



**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA
AFRO-BRASILEIRA
INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL - IEDS**

**RECONFIGURAÇÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DA
ENERGIA ELÉTRICA COM A GERAÇÃO FOTOVOLTAICA
DO CAMPUS DAS AURORAS**

ESMIRALDO GOMES CÁ

**Redenção - CE,
2024**

ESMIRALDO GOMES CÁ

**RECONFIGURAÇÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DA ENERGIA
ELÉTRICA COM A GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DO CAMPUS DAS
AURORAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao **Curso de Graduação em Engenharia de Energias do Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável - IEDS** da **Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira** como requisito parcial à obtenção do título de **Bacharel em Engenharia de Energias**.

Orientador:

Prof. Dr. Sabi Yari Moïse Bandiri.

Coorientador:

Mestre Yanick Rodolfo Gomes.

Redenção - CE, outubro de 2024

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

cá, Esmiraldo Gomes.

C111r

Reconfiguração da rede de distribuição da energia elétrica com a geração fotovoltaica do Campus das Auroras / Esmiraldo Gomes cá. - Redenção, 2024.

73f: il.

Monografia - Curso de Engenharia De Energias, Instituto De Engenharias E Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Sabi Yari Moïse Bandir.

Coorientador: Mestre Yanick Rodolfo Gomes.

1. Energia elétrica fotovoltaica - Distribuição. 2. Energia elétrica fotovoltaica - Rede de distribuição. 3. Geração de energia Fotovoltaica. I. Título

CE/UF/BSCA

CDD 621.317

ESMIRALDO GOMES CÁ

RECONFIGURAÇÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA COM A GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DO CAMPUS DAS AURORAS

Monografia apresentada ao programa de **Curso de Graduação em Engenharia de Energias** do **Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira**, como requisito à obtenção do título de **Bacharel em Engenharia de Energias**.

Data de aprovação:

10/10/2024

Banca Examinador:

Documento assinado digitalmente
 **SABI YARI MOÏSE BANDIRI**
Data: 04/11/2024 22:02:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Sabi Yari Moïse Bandiri.

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira

Documento assinado digitalmente
 **VITOR ALENCAR DE MESQUITA**
Data: 05/11/2024 22:17:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Vitor Alencar De Mesquita

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira

Documento assinado digitalmente
 **REGINALDO MARCIANO SA**
Data: 04/11/2024 18:30:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me. Reginaldo Marciano Sá

Universidade Federal do ABC

Dedico este trabalho à minha mãe, Segunda Índi, e ao meu pai, Noé Openhy Gomes Cá, que sempre estiveram ao meu lado me incentivando e apoiando. Agradeço também às minhas irmãs e irmãos pela compreensão e suporte nos momentos em que precisei me dedicar aos estudos. Sou grato por ter vocês como parte da minha família.

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de expressar minha profunda gratidão a Deus por todo o apoio e orientação que recebi ao longo da minha jornada de conclusão de curso. Sem Sua graça e misericórdia, eu não teria sido capaz de superar os desafios e alcançar essa conquista.

Agradeço também a minha mãe, segunda indí, pela amorosa dedicação e incentivo incansável ao longo dessa jornada. Seu apoio incondicional e palavras de encorajamento foram fundamentais para o meu sucesso.

Ao meu pai, Noé Openhy Gomes Cá, sou muito grato pelo exemplo de trabalho duro e perseverança que me transmitiram ao longo da vida. Você sempre acredita em mim e me motiva a perseguir meus sonhos.

Não posso deixar de mencionar minhas irmãs, Ivanisa Noé Gomes Cá, Noémia Noé Gomes Cá e Ivanumila Noé Gomes Cá, e meu irmão Laurentino Noé Gomes cá, pela compreensão e apoio constante. Vocês sempre estiveram ao meu lado, fortalecendo minha determinação e me lembrando do valor da família.

Agradeço mas não menos importante, meu profundo agradecimento ao meu Tio Rui Indí, por toda a ajuda e apoio técnico durante a execução do trabalho de conclusão de curso. Suas habilidades e conhecimentos foram fundamentais para o sucesso deste projeto.

Também sou grato pelo meu orientador, Prof.Dr. Sabi Yari Moise Bandiri, sua dedicação e conhecimento foram fundamentais para o desenvolvimento do meu trabalho. Suas sugestões foram essenciais para a construção de um trabalho de qualidade. Agradeço sinceramente por compartilhar seu tempo e expertise comigo.

Por último, gratidão pelo meu coorientador, Mestre e Doutorando Yanick Rodolfo Gomes, pela cooperação e disponibilidade inestimáveis durante todo o processo. Sua paciência e disposição em me ajudar em cada etapa foram fundamentais para o sucesso desse projeto. Sou imensamente grato por sua contribuição e apoio.

Que Deus abençoe a todos vocês e continue a nos guiar em todas as nossas futuras realizações.

O engenheiro, por sua vez, fala pouco porque tem receio de emitir uma afirmação que não possa provar, enquanto os opositores criam factoides e parecem saber mais, ainda que estejam mentindo. O engenheiro não mente.

(Francisco Luiz Sibut Gomide)

RESUMO

A modernização e digitalização dos sistemas elétricos, impulsionadas pela crescente penetração de fontes de energia renovável, como a Geração Fotovoltaica (GF) e a Geração Eólica (GE), têm gerado desafios para as empresas concessionárias. A intermitência dessas fontes na rede representa um desafio para garantir a estabilidade e a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica na Rede de Distribuição de Energia Elétrica (RDEE). Este trabalho utiliza a Reconfiguração da Rede de Distribuição (RRD) para otimizar a RDEE com GF do campus de Auroras, Estado do Ceará, da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), empregando uma meta-heurística baseada no algoritmo de Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization*, PSO). Para comprovar a eficácia da metodologia proposta, um sistema de 33 barras e 37 linhas foi utilizado, considerando diferentes cenários e curvas de GF para análise de 24 horas. Os resultados obtidos comprovam a eficácia da metodologia proposta, em uma redução significativa das perdas de energia de 4859,648 kWh para 3347.599 kWh durante um ano.

Palavras-chave: Reconfiguração de Rede de Distribuição de Energia Elétrica; Geração Fotovoltaica; PSO; Curvas de GF e Perdas de Energia.

ABSTRACT

The modernization and digitalization of electrical systems, driven by the increasing penetration of renewable energy sources such as Photovoltaic Generation (PVG) and Wind Generation (WG), have posed challenges for utility companies. The intermittency of these sources in the grid presents a challenge in ensuring the stability and reliability of power supply in the Electrical Distribution Network (EDN). This work employs Distribution Network Reconfiguration (DNR) to optimize the EDN with PV generation at the Auroras campus, in Ceará, of the Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), using a *Particle Swarm Optimization* (PSO)-based metaheuristic. To verify the effectiveness of the proposed methodology, a 33-bus, 37-line system was used, considering different scenarios and PVG curves for 24-hour analysis. The results demonstrate the effectiveness of the proposed methodology, achieving a significant reduction in energy losses from 4859.648 kWh to 3347.599 kWh over a year,

Keywords: Electrical Distribution Network Reconfiguration; Photovoltaic Generation; PSO; PVG Curves and Energy Losses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Base da Transição Energética.	16
Figura 2.1 – Unidade Acadêmica do Campus das Auroras da UNILAB-CE	24
Figura 2.2 – Energia Solar Fotovoltaica Conectado à Rede Elétrica	25
Figura 2.3 – Diagrama Unifilar do Sistema Fotovoltaico conectado à Rede	25
Figura 2.4 – Módulos solares fotovoltaicos instalados no Campus das Auroras	27
Figura 2.5 – Inversores ABB do Sistema Fotovoltaico do Campus das Auroras UNILAB-CE	27
Figura 2.6 – Localização dos Módulos na Central de Microgeração Solar do Campus das Auroras.	28
Figura 2.7 – Árvore Solar do Campus das Auroras – UNILAB/CE	29
Figura 2.8 – As Perdas no setor elétrico	32
Figura 2.9 – Fontes renováveis de energia	33
Figura 2.10 – Fluxograma de PSO Modificado	38
Figura 3.1 – Curva de Geração Fotovoltaica de 24h	42
Figura 3.2 – Curva de Geração Fotovoltaica Semanal	43
Figura 3.3 – Curva média de GF semanal	44
Figura 3.4 – Curva média de GF mensal	46
Figura 3.5 – Curva de GF anual	47
Figura 3.6 – Curva média de GF anual	48
Figura 4.1 – Sistema unifilar de distribuição de 33 barras	49
Figura 4.2 – Perfil de tensão sem GF	50
Figura 4.3 – Geração total de sistema de 33 barras para Caso A e Caso B de 24h	53
Figura 4.4 – Curva de tensão para sistema de 33 barras para Caso A e Caso B de 24h	55
Figura 4.5 – Geração total de sistema de 33 barras para Caso A e Caso B semanal	57
Figura 4.6 – Geração total de sistema de 33 barras para Caso A e Caso B mensal	59
Figura 4.7 – Geração total de sistema de 33 barras para Caso A e Caso B anual	61
Figura 4.8 – Curva de tensão para sistema de 33 barras para Caso A e Caso B de anual	63
Figura B.1 – Artigo aprovado no xivcbpe	72
Figura B.2 – Artigo aprovado no LASCAS 2025	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resumo de Levantamento Bibliográfico para o Problema de RRD . . .	22
Tabela 2.2 – Configuração do Arranjo Fotovoltaico com o Inversor	28
Tabela 3.1 – Potência diária de geração fotovoltaica em janeiro	45
Tabela 4.1 – Restuado final e incial de sistema de 33 barras	49
Tabela 4.2 – Resultado encontrados para o sistema de 33 barras	50
Tabela 4.3 – Análise 24h para sistemas de 33 barras de dois casos	52
Tabela 4.4 – Perfil de tensão para curva de 24h	54
Tabela 4.5 – Análise semanal para sistemas de 33 barras de dois casos	56
Tabela 4.6 – Análise Mensal para sistemas de 33 barras de dois casos	58
Tabela 4.7 – Análise anual para sistemas de 33 barras de dois casos	60
Tabela 4.8 – Perfil de tensão para curva Anual	62
Tabela A.1 – Médias de Geração FV	68
Tabela A.2 – Geração FV semanal em Janeiro	69
Tabela A.4 – Geração FV mensal de janeiro	70
Tabela A.5 – Geração FV Anual	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UNILAB	Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
GD	Geração Distribuída
GF	Geração Fotovoltaica
GFVD	Geração Fotovoltaica Distribuída
RD	Rede de Distribuição
GE	Geração de Energia
GDs	Geração Distribuídas
PNE	Plano Nacional de Energia
FV	Fotovoltaica
RDs	Rede Distribuídas
Wp	Watts-pico
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PNE	Plano Nacional de Energia
PGDS	Planta de Geração Distribuída Solar
RRDEE	Reconfiguração de Rede de Distribuição de Energia Elétrica
RDEE	Rede de Distribuição de Energia Elétrica
PNLIM	Programação Não Linear Inteiro Misto
PSO	Particle Swarm Optimization
PGDS	Planta de Geração Distribuída Solar

LISTA DE SÍMBOLOS

θ_{km}	Diferença angular entre as barras
Σ	Somatória
pu	por unidade
kWh	quilowatt-hora
kWp	quilowatt-pico
I	corrente
Ri	Resistência no ramo i
A	matriz de incidência nodal
w	fator de inércia, que controla a influência da velocidade anterior
PG_k, QG_k	Potência ativa e reativa das cargas na barra
V_k, V_m	Magnitudes de tensão nodal nas barras
$v_i^{(t)}$	velocidade da partícula i na iteração t
$x_i^{(t)}$	posição da partícula i na iteração t
$p_i^{(t)}$	melhor posição encontrada pela partícula i até a iteração t
$p_g^{(t)}$	melhor posição encontrada por qualquer partícula no enxame até a iteração t
c_1 e c_2	coeficientes de aceleração que controlam a influência das melhores posições locais e globais.
r_1 e r_2	números aleatórios uniformemente distribuídos no intervalo $[0, 1]$

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa	18
1.2	OBJETIVOS	19
1.2.1	Objetivo Geral	19
1.2.2	Objetivos Específicos	19
1.3	Organização do Trabalho	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	LEVANTAMENTO DE RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	22
2.2	Sistema Fotovoltaico instalado no Campus das Auroras - UNI-LAB/CE	22
2.2.1	Usina Fotovoltaica Instalado no Campus das Auroras	23
2.3	Impactos sócio-econômicos e ambientais de GF na Rede de Distribuição de Energia	31
2.3.1	Redução das perdas de transmissão e distribuição	31
2.3.2	Alívio da demanda na rede elétrica	32
2.3.3	Maior segurança energética	33
2.3.4	Integração de fontes renováveis	33
2.3.5	Desafios de gerenciamento do sistema	34
2.4	<i>PARTICLE SWARM OPTIMIZATION (PSO)</i>	35
2.4.1	Velocidade e Posição das Partículas	35
3	METODOLOGIA PROPOSTA	40
3.0.1	Restrição de fluxo de potência	40
3.0.2	Restrições de magnitude de tensão	40
3.0.3	Radialidade da Rede	41
3.0.4	Curva de Geração Solar	41

3.0.5	Curva de 24h	41
3.0.6	Curva semanal	42
3.0.7	Curva mensal	44
3.0.8	Curva anual	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.0.1	Análise de 24h	50
4.0.2	Análise semanal	55
4.0.3	Análise Mensal	57
4.0.4	Análise anual	59
4.0.5	Custo e benefício	63
5	CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS	65
	APÊNDICE A –	68
	APÊNDICE B –	72

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a energia elétrica desempenha um papel fundamental em nossa sociedade moderna, impulsionando quase todas as esferas da vida. No entanto, à medida que aumenta a conscientização sobre os impactos ambientais das fontes convencionais de energia, como os combustíveis fósseis torna-se mais importante encontrar soluções que garantam um abastecimento com o bom resultado e sustentável da energia elétrica. Nesse contexto, a integração de Geração Distribuída (GD), como a Geração Fotovoltaica (GF), surge como uma das soluções para os desafios do cenário atual de transição energética. Conforme ilustra a Figura 1.1.

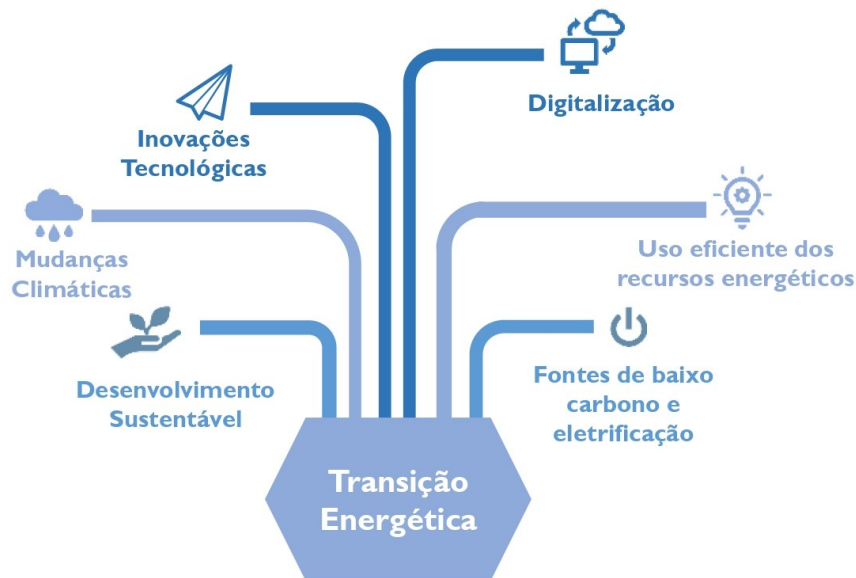


Figura 1.1 – Base da Transição Energética.

Fonte: (ENERGÉTICA, 2020) Acesso em: 07 Jan. (2024)

A transição energética da matriz elétrica brasileira descrita pelo Plano Nacional de Energia (PNE) 2050 é um processo de troca das fontes de energia não renováveis para fontes renováveis, reduzindo transmissões de gases de estufa a um nível próximo de 0

O PNE 2050 destaca que, no momento, não existe uma política governamental específica para a transição energética no Brasil. No entanto, o plano menciona uma série de políticas que impactam e contribuem para essa transição. Em especial, os programas e diretrizes que influenciam o crescimento do setor energético.

A GD surge como uma alternativa para aumentar a eficiência, a confiabilidade e a sustentabilidade do sistema elétrico. A GD consiste na instalação de pequenos geradores próximos aos centros de carga, utilizando fontes renováveis ou convencionais de energia. A GD pode reduzir as perdas nas redes, aliviar os congestionamentos, melhorar a tensão e a frequência, diversificar a matriz energética, diminuir a dependência de grandes usinas e incentivar a participação dos consumidores na geração de energia (MACHADO, 2017).

A Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNI-LAB) é uma instituição que entende a importância da mudança na matriz energética para fontes renováveis. A GD, como a GF, que usa a energia solar para produzir eletricidade, é uma alternativa promissora e ambientalmente amigável. Ela não emite poluentes atmosféricos nem contribui para o aquecimento global (GUIMARÃES, 2017).

No entanto, apenas a instalação de sistemas fotovoltaicos nas redes elétricas não é suficiente para aproveitar todos os benefícios dessa tecnologia, como a redução da dependência de combustíveis fósseis, a diminuição das emissões de gases de efeito estufa e a redução dos custos de energia. Para maximizar esses benefícios, é necessário realizar um estudo detalhado da capacidade da rede, além de um projeto adequado e dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos, bem como uma operação e controle eficientes desses sistemas. De acordo com Mariano et al. (2017), a integração dos sistemas fotovoltaicos nas redes elétricas requer essa análise da capacidade da rede. Portanto, em determinados casos, a geração de energia elétrica por meio de placas fotovoltaicas torna-se uma alternativa viável, especialmente em comunidades distantes e de difícil acesso às linhas de distribuição de energia elétrica.

Com tudo, o aumento da penetração da geração distribuída fotovoltaica, em especial, traz consigo impactos significativos nos parâmetros das redes elétricas, como fluxo de Potência, Perdas técnicas, Fator de Potência e níveis de tensão Kazmi et al. (2017). A geração fotovoltaica distribuída (GFVD) pode causar um descompasso temporal entre a energia ofertada e a necessária, principalmente no horário de pico. Isso pode levar a uma variação muito grande entre as demandas máximas e mínimas do sistema elétrico, impactando na configuração e na operação dos seus componentes. Por conta disso, os programas de conservação de energia elétrica vigentes no Brasil que nos permitem a redução da demanda de potência ativa e do consumo de energia elétrica, Esses investimentos na geração de energia elétrica vêm sendo produzidos e pronunciados para suportar e tornar seguro a expansão econômica no relativo ao consumo de energia elétrica (HASSANZADEHFARD; JALILIAN, 2018).

Dentre as fontes de GD, a energia solar fotovoltaica (FV) se destaca pelo seu potencial, disponibilidade e viabilidade técnica e econômica. A energia solar FV utiliza a

radiação solar para produzir eletricidade por meio de células semicondutoras que convertem a luz em corrente elétrica. A energia solar FV pode ser aplicada em sistemas isolados ou conectados à rede, sendo esta última modalidade a mais comum no Brasil (ALVES, 2019).

O planejamento da otimização e reconfiguração das redes de distribuição com Geração Distribuída (GD) e Geração Fotovoltaica (GF) é um problema complexo e de grande importância para as concessionárias de energia elétrica, pois envolve múltiplos objetivos e restrições. Entre esses objetivos estão a análise do sistema de distribuição, com e sem geração fotovoltaica, ao longo de 24 horas, e a redução das perdas no sistema fotovoltaico integrado à rede de distribuição de energia elétrica. Além disso, busca-se melhorar a qualidade do serviço e propor uma estratégia de otimização específica para o sistema fotovoltaico na rede de distribuição de energia da UNILAB (ALVES, 2019).

Para resolver esse problema, é necessário utilizar modelos e métodos de otimização que possam representar adequadamente as características técnicas, econômicas e ambientais, bem como as preferências e as necessidades das concessionárias e dos consumidores. Esses métodos capazes de lidar com a não-linearidade fornecendo ótimas soluções ou sub-ótimas que sejam factíveis, robustas e flexíveis.

Portanto, para desenvolver este trabalho utilizou-se um modelo da eficiência energética e a qualidade do perfil de tensão por meio da integração de geração fotovoltaica (GF), visando a minimização de perdas de energia considerando os aspectos técnicos, econômicos e ambientais do problema. Este modelo busca reduzir perdas na rede elétrica considerando os custos de investimento, operação e falhas, aplicando a rede de distribuição da UNILAB.

1.1 JUSTIFICATIVA

A otimização da RD de energia elétrica com GF da UNILAB é uma medida necessária e estratégica para o avanço da sustentabilidade e eficiência energética da universidade. Além disso, a GF permite que a (UNILAB) produza parte da energia elétrica que consome, gerando uma economia significativa em sua conta de energia. Isso é especialmente relevante em um momento em que a tarifa energética está em constante aumento. A otimização da RD com GF pode aumentar ainda mais essa economia, pois permite que a energia produzida pela GF seja distribuída de forma mais eficiente, evitando perdas de energia. A GF é uma fonte de energia renovável e limpa, que não emite gases de efeito estufa. A otimização da RD com GF pode ajudar a reduzir as emissões de gases de efeito estufa da UNILAB, contribuindo para a proteção do meio ambiente. A otimização da RD com GF também traz benefícios em relação à segurança energética. Tendo uma fonte própria de geração elétrica, para garantindo o funcionamento de suas atividades

essenciais, como laboratórios, salas de aula, centros de pesquisa, entre outros. Ao investir em energias renováveis e avançadas tecnologias de geração, a universidade está mostrando seu compromisso com a preservação do meio ambiente e com a formação de profissionais conscientes e engajados com questões ambientais. Para isso, a otimização da RD de energia elétrica com GF da (UNILAB) pode ser uma medida estratégica e de grande importância, que pode trazer benefícios econômicos, ambientais e de segurança energética.

Por fim, a otimização da rede de distribuição de energia elétrica com GF da UNILAB pode ajudar a reduzir as perdas de energia no caso da distribuição da carga entre as linhas de transmissão, evitando perdas de energia, pode evitar o fluxo inverso de potência garantindo que a energia produzida pela GF seja transmitida para outros locais da rede, e melhorar a estabilidade da rede evitando falhas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Minimizar perda de energia e melhorar perfil de tensão na RDEE com inserção de GF.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Propor RRD para otimizar e alocar GF na rede elétrica;
- Propor técnica meta-heurística PSO para problema de RRD;
- Realizar um levantamento dos dados de usinas da GF da UNILAB;
- Analisar sistema com GF sem RRD;
- Analisar sistema com GF e RRD;
- Utilizar curvas de GF, diária, semanal, mensal e anual;
- Analisar o custo benefício da RRD e penetração de GF na RDEE.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho, intitulado "Otimização de Rede de Distribuição de Energia Elétrica com Geração Fotovoltaica da UNILAB no Campus das Auroras", utiliza uma técnica de otimização para a redução das perdas. O conteúdo está estruturado em seis capítulos, descritos da seguinte forma:

Capítulo 1: Apresenta o tema, justificativa e os objetivos do trabalho. Fornece uma visão geral da transição energética, do papel da Geração Distribuída (GD) e da relevância da Geração Fotovoltaica (GF) para a UNILAB.

Capítulo 2: Discorre sobre a literatura existente sobre a reconfiguração da rede de distribuição e sistemas fotovoltaicos, destacando os impactos socioeconômicos, ambientais, os desafios de gerenciamento de sistemas com Geração Distribuída e o uso da técnica PSO.

Capítulo 3: Apresenta o modelo matemático para otimização da rede de distribuição, as restrições de fluxo de potência, magnitude de tensão, radialidade da rede, e as curvas de geração solar (diária, semanal, mensal e anual).

Capítulo 4: Analisa os dados coletados, comparando o desempenho da rede de distribuição com e sem a reconfiguração e geração fotovoltaica, ao longo de diferentes períodos (24 horas, semanal, mensal e anual). Avalia o impacto da reconfiguração na redução de perdas e melhoria do perfil de tensão.

Capítulo 5: Resume as principais descobertas, confirmando as hipóteses iniciais e destacando a aplicabilidade prática das soluções propostas para a rede de distribuição do campus Auroras.

Os resultados deste trabalho foram publicados tanto em um congresso nacional, o Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, ocorrido em Manaus, quanto em um evento internacional, o Simpósio Latino-Americano IEEE CASS sobre Circuitos e Sistemas. Além disso, uma vasta gama de material de pesquisa bibliográfica foi referenciada, iniciou a trajetória do estudo, bem como os temas e autores que sustentaram o raciocínio apresentado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Inicialmente, a discussão sobre os sistemas fotovoltaicos, fundamentada por Alves (2019) e Energia (2019), esclarece a importância crescente da energia solar como uma alternativa sustentável e economicamente viável para geração de energia elétrica, tanto em ambientes residenciais quanto comerciais. Esses estudos são cruciais para entender as motivações técnicas e econômicas por trás da adoção dessa tecnologia, que é o foco central da pesquisa.

Em paralelo, o cenário regulatório e energético no Brasil, abordado por Elétrica (2005), Energética (2015) e Energética (2020), fornece o contexto necessário para discutir a viabilidade e os incentivos para a implantação de sistemas fotovoltaicos. A análise do sistema de net metering por Machado (2017) complementa essa visão, explicando as políticas que facilitam a integração da geração distribuída no sistema elétrico brasileiro.

A reconfiguração de redes de distribuição emerge como um tema central, com estudos como os de Bernardon (2007), (FILHO et al., 2022), Carvalho et al. (2016), Mantovani et al. (2000) e Mello et al. (2014) oferecendo um embasamento robusto sobre o uso de algoritmos de otimização, como a busca tabu e a otimização por enxame de partículas (PSO). Esses métodos são fundamentais para melhorar a eficiência e a confiabilidade das redes elétricas ao integrar fontes de geração distribuída, como a solar.

Além disso, os impactos dessa geração distribuída são detalhadamente discutidos por Castro et al. (2018) e HassanzadehFard e Jalilian (2018), que exploram tanto os desafios quanto os benefícios da geração distribuída em redes de distribuição. A modelagem de sistemas fotovoltaicos por Nascimento Jairo (2021) e a análise de monitoramento por Manito et al. (2010), Mariano et al. (2017) e Guimarães (2017) reforçam a importância de uma abordagem técnica e bem fundamentada para a integração eficiente desses sistemas.

Por fim, a contribuição prática das técnicas discutidas é destacada nos trabalhos de Pegado et al. (2019), Gomes et al. (2023), Oliveira (2011), e Gerez Cassio e Silva (2019), que abordam a implementação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede e a reconfiguração das redes em contextos reais. Esses estudos demonstram a aplicabilidade das teorias e metodologias discutidas ao longo do referencial teórico.

Em síntese, o referencial teórico deste trabalho não apenas estabelece os fundamentos técnicos e regulatórios necessários para a implementação de sistemas fotovoltaicos em redes de distribuição, mas também explora as técnicas de otimização e reconfiguração de redes que permitem maximizar a eficiência e a sustentabilidade dessas soluções. Essa

consolidação teórica é essencial para orientar a pesquisa e oferecer uma base sólida para as análises e propostas que seguem no desenvolvimento do trabalho.

2.1 LEVANTAMENTO DE RECONFIGURAÇÃO DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Autor(es)	Objetivos Principais	Ferramentas Utilizados	Descrição
(PEGADO et al., 2019)	Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma ferramenta computacional capaz de fornecer uma solução factível para o problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia, considerado como função objetivo a redução de perdas técnicas. Além de fazer uso dos recursos do OpenDSS, essa ferramenta utiliza uma nova técnica baseada em otimização por enxame de partículas para a solução do problema.	OPENDSS	O texto apresenta um método de reconfiguração de redes primárias de distribuição baseado no software OpenDSS e na técnica BPSO seletivo aprimorado. O objetivo é reduzir as perdas de potência do sistema respeitando seus limites operacionais. O método foi implementado em C e testado em quatro sistemas, dois deles reais. Os resultados mostraram que o método é eficiente e competitivo com outras técnicas da literatura.
(MELLO et al., 2014)	O objetivo geral desta Dissertação é o desenvolvimento e análise de uma metodologia de reconfiguração de redes de distribuição no estado normal de operação com a inserção de geração distribuída.	THBE e AHP	O texto descreve um método de gerenciamento de redes de distribuição de energia elétrica que leva em conta a geração distribuída. O método consiste em duas etapas: reconfiguração da topologia dos alimentadores e conexão de geradores distribuídos. A primeira etapa usa a técnica <i>Branch Exchange</i> para otimizar vários objetivos, como perdas de energia, níveis de tensão e confiabilidade. A segunda etapa usa o método AHP para avaliar diferentes cenários de conexão. O método foi aplicado em uma rede real e mostrou melhorias nos indicadores de desempenho da rede.
(FILHO et al., 2022)	Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma ferramenta computacional capaz de apresentar soluções factíveis para o problema de reconfiguração de redes de distribuição, minimizando as perdas ativas do sistema.	OPENDSS	O texto propõe um método de reconfiguração de redes de distribuição que usa o algoritmo de Busca Tabu e o conceito de Distância Elétrica junto com o software OpenDSS. O método tem um sistema de geração de solução inicial baseado em Distância Elétrica que usa apenas a configuração da rede. O método tem também um método de geração de vizinhança para o algoritmo de Busca Tabu que reduz as perdas do sistema de distribuição. O método visa minimizar as perdas na rede de distribuição respeitando as restrições operacionais. O método foi implementado em <i>Python</i> e testado em quatro sistemas, dois deles reais.
(ZANCHETTA, 2016)	O objetivo desta seção é apresentar uma síntese da revisão bibliográfica e do estado da arte da reconfiguração de sistemas de distribuição considerando a geração distribuída.	AHP	Este trabalho apresenta uma metodologia de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica considerando a inserção de fontes de geração distribuída, visando melhorar os indicadores de serviço da rede. Além disso, é empregado um método de análise multicritério denominado <i>Analytic Hierarchy Process</i> (AHP) para avaliar o grau de importância de cada indicador e para identificar as manobras de maior impacto na reconfiguração.

Tabela 2.1 – Resumo de Levantamento Bibliográfico para o Problema de RRD

Fonte: Autoria Própria, (2024)

2.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO INSTALADO NO CAMPUS DAS AUORAS - UNILAB/CE

Um sistema fotovoltaico é um sistema que gera energia de forma renovável e limpa a partir da luz solar. Os módulos solares são responsáveis por captar a luz do sol e gerar a energia elétrica DC, que é convertido em energia elétrica CA por meio de um inversor solar. A energia produzida pode ser entregue para o consumo ou armazenada em baterias solares. O Brasil tem um grande potencial para a geração de energia solar, já que, em boa

parte do ano, o sol brilha consideravelmente forte. De acordo com os dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), até 2030 cerca de 10% da produção nacional de energia virá da energia solar Energética (2015). Isso é uma grande vantagem tanto para o governo quanto para os consumidores, já que essa energia é renovável e traria descontos na conta de luz, de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (ELÉTRICA, 2005).

Os sistemas fotovoltaicos funcionam a partir de dois principais equipamentos: o módulo solar, que transforma a luz em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico; e o inversor solar, que adapta a corrente elétrica de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA) da eletricidade gerada pelo módulo para que ela possa ser distribuída, utilizada ou armazenada. A energia produzida abastece a rede elétrica em larga escala, como acontece em algumas usinas solares. No entanto, ela também pode ser gerada para abastecer residências, caracterizando o uso doméstico da energia solar (PORTAL, 2020).

Segundo Portal (2020), os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em três tipos: conectados à rede (*On-Grid*), isolados (*Off-Grid*) ou híbridos.

- **Sistemas *On-Grid*** - são conectados à rede elétrica da distribuidora da região. A energia gerada que não é consumida é injetada na rede de distribuição e convertida em créditos de energia, que podem ser utilizados para abater esse uso noturno.
- **Sistemas *Off-Grid*** - não são conectados à rede elétrica e fazem uso de baterias para acumular a energia excedente e usá-la quando não a sol.
- **sistemas Híbridos** - são uma união dos dois: um sistema conectado à rede que possui baterias. Cada um deles possui vantagens e desvantagens, o que varia é a necessidade de cada um. Em centros urbanos, o sistema *on-grid* costuma ser mais vantajoso e econômico, mas em lugares afastados da cidade, onde a rede elétrica não chega, sistemas *off-grid* são mais adequados.

A energia solar é uma fonte de energia renovável e limpa, que traz benefícios tanto para o meio ambiente quanto para o bolso do consumidor. Além disso, o Brasil tem um grande potencial para a geração de energia solar, o que pode trazer vantagens para o país como um todo (PORTAL, 2020).

2.2.1 Usina Fotovoltaica Instalado no Campus das Auroras

O Campus das Auroras, localizado entre Redenção e Acarape, possui uma área de 132 hectares e está se preparando para ser o lar definitivo de vários cursos da Universidade.

A primeira etapa das obras já foi concluída, com a imponente Unidade Acadêmica dominando a paisagem como ilustrado na Figura B.2. O prédio de 16.000 m² abriga 40 salas de aula, divididas entre 32 para 42 alunos e 8 para 80 alunos, garantindo flexibilidade para diferentes turmas e estilos de ensino. Além disso, o campus oferece 33 laboratórios que proporcionam um ambiente propício para a experimentação e o aprendizado prático. Há também 120 gabinetes de professores que garantem um espaço individualizado para o preparo das aulas e a pesquisa. As 10 salas de coordenação de cursos facilitam a organização e o acompanhamento das atividades acadêmicas, e 2 secretarias oferecem suporte administrativo para toda a comunidade do campus das Auroras (UNILAB.EDU.BR/CAMPI, 2018).



Figura 2.1 – Unidade Acadêmica do Campus das Auroras da UNILAB-CE

Fonte: unilab.edu.br/Campi (2018). Acesso em: 05 Fev. (2024)

A usina fotovoltaica do Campus das Auroras - UNILAB, está conectada na rede elétrica distribuidora (Alimentador ACP01C3) da subestação do Acarape, para fornecer energia elétrica às suas instalações. Esse tipo de sistema é composto por módulos solares, inversor e medidor bidirecional, e é capaz de gerar energia elétrica através da conversão da luz solar em eletricidade. A energia gerada pelos módulos solares é entregue à rede elétrica instantaneamente, e quando a geração solar fotovoltaica é superior à demanda, o sistema devolve a energia para rede, no sentido contrário, para ser utilizada por outros consumidores, automaticamente sem intervenção e seguindo normas de segurança.

Quando a geração solar fotovoltaica é inferior à demanda, ou no período noturno, a diferença de energia é suprida automaticamente pela energia elétrica da distribuidora. O sistema fotovoltaico conectado à rede é sincronizado com a energia elétrica da distribuidora, assim, quando falta energia da distribuidora, por questões de segurança, o sistema fotovoltaico se desliga automaticamente. Então, o objetivo desse tipo de sistema é reduzir

a dependência e consumo da energia elétrica da distribuidora, substituindo-a por uma fonte de energia limpa, gratuita e inesgotável. Como mostra nas Figuras 2.2 e 2.3 .

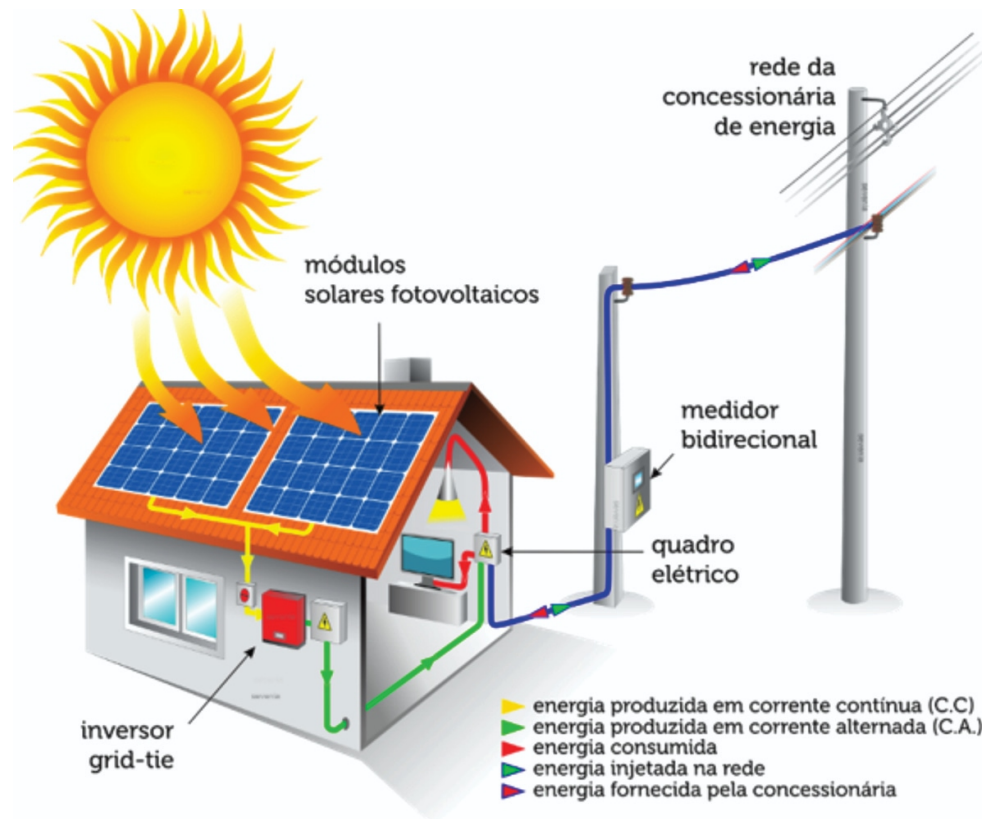


Figura 2.2 – Energia Solar Fotovoltaica Conectado à Rede Elétrica

Fonte: (SÍNDICO, 2021) . Acesso em: 11 Jan. (2024)

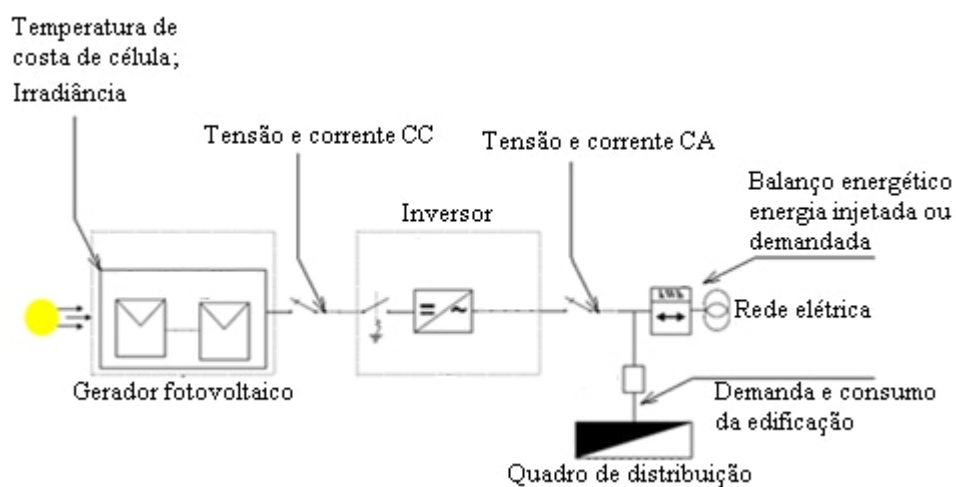


Figura 2.3 – Diagrama Unifilar do Sistema Fotovoltaico conectado à Rede

Fonte: (MANITO et al., 2010). Acesso em: 11 Jan. (2024)

O funcionamento do sistema de geração de Energia Solar Fotovoltaica, é relativamente simples. Ele se baseia no efeito fotovoltaico, que é a capacidade de alguns materiais, como o silício, de converter a luz do sol em energia elétrica. Como a geração de energia solar fotovoltaica é baseada na conversão direta da luz do sol em eletricidade, uma fonte de energia limpa e renovável, Ela contribui para a redução da emissão de gases de efeito estufa e para a sustentabilidade. É importante ressaltar que a eficiência e a capacidade de geração de energia dos sistemas solares fotovoltaicos podem variar de acordo com fatores como a inclinação e a orientação dos painéis solares em relação à incidência solar.

A UNILAB instalou um sistema fotovoltaico de mini-geração no Campus das Auroras, em Redenção/CE. O sistema possui uma potência instalada de 325 watts-pico (Wp) e é composta por 762 módulos solares (usinas) e 10 painéis de 275 Wp (Árvore Solar). Através da geração de energia solar, o projeto busca conscientizar a comunidade acadêmica sobre a importância da sustentabilidade e do uso responsável dos recursos naturais.

Com a instalação desse sistema, a universidade reduz significativamente os custos com energia elétrica, aproveitando a energia solar para suprir parte de suas necessidades energéticas. Essa economia financeira poderá ser revertida em investimentos em outras áreas da universidade, promovendo um maior desenvolvimento e melhorias na instituição de ensino. Ao promover a eficiência energética, a UNILAB também busca agregar valor ao seu campus e torná-lo mais sustentável. Através do exemplo dado pela instalação do sistema fotovoltaico, a universidade incentiva a comunidade acadêmica a adotar práticas mais conscientes em relação ao consumo de energia e a buscar alternativas renováveis para suprir suas necessidades.

Dessa forma, o projeto de instalação do sistema fotovoltaico da UNILAB no Campus das Auroras em Redenção/CE tem como objetivo principal reduzir os gastos com energia elétrica, promover a eficiência energética e conscientizar a comunidade acadêmica sobre a importância da sustentabilidade e do uso responsável dos recursos naturais. A Figura 2.4 mostra os módulos solares e a Figura 2.5 mostra os inversores.



Figura 2.4 – Módulos solares fotovoltaicos instalados no Campus das Auroras

Fonte: Autoria Própria, (2024)



Figura 2.5 – Inversores ABB do Sistema Fotovoltaico do Campus das Auroras UNILAB-CE

Fonte: Autoria Própria, (2024)

A planta de geração distribuída solar (PGDS) do Campus das Auroras faz parte de um Projeto Prioritário de Eficiência Energética e Minigeração de Energia Fotovoltaica da Unilab, executado por equipes de pesquisadores, técnicos e professores da instituição, em parceria com a Enel Distribuição Ceará e a Aneel.

A PGDS do Campus das Auroras funciona desde 20 de dezembro de 2018 e tem uma capacidade de 251,4 kWp e conta com 762 painéis solares do modelo Canadian Solar 60 CS6U-330P e 6 conversores do modelo ABB PRO 33.0-TL-OUTD-SX-400 – Trifásico 380V. As unidades são dispostas em 6 combinações, sendo cada combinação ligada a um dos conversores. A organização das combinações é mostrada na Figura 2.6 e a Tabela 2.2 indica a quantidade de unidades ligadas em cada combinação. (NASCIMENTO JAIRO, 2021)

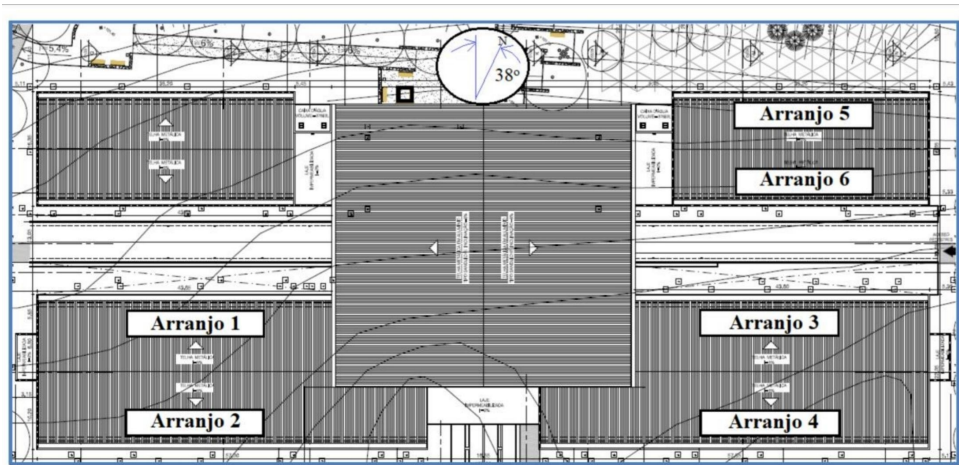


Figura 2.6 – Localização dos Módulos na Central de Microgeração Solar do Campus das Auroras.

Fonte: (NASCIMENTO JAIRO, 2021, apud SON, 2018)

Arranjo	Quantidade de Módulos do Arranjo
1	140
2	133
3	140
4	133
5	108
6	108
Total	762

Tabela 2.2 – Configuração do Arranjo Fotovoltaico com o Inversor

Fonte: (NASCIMENTO JAIRO, 2021, apud SON, 2018)

Além disso, a obra arquitetônica, nomeada de Árvore Solar e mostrada na Figura 2.7, está localizada na entrada do campus e faz parte do sistema de geração.



Figura 2.7 – Árvore Solar do Campus das Auroras – UNILAB/CE

Fonte: Autoria Própria, (2024)

Elevando-se a 11 metros de altura, a Árvore Solar situa na entrada do Campus das Auroras, ocupando uma área de aproximadamente 20 m². Os seus dez painéis fotovoltaicos, em forma de folhas, captam a energia do sol e a transformam em energia limpa, alimentando a Unidade Acadêmica e inspirando a comunidade. No futuro, a Árvore Solar também servirá como um minilaboratório para os estudantes do curso de Engenharia de Energias. Através dela, os alunos poderão ter contato direto com a tecnologia de geração de energia solar e aprender na prática como funciona esse sistema inovador.

Além disso, Unilab utiliza sistemas de controle e monitoramento para garantir a eficiência e segurança do seu sistema elétrico. Isso inclui dispositivos como medidores de energia, relés de proteção e sistemas de supervisão controle, que permitem identificar e solucionar problemas ou falhas no sistema.

Em relação à conexão com a rede elétrica externa, a Unilab está conectada à concessionária de energia local. Isso significa que ela recebe energia da rede pública, mas também pode injetar energia excedente de suas fontes renováveis na rede, através do sistema de compensação de energia elétrica, normalmente regulamentado pelas políticas

energéticas de cada país. Esse sistema conectado à rede elétrica permite que a Unilab tenha um fornecimento constante de energia elétrica para suas atividades acadêmicas e administrativas. Além disso, ao utilizar fontes de energia renovável, a universidade contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a sustentabilidade ambiental.

Como a base no sistema e módulos utilizado na instalação fotovoltaico da universidade, procedemos a algumas definições importantes:

- (a) **Painéis Solares (Módulos Fotovoltaicos):** Os módulos solares captam a luz solar e a transformam em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. A cada módulos é composto por células fotovoltaicas que geram CC quando expostas à luz solar.
- (b) **Inversor Solar:** É um componente crucial, que adapta a corrente elétrica gerada pelos painéis solares, convertendo-a de CC para CA. A eletricidade gerada pode ser distribuída para uso imediato, armazenada em baterias ou injetada na rede elétrica.
- (c) **Funcionamento Geral:** A luz solar incide sobre os painéis solares, liberando elétrons nas células fotovoltaicas. Esses elétrons criam uma corrente elétrica que flui para o inversor solar. O inversor converte essa corrente para CA, tornando-a compatível com os aparelhos elétricos. A energia é distribuída para a casa ou empresa, alimentando luzes e equipamentos.
- (d) **Benefícios:**
 - **Economia na conta de luz:** A energia solar reduz a dependência da rede elétrica convencional.
 - **Sustentabilidade:** É uma fonte limpa e renovável, reduzindo a pegada de carbono.
 - **Acessibilidade:** Cada vez mais pessoas podem instalar sistemas fotovoltaicos.

Portanto, o sistema utilizado pela Unilab, que está conectado à rede elétrica, proporciona confiabilidade. Além disso, fortalece o compromisso da universidade com a sustentabilidade e pode impulsionar a pesquisa e inovação na área de energia.

2.3 IMPACTOS SÓCIO-ECONÔMICOS E AMBIENTAIS DE GF NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

As tarifas de energia elétrica são calculadas com base na quantidade de energia consumida pelos consumidores. Em contextos de crescimento do mercado, essas tarifas permitem que as distribuidoras de energia se sustentem financeiramente e invistam na ampliação da rede. No entanto, em mercados estagnados ou decrescentes, as tarifas de base volumétrica podem se tornar insustentáveis. Isso ocorre porque as distribuidoras têm custos fixos, que independem da quantidade de energia consumida. Quando a demanda não cresce, a receita das distribuidoras cai e elas não conseguem recuperar esses custos fixos (CASTRO et al., 2018).

Por outro lado, o Castro et al. (2018) destacaram que a descentralização dos sistemas elétricos, através da difusão de recursos energéticos distribuídos, como microgeração e minigeração distribuída, sistemas de armazenamento, programas de resposta da demanda e veículos elétricos, está trazendo desafios para as redes de distribuição (RD). Na década de 1970, a disseminação de programas de incentivo à eficiência energética vinculados à crise petrolífera mundial já havia provocado um aumento da demanda por energia fora dos horários de pico de consumo, o que também exigiu adaptações das redes de distribuição (CASTRO et al., 2018).

Atualmente, a descentralização dos sistemas elétricos está intensificando esse desafio. Os usuários de sistemas fotovoltaicos, por exemplo, exportam eletricidade para a rede em momentos de excesso de geração, e importam energia da rede quando a geração não é suficiente para atender a sua demanda.

A GD refere-se à produção de energia elétrica por meio de fontes renováveis e pequenos geradores próximos aos consumidores. Com isso, apresentaram-se os impactos mais importantes na RD de energia elétrica. Alguns desses impactos incluem: Redução das perdas de transmissão e distribuição, Alívio da demanda na rede elétrica, Maior segurança energética, Integração de fontes renováveis, Desafios de gerenciamento do sistema, Tais tópicos são abordados nas próximas seções.

2.3.1 Redução das perdas de transmissão e distribuição

Com a geração ocorrendo próximo aos pontos de consumo, há uma diminuição nas perdas de energia elétrica durante o transporte pelas linhas de transmissão e distribuição. Isso ocorre porque a energia gerada é utilizada localmente, sem passar por grandes distâncias. A Figura 2.8 mostra as perdas no setor elétrico.

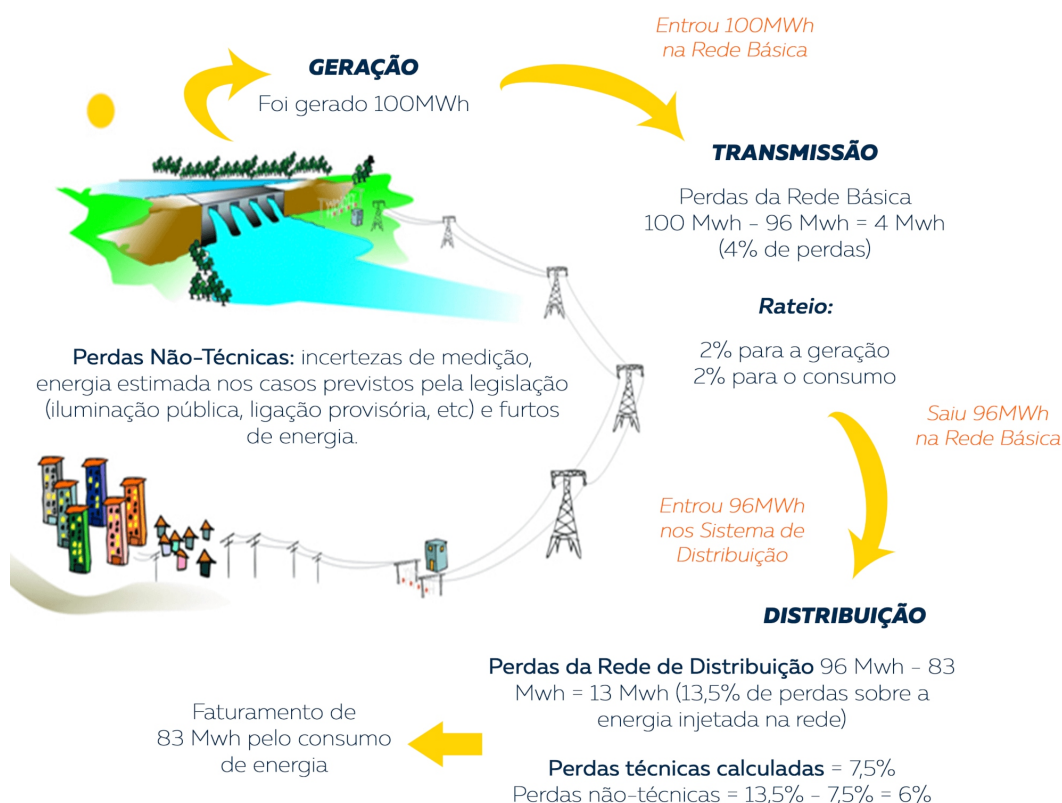


Figura 2.8 – As Perdas no setor elétrico

Fonte: (CERBRANORTE,). Acesso em: 17 Fev. (2024).

2.3.2 Alívio da demanda na rede elétrica

É um dos principais benefícios da GD. Isso ocorre porque os consumidores que geram sua própria energia elétrica reduzem a quantidade de energia que precisam adquirir da rede. Portanto, em horários de pico, quando a demanda por energia é maior, a GD pode ajudar a evitar sobrecargas na rede. Isso diminui o risco de apagões e melhora a eficiência do sistema elétrico. Além do alívio da demanda, a GD também pode trazer outros benefícios para o setor elétrico, como: diversificação da matriz energética; redução da dependência de combustíveis fósseis; melhoria da qualidade do ar; geração de empregos e renda e desenvolvimento tecnológico.

No Brasil, a Geração Distribuída (GD) vem crescendo nos últimos anos. Em 2023, a potência instalada em micro e minigeração distribuída chegou a 17,5 GW, representando um aumento de 30% em relação a 2021. Esse crescimento reflete uma tendência global, e a expectativa é que a GD continue a se expandir nos próximos anos, impulsionada pela queda dos custos das tecnologias renováveis e por políticas públicas que incentivam o setor (BEZERRA, 2023).

2.3.3 Maior segurança energética

A GD torna o sistema elétrico mais seguro e resiliente, já que a produção de energia é descentralizada e não depende de grandes usinas geradoras. Em caso de falhas em uma parte da rede a GD é desligada da rede por causa da segurança da equipa de manutenção.

No Brasil, a GD está em expansão. Em 2022, o país tinha cerca de 2,5 milhão de sistemas de GD instalados, ultrapassou dois milhões de residências com energia solar. A expansão da GD é importante para tornar o sistema elétrico brasileiro mais seguro, resiliente e eficiente.

2.3.4 Integração de fontes renováveis

A GD possibilita uma maior integração de fontes renováveis, como solar e eólica, na matriz energética. Isso ocorre porque os consumidores podem instalar painéis solares em suas residências ou utilizar aerogeradores para produzir eletricidade limpa, reduzindo a dependência de fontes fósseis. como ilustra na Figura 2.9



Figura 2.9 – Fontes renováveis de energia

Fonte: Energia (2019). Acesso em: 28 Jan. (2024).

A GD é uma tecnologia promissora que tem o potencial de transformar o setor elétrico. Ela pode ajudar a reduzir a dependência de fontes fósseis, melhorar a confiabilidade do sistema elétrico, reduzir o custo da energia e promover o desenvolvimento sustentável.

2.3.5 Desafios de gerenciamento do sistema

A GD impõe desafios na gestão do sistema elétrico. A variação na geração de energia por parte dos consumidores pode causar flutuações na rede, exigindo a implementação de sistemas inteligentes de monitoramento e controle para equilibrar a oferta e a demanda. Além disso, a GD pode aumentar a complexidade do sistema elétrico, pois torna mais difícil gerenciar a interação entre diferentes fontes de geração, incluindo fontes centralizadas e distribuídas.

Então, para enfrentar os desafios de gerenciamento do sistema elétrico associados à geração distribuída, é necessário desenvolver soluções que permitam equilibrar a oferta e a demanda de energia de forma eficiente e segura.

No geral, a GD tem um impacto positivo na RD de energia elétrica, contribuindo para uma maior eficiência, integração de fontes renováveis e participação dos consumidores no mercado de energia. No entanto, a sua implementação requer adaptações e investimentos por parte das concessionárias de energia para garantir a estabilidade do sistema. Além disso, políticas governamentais e regulamentações adequadas são necessárias para incentivar e facilitar a expansão da geração distribuída.

2.4 *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION* (PSO)

O PSO (*Particle Swarm Optimization*) foi criado por Kennedy e Eberhart Gomes et al. (2023), e é inspirado no comportamento coletivo observado em grupos de peixes e pássaros que procuram por alimentos. Este algoritmo se destaca por permitir que as partículas aproveitem tanto suas próprias experiências quanto as experiências coletivas do grupo para encontrar soluções otimizadas.

Durante a busca por uma solução ideal, cada partícula ajusta sua posição no espaço de busca com base em três elementos principais: a memória da partícula, que é a melhor posição da própria partícula encontrada anteriormente; o fator cognitivo, que incentiva a partícula a se mover em direção à sua própria melhor solução encontrada; e o fator social, que orienta a partícula a considerar a melhor solução descoberta por outros membros do enxame Gomes et al. (2023). Esses fatores combinados permitem que o PSO explore e otimize eficientemente o espaço de busca.

2.4.1 Velocidade e Posição das Partículas

Cada partícula i tem uma posição x_i e uma velocidade v_i que são atualizadas a cada iteração. Conforme as Equações (1) e (2).

2.4.1.1 Atualização da Velocidade

$$v_i^{(t+1)} = w \cdot v_i^{(t)} + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_i^{(t)} - x_i^{(t)}) + c_2 \cdot r_2 \cdot (p_g^{(t)} - x_i^{(t)}) \quad (1)$$

2.4.1.2 Atualização da Posição

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + v_i^{(t+1)} \quad (2)$$

- $v_i^{(t)}$ é a velocidade da partícula i na iteração t .
- $x_i^{(t)}$ é a posição da partícula i na iteração t .
- $p_i^{(t)}$ é a melhor posição encontrada pela partícula i até a iteração t (melhor solução local).
- $p_g^{(t)}$ é a melhor posição encontrada por qualquer partícula no enxame até a iteração t (melhor solução global).
- w é o fator de inércia, que controla a influência da velocidade anterior.

- c_1 e c_2 são os coeficientes de aceleração que controlam a influência das melhores posições locais e globais, respectivamente.
- r_1 e r_2 são números aleatórios uniformemente distribuídos no intervalo $[0, 1]$, usados para introduzir aleatoriedade no processo.

O PSO tem se mostrado uma técnica eficiente para a solução de problemas de otimização complexos. Desenvolvido a partir da observação de comportamentos naturais de agrupamento, o algoritmo permite uma busca eficiente através do espaço de soluções ao utilizar o conhecimento tanto das partículas individuais quanto do grupo (CARVALHO et al., 2016).

Ao longo das iterações, o PSO ajusta as posições das partículas de forma a balancear a exploração global e a exploração local do espaço de busca. Isso é feito através da combinação da memória pessoal de cada partícula com as informações coletivas do enxame. O resultado é um método de otimização que não apenas é relativamente simples de implementar, mas também eficaz em uma ampla gama de problemas (CARVALHO et al., 2016).

Os parâmetros como quantidade de partículas e coeficiente, contribuem para o ajuste do PSO a diferentes problemas. Entretanto, o que essencialmente permite o ajuste do PSO a diferentes tipos de problema são mudanças no conjunto de atributos que representam a posição de uma partícula no modelo.

Para desenvolver um algoritmo que organize a execução do PSO com problema de RRDEE, seguiu-se seguintes passos básicos descritos abaixo. Esses passos são resumidos no fluxograma e referenciado na Figura 2.10.

Passos para Organização do Algoritmo PSO com RRDEE:

- Inicialização: Definir os parâmetros do PSO (número de partículas, número máximo de iterações, coeficientes de inércia, fatores de aprendizado, etc.).
- Inicializar a população de partículas com posições e velocidades aleatórias, dentro do espaço de busca.
- Avaliação Inicial: Avaliar o desempenho de cada partícula utilizando o problema de RRDEE como função objetivo. Isso pode envolver simulações ou cálculos de desempenho da rede elétrica reconfigurada.

- Determinação do Melhor Local e Global: Para cada partícula, determinar o melhor desempenho alcançado (local) e o melhor desempenho global entre todas as partículas.
- Atualização das Velocidades e Posições: Atualizar a velocidade e a posição de cada partícula com base na fórmula padrão do PSO, considerando o melhor local e o melhor global encontrado; Aplicar o operador de reconfiguração da rede de distribuição de energia elétrica às posições das partículas. Isso pode envolver a escolha de chaves abertas/fechadas em uma rede elétrica para otimizar a operação.
- Avaliação da Nova Configuração: Avaliar o desempenho da rede elétrica com a nova configuração gerada pela reconfiguração. Isso atualiza a função objetivo para cada partícula.
- Atualização do Melhor Local e Global: Atualizar o melhor local e global com base no desempenho das novas configurações após a reconfiguração.
- Critério de Parada: Verificar se o critério de parada foi alcançado (por exemplo, número máximo de iterações atingido ou convergência da solução).
- Iteração do PSO: Se o critério de parada não foi alcançado, retornar ao passo 4 para continuar com a próxima iteração do PSO.

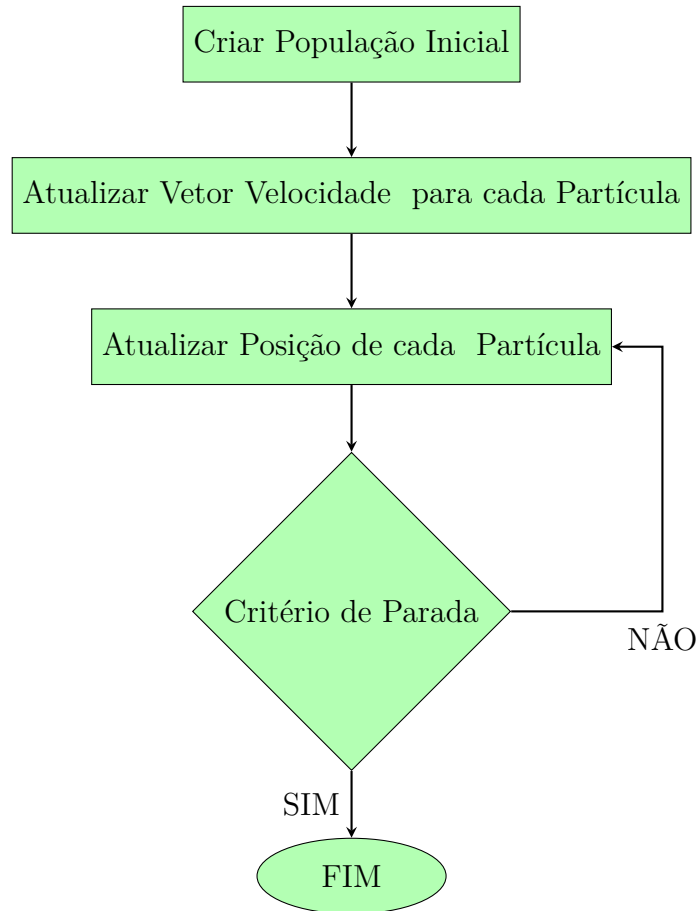


Figura 2.10 – Fluxograma de PSO Modificado

Fonte: Autoria Própria (2024).

De acordo com Souto et al. (2017), o método PSO trata cada membro do enxame como uma partícula, onde cada uma simboliza uma potencial solução para o problema a ser resolvido. Essas partículas se movem pelo espaço de soluções com velocidades variáveis, guiadas por duas influências principais: a experiência individual (pbest) e a experiência coletiva do enxame (gbest). A posição de cada partícula é ajustada com base nas melhores posições (pbest) e (gbest) encontradas até o momento da iteração atual. Esta metodologia tem se mostrado bastante eficiente na resolução de problemas complexos de otimização não-linear de grande escala.

Na RRDE, segundo Bernardon (2007), o PSO é utilizado para encontrar a configuração ótima do sistema. Este processo envolve variáveis como a abertura ou fechamento de chaves seccionadoras, a alocação de dispositivos de compensação reativa e a minimização das perdas de energia. A aplicação do PSO na otimização da rede resulta em uma maior eficiência operacional e facilita a integração da geração fotovoltaica na rede elétrica de maneira eficaz.

Por fim, o algoritmo PSO é eficiente e eficaz na solução de problemas complexos de otimização durante a reconfiguração de redes de distribuição em contextos que incluem a geração fotovoltaica.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

O Problema de RRD consiste na minimização de perdas de energia e melhoramento de perfil de tensão nos barramentos seguindo as restrições do sistema, e pode ser representado pela equação (3).

$$\text{Minimizar } P_P = \sum_{i=1}^{n_l} R_i I^2 \quad (3)$$

Onde:

P_P - Perdas totais de Potência ativa do sistema na configuração;

I - Corrente elétrica que circula no ramo i ;

n_l - Número de linhas da rede;

R_i - Resistência no ramo i .

A função objetivo do problema da equação (3) está sujeita as seguintes restrições:

3.0.1 Restrição de fluxo de potência

Também se encontram dentro dessas restrições, balanços de potência ativa e reativa dos nós do sistema em estudo, dados pelas equações (4) e (5).

$$PG_k - PC_k = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (4)$$

$$QG_k - QC_k = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (5)$$

onde

PG_k, QG_k - São a potência ativa e reativa das cargas na barra;

V_k, V_m - Magnitudes de tensão nodal nas barras;

G_{km}, B_{km} - Parte real e imaginária do elemento da matriz admitância ($Y = G + jB$);

θ_{km} - Diferença angular entre as barras

3.0.2 Restrições de magnitude de tensão

A restrição do problema considera que a tensão nos nós deve estar dentro dos limites operacionais estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), com uma faixa de operação adequada entre 0,93 p.u e 1,05 p.u. Esses valores, representados na Equação (6), definem os limites máximos (V_{max}) e mínimos (V_{min}) permitidos para a tensão em cada ponto de conexão, garantindo a estabilidade do sistema.

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (6)$$

3.0.3 Radialidade da Rede

Os sistemas de distribuição de energia elétrica operam, na maioria das vezes, de forma radial, fornecendo energia a todas as cargas a partir de uma única extremidade. Esta restrição é atendida pela metodologia proposta.

3.0.4 Curva de Geração Solar

A análise das curvas de geração solar é fundamental para compreender a eficiência e o desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Neste estudo, foram analisados dados coletados do sistema solar instalado na UNILAB, especificamente no campus de Auroras, Ceará (CE), que está conectado à rede elétrica. As curvas de potência gerada fornecem uma visão detalhada sobre como o sistema contribui para a produção de energia ao longo de diferentes períodos.

Essas curvas são apresentadas em quatro intervalos de tempo distintos, cada um oferecendo uma perspectiva única sobre a geração de potência:

3.0.5 Curva de 24h

A Figura 3.1 mostra a variação na potência gerada ao longo de um único dia, permitindo a análise das horas de maior e menor produção, e fornecendo um entendimento sobre o desempenho diário do sistema.

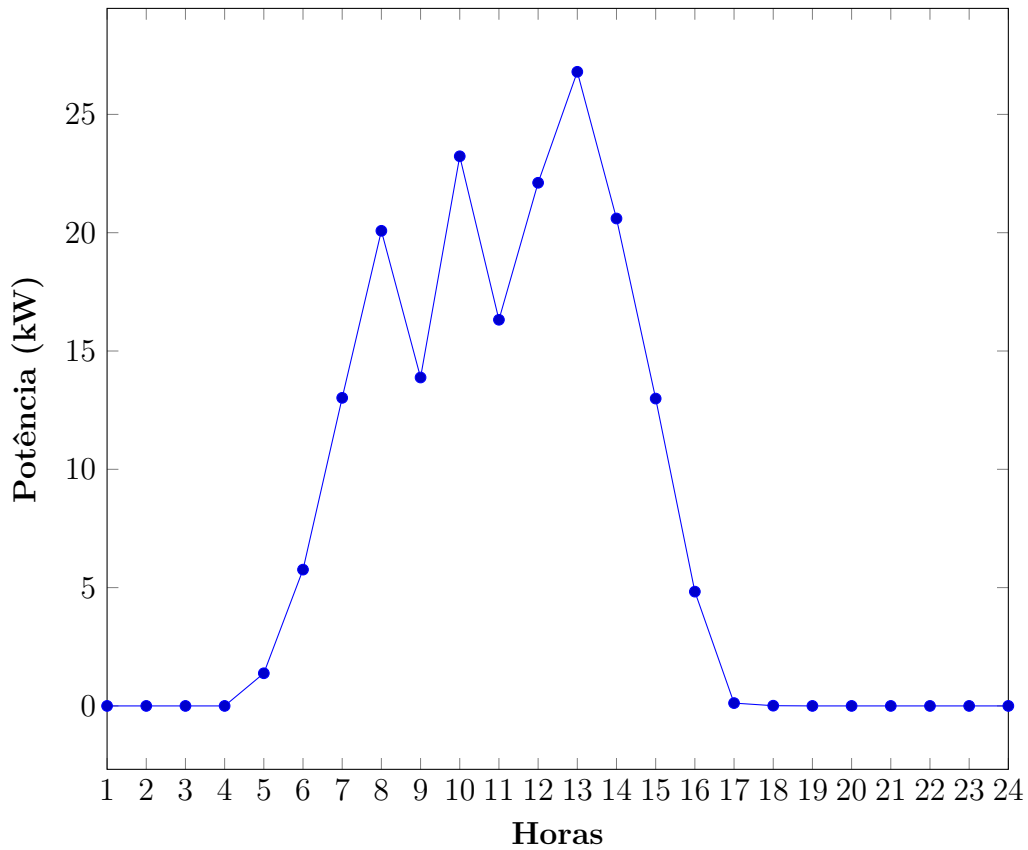


Figura 3.1 – Curva de Geração Fotovoltaica de 24h

Fonte: Autoria Própria (2024).

Observa-se que, durante as primeiras horas do dia, o consumo de energia é baixo, aumentando progressivamente até atingir seu pico. A geração de potência solar inicia por volta das 5 horas da manhã, crescendo até alcançar o máximo às 13 horas, com uma potência de aproximadamente 26,80 kW. Após esse ponto, a geração de potência começa a diminuir gradualmente, chegando a zero por volta das 18 horas. É possível analisar a relação entre o pico de consumo e as atividades realizadas nesse período para identificar oportunidades de reduzir o consumo de energia durante os horários de maior demanda.

3.0.6 Curva semanal

A curva de geração solar semanal oferece uma visão detalhada da produção de energia ao longo de uma semana inteira. Essa análise é importante para entender como a geração de potência solar varia em função das condições climáticas e da disponibilidade de luz solar ao longo dos dias da semana.

Compreender essas variações permite ajustar estratégias para otimizar o uso da energia gerada, melhorar a eficiência do sistema e potencialmente reduzir os custos com

energia elétrica.

A figura 3.2 ilustra a curva semanal, mostrando a produção de energia ao longo dos sete dias da semana. Além disso, a figura 3.3 apresenta a média semanal, oferecendo uma visão geral das tendências de geração ao longo de todo o período analisado.

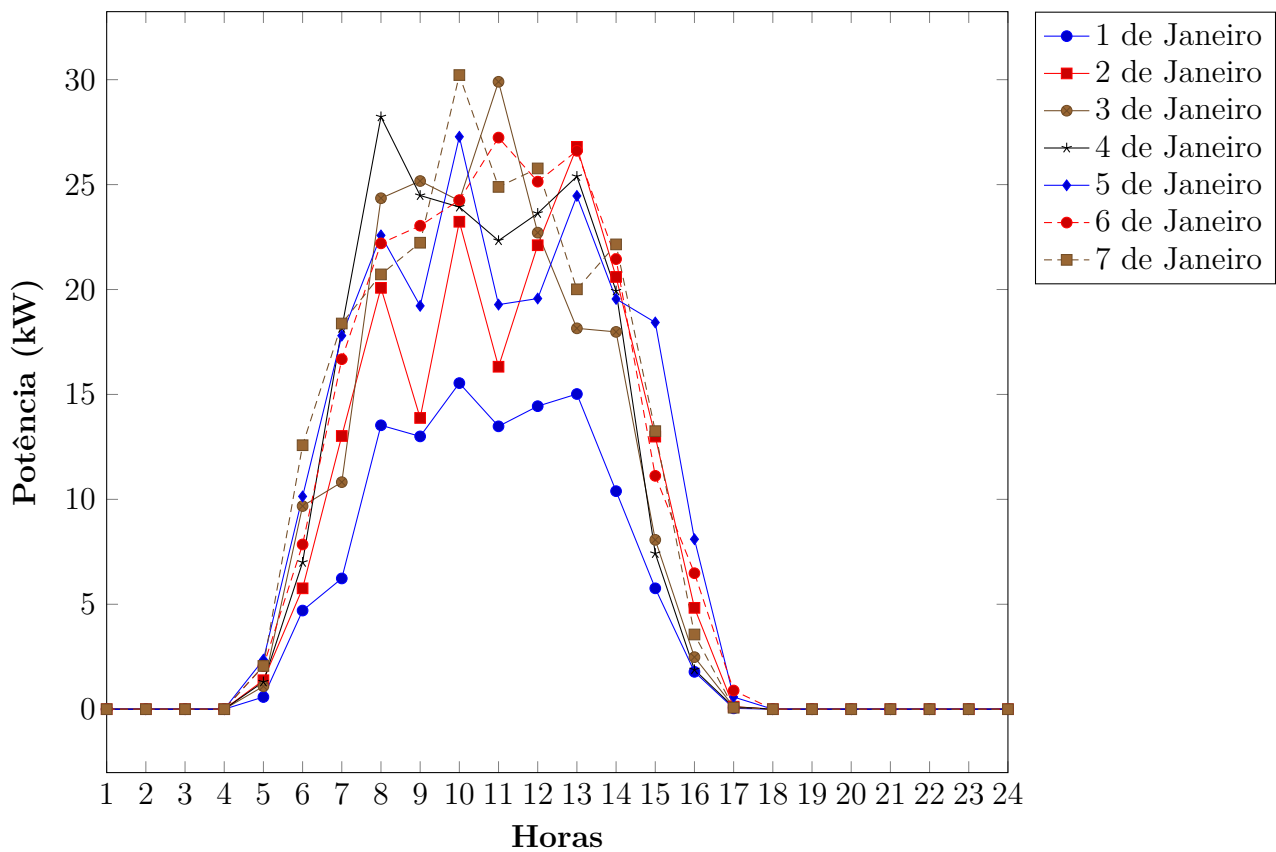


Figura 3.2 – Curva de Geração Fotovoltaica Semanal

Fonte: Autoria Própria (2024).

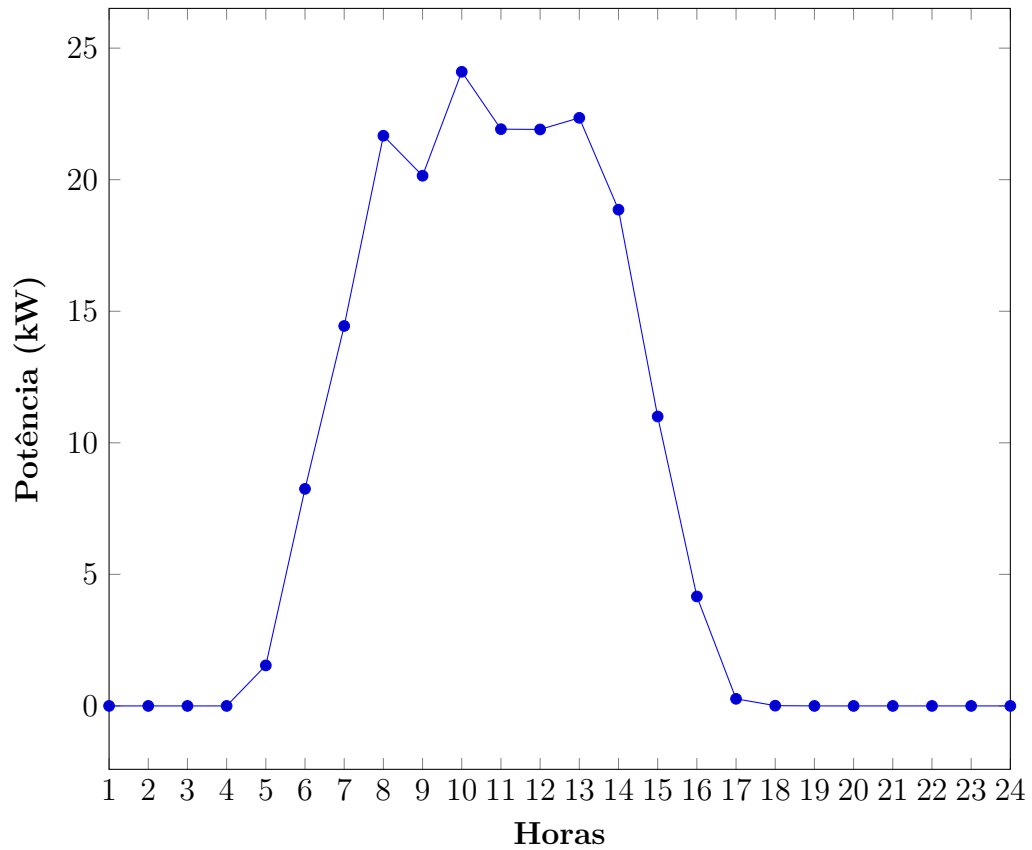


Figura 3.3 – Curva média de GF semanal

Fonte: Autoria Própria (2024).

Durante esse período, observamos picos da produção notáveis por volta das 10, 11 e 12 horas, indicando possíveis momentos de maior demanda energética na Universidade. A geração de potência se inicia por volta das 5 horas, aumentando progressivamente até atingir o pico às 10 horas, atingindo cerca de 24,10 kW. Posteriormente, a potência gerada diminui gradualmente até alcançar o mínimo de 0 kW às 17 horas. Essa análise detalhada nos permite compreender os padrões de consumo ao longo do dia e otimizar a gestão da energia na instituição.

3.0.7 Curva mensal

Ao analisar os valores de pico de potência registrados ao longo do mês de janeiro, podemos observar uma variação subjetividade no comportamento da geração fotovoltaica. Como mostra na tabela 3.1.

Data	Potência (kW)	Hora
1 de janeiro	15,54	10h
2 de janeiro	26,80	13h
3 de janeiro	29,90	11h
4 de janeiro	28,23	8h
5 de janeiro	27,28	10h
6 de janeiro	27,24	11h
7 de janeiro	30,22	10h
8 de janeiro	26,83	9h
9 de janeiro	28,69	12h
10 de janeiro	23,58	14h
11 de janeiro	27,94	12h
12 de janeiro	29,97	13h
13 de janeiro	30,72	13h
14 de janeiro	31,94	11h
15 de janeiro	27,52	11h
16 de janeiro	14,28	11h
17 de janeiro	26,19	11h
18 de janeiro	23,78	10h
19 de janeiro	33,77	15h
20 de janeiro	21,58	10h
21 de janeiro	25,58	12h
22 de janeiro	27,13	10h
23 de janeiro	30,76	10h
24 de janeiro	42,13	9h
25 de janeiro	18,48	14h
26 de janeiro	50,27	10h
27 de janeiro	24,69	15h
28 de janeiro	23,98	12h
29 de janeiro	28,93	11h
30 de janeiro	27,47	14h
31 de janeiro	24,67	11h

Tabela 3.1 – Potência diária de geração fotovoltaica em janeiro

Fonte: Autoria Própria (2024).

Essas variações nos picos de potência ao longo do mês refletem as flutuações na geração fotovoltaica conforme as condições climáticas e a posição do sol ao longo do dia. Cada valor representa a capacidade máxima de produção de energia solar em momentos específicos, fornecendo importância valiosa sobre o desempenho do sistema ao longo do mês de janeiro.

A média anual da curva de GF em termos de potência (kW) ao longo de 24 horas é representada no gráfico da Figura 3.4.

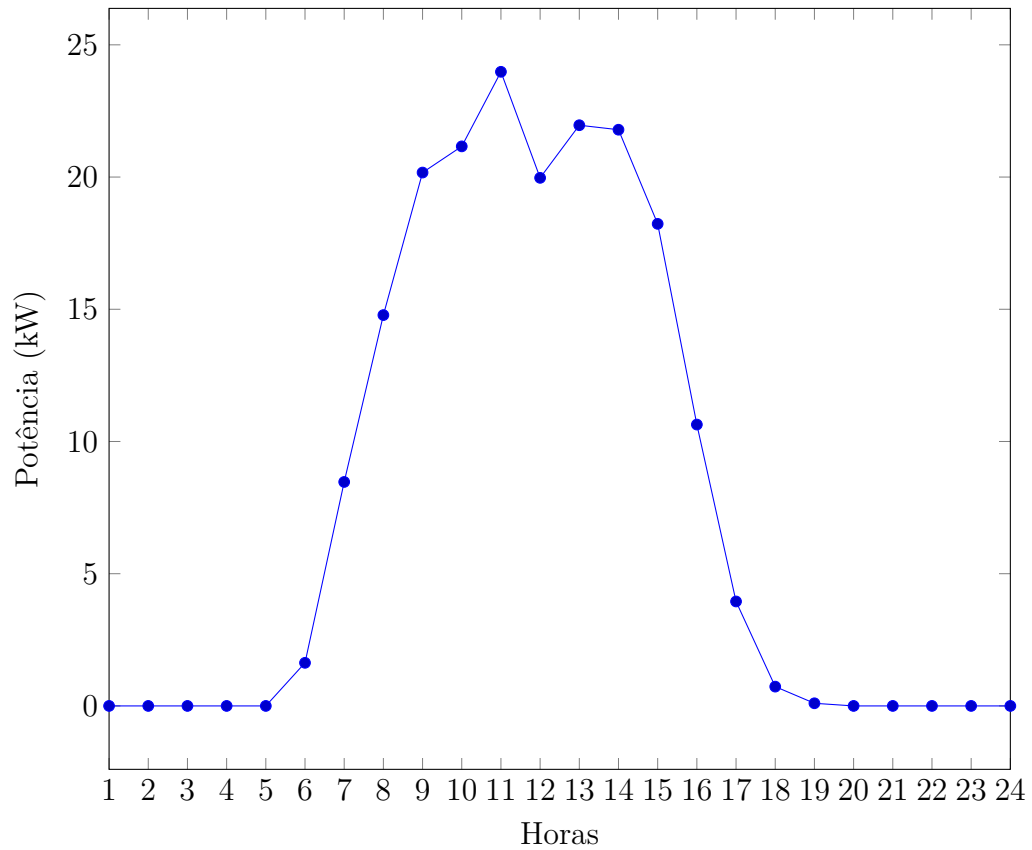


Figura 3.4 – Curva média de GF mensal

Fonte: Autoria Própria (2024).

Pode-se perceber que a potência começa a aumentar por volta das 6 horas da manhã, atingindo um pico entre as 11 horas, e depois começa a diminuir, retornando a valores próximos de zero por volta das 18 horas. Este padrão é típico de sistemas fotovoltaicos que dependem da luz solar para gerar energia atingindo a potência máxima entre 20 e 24 kW, indicando que durante as horas de maior incidência solar (11 horas), a geração de energia é mais eficiente e atinge seu máximo. Como esperado, a potência é praticamente zero (das 18 às 6 horas), uma vez que não há luz solar disponível para a geração de energia.

3.0.8 Curva anual

A Figura 3.6 mostra a curva de consumo mensal de energia para todos os meses do ano, durante um período de 24 horas.

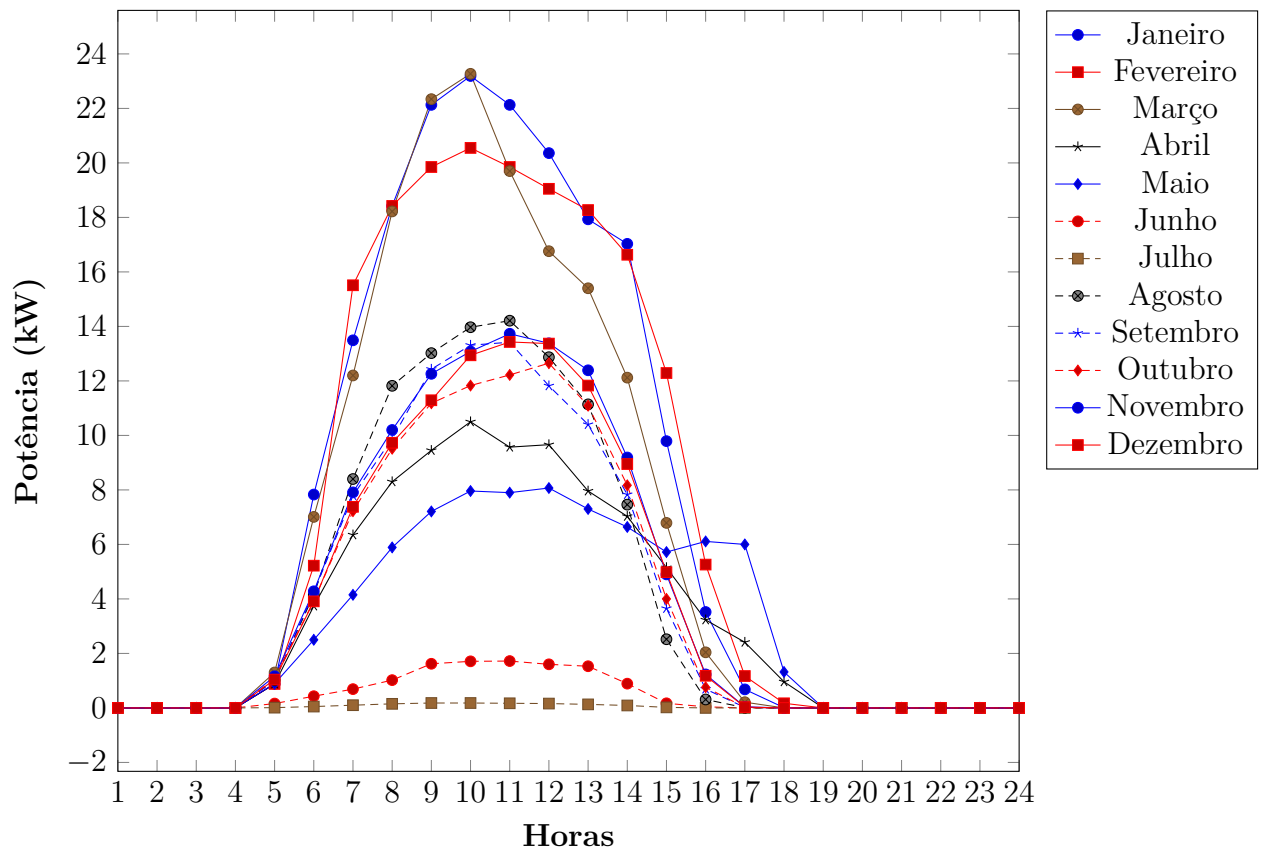


Figura 3.5 – Curva de GF anual

Fonte: Autoria Própria (2024).

É possível observar que o pico da geração varia de acordo com o mês. Nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril e maio, o pico de consumo ocorre por volta das 18 horas. Já nos meses de junho e julho, o pico de consumo se concentra por volta das 16 horas. Nos meses de agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro, o pico de consumo ocorre por volta das 17 horas. A potência máxima de consumo, em torno de 23,27 KW, se dá durante o período de pico. Após o pico, o consumo de energia diminui gradualmente até atingir o mínimo de 0 kW às 19 horas.

A Figura 3.6 mostra um gráfico que representa a curva média anual de GF em termos de potência (kW) ao longo de 24 horas.

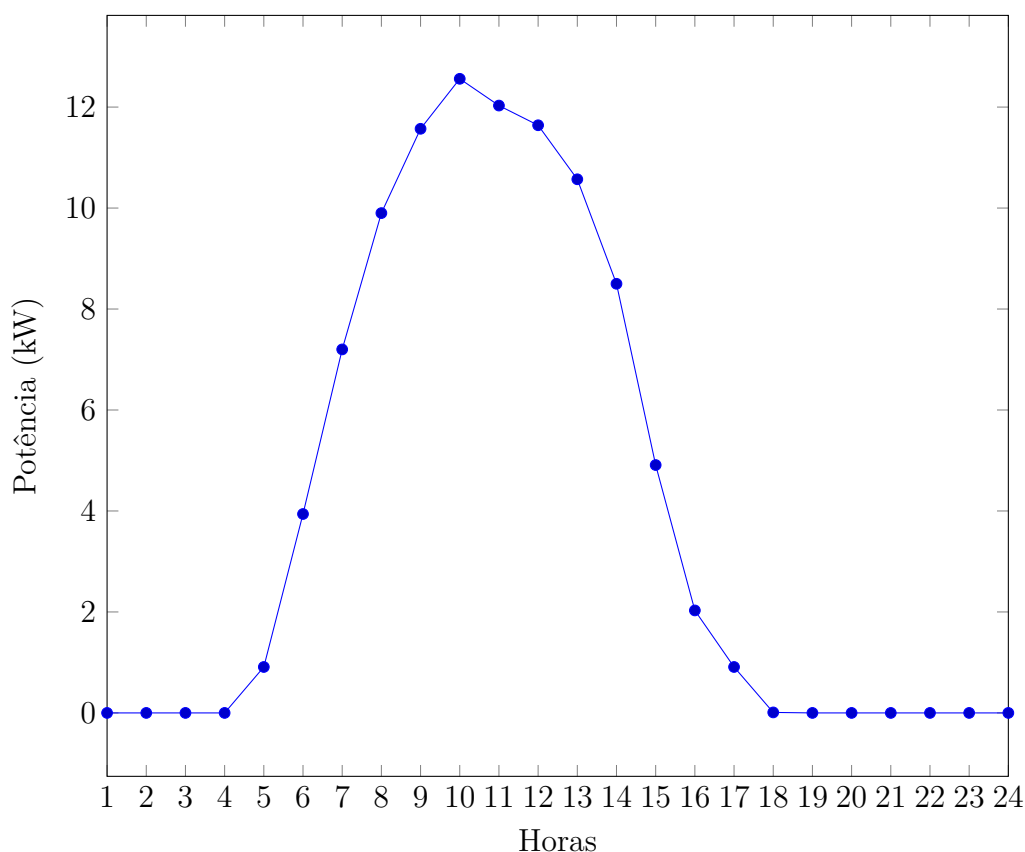


Figura 3.6 – Curva média de GF anual

Fonte: Autoria Própria (2024).

Pode-se ver que a potência começa a aumentar a partir das 6 horas da manhã, atinge um pico entre às 10 horas, e diminui novamente até quase zero por volta das 18 horas. Este comportamento é típico da geração fotovoltaica, que depende da luz solar. A potência máxima observada no gráfico é de aproximadamente 12 kW, ocorrendo às 10 horas. Este é o momento em que a intensidade da luz solar é maior, resultando na máxima geração de energia. Durante o período noturno (aproximadamente das 18 às 6 horas), a potência gerada é praticamente zero, o que é esperado, pois não há luz solar disponível.

Como o gráfico representa a média anual, ele suaviza as variações diárias e sazonais causadas por diferentes condições climáticas e a posição do sol ao longo do ano. Isso resulta em uma curva mais suave e representativa do comportamento geral da geração de energia fotovoltaica ao longo de um ano.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a obtenção dos resultados com a metodologia proposta, foi utilizado o ambiente MATLAB. Todas as simulações foram realizadas em um computador Dell com Windows 11, processador i7, 8 GB de memória RAM e 1 TB de armazenamento em HD, além de 256 GB de SSD. O sistema de 33 barras e 37 linhas, representado na Figura 4.1, foi utilizado como sistema de teste. As linhas traçadas na figura representam as chaves abertas inicialmente. A tensão de operação é de 13,8 kV, e a perda inicial é de 202,662 kW. A Tabela 4.1 apresenta os resultados antes e depois da Reconfiguração da Rede de Distribuição (RRD), sem a inserção da Geração Fotovoltaica (GF).

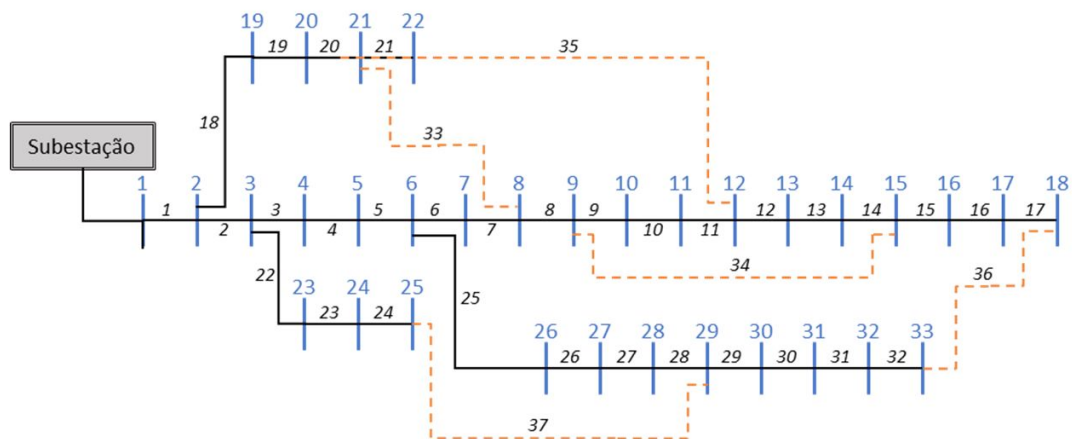


Figura 4.1 – Sistema unifilar de distribuição de 33 barras

Fonte: Gomes et al. (2023). Acesso em: 29 Junho. (2024).

Sistema de 33 barras	configuração inicial	configuração final
Chaves abertas	33 - 34 - 35 - 36 - 37	7- 9 - 14 - 32- 37
Perdas (kW)	202,662	138,551
Tensão mínima (p.u)	0,91311	0,93782

Tabela 4.1 – Restuado final e inical de sistema de 33 barras

Fonte: Autoria Própria, (2024)

A Figura 4.2 apresenta o perfil de tensão sem geração fotovoltaica, mostrando duas curvas distintas. A primeira curva, representada pela cor preta, exibe o comportamento do sistema antes da reconfiguração. Já a segunda curva, em vermelho, mostra o comportamento do sistema após a reconfiguração.

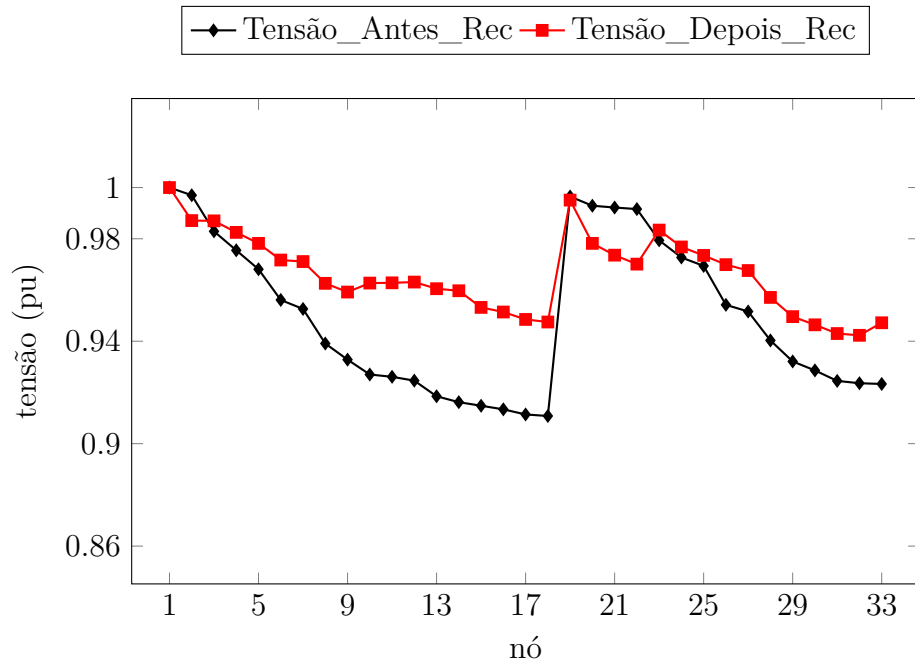


Figura 4.2 – Perfil de tensão sem GF

Fonte: Autoria Própria (2024).

Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados de outros trabalhos na literatura que utilizaram metodologias diferentes para o estudo, permitindo uma comparação com os resultados obtidos na pesquisa atual.

Autores	Algoritmo utilizado	Perdas (kW)	Chaves
Autoria Propria	PSO	139,55	7-9-14-32-37
Gomes et al. (2022)	SOS	139,55	7-9-14-32-37
Oliveira (2011)	GRASP	139,55	7-9-14-32-37
Gerez Cassio e Silva (2019)	Firefly-DNR	139,55	7-9-14-32-37
Mantovani et al. (2000)	AG	139,55	7-9-14-32-37

Tabela 4.2 – Resultado encontrados para o sistema de 33 barras

Fonte: Autoria Própria, (2024)

4.0.1 Análise de 24h

Para facilitar a compreensão foram conduzidas duas avaliações para cada período do dia. Abaixo, apresento um resumo de cada cenário:

Caso A – Sistema com GF e sem reconfiguração;

Caso B – Sistema com GF e com reconfiguração.

Nas Figuras 4.3, 4.5, 4.6 e 4.7, são apresentados os gráficos da geração total de sistema de 33 barras nos cenários Caso A e Caso B. Observa-se que ambos os cenários as perdas reduzida é aproximadamente 15%.

A distribuição desigual da energia total entre os cenários A e B aponta para diferenças significativas em termos de consumo energético. Essa disparidade pode ter implicações importantes na eficiência dos sistemas estudados e na necessidade de estratégias diferenciadas para otimização do consumo.

É importante lembrar que esse é apenas um gráfico resumido da energia total, e que a tabela com os valores de cada figura fornece informações mais detalhadas sobre o consumo de energia ao longo do tempo. A análise da tabela permite compreender melhor a variação do consumo de energia em cada cenário e identificar possíveis padrões e tendências.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados para cada cenário. Os resultados do cenário A estão na coluna 2 da tabela. Durante o período analisado, as perdas totais de energia somaram 4835,945 kW. Nesse cenário, o sistema de geração fotovoltaica não foi implementado. Observa-se que, às 18 horas, ocorreu o pico de perdas do sistema, resultando no menor valor de tensão atingindo 0,91311 pu.

Os resultados do cenário B estão apresentados na coluna 3. Nesse cenário, o sistema de geração fotovoltaica foi implementado, e o algoritmo indicou a abertura das chaves 7, 9, 14, 32 e 37. As perdas foram reduzidas, totalizando 3333,896 kW. Observou-se novamente um pico de perdas do sistema às 16 horas, com um valor de tensão de 0,93782 pu.

Horas	Caso A Perdas (kW)	Caso B Perdas (kW)	Chaves
1	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
2	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
3	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
4	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
5	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
6	202,567	139,499	7 9 14 32 37
7	202,0747	139,227	7 9 14 32 37
8	200,7835	138,5184	7 9 14 32 37
9	200,9376	138,6029	7 9 14 32 37
10	200,2721	138,2384	7 9 14 32 37
11	200,0807	138,1338	7 9 14 32 37
12	199,4102	137,7678	7 9 14 32 37
13	198,6078	137,3311	7 9 14 32 37
14	198,8906	137,4849	7 9 14 32 37
15	200,0031	138,0913	7 9 14 32 37
16	199,4732	137,8021	7 9 14 32 37
17	201,4319	138,8742	7 9 14 32 37
18	202,1455	139,2668	7 9 14 32 37
19	202,6506	139,5453	7 9 14 32 37
20	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
21	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
22	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
23	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
24	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
Total	4835,945	3333,896	-

Tabela 4.3 – Análise 24h para sistemas de 33 barras de dois casos

Fonte: Autoria Própria, (2024)

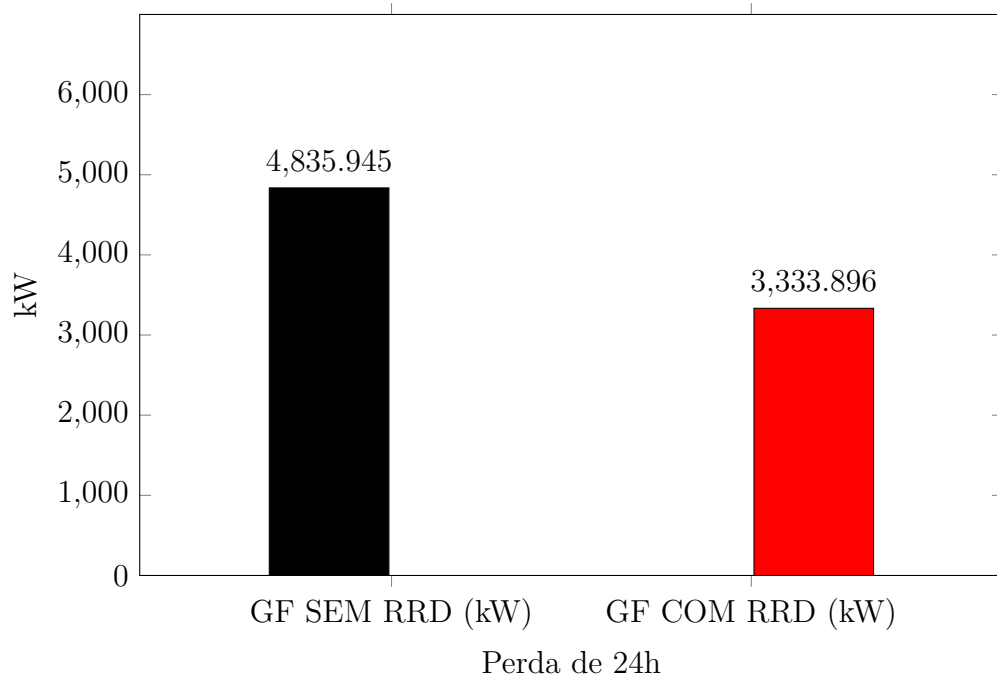


Figura 4.3 – Geração total de sistema de 33 barras para Caso A e Caso B de 24h

Fonte: Autoria Própria (2024).

Logo, na Tabela 4.4 mostra-se o perfil de tensões ao longo de 24 horas para dois cenários distintos, designados Caso A e Caso B. No Caso A, os valores de tensões antes são registados na coluna 2, em p.u, enquanto no Caso B, os valores de tensão depois são apresentados na coluna 3, também em p.u, com os mesmos chaves.

Horas	Caso A	Caso B	Chaves
	Antes (p.u)	Depois (p.u)	
1	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
2	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
3	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
4	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
5	0,91311	0,9378	7 9 14 32 37
6	0,91343	0,93782	7 9 14 32 37
7	0,91414	0,93783	7 9 14 32 37
8	0,91405	0,93783	7 9 14 32 37
9	0,91442	0,93783	7 9 14 32 37
10	0,91452	0,93783	7 9 14 32 37
11	0,9149	0,93783	7 9 14 32 37
12	0,91535	0,93784	7 9 14 32 37
13	0,91519	0,93784	7 9 14 32 37
14	0,91457	0,93783	7 9 14 32 37
15	0,91486	0,93783	7 9 14 32 37
16	0,91378	0,93782	7 9 14 32 37
17	0,91339	0,93782	7 9 14 32 37
18	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
19	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
20	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
21	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
22	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
23	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
24	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
Total	21,92981	22,50777	-

Tabela 4.4 – Perfil de tensão para curva de 24h

Fonte: Autoria Própria, (2024)

Nota-se que, durante um período de 24 horas, os níveis de tensão registrados no Caso A são de 0,91535 p.u às 12h. Em contrapartida, no Caso B, os níveis atingem 0,93784 p.u no intervalo de 12h e 13h. Os valores de tensão do Caso B mostram-se consistentemente superiores aos valores do Caso A, indicando uma melhora ou aumento na tensão após a reconfiguração.

O gráfico representa a tensão em (p.u), para sistema de 33 barras antes e depois da implementação de RRD durante 24h. Como mostra na Figura 4.4.

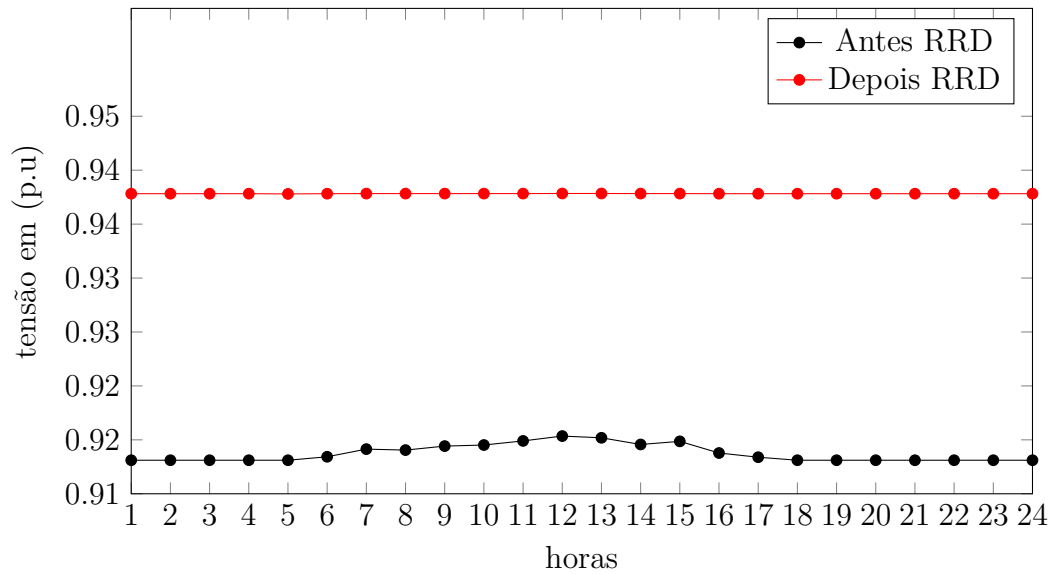


Figura 4.4 – Curva de tensão para sistema de 33 barras para Caso A e Caso B de 24h

Fonte: Autoria Própria (2024).

Percebe-se que antes da aplicação do RRD a tensão era baixa, em torno de 0,91 p.u., com algumas oscilações ao longo de 24h. Depois da aplicação do RRD a tensão subiu significativamente, e se estabilizou num nível constante em torno de 0,935 p.u.

A leve variação observada indica uma melhoria na estabilidade e qualidade da tensão após a intervenção. O aumento modesto sugere que o sistema já operava de forma eficiente antes do RRD, depois da reconfiguração otimizou ainda mais seu desempenho.

4.0.2 Análise semanal

A Tabela 4.5 exibe os resultados de cada cenário analisado. Os dados do cenário A estão listados na coluna 2, revelando que as perdas totais de energia durante o período somam 4855,500 kW, sem a presença do sistema de geração fotovoltaica.

Para o cenário B que são apresentados na coluna 3 da Tabela 4.5 foi implementado o sistema de geração fotovoltaica, com o algoritmo indicando a abertura das chaves 7, 9, 14, 32 e 37. Com essa implementação, as perdas foram significativamente reduzidas para um total de 3342,748 kW.

Horas	Caso A Perdas (kW)	Caso B Perdas (kW)	Chaves
1	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
2	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
3	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
4	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
5	202,5936	139,8999	7 9 14 32 37
6	202,2977	139,252	7 9 14 32 37
7	202,0259	139,0286	7 9 14 32 37
8	201,7098	138,7689	7 9 14 32 37
9	201,7761	138,8234	7 9 14 32 37
10	201,6039	138,682	7 9 14 32 37
11	201,6989	138,76	7 9 14 32 37
12	201,6993	138,7603	7 9 14 32 37
13	201,6801	138,7446	7 9 14 32 37
14	201,8325	138,8697	7 9 14 32 37
15	202,1768	139,1526	7 9 14 32 37
16	202,4779	139,4002	7 9 14 32 37
17	202,6497	139,5415	7 9 14 32 37
18	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
19	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
20	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
21	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
22	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
23	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
24	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
Total	4855,500	3342,748	-

Tabela 4.5 – Análise semanal para sistemas de 33 barras de dois casos

Fonte: Autoria Própria, (2024)

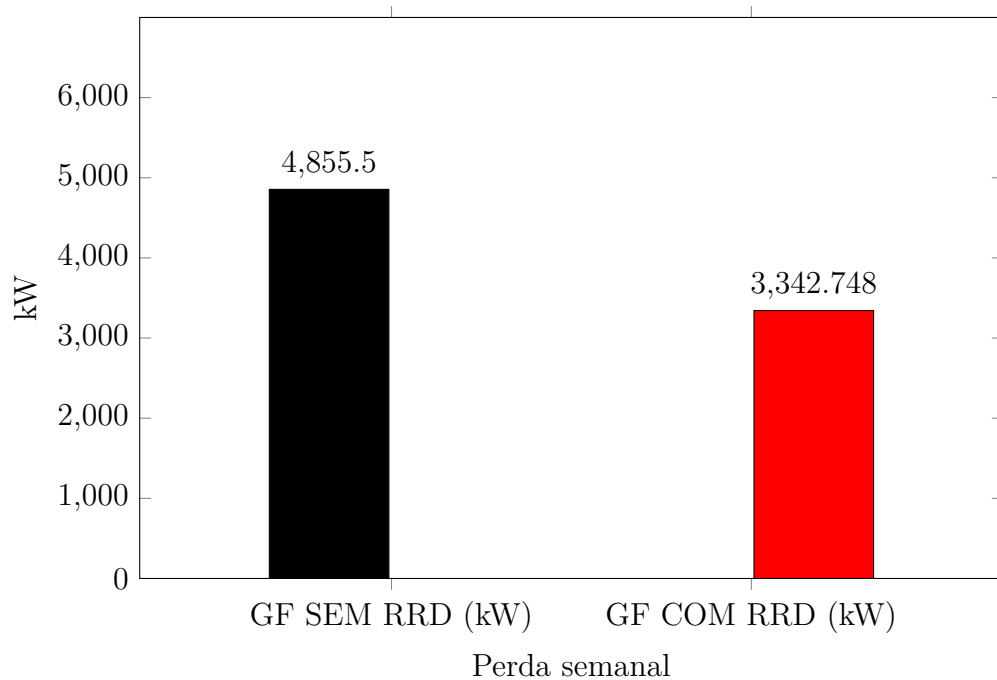


Figura 4.5 – Geração total de sistema de 33 barras para Caso A e Caso B semanal

Fonte: Autoria Própria (2024).

4.0.3 Análise Mensal

Os dados do cenário A, listados na coluna 2 da Tabela 4.6 revelam que as perdas totais de energia durante o período somaram 4856,439 kW, sem a presença do sistema de geração fotovoltaica.

Por outro lado, o cenário B, cujos resultados estão apresentados na coluna 3 da Tabela 4.6, foi implementado o sistema de geração fotovoltaica. O algoritmo indicou a abertura das chaves 7, 9, 14, 32 e 37. Com essa implementação, as perdas foram significativamente reduzidas para um total de 3345,408 kW.

Horas	Caso A Perdas (kW)	Caso B Perdas (kW)	Chaves
1	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
2	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
3	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
4	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
5	202,5896	139,4921	7 9 14 32 37
6	202,2881	139,244	7 9 14 32 37
7	202,011	139,0163	7 9 14 32 37
8	201,7753	138,9579	7 9 14 32 37
9	201,732	138,9082	7 9 14 32 37
10	201,6091	138,6863	7 9 14 32 37
11	201,784	138,8298	7 9 14 32 37
12	201,6971	138,7585	7 9 14 32 37
13	201,7046	140,5289	7 9 14 32 37
14	202,1927	139,4385	7 9 14 32 37
15	202,4872	139,4078	7 9 14 32 37
16	202,6294	139,5248	7 9 14 32 37
17	202,6612	139,551	7 9 14 32 37
18	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
19	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
20	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
21	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
22	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
23	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
24	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
Total	4856,439	3345,408	-

Tabela 4.6 – Análise Mensal para sistemas de 33 barras de dois casos

Fonte: Autoria Própria, (2024)

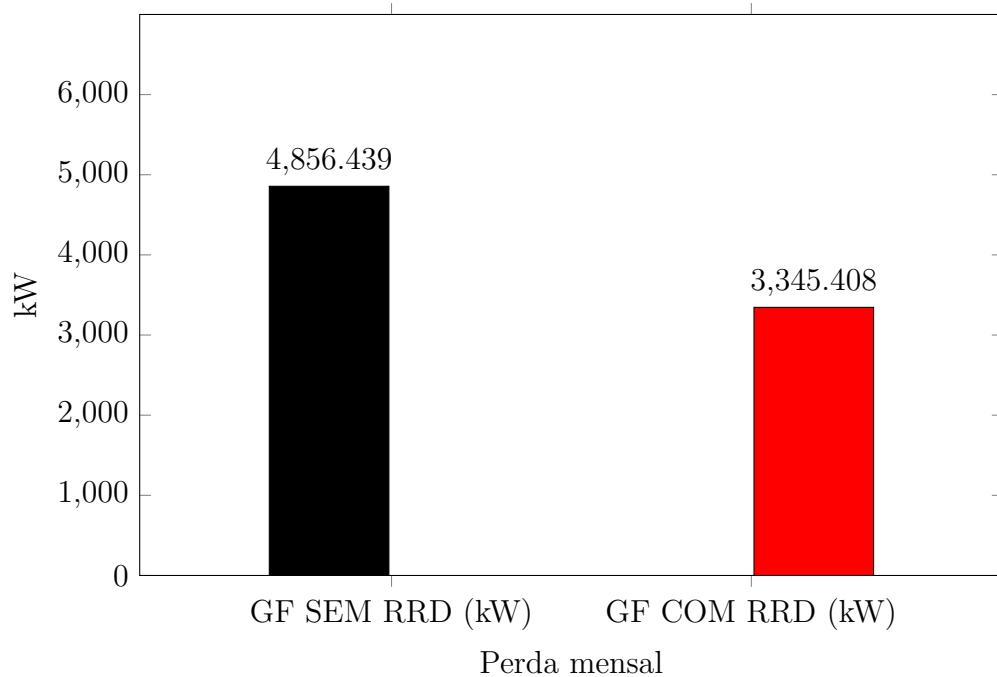


Figura 4.6 – Geração total de sistema de 33 barras para Caso A e Caso B mensal

Fonte: Autoria Própria (2024).

4.0.4 Análise anual

As informações relacionadas ao contexto A, exibidas na segunda coluna da Tabela 4.7, revelam que as perdas totais de energia no período estudado chegaram a 4859,648 kW, sem a presença de um sistema de produção de energia solar. É perceptível que o pico redundância de perdas ocorre às 12 horas, culminando em uma tensão mínima de 0,91316 pu.

No contexto B, conforme os dados na terceira coluna da Tabela 4.7, é introduzido um sistema de produção de energia solar. O algoritmo recomenda a ativação dos interruptores 7, 9, 14, 32 e 37. Com essa mudança, as perdas foram significativamente diminuídas para um total de 3347,599 kW. No entanto, é importante mencionar um pico de perdas às 12 horas, com a tensão atingindo 0,94144 pu.

Horas	Caso A Perdas (kW)	Caso B Perdas (kW)	Chaves
1	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
2	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
3	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
4	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
5	202,6214	139,5182	7 9 14 32 37
6	202,4876	139,4081	7 9 14 32 37
7	202,3439	140,0175	7 9 14 32 37
8	202,2252	139,476	7 9 14 32 37
9	202,1518	139,132	7 9 14 32 37
10	202,1084	139,0963	7 9 14 32 37
11	202,1316	139,1154	7 9 14 32 37
12	202,1487	139,388	7 9 14 32 37
13	202,1957	139,4421	7 9 14 32 37
14	202,2867	139,5468	7 9 14 32 37
15	202,4448	139,3729	7 9 14 32 37
16	202,5719	139,4775	7 9 14 32 37
17	202,6524	139,5437	7 9 14 32 37
18	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
19	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
20	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
21	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
22	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
23	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
24	202,6616	139,5513	7 9 14 32 37
Total	4859,648	3347,599	-

Tabela 4.7 – Análise anual para sistemas de 33 barras de dois casos

Fonte: Autoria Própria, (2024)

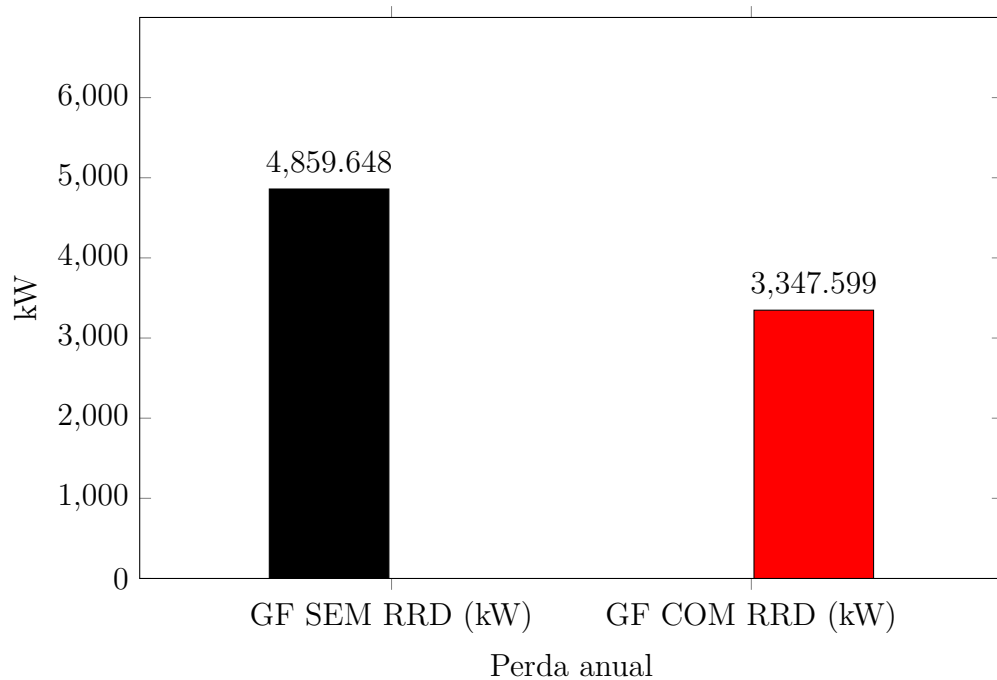


Figura 4.7 – Geração total de sistema de 33 barras para Caso A e Caso B anual

Fonte: Autoria Própria (2024).

Os gráficos demonstram claramente que a implementação da RRD no sistema reduz a necessidade de geração de energia ao longo de diferentes intervalos de tempo. A redução é evidente em todos os cenários, desde curtos períodos de 24 horas até um ano completo, indicando uma eficiência considerável na gestão de energia com o uso da RRD.

Na Tabela 4.8 é apresentado o perfil de tensões ao longo de um período de 24 horas para dois cenários diferentes, chamados de Caso A e Caso B. No Caso A, os valores de tensão estão na segunda coluna, expressos em p.u. Por outro lado, no Caso B, os valores de tensão podem ser encontrados na terceira coluna, igualmente em p.u, utilizando as mesmas referências.

Horas	Caso A	Caso B	Chaves
	Antes (p.u)	Depois (p.u)	
1	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
2	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
3	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
4	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
5	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
6	0,91312	0,93784	7 9 14 32 37
7	0,91314	0,93785	7 9 14 32 37
8	0,91315	0,94142	7 9 14 32 37
9	0,91316	0,93787	7 9 14 32 37
10	0,91316	0,93787	7 9 14 32 37
11	0,91316	0,93787	7 9 14 32 37
12	0,91316	0,94144	7 9 14 32 37
13	0,91315	0,94143	7 9 14 32 37
14	0,91314	0,9414	7 9 14 32 37
15	0,91313	0,93784	7 9 14 32 37
16	0,91312	0,93783	7 9 14 32 37
17	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
18	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
19	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
20	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
21	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
22	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
23	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
24	0,91311	0,93782	7 9 14 32 37
Total	21,9150	22,5223	-

Tabela 4.8 – Perfil de tensão para curva Anual

Fonte: Autoria Própria, (2024)

Observa-se que, ao longo das 24 horas, os valores de tensão no Caso A são de 0,91316 p.u entre 9h e 12h. No Caso B, os valores são de 0,93787 p.u no mesmo intervalo. Os valores de tensão do Caso B são consistentemente mais altos em comparação aos valores do Caso A, sugerindo uma melhora ou elevação na tensão após a reconfiguração.

A Figura 4.8 apresenta o gráfico da tensão em p.u em dois cenários, antes e depois da RRD para um sistema de 33 barras ao longo de um ano.

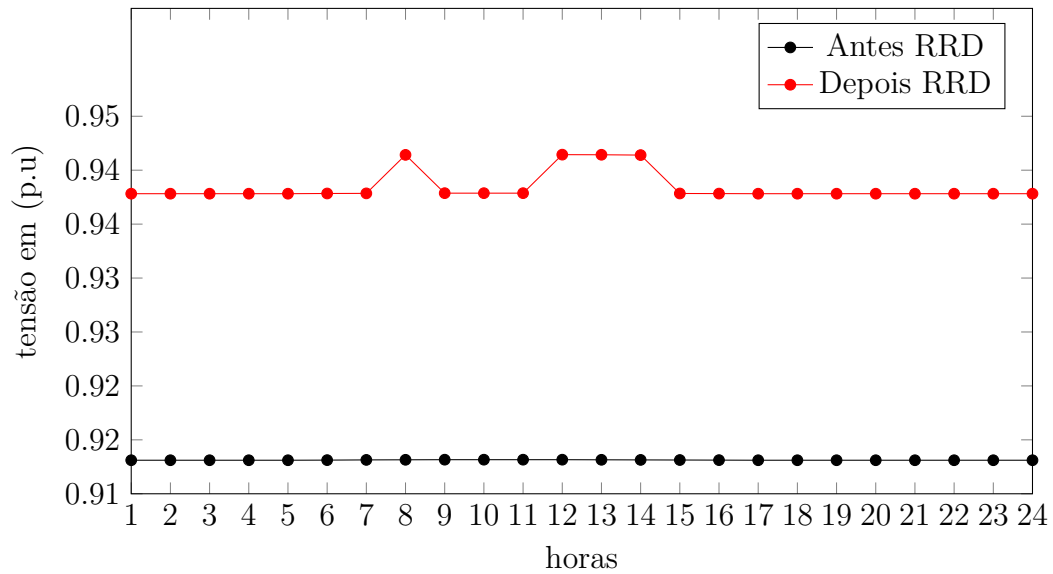


Figura 4.8 – Curva de tensão para sistema de 33 barras para Caso A e Caso B de anual

Fonte: Autoria Própria (2024).

Observa-se que a tensão antes da RRD é aproximadamente constante ao longo das 24 horas, em torno de 0,91 p.u. Após a implementação da RRD, houve um aumento cerca de 0,935 p.u, com um pico em torno da 8 horas, atingindo 0,94 p.u, sugerindo uma melhora no desempenho ou eficiência do sistema. Este aumento de valor de tensão, embora pequeno, mas pode ser significativo em termos de impacto na operação do sistema.

4.0.5 Custo e benefício

Os resultados obtidos na comparação entre os cenários A e B, através da metodologia proposta na pesquisa oferece benefícios significativos, incluindo a otimização da eficiência energética e a redução das perdas de energia na rede de distribuição, melhorando o perfil de tensão e a sustentabilidade da operação. Isso mostra que a vantagens da alocação de GF na rede incluem a diminuição das perdas energéticas e redução de custos operacionais ao longo do tempo. Além disso, a implementação do GF pode ser economicamente atrativa devido a incentivos fiscais e subsídios e contribui para práticas sustentáveis ao reduzir a dependência de fontes de energia não renováveis. Entretanto, no dois cenários utilizado, o sistema de geração fotovoltaica resultou em uma redução significativa das perdas de energia de 4,859.648 kWh para 3,347.599 kWh durante um ano, diminuindo aproximadamente 15% das perdas.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi realizada a otimização da rede de distribuição de energia elétrica com GF do campus da Aurora da UNILAB, utilizando a RRD com a meta-heurística PSO.

Foram analisados dois cenários, o sistema com GF e sem reconfiguração e o sistema reconfigurado com GF, considerando diferentes curvas de GF, incluindo diárias, semanais, mensais e anuais e função de 24h.

Os resultados obtidos com a metodologia RRD, quando aplicada ao sistema sem GF, mostraram-se consistentes com os encontrados na literatura. Isso valida a técnica do PSO quanto à confiabilidade dos resultados obtidos na otimização da rede de distribuição.

Entre os cenários analisados, destaca-se a minimização das perdas de energia e a melhoria do perfil de tensão. Além disso, quando o sistema é reconfigurado juntamente com os GF, as perdas são ainda mais reduzidas.

Os resultados mostram que integrar energias renováveis na rede elétrica traz muitos benefícios, como a melhoria da qualidade da tensão elétrica.

Os resultados mostram que a metodologia RRD oferece uma alternativa de otimização eficaz. Ela ajuda a reduzir perdas de energia e melhora a qualidade da tensão elétrica, o que significa menor custo com energia e manutenção para empresas concessionárias. Adotar essa metodologia pode ajudar as empresas a economizar, melhorar o serviço para os clientes e atuar de forma mais sustentável.

Portanto, para trabalhos futuros, serão utilizados a curva de carga, GF, e FP unitário e variável em sistemas de médio e grande porte.

REFERÊNCIAS

- ALVES, M. d. O. L. Energia solar: estudo da geração de energia elétrica através dos sistemas fotovoltaicos on-grid e off-grid. 2019. Disponível em: <<https://monografias.ufop.br/handle/35400000/2019>>.
- BERNARDON, D. P. Novos métodos para reconfiguração das redes de distribuição a partir de algoritmos de tomadas de decisão multicriteriais. 2007. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/3651/DANIEL%20BERNARDON.pdf?sequence=1>>.
- BEZERRA, F. D. Infraestrutura: Energia solar. Banco do Nordeste do Brasil, 2023. Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/1849/1/2023_CDS_295.pdf>.
- CARVALHO, M.; LUDERMIR, T. B.; LINEAR, T. de P. Otimização por enxames de partículas (pso). 2016. Disponível em: <https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=qT9HBnoAAAAJ&citation_for_view=qT9HBnoAAAAJ:eQOLeE2rZwMC>.
- CASTRO, N. d.; DANTAS, G.; TOMMASO, F.; CÂMARA, L. Impactos da geração distribuída na rede de distribuição de energia elétrica. Agência CanalEnergia, 2018. Disponível em: <https://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/53_castro195.pdf>.
- CERBRANORTE. **Dúvidas Frequentes**. Disponível em: <<https://cerbranorte.org/ferramentas-web/>>.
- ELÉTRICA, Q. C. A. de E. Agência nacional de energia elétrica-aneel. **Abril de**, 2005. Disponível em: <http://faturas.tbe.com.br/files/ecte_Contrato_Amazonense_042_2001.pdf>.
- ENERGÉTICA, E.-E. de P. Empresa de pesquisa energética. **Balanco energético nacional**, 2015. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf>.
- ENERGIA, S. . **Vantagens da energia solar residencial**. 2019. Disponível em: <<https://soleenergias.com.br/vantagens-energia-solar-residencial/>>.
- ENERGÉTICA, E. de P. **Plano Nacional de Energia - 2050**. 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>>.
- FILHO, L. O. P. et al. Reconfiguração de redes de distribuição utilizando algoritmo de busca tabu. Universidade Federal da Paraíba, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/22834/1/LuizOt%C3%A1vioPinheiroFilho_Dissert.pdf>.
- GEREZ CASSIO E SILVA, L. I. e. B. E. A. e. S. F. A. J. e. C. E. C. Reconfiguração da rede de distribuição usando algoritmo seletivo firefly e um critério de análise de fluxo de

carga para redução do espaço de busca. **IEEE Access**, IEEE, v. 7, p. 67874–67888, 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8720166>>.

GOMES, Y. R.; BELATI, E. A.; CASTILLA, H. A.; PINTO, F. R.; COSTA, L. P. Análise das meta-heurísticas sos e pso aplicadas ao problema de reconfiguração de rede de distribuição de energia elétrica. In: IEEE. **2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**. 2023. p. 997–1004. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10374727>>.

GOMES, Y. R.; BELATI, E. A.; VARGAS, R.; ROSSONI, P. Reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica com geração fotovoltaica utilizando fpa. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE**, v. 2, n. 1, 2022. Disponível em: <https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/sbse/article/view/2984>.

GUIMARÃES, C. **Controle e monitoramento de poluentes atmosféricos**. Elsevier Brasil, 2017. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=8K44DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP6&dq=Ela+n%C3%A3o+emite+poluentes+atmosf%C3%A9ricos+nem+contribui+para+o+aquecimento+global&ots=RZgys2g7dL&sig=FL6G048bt7SUNCD1-NfAMYc5Fqw&redir_esc=y#v=onepage&q=Ela%20n%C3%A3o%20emite%20poluentes%20atmosf%C3%A9ricos%20nem%20contribui%20para%20o%20aquecimento%20global&f=false>.

HASSANZADEHFARD, H.; JALILIAN, A. Optimal sizing and location of renewable energy based dg units in distribution systems considering load growth. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 101, p. 356–370, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061517300601?casa_token=5wVQrCOrDgQAAAAA:_DMmQqpP-NcEgvMe0hH4ATmccfX1qM4JRD42eX7cevAj7dtNcdKeKTEDQbmPe9Pg_44XcjcwxQ>.

KAZMI, S. A. A.; SHAHZAD, M. K.; SHIN, D. R. Multi-objective planning techniques in distribution networks: A composite review. **Energies**, MDPI, v. 10, n. 2, p. 208, 2017. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/10/2/208>>.

MACHADO, M. d. A. **A utilização do sistema de microgeração de energia no Brasil: uma análise da geração distribuída e do sistema net metering**. Dissertação (B.S. thesis), 2017. Disponível em: <<https://repositorio.furg.br/handle/1/7604>>.

MANITO, A.; GALHARDO, M.; FIGUEIREDO, G.; VASCONCELOS, F.; MACÊDO, W.; PINHO, J. Desenvolvimento de um sistemas de aquisição de dados para monitoração de um sistema fotovoltaico conectado à rede. In: . [S.l.: s.n.], 2010.

MANTOVANI, J. R.; CASARI, F.; ROMERO, R. A. Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. **Controle and Automacao**, p. 150–159, 2000. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/20ffb6ab-2a2b-43da-811f-46356fc8c16c/content>>.

MARIANO, J. D. et al. **Análise do potencial da geração de energia fotovoltaica para redução dos picos de demanda e contribuição energética nas edificações da UTFPR em Curitiba**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/2585>>.

MELLO, A. P. C. d. et al. Reconfiguração de redes de distribuição considerando multivariáveis e geração distribuída. Universidade Federal de Santa Maria, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8537/MELLO%2C%20ANA%20PAULA%20CARBONI%20DE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.

NASCIMENTO JAIRO, L. d. **Modelagem e validação de um sistema de geração fotovoltaica para avaliação de impactos da conexão em alimentador de distribuição.** Tese (Doutorado), 2021. Disponível em: <<https://www.repositorio.unilab.edu.br/jspui/bitstream/123456789/2228/1/JAIRO%20LIMA%20DO%20NASCIMENTO%20Disserta%C3%A7%C3%A3o%2017082021.pdf>>.

OLIVEIRA, M. B. C. d. Reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição usando a metaheurística grasp. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2011. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/289-dissertacao_marlon_borges.pdf>.

PEGADO, R. d. A. et al. Reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica usando otimização por enxame de partículas aprimorado. Universidade Federal da Paraíba, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/17174>>.

PORTAL, S. O que é energia solar. **Acesso em**, v. 15, n. 03, p. 202013–2014, 2020. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/como-funciona-energia-solar.html>>.

SOUTO, V. D. P.; GOMES, N. R.; CAMPOS, A. Otimização dos lóbulos secundários de um arranjo linear de antenas utilizando a técnica de otimização por enxame de partículas. **Revista Ciência e Tecnologia**, v. 20, n. 36, 2017. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialoptimiz/pagina_2.asp>.

SÍNDICO, J. do. **Sistema fotovoltaico Conectado a rede.** 2021. Disponível em: <<https://jornaldosindicobsb.com.br/sistema-fotovoltaico-conectado-a-rede/>>.

UNILAB.EDU.BR/CAMPI. **Campus das Auroras.** 2018. Disponível em: <<https://unilab.edu.br/nossos-campi/>>.

ZANCHETTA, L. P. Reconfiguração de redes de distribuição de energia com geração distribuída empregando conceitos de redes elétricas inteligentes. 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/128061/TCC%20-%20VF%20-%20Lucas%20P.%20Z%20-%20FINAL%20AJUSTADO.pdf?sequence=1>>.

APÊNDICE A –

Horas	24h de 02 de Janeiro	Média semanal	Média mensal	Média anual
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00
5	1,38	1,54	1,63	0,91
6	5,76	8,25	8,47	3,94
7	13,02	14,44	14,78	7,20
8	20,08	21,67	20,17	9,90
9	13,88	20,15	21,16	11,57
10	23,23	24,10	23,98	12,56
11	16,32	21,92	19,97	12,03
12	22,11	21,91	21,96	11,64
13	26,80	22,35	21,79	10,57
14	20,60	18,86	18,23	8,50
15	12,99	11,00	10,64	4,91
16	4,83	4,16	3,95	2,03
17	0,12	0,27	0,73	0,91
18	0,00	0,00	0,01	0,21
19	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,00	0,00	0,00	0,00
24	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela A.1 – Médias de Geração FV

Fonte: Autoria Própria, 2024

Horas	1/01	2/01	3/01	4/04	5/01	6/01	7/01
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,58	1,38	1,09	1,30	2,36	2,05	2,06
6	4,70	5,76	9,68	7,00	10,14	7,85	12,58
7	6,23	13,02	10,82	18,15	17,80	16,68	18,38
8	13,53	20,08	24,35	28,23	22,58	22,20	20,72
9	13,00	13,88	25,17	24,48	19,22	23,04	22,23
10	15,54	23,23	24,23	23,93	27,28	24,26	30,22
11	13,48	16,32	29,90	22,33	19,28	27,24	24,89
12	14,44	22,11	22,71	23,63	19,57	25,14	25,77
13	15,02	26,80	18,15	25,39	24,46	26,61	20,01
14	10,39	20,60	17,98	19,93	19,55	21,45	22,15
15	5,76	12,99	8,07	7,42	18,43	11,12	13,25
16	1,78	4,83	2,48	1,88	8,10	6,48	3,56
17	0,04	0,12	0,12	0,10	0,58	0,89	0,07
18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela A.2 – Geração FV semanal em Janeiro

Fonte: Autoria Própria, 2024

Dia	Horas																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,58	4,70	6,23	13,53	13,00	15,54	13,48	19,78	19,33	16,63	17,60	18,68	15,38	18,38	16,80	14,80	15,25	17,35	15,15	15,33
2	0,00	0,00	0,00	0,00	1,38	5,76	13,02	20,08	13,88	23,23	16,32	25,95	18,00	16,70	22,30	21,63	21,65	16,80	16,02	16,88	16,78	14,62	16,18	15,92
3	0,00	0,00	0,00	0,00	1,09	9,68	10,82	24,35	25,17	24,23	29,90	30,18	28,60	25,10	27,30	25,60	23,00	26,88	23,85	22,75	21,08	22,73	20,20	20,95
4	0,00	0,00	0,00	0,00	1,30	7,00	18,15	28,23	24,48	23,93	22,33	25,88	20,80	20,20	23,45	22,50	22,00	21,90	23,90	20,33	22,43	18,90	17,00	20,43
5	0,00	0,00	0,00	0,00	2,36	10,14	17,80	22,58	19,22	27,28	19,45	26,65	19,20	21,95	23,27	21,07	18,58	23,63	19,98	18,92	18,45	17,12	17,22	19,32
6	0,00	0,00	0,00	0,00	2,05	7,85	16,68	22,20	23,04	24,26	21,17	28,74	20,32	23,88	20,98	21,12	22,18	23,34	23,70	18,52	20,34	20,76	20,40	18,46
7	0,00	0,00	0,00	0,00	2,06	12,58	18,38	20,72	22,23	30,22	19,43	31,18	20,73	21,20	27,50	24,75	24,75	20,45	23,88	22,43	24,68	23,48	22,08	21,13
8	0,00	0,00	0,00	0,00	1,63	6,78	18,39	22,93	26,83	24,46	16,65	32,58	17,05	19,90	23,10	22,88	20,85	23,93	24,43	22,03	23,05	20,88	21,78	21,10
9	0,00	0,00	0,00	0,00	1,79	5,33	15,51	10,87	17,73	27,54	27,61	29,18	19,13	24,13	24,20	20,33	19,00	20,67	21,43	23,21	19,23	18,41	19,21	17,61
10	0,00	0,00	0,00	0,00	1,43	5,30	12,57	18,53	7,73	18,16	12,52	18,82	15,20	11,64	17,84	20,36	13,77	13,09	12,36	14,23	15,86	12,36	12,41	11,55
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,13	5,72	16,84	19,78	20,05	21,87	20,79	18,60	23,17	21,60	22,50	18,05	22,28	21,18	21,50	19,05	20,45	19,55	18,13
12	0,00	0,00	0,00	0,00	3,26	12,46	15,18	24,10	20,48	24,98	17,87	27,08	20,07	19,57	23,50	22,73	23,98	21,53	22,60	20,93	21,83	17,03	18,80	19,00
13	0,00	0,00	0,00	0,00	1,875	9,417	15,550	23,667	19,417	22,733	20,417	26,850	21,417	19,117	22,733	20,833	22,667	20,317	19,917	20,950	21,700	18,917	18,533	19,567
14	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	6,53	8,12	17,94	19,38	31,94	26,31	22,69	15,13	23,38	26,38	22,56	23,81	26,00	21,06	21,13	21,25	22,88	21,69	22,44
15	0,00	0,00	0,00	0,00	1,03	4,00	11,63	15,60	20,22	27,52	22,94	25,97	20,14	20,70	24,55	25,67	22,28	22,20	24,28	21,86	20,90	22,28	22,67	21,10
16	0,00	0,00	0,00	0,00	2,34	5,99	7,71	10,43	13,93	14,28	13,89	14,34	10,39	12,33	16,44	14,11	15,56	13,72	13,17	12,72	11,89	12,39	12,11	12,17
17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,90	9,40	19,57	17,50	22,16	26,19	18,65	24,20	18,43	19,47	22,16	21,94	22,34	20,97	22,15	20,06	18,78	19,03	16,86	19,71
18	0,00	0,00	0,00	0,00	1,96	7,59	11,96	14,24	23,78	19,58	17,22	21,82	15,00	15,24	22,10	19,32	19,48	18,93	17,34	18,17	18,88	17,76	18,32	15,95
19	0,00	0,00	0,00	0,00	1,13	23,68	22,00	15,83	21,29	22,73	22,07	23,62	18,41	20,55	24,43	21,47	23,89	21,33	19,42	19,67	22,14	19,50	18,86	19,24
20	0,00	0,00	0,00	0,00	2,13	4,78	13,49	18,97	21,58	21,04	20,41	22,88	19,00	17,98	21,67	21,60	19,84	20,03	19,30	19,54	20,45	17,15	18,47	17,97
21	0,00	0,00	0,00	0,00	1,46	10,74	13,23	20,03	19,18	20,51	19,73	26,41	20,07	23,17	22,33	22,53	21,13	20,83	20,63	20,27	21,30	19,83	19,57	18,13
22	0,00	0,00	0,00	0,00	1,43	10,18	23,13	26,99	27,13	21,60	18,31	24,14	19,10	18,64	20,53	17,71	19,53	17,36	16,86	17,14	16,21	16,29	15,90	16,21
23	0,00	0,00	0,00	0,00	1,43	10,35	8,58	16,48	30,76	17,60	21,86	25,50	21,70	21,87	24,16	19,33	17,26	18,24	18,79	18,16	18,73	18,16	17,32	19,53
24	0,00	0,00	0,00	0,00	2,93	13,82	33,57	42,13	24,43	34,94	27,53	35,59	22,00	21,44	33,59	27,09	28,87	24,21	25,47	22,62	22,71	23,57	22,37	22,44
25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,53	2,86	4,95	8,19	16,91	19,79	21,50	12,08	11,69	17,60	16,08	16,35	14,04	11,69	12,58	14,00	13,12	12,58	13,08
26	0,00	0,00	0,00	0,00	7,35	29,32	33,61	43,20	50,27	44,65	32,00	39,73	23,55	30,70	39,73	34,41	33,55	28,82	27,55	26,91	26,32	24,68	24,05	24,27
27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,49	6,85	19,74	27,21	23,03	21,43	20,60	26,86	20,21	18,64	23,60	23,10	20,10	20,14	21,21	19,03	20,14	19,14	18,17	20,00
28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,88	6,69	15,37	16,16	20,53	21,23	17,03	28,05	18,21	18,71	23,03	20,03	19,03	19,89	18,03	18,08	17,03	17,18	17,18	16,39
29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,74	7,98	17,22	25,63	22,76	28,93	27,88	25,89	20,98	20,34	23,71	20,45	21,84	22,21	22,08	21,39	20,29	18,63	19,00	19,50
30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	2,04	4,58	5,98	21,04	21,11	25,37	22,92	18,14	19,89	22,64	20,07	19,11	17,54	16,57	18,79	18,00	19,07	17,43	18,11
31	0,00	0,00	0,00	0,00	1,20	3,86	8,00	17,50	13,24	24,67	19,52	27,31	22,80	19,72	24,67	23,83	20,24	23,64	18,60	22,62	21,21	19,31	20,31	19,11

Tabela A.4 – Geração FV mensal de janeiro

Fonte: Autoria Própria, 2024

Horas	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	1,50	0,88	1,30	0,88	0,89	0,16	0,01	1,02	0,99	1,07	1,16	1,04
6	7,83	5,22	7,01	3,74	2,50	0,43	0,05	4,15	4,24	3,93	4,28	3,91
7	13,49	10,77	12,20	6,35	4,15	0,69	0,10	8,40	7,79	7,22	7,91	7,38
8	18,42	15,61	18,22	8,30	5,89	1,02	0,15	11,82	9,88	9,51	10,20	9,73
9	19,25	18,59	22,34	9,45	7,21	1,62	0,18	13,02	12,43	11,18	12,26	11,29
10	22,13	19,85	23,27	10,50	7,96	1,71	0,18	13,97	13,31	11,83	13,08	12,94
11	18,20	20,10	19,70	9,57	7,90	1,72	0,17	14,21	13,42	12,22	13,73	13,43
12	20,36	19,05	16,76	9,66	8,07	1,60	0,16	12,87	11,82	12,65	13,38	13,37
13	20,03	17,70	15,40	7,96	7,30	1,53	0,13	11,14	10,40	11,09	12,39	11,83
14	17,03	16,63	12,12	7,03	6,64	0,89	0,09	7,46	7,83	8,17	9,19	8,95
15	9,79	11,29	6,79	5,15	5,72	0,17	0,02	2,52	3,65	4,00	4,90	4,98
16	3,52	5,26	2,04	3,23	6,11	0,04	0,00	0,31	0,69	0,76	1,23	1,18
17	0,68	1,46	0,21	2,41	6,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,04	0,03
18	0,01	0,17	0,01	0,96	1,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela A.5 – Geração FV Anual

Fonte: Autoria Própria, 2024

APÊNDICE B –



OTIMIZAÇÃO DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM GERAÇÃO FOTOVOLTAICA DA UNILAB DE CAMPUS DE AURORAS

Esmiraldo Gomes Cá
Sabi Yari Moïse Bandiri
Yanick Rodolfo Gomes

RESUMO

A modernização do sistema elétrico, impulsionada pela penetração de fontes renováveis como Geração Fotovoltaica (GF) e Geração Eólica (GE), apresenta desafios para as concessionárias. A intermitência dessas fontes exige garantia de estabilidade e confiabilidade no fornecimento de energia. O estudo propõe otimizar a Rede de Distribuição de Energia Elétrica (RDEE) com GF na UNILAB, Ceará, usando a Reconfiguração de Rede de Distribuição de Energia Elétrica (RRDEE). Essa técnica econômica minimiza perdas de energia, buscando a melhor configuração através da manipulação de chaves seccionadoras. A alocação simultânea de Geração Distribuída (GD) com a RRDEE promove sustentabilidade. O problema complexo da RRDEE é abordado com o algoritmo de Enxame de Partículas (PSO), considerando todas as restrições do sistema. A validação foi feita em um sistema de 33 barras e 37 linhas, reduzindo mais de 60% das perdas de energia. Esse trabalho contribuirá para a pesquisa em otimização de redes de distribuição com fontes renováveis, auxiliando na transição energética. Os resultados podem beneficiar pesquisadores e profissionais da área de energia renovável e eficiência energética.

Palavras-Chave: Reconfiguração de Rede de Distribuição de Energia Elétrica; Geração Fotovoltaica; PSO; Perdas de Energia.

ABSTRACT

The modernization of the electrical system, driven by the penetration of renewable sources such as Photovoltaic Generation (GF) and Wind Generation (GE), presents challenges for concessionaires. The intermittency of these sources requires a guarantee of stability and reliability in the energy supply. The study proposes to optimize the Electricity Distribution Network (RDEE) with GF at UNILAB, Ceará, using the Electricity Distribution Network Reconfiguration (RRDEE). This economical technique minimizes energy losses, seeking the best configuration through the manipulation of disconnector switches. The simultaneous allocation of Distributed Generation (DG) with RRDEE promotes sustainability. The complex RRDEE problem is approached with the Particle Swarm Algorithm (PSO), considering all system constraints. Validation is carried out on a system with 33 bars and 37 lines, reducing energy losses by more than 60%. This work will contribute to research into



Optimization of the Electric Distribution Network with Photovoltaic Generation: Application of PSO for Reconfiguration in Intermittent Scenarios

1st Esmiraldo. G. Cá
*Universidade da Integração
Internacional da Lusofonia
Afro-Brasileira- UNILAB,
esmiraldogomesca1@gmail.com*

2nd Yanick. R. Gomes
*Universidade do ABC - UFABC
yanickyanirce@gmail.com*

3rd Sabi Y.M. BANDIRI
*Universidade da Integração
Internacional da Lusofonia
Afro-Brasileira- UNILAB,
bandiri@unilab.edu.br*

5th Ramon M. Martins
*Instituto Federal
de Santa Catarina - IFSC,
ramon.mayor@ifsc.edu.br*

4th Danilo H. Spadoti
*Universidade Federal
de Itajubá - UNIFEI,
spadoti@unifei.edu.br*

6th Tales C. Pimenta
*Universidade Federal
de Itajubá - UNIFEI,
tales@unifei.edu.br*

Abstract—The modernization of electrical systems, driven by the increasing integration of renewable energy sources such as Photovoltaic Generation (PVG) and Wind Generation (WG), presents challenges of the stability of the Electrical Distribution Network (EDN). This work proposes the Distribution Network Reconfiguration (DNR) of the Auroras campus, Ceará, using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm to optimize the EDN with PV generation. The methodology was tested on a 33-bus and 37-line system, considering different scenarios and PVG generation curves over 24 hours. The results show a significant reduction in energy losses, from 4859.648 kWh to 3347.599 kWh per year, approximately 15%, proving the effectiveness of the methodology used.

I. INTRODUCTION

Currently, electricity is essential for the operation of almost every area of modern society. However, with the growing recognition of the environmental impacts of traditional energy sources, such as fossil fuels, the urgency to find alternatives that ensure efficient and sustainable supply. In this context, the incorporation of Distributed Generation (DG), such as Photovoltaic Generation (PVG) and other forms of Energy Generation (EG), emerges as one of the main solutions in the current energy transition.

The Distribution Network Reconfiguration (DNR) is a procedure aimed at optimizing the performance of an electrical network. It involves altering the network configuration, often by opening and closing sectionalizing switches at strategic points. This action allows the network topology to be modified to optimize energy distribution more efficiently [1].

In Brazil, the National Energy Plan (PNE) 2050 describes the energy transition as a gradual process of replacing non-renewable sources with renewable ones, with the goal of reducing greenhouse gas emissions to levels close to 0%. Although there is no specific government policy for this transition yet, the plan outlines several guidelines and programs that have driven the growth of the energy sector in the country.

Distributed Generation (DG) emerges as an alternative to increase the efficiency, reliability, and sustainability of the electrical system. DG involves the installation of small generators near load centers, using renewable or conventional energy sources. DG can reduce network losses, alleviate congestion, improve voltage and frequency, diversify the energy matrix, decrease dependence on large power plants, and encourage consumer participation in energy generation [2].

In this scenario, the University for International Integration of the Afro-Brazilian Lusophony (UNILAB) has been promoting the use of renewable energy sources, with a focus on Photovoltaic Generation as a sustainable and environmentally responsible alternative. PVG generation stands out for not emitting atmospheric pollutants or contributing to global warming, making it an attractive choice for the institution [3].

However, the simple installation of photovoltaic systems in electrical grids is not enough to guarantee all the benefits of this technology. It is essential to conduct grid capacity studies, proper planning, and effective control of photovoltaic systems, ensuring the reduction of non-renewable source dependence, the decrease of greenhouse gas emissions, and the optimization of energy costs, as shown in citation [4].

Therefore, electricity generation through photovoltaic panels, in certain cases, becomes a viable alternative when analyzing remote communities with difficult access to power lines and electrical distribution networks. However, the increasing penetration of distributed photovoltaic generation, in particular, brings significant impacts on electrical grid parameters, such as power flow, technical losses, power factor, and voltage levels [5]. Additionally, it can cause imbalances between energy supply and demand, especially during peak hours, directly affecting the configuration and operation of system components [6].

Among DG sources, photovoltaic (PV) solar energy stands out for its great potential and technical and economic viability. Using solar radiation to produce electricity through semicon-

Figura B.2 – Arigo aprovado no LASCAS 2025

Fonte: ufrgs.br/lascas (2024)