202
85	11,75430243	1,52967E-14	1,79802E-13
86	12	16,49604335	197,9525202
87	11,75430243	7,10543E-14	8,35193E-13
88	12	15,29916505	183,5899806
89	11,8263545	9,23706E-14	1,09241E-12
90	12	11,13768569	133,6522283
91	12	10,85725045	130,2870054
92	12	12,41468834	148,9762601
93	11,75430243	1,52967E-14	1,79802E-13
94	12	16,49604335	197,9525202
95	11,75430243	-1,3125E-14	-1,54275E-13
96	12	15,60162738	187,2195286
97	11,80814627	-3,36352E-14	-3,97169E-13
98	12	10,8399146	130,0789752
99	12	10,8399146	130,0789752

Anexo A - Dados de linha para o sistema de iluminação pública utilizado

Linha	De	Para	Comprimento (m)
1	1	2	36
2	2	3	35
3	3	4	35
4	4	5	29
5	5	6	38
6	6	7	37
7	7	8	37
8	8	9	45,5
9	9	10	28
10	10	11	32
11	4	12	32
12	12	13	31
13	13	14	26
14	14	15	33
15	15	16	33
16	16	17	33
17	17	18	36
18	18	19	29
19	19	20	40
20	18	21	39
21	21	22	39
22	22	23	39
23	23	24	39
24	24	25	39

25	25	26	23
26	25	27	40
27	27	28	40
28	28	29	40
29	29	30	40
30	30	31	40
31	31	32	40
32	32	33	23
33	32	34	36
34	34	35	36
35	35	36	36
36	36	37	36
37	37	38	36
38	38	39	36
39	39	40	36
40	40	41	23
41	41	42	22
42	42	43	42
43	43	44	35
44	44	45	35
45	45	46	35
46	46	47	35
47	47	48	35
48	48	49	35
49	49	50	36
50	49	51	36
51	49	52	40

52	52	53	35
53	53	54	35
54	54	55	35
55	55	56	35
56	56	57	35
57	57	58	35
58	58	59	42
59	58	60	42
60	42	61	32
61	61	62	22
62	62	63	42
63	63	64	35
64	64	65	35
65	65	66	35
66	66	67	35
67	67	68	35
68	68	69	35
69	69	70	36
70	69	71	36
71	69	72	40
72	72	73	35
73	73	74	35
74	74	75	35
75	75	76	35
76	76	77	35
77	77	78	35
78	78	79	42

79	78	80	42
80	62	81	32
81	81	82	22
82	82	83	35
83	83	84	35
84	84	85	35
85	85	86	35
86	86	87	35
87	87	88	35
88	88	89	35
89	89	90	36
90	89	91	40
91	91	92	35
92	92	93	35
93	93	94	35
94	94	95	35
95	95	96	35
96	96	97	35
97	97	98	44,5
98	97	99	44,5

Fonte: (FAGUNDES, 2014) .

Anexo B - Dados técnicos dos painéis fotovoltaicos escolhidos nas simulações

Painel Solar Fotovoltaico 100W - Resun RSM-100P - Resun RS7E-210M

Potência do Painel:	100 Wp
Tolerância:	± 5 W
Tensão de Máxima Potência (V_{mp}):	17,4 V
Corrente de Máxima Potência (I_{mp}):	5,75 A
Tensão em Aberto (V_{oc}):	21,58 V
Corrente de Curto Circuito (I_{sc}):	6,04 A
Tensão Máxima do Sistema:	1000 V
Eficiência:	15,44 %

Painel Solar Fotovoltaico 155W - Resun RS6E-155M

Potência do Painel:	155 Wp
Tolerância:	± 5 W
Tensão de Máxima Potência (V_{mp}):	20,64 V
Corrente de Máxima Potência (I_{mp}):	7,51 A
Tensão em Aberto (V_{oc}):	24,46 V
Corrente de Curto Circuito (I_{sc}):	8,31 A
Tensão Máxima do Sistema:	1000 V
Eficiência:	18,05 %

Painel Solar Fotovoltaico 210W - Resun RS7E-210M

Potência do Painel:	210 Wp
Tolerância:	± 5 W
Tensão de Máxima Potência (V_{mp}):	20,05 V
Corrente de Máxima Potência (I_{mp}):	10,47 A
Tensão em Aberto (V_{oc}):	23,95 V
Corrente de Curto Circuito (I_{sc}):	11,07 A
Tensão Máxima do Sistema:	1000 V
Eficiência:	19,23 %

Painel Solar Fotovoltaico 280W - OSDA - ODA280-30-P

Potência do Pannel:	280 Wp
Tolerância:	± 3 W
Tensão de Máxima Potência (V_{mp}):	31,94 V
Corrente de Máxima Potência (I_{mp}):	8,77 A
Tensão em Aberto (V_{oc}):	38,33 V
Corrente de Curto Circuito (I_{sc})	9,41 A
Tensão Máxima do Sistema:	1000 V
Eficiência:	17,21 %

Placa Solar Fotovoltaica 345W Half-Cell - ZnShine Solar Series ZXP6-H144

Potência do Pannel:	345 Wp
Tolerância:	± 3 W
Tensão de Máxima Potência (V_{mp}):	38,30 V
Corrente de Máxima Potência (I_{mp}):	9,01 A
Tensão em Aberto (V_{oc}):	47,00 V
Corrente de Curto Circuito (I_{sc})	9,28 A
Tensão Máxima do Sistema:	1500 V
Eficiência:	17,39 %

Painel Solar Fotovoltaico 420W - OSDA ODA420-36V-PH

Potência do Pannel:	420 Wp
Tolerância:	± 3 W
Tensão de Máxima Potência (V_{mp}):	39,54 V
Corrente de Máxima Potência (I_{mp}):	10,63 A
Tensão em Aberto (V_{oc}):	47,94 V
Corrente de Curto Circuito (I_{sc})	11,21 A
Tensão Máxima do Sistema:	1500 V
Eficiência Módulo:	19,32 %

Painel Solar Fotovoltaico 465W - OSDA ODA465-36V-MH

Potência do Pannel:	465 Wp
Tolerância:	± 3 W
Tensão de Máxima Potência (V_{mp}):	42,10 V
Corrente de Máxima Potência (I_{mp}):	11,06 A
Tensão em Aberto (V_{oc}):	49,90 V
Corrente de Curto Circuito (I_{sc})	11,78 A
Tensão Máxima do Sistema:	1500 V
Eficiência Módulo:	21,30 %

Painel Solar Fotovoltaico 550W - OSDA ODA550-36V-MH

Potência do Pannel:	550 Wp
Tolerância:	± 3 W
Tensão de Máxima Potência (V_{mp}):	42,10 V
Corrente de Máxima Potência (I_{mp}):	13,06 A
Tensão em Aberto (V_{oc}):	50,10 V
Corrente de Curto Circuito (I_{sc})	14,01 A
Tensão Máxima do Sistema:	1500 V
Eficiência Módulo:	21,30 %

Placa Solar Fotovoltaica 595W Monocristalina - Luxen Solar Series 5

Potência do Pannel:	595 Wp
Tolerância:	± 5 W
Tensão de Máxima Potência (V_{mp}):	43,62 V
Corrente de Máxima Potência (I_{mp}):	13,64 A
Tensão em Aberto (V_{oc}):	51,21 V
Corrente de Curto Circuito (I_{sc})	14,63 A
Tensão Máxima do Sistema:	1500 V
Eficiência do Módulo:	21,29 %