

# Análise comparativa do fluxo de potência no ANAREDE e no OpenDSS para a modelagem de um sistema de distribuição de energia elétrica real com a presença de uma usina fotovoltaica

Matheus Dantas de Lucena\* Victor Lhincio Sales Brito\*\*  
Marcelo Renato de Cerqueira Paes Junior\*\*  
Núbia Silva Dantas Brito\*\*\*

\* *Doutorando, Laboratório de Sistemas de Potência - LSP,  
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, PB  
(e-mail: matheus.lucena@ee.ufcg.edu.br)*

\*\* *Engenheiro, Energisa Paraíba, João Pessoa, PB*

\*\*\* *Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, PB*

---

**Abstract:** A comparative analysis of the calculation of the power flow of a real electrical energy distribution system modeled in ANAREDE and OpenDSS with the presence of a photovoltaic power plant is carried out. Data from Energisa Paraíba's western regional system were used. It was found that the modeling of a distribution system in ANAREDE presented results similar to those obtained in OpenDSS, due to the reduced loads and dimensions of the system. However, the good results were restricted to the calculation of power losses, given that only OpenDSS presents the calculation of energy losses. Finally, the efficiency of the installation of the Malta Power Plant was evaluated, corroborating the fact that distributed generation, depending on the installed power, can collaborate with the reduction of power and energy losses.

**Resumo:** É realizada uma análise comparativa do cálculo do fluxo de potência de um sistema de distribuição de energia elétrica real modelado no ANAREDE e no OpenDSS com a presença de uma usina fotovoltaica. Foram utilizados dados do sistema da regional oeste da Energisa Paraíba. Constatou-se que a modelagem de um sistema de distribuição no ANAREDE apresentou resultados semelhantes aos obtidos no OpenDSS, devido às cargas e dimensões reduzidas do sistema. Contudo, os bons resultados ficaram restritos ao cálculo das perdas de potência, haja vista que apenas o OpenDSS apresenta o cálculo das perdas de energia. Por fim, a instalação da Usina de Malta teve sua eficiência avaliada, corroborando com o fato de que a geração distribuída, a depender da potência instalada, pode colaborar com a redução das perdas de potência e de energia.

*Keywords:* ANAREDE; energy losses; OpenDSS; photovoltaic power plant; real electric system.

*Palavras-chaves:* ANAREDE; OpenDSS; perdas de energia; sistema real; usinas fotovoltaicas.

---

## 1. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda de potência no sistema elétrico, tem aumentado a preocupação quanto à adequação do mesmo para a absorção dessas novas cargas, principalmente no que diz respeito à Geração Distribuída (GD). Pelo fato da GD ser definida como sendo centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência (podendo incluir as Usinas Fotovoltaicas (UFV), cujas potências são superiores a 5 MW), com instalações conectadas diretamente em um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) ou através de instalações de consumidores (ANEEL, 2008).

O impacto da instalação de uma UFV pode ser avaliado no cálculo do fluxo de potência mediante análise de perdas. Um estudo de fluxo de potência pode envolver diversos tipos de análise, como verificação de perfil de tensão e de carregamento de circuitos e avaliação do efeito de desligamentos.

Os métodos convencionais de cálculo de fluxo de carga utilizados no ANAREDE, Newton-Raphson e desacoplado rápido, não apresentam desempenho adequado no caso de SDEE. Tal fato resulta de características particulares das redes de distribuição, como: a elevada relação  $R/X$  dos circuitos, topologia predominantemente radial e alto carregamento. Estas características podem afetar a convergência dos métodos convencionais de solução, exigindo um grande número de iterações e/ou causando divergência do processo iterativo (CEPEL, 2021).

Já o OpenDSS resolve circuitos radiais com facilidade, utilizando dois tipos básicos de solução de fluxo de potência: iterativo ou solução direta. Para o iterativo, elementos não lineares são tratados como fontes de injeção. Na solução direta, eles são incluídos como admitâncias na matriz de admitância do sistema, que é então resolvida diretamente sem iteração (Dugan, 2020). Além disso, no OpenDSS é possível realizar o cálculo das perdas de energia.

Dentro desse contexto apresenta-se neste trabalho uma análise comparativa entre a modelagem de um SDEE com a presença de uma UFV no ANAREDE e no OpenDSS. Um resumo das características de cada um dos *softwares* é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Resumo - ANAREDE e OpenDSS.

Característica	OpenDSS	ANAREDE
Modelagem dos equipamentos	✓	✓
Cálculo do fluxo de potência	✓	✓
Método do fluxo de potência	Iterativo ou Solução Direta	Newton
Tensão nas barras	✓	✓
Perdas de potência	✓	✓
Perdas de energia	✓	-
Adequado para SDEE	✓	-
Cargas desequilibradas	✓	-

Análise do estado da arte mostrou que a realização de pesquisas relacionadas com o tema UFV ainda é incipiente quando comparadas com a GD propriamente dita.

Do ponto de vista histórico, análise do estado da arte mostrou que os trabalhos mais relevantes referentes a UFV começaram a ser publicados a partir dos anos 2000, com destaque para os trabalhos de Thong et al. (2007); Kato and Suzuoki (2009); Paes (2014); Anwarzai and Nagasaka (2017); Merrouni et al. (2018); Ramadan et al. (2019); Rediske et al. (2019); Obeng et al. (2020); El-Hafez et al. (2022). Esse fato corroborou a motivação em tratar desse tema, em particular, em realizar uma comparação da modelagem de um SDEE de 69 kV com uma UFV no ANAREDE e no OpenDSS, visando os resultados das perdas de energia.

O artigo foi organizado em 7 seções, incluindo essa seção introdutória. Na seção 2, os fundamentos da energia solar fotovoltaica; nas seções 3 e 4 são apresentados os softwares utilizados para o cálculo do fluxo de potência; na seção 5 é apresentada a metodologia; na seção 6 são apresentados e discutidos os resultados obtidos e, por fim, as conclusões do trabalho são apresentadas na seção 7.

## 2. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O termo energia solar se refere à energia proveniente da radiação emitida pelo Sol em direção à Terra (CRE-SESB/CEPEL, 2013). O processo de conversão de energia elétrica a partir da energia solar pode se dar de duas formas: heliotérmica, na qual a irradiação solar é convertida inicialmente, em energia térmica e posteriormente, em energia elétrica; e a fotovoltaica (FV), na qual a irradiação solar é convertida diretamente em energia elétrica.

A produção de energia FV constitui, atualmente, uma das técnicas de geração de energia elétrica mais promissoras, devido a: baixo impacto ambiental e índice de manutenção, alta confiabilidade, pode ser instalada junto ao ponto de consumo, energia silenciosa e sistema modular.

Um sistema FV, conforme apresentado na Figura 1, é composto por um conjunto de painéis fotovoltaicos (PFV), sendo cada painel constituído de módulos FV. Um módulo FV é composto de células FV, as quais são os dispositivos que realizam a conversão direta da luz solar em energia elétrica por meio do efeito FV (Lucena et al., 2020).

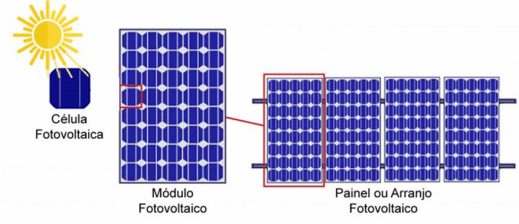


Figura 1. Composição de um sistema FV.

Os estudos relacionados com a energia FV requerem a construção de um modelo da célula FV. Na Figura 2 é apresentado o diagrama de blocos do elemento *PVSystem* modelado no OpenDSS, que combina o PFV e o inversor.

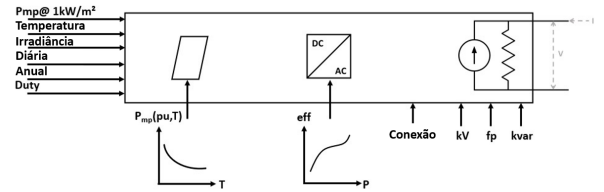


Figura 2. Diagrama de blocos do modelo do sistema FV. Fonte: Freitas (2015).

Basicamente, o modelo possui uma potência ativa injetada no ponto de interconexão,  $P(t_0)$ , a qual é função da irradiação, da temperatura, da eficiência do conversor, da tensão da rede e da potência nominal do painel no ponto de máxima potência ( $P_{mp}$ ). O valor da potência na saída do painel,  $P(t_0)$ , é calculada conforme (1):

$$P(t_0) = P_{mp} \cdot \text{ird}_{(\text{pu})(t_0)} \cdot \text{ird}_{(\text{base})} \cdot P_{mp(\text{pu}, T(t_0))}, \quad (1)$$

onde  $P(t_0)$  é a potência na saída do painel,  $P_{mp}$  é a potência no ponto de máxima potência,  $\text{ird}_{(\text{pu})(t_0)}$  é o valor da irradiação no instante  $t_0$ ,  $\text{ird}_{(\text{base})}$  é o valor máximo da irradiação e  $P_{mp(\text{pu}, T(t_0))}$  é o fator de correção do  $P_{mp}$  em função da temperatura no instante  $t_0$ . A potência ativa fornecida é apresentada em (2):

$$P_{\text{saída}}(t) = P(t_0) \cdot \text{ef}(P(t_0)), \quad (2)$$

sendo  $\text{ef}(P(t_0))$  a eficiência do inversor para um dada potência de saída.

O fato de utilizar o próprio modelo de GFV faz com que o cálculo do fluxo de potência seja mais rápido. Além disso, o OpenDSS pode importar os dados de modelagem de outros *softwares*, resultando numa formulação mais precisa.

## 3. ANAREDE

O ANAREDE é composto por um abrangente conjunto de funções de análise de sistemas elétricos de potência em regime permanente que inclui fluxo de potência, análise de contingências, análise de sensibilidade de tensão e fluxo, entre outras (CEPEL, 2023). O programa é voltado a estudos de acesso de empreendimentos de geração e transmissão, além de estudos de planejamento da operação e da expansão do Sistema Interligado Nacional (SIN).

O ANAREDE tem como núcleo um módulo de solução de fluxo de potência que utiliza o método *full* Newton. Em torno desse módulo, foram desenvolvidas outras funções de análise de redes que permitem utilizar o programa tanto em um estudo de acesso de um pequeno empreendimento quanto em estudos de planejamento da operação do SIN.

### 3.1 Fluxo de Potência no ANAREDE

O processo iterativo do cálculo do estado operativo da rede elétrica para as condições impostas consiste na obtenção, de forma alternada, de soluções para o sistema de corrente alternada (CA) e para o sistema de corrente contínua (CC), até que as variações, entre iterações consecutivas, das potências injetadas na rede CA pela rede CC sejam menores que uma determinada tolerância (CEPEL, 2021).

O primeiro passo do processo de solução é a determinação do estado operativo do sistema CC para as condições iniciais estabelecidas. Nos passos seguintes os sistemas CA e CC são solucionados alternadamente até a obtenção da convergência da interface entre estes sistemas (CEPEL, 2021). Dois métodos estão disponíveis para a solução das equações da rede elétrica CA:

#### A) Método de Newton

Para a resolução de um fluxo de potência via Método de Newton, leva-se em consideração a formulação matemática de um problema de fluxo de potência convencional, a qual consiste na aplicação de duas equações para cada barra, representando a conservação de potência ativa e reativa, ou seja, a potência injetada em uma barra é igual a potência consumida pelos elementos conectados a ela:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m), \quad (3)$$

$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m). \quad (4)$$

sendo:  $P_k$  a potência ativa e  $Q_k$  a potência reativa;  $\Omega_k$  o conjunto das barras vizinhas da barra  $k$ ;  $|V_k|, |V_m|$  as amplitudes das tensões das barras terminais do ramo  $k$  e  $m$ ;  $\theta_k, \theta_m$  os ângulos das tensões das barras terminais do ramo  $k$  e  $m$ ;  $P_{km}(Q_{km})$  o fluxo de potência ativa (reativa) no ramo  $k$  e  $m$  e  $Q_{km}^{sh}$  a componente de injeção de potência reativa devida ao elemento *shunt* da barra  $k$ .

As injeções de potências ativas  $P_k$  e reativas  $Q_k$  são determinadas por:

$$P_k = |V_k| \cdot |V_n| \cdot |Y_{kn}| \cdot \cos(\theta_{kn} - \delta_k + \delta_n). \quad (5)$$

$$Q_k = |V_k| \cdot |V_n| \cdot |Y_{kn}| \cdot \sin(\theta_{kn} - \delta_k + \delta_n). \quad (6)$$

Resumidamente, o algoritmo de Newton-Raphson é calculado mediante a seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{P}^{(k)} \\ \Delta \bar{Q}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^{(k)} & N^{(k)} \\ M^{(k)} & L^{(k)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \bar{\delta}^{(k)} \\ \Delta \bar{V}^{(k)} \end{bmatrix} \quad (7)$$

sendo  $\Delta P^{(k)}$  e  $\Delta Q^{(k)}$  vetores de resíduos de potência ativa e reativa, respectivamente.

Já os elementos da matriz Jacobiana ( $H$ ,  $N$ ,  $M$  e  $L$ ) são as derivadas parciais de (5) e (6), avaliadas em  $\Delta \delta^{(k)}$  e  $\Delta V^{(k)}$  (Monticelli, 1983).

#### B) Método Desacoplado Rápido

Em geral, as linhas de transmissão (LT) tem uma baixa relação  $R/X$ , e para tais sistemas as variações na potência ativa  $\Delta P$  são menos sensíveis à variação na magnitude da tensão e mais sensíveis à variação angular  $\Delta \delta$ . Similar à potência ativa, a potência reativa é mais sensível a variação na magnitude da tensão e menos sensível a

variação angular. Tendo isto em vista, é possível igualar os elementos N e M da matriz do jacobiano e (7) se torna:

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{P}^{(k)} \\ \Delta \bar{Q}^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^{(k)} & 0 \\ 0 & L^{(k)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \bar{\delta}^{(k)} \\ \Delta \bar{V}^{(k)} \end{bmatrix} \quad (8)$$

De maneira que

$$\Delta \bar{P}^{(k)} = H^{(k)} \cdot \Delta \bar{\delta}^{(k)} = \frac{\partial P}{\partial \delta} \cdot \Delta \bar{\delta}^{(k)} \quad (9)$$

e

$$\Delta \bar{Q}^{(k)} = L^{(k)} \cdot \Delta \bar{V}^{(k)} = \frac{\partial Q}{\partial V} \cdot \Delta \bar{V}^{(k)} \quad (10)$$

Devido a (9) e (10), a matriz pode ser desacoplada em duas equações, possuindo uma resolução mais simplificada quando comparada com (7). Este processo resulta no método desacoplado de solução do problema do fluxo.

Em um SEP típico, a susceptância própria  $B_{kk} \gg Q_k$ , de modo que  $Q_k$  pode ser suprimido. Do mesmo modo, pode-se considerar que  $V_k^2 \approx V_k$ . Já o processo com a matriz  $L$ , será similar ao feito com a matriz  $H$ . Portanto para os termos da diagonal da matriz  $Z$ .

## 4. OPENDSS

O *Open Distribution System Simulator* (OpenDSS), é um software de domínio do *Electric Power Research Institute* (EPRI), sendo uma ferramenta de simulação de SDEE. O OpenDSS foi utilizado nesse artigo pelo fato de:

- Ser de código aberto;
- Possibilitar modificações via programação;
- Modelar equipamentos que compõem um SEP;
- Calcular do fluxo de potência e perdas de energia.

O OpenDSS foi projetado para ser expansível indefinidamente, de modo que possa ser facilmente modificado (Dugan, 2020). Os principais modos de solução presentes no OpenDSS são: *SnapShot*, diário e anual.

### 4.1 Fluxo de Potência no OpenDSS

O OpenDSS resolve circuitos radiais utilizando dois tipos básicos de solução de fluxo de energia: fluxo de potência iterativo e solução direta.

Existem dois algoritmos de fluxo de potência iterativos atualmente empregados: modo Newton, que é um pouco mais robusto para circuitos que são difícil de resolver, e o modo de injeção de corrente *Normal* (padrão), que emprega um simples método do ponto fixo iterativo e destaca-se por sua velocidade.

Na Figura 3 é apresentado um fluxograma de como o OpenDSS une os Elemento de Conversão de Energia (ECE) e os Elementos de Fornecimento de Energia (EFE) para a resolução do fluxo de potência.

Uma matriz de admitância primitiva,  $Y_{prim}$ , é calculada para cada elemento do circuito. Essas pequenas matrizes de admitância nodal são usadas para construir a matriz de admitância do sistema principal,  $Y_{Sistema}$  (Dugan, 2020).

Após construir a matriz  $Y_{Sistema}$ , estima-se o vetor de tensão inicial do sistema e são calculadas as correntes de compensação. Usando um solucionador de matrizes

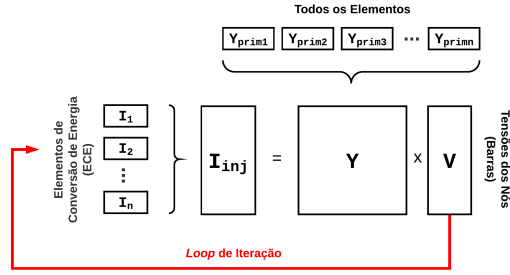


Figura 3. Loop de Solução do Fluxo de Potência.  
Fonte: Dugan (2020).

esparças, é calculada a nova estimativa da tensão na barra,  $V_{n+1}$ , até que um critério de convergência seja atendido.

Quando o fluxo de potência é concluído, as perdas, tensões, fluxos e outras informações estão disponíveis para o sistema total, individualmente para cada componente e também para certas áreas definidas.

## 5. METODOLOGIA

O sistema de distribuição do oeste do estado (SRO) da Paraíba tem característica radial e é formado por um ponto de suprimento derivado da subestação 230/69 kV Coremas de propriedade da CHESF. Possui 20 subestações rebaixadoras 69/13,8 kV e 26 LT de 69 kV, de propriedade da Energisa Paraíba (EPB), conforme diagrama unifilar representado na Figura 4.

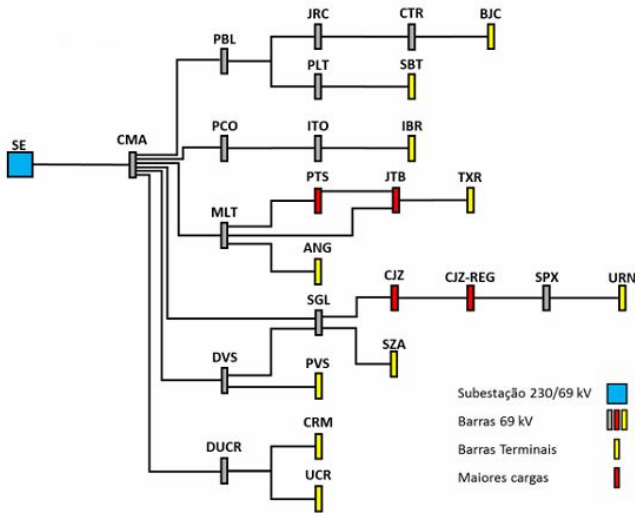


Figura 4. Diagrama do SRO-CMA.  
Fonte: Adaptado de EPB.

### 5.1 Dados das Barras

Os dados de identificação e tipo das barras do sistema em estudo estão relacionados na Tabela 2.

### 5.2 Dados das Linhas

As linhas de distribuição 69 kV que compõem o sistema modelado possuem comprimento máximo de 50 km, consideradas linhas curtas (comprimento menor que 80 km).

Tabela 2. Dados das Barras.

Nome	Sigla	Nome	Sigla
Coremas – CHESF	CMA	Patos	PTS
Pombal	PBL	Jatobá	JTB
Jericó	JRC	Teixeira	TXR
Catolé do Rocha	CTR	São Gonçalo	SGL
Brejo do Cruz	BJC	Cajazeiras	CJZ
Paulista	PLT	Sousa	SZA
São Bento	SBT	São João do Rio do Peixe	SPX
Piancó	PCO	Uiraúna	URN
Itaporanga	ITO	Derivação Várzeas de Sousa	DVS
Ibiara	IBR	Projeto Várzeas de Sousa	PVS
Malta	MLT	Coremas	CRM

Logo, podem ter as suas capacitâncias *shunt* desprezadas e serem representadas apenas pelas suas resistências em série  $R$  e suas reatâncias indutivas (STEVENSON, 1986).

Os valores de resistência elétrica e raio médio geométrico (RMG) das linhas foram obtidos a partir das grandezas informadas pelo fabricante dos cabos conforme Tabela 3.

Tabela 3. Grandezas referentes aos cabos.

CONDUTOR	Raven	Penguin	Partridge	Linnet	Cuckoo
Secção (AWG)	1/0	4/0	266.8	336.4	795
R ( $\Omega/\text{km}$ )	0,7090	0,3797	0,2554	0,2032	0,0865
RMG (m)	0,00388	0,00550	0,00661	0,00742	0,01114
$X_{Indutiva}$ ( $\Omega/\text{km}$ )	0,5166	0,4903	0,4765	0,4677	0,3391
$X_{Capacitiva}$ ( $\text{U}/\text{km}$ )	0,2524	0,2358	0,2296	0,2241	0,2042
Ampacidade (A)	273	408	514	594	1014

Fonte: Nexans (2013).

### 5.3 Dados das Cargas

Para efeito dessa simulação, as cargas do sistema são representadas como 100% potência constante e conectadas diretamente no secundário dos transformadores. Os valores médios horários de potência ativa e reativa da carga, registrados em cada uma das subestações, para cada um dos meses do ano foram obtidos a partir das curvas de carga da base de dados histórica do SCADA da concessionária de distribuição de energia elétrica local, tendo como referência o ano de 2020. Os respectivos valores de potência ativa e reativa estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Dados das Cargas.

Barra	Carga (MW)	Carga (Mvar)	Barra	Carga (MW)	Carga (Mvar)
CMA	-117,2	-87,1	PTS	16,1	1,7
PBL	8,2	2,8	JTB	13,5	5,3
JRC	1,9	0,1	TXR	3,6	0,6
CTR	9,1	5,0	SGL	5,3	2,0
PLT	2,7	0,4	PVS	1,4	0,6
SBT	8,4	2,9	SZA-A	11,5	3,4
BJC	3,1	0,1	SZA-B	8,6	0,7
PCO	5,5	1,9	CJZ-A	20,5	4,4
ITO	8,0	2,9	CJZ-B	6,8	1,5
IBR	4,6	1,6	SPX	3,9	0,8
MLT	4,0	0,5	URN	3,0	0,5
ANG	-54,0	-4,3	CRM	3,5	0,9

### 5.4 Dados dos Transformadores

Os dados dos Transformadores de Potência e dos Reguladores de Tensão são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Dados dos Transformadores.

Barra		Reatância (%)	Tap	Capacidade (MVA)
Origem	Destino			
CMA-230	CMA-69	13,19	0,9616	100,0
CMA-230	COR-FIC-1	13,955	0,9616	100,0
COR-FIC-1	CMA-69	-1,035	1,0	
COR-FIC-2	COR-FIC-1	27,555	1,0	
CMA-230	COR-FIC-3	13,615	0,9616	100,0
COR-FIC-3	CMA-69	-,585	1,0	
COR-FIC-4	COR-FIC-3	7,585	1,0	
PBL-69	PBL-13	65,9	0,9275	10,0
JRC-69	JRC-13	138,0	0,9176	5,0
CTR-69	CTR-13	69,8	0,85	10,0
BJC-69	BJC-13	80,5	1,0	
PLT-69	PLT-13	137,0	0,9084	5,0
SBT-69	SBT-13	79,6	0,8743	10,0
BJC-13	BJC-13	10,0	1,003	10,0
PCO-69	PCO-13	63,4	1,0	
PCO-13	PCO-13	10,0	0,9461	10,0
ITO-69	ITO-13	64,9	1,0	
ITO-13	ITO-13	10,0	0,9079	10,0
IBR-69	IBR-13	70,1	0,902	10,0
MLT-69	MLT-13	141,4	0,975	
MLT-13	MLT-13	20,0	1,004	5,0
ANG-MAL-34	ANG-MAL-69	13,0	1,0	
PTS-69	PTS-13	33,95	0,9439	20,0
JTB-69	JTB-13	51,0	0,92	20,0
TXR-69	TXR-REG-13	33,3	0,925	
TXR-69	TXR-REG-13	133,8	0,925	
TXR-REG-13	TXR-13	10,0	1,011	10,0
SGL-69	SGL-13	81,0	0,85	10,0
PVS-69	PVS-13	300,0	0,95	
PVS-69	PVS-13	3,0	0,95	
SZA-69	SZA-A-13	51,85	0,85	20,0
SZA-69	SZA-B-13	63,5	0,975	
CJZ-69	CJZ-REG-69	0,02	0,9	50,0
CJZ-REG-69	CJZ-A-13	41,45	0,925	
CJZ-REG-69	CJZ-B-13	69,8	0,925	
SPX-69	SPX-REG-13	65,1	0,925	
SPX-REG-13	SPX-13	10,0	0,9	10,5
URN-69	URN-REG-13	135,4	0,925	
URN-REG-13	URN-13	10,0	0,9	10,5
CRM-69	CRM-13	127,6	0,9919	5,0
UCR-A-1	UCR-69	395,6	1,0	
UCR-B-1	UCR-69	395,0	1,0	

### 5.5 Dados da UFV

O Complexo Solar Malta, apresentado na Figura 5, é composto pela UFV Malta e pela UFV Angico I, ambas localizadas na cidade de Malta, no estado da Paraíba e de posse da Empresa SPE Malta Energias Renováveis.



Figura 5. Complexo da UFV de Angico-Malta. Fonte: WEG (2019).

O período de construção do complexo foi de dezembro de 2017 até setembro de 2019 (Angico) e outubro de 2019 (Malta). O complexo é composto de (GTEL, 2018):

- 2.756 Seguidores Solares *Trackers*;
- 120.960 módulos;
- 16 eletrocentros e transformadores tipo *Pad Mounted*;
- 1.140 km de cabos instalados.

A potência de pico do sistema totalizou 63 MW, sendo a potência média de 54 MW considerada neste trabalho.

## 6. RESULTADOS

Realizou-se o fluxo de potência para o Sistema Regional Oeste Coremas (SRO-CMA), o qual teve seus resultados de perdas de potência comparados com a simulação sem a instalação das UFV. Em seguida, modelou-se o SRO-CMA no OpenDSS, a fim de avaliar a viabilidade do uso do mesmo na simulação de SDEE reais.

### 6.1 Perdas de Potência

Para validação da modelagem realizada no OpenDSS, foi calculado o fluxo de potência no ANAREDE, o qual foi comparado com o do OpenDSS.

Os valores de perdas de potência ativa e reativa do SRO-CMA foram obtidos pelo relatório da rede CA, mais especificamente pelo Relatório de Dados de Linha (RLIN). Os resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Valores de Perdas de Potência Ativa e Reativa com a UFV.

Perdas	
Ativa (MW)	Reativa (Mvar)
18,0	50,5

Já no OpenDSS, após a execução do fluxo de potência, foram obtidos os resultados das perdas de potência ativa, com e sem a instalação da UFV, na Tabela 7.

Tabela 7. Valores de Perdas de Potência Ativa no OpenDSS.

Perdas	
Ativa com UFV (MW)	Ativa sem UFV (MW)
16,92	18,47

Comparando os valores das perdas de potência ativa obtidos no OpenDSS com os do ANAREDE, pode-se verificar o erro inerente à modelagem em *softwares* diferentes, inferior a 10%, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8. Resumo dos Resultados de Perdas de Potência Ativa.

Perdas de Potência Ativa (MW)		Erro
Com UFV ANAREDE	18,00	-
Com UFV OpenDSS	16,92	6,00%
Sem UFV ANAREDE	20,30	-
Sem UFV OpenDSS	18,47	9,01%

Na Tabela 9 são observadas as reduções das perdas de potência ativa e reativa, tanto no ANAREDE quanto no OpenDSS, em detrimento da instalação da UFV.

Tabela 9. Redução Percentual das Perdas de Potência após as UFV.

Perdas de Potência Ativa	
Redução ANAREDE	11,33%
Redução OpenDSS	8,39%

Os resultados obtidos são da mesma ordem de grandeza, evidenciando que a instalação da UFV surtiu efeito semelhante de maneira proporcional às características modeladas no ANAREDE e no OpenDSS.

### 6.2 Perdas de Energia

Para a avaliação das perdas anuais de energia, foram adicionadas duas linhas ao algoritmo principal do OpenDSS:

```
New Line.CMA1-CMA phases=3 bus1=CMA1
~ bus2=CMA linecode=000 length=.1 units=km
New EnergyMeter.Medidor
~ Element=Line.CMA1-CMA terminal = 1
```

A primeira linha representa a criação de uma barra fictícia (CMA1), a qual será colocada à montante da barra CMA, com o intuito de criar uma linha, também fictícia, com perdas mínimas, na qual será instalado o medidor de energia. Já a segunda linha representa a caracterização do medidor de energia.

Os resultados fornecidos pelos registradores do medidor de energia estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Perdas de Energia.

	Perdas de Energia Ativa	Perdas de Energia Reativa
Com UFV	151,41 TWh	265,76 Tvarh
Sem UFV	158,02 TWh	279,83 Tvarh
Redução	4,18%	5,03%

Verifica-se, assim, que além de reduzir as perdas de potência, a instalação da UFV colaborou com a redução das perdas de energia. Logo, essa redução irá impactar na redução dos custos de compra de energia complementar (oriunda de outra fonte de energia ou de outro sistema), o qual será deduzido do valor investido na construção da UFV, podendo, inclusive, gerar lucro.

### 6.3 Relação $R/X$

A relação  $R/X$  pode diferir substancialmente, quando comparados os SDEE, nos quais a relação é mais elevada, variando de 0,5 a até 7,0, com as LT, que são compostas principalmente por linhas aéreas e a razão é geralmente menor que 0,5 (Blazic and Papic, 2008).

Na Tabela 11 são apresentadas as respectivas relações  $R/X$  dos condutores que compõem o sistema.

Observa-se, assim, que há uma predominância no sistema de condutores que possuem valores da relação  $R/X$  na região limite que divide a caracterização como sendo de um SDEE ou de uma LT.

### 6.4 Sistema Equilibrado

As características dos SDEE são bastante diferentes das observadas em LT, como por exemplo, suas linhas são

Tabela 11. Relação  $R/X$  dos condutores que compõem o SRO.

Condutor	R ( $\Omega/km$ )	X ( $\Omega/km$ )	$R/X$	Comprimento total (km)
4/0	0,6356	1,0281	1,5732	41,77
1/0	1,3079	1,0831	1,2075	155,94
266	0,5235	1,0060	0,5204	258,32
336	0,4155	0,9879	0,4206	252,81
795	0,1772	0,9195	0,1927	4,60

normalmente curtas e a carga total é normalmente diferente nas três fases do sistema, tornando-a desequilibrada (Kersting, 2017).

No ANAREDE, as cargas das barras são normalmente modeladas como potências constantes ou expressas como uma função da magnitude da tensão da barra e dos parâmetros que definem as parcelas de carga representadas por corrente e impedância constantes respectivamente, ou seja, considerando cargas equilibradas. Já no OpenDSS, há a possibilidade de realizar a modelagem das cargas de duas formas: equilibradas ou desequilibradas, ficando de acordo com a característica intrínseca ao tipo do sistema, seja SDEE ou LT.

## 7. CONCLUSÃO

Foi proposta uma análise comparativa do fluxo de potência, o qual foi realizado nos *softwares* ANAREDE e OpenDSS, para a modelagem de um sistema de distribuição de energia elétrica real com a presença de uma usina fotovoltaica.

Os dados originais do Sistema Regional Oeste da Energisa Paraíba, com subestação de 230/69 kV na cidade de Coremas, foram extraídos do ANAREDE, o qual apresentou a primeira versão do fluxo de potência. O fluxo também foi calculado no OpenDSS, o qual destaca-se por sua versatilidade e permitir a inserção das curvas de carga, temperatura e irradiância, de modo a fornecer resultados não só de perdas de potência, como também perdas de energia, sejam diárias ou anuais.

Os resultados da modelagem do Sistema Regional Oeste da Energisa Paraíba no ANAREDE e no OpenDSS apresentaram resultados muito semelhantes (erro inferior a 10%), justificados pelo fato de que em ambos os casos considerou-se que o sistema possuía as cargas balanceadas (equilibrado) e que a relação  $R/X$  ficou próxima aos limites que diferem um sistema de distribuição de energia elétrica e de linhas de transmissão. Essas características não são típicas de um SDEE, fato que corroborou com a convergência dos resultados dos dois *softwares* para valores próximos entre si. Além disso, esperava-se que houvesse um erro maior no resultado do cálculo do fluxo de potência pelo fato de o ANAREDE utilizar o método de Newton para o cálculo do fluxo de potência.

Confirmou-se também que, para o sistema analisado, a Usina de Malta reduziu as perdas do sistema, bem como melhorou o perfil de tensão do alimentador, corroborando com a literatura específica da área. Há de se destacar, também, a possibilidade de estudo da instalação da usina em outro barramento, levando em consideração não só

os critérios técnicos, como também a legislação vigente, principalmente a ambiental.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) por meio do Programa de Excelência Acadêmica (PROEX). Os autores também agradecem a colaboração da Energisa Paraíba na construção do trabalho e no fornecimento dos dados necessários.

## REFERÊNCIAS

- ANEEL (2008). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST: Módulo 1 - Introdução. *Revisão*, 10, 55.
- Anwarzai, M.A. and Nagasaka, K. (2017). Utility-scale implementable potential of wind and solar energies for afghanistan using GIS multi-criteria decision analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 150–160.
- Blazic, B. and Papic, I. (2008). Voltage profile support in distribution networks—influence of the network r/x ratio. In *2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2510–2515. IEEE.
- CEPEL (2021). *Manual do Usuário - ANAREDE*. Eletrobrás, Rio de Janeiro, 11.05.02 edition.
- CEPEL (2023). Anarede: Análise de sistemas elétricos de potência em regime permanente. URL <https://www.cepel.br/produtos/anared-2/>.
- CRESESB/CEPEL (2013). Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. URL <http://www.cresesb.cepel.br/index.php>.
- Dugan, R.C. (2020). Reference guide. *The Open Distribution System Simulator (OpenDSS)*. EPRI, 1–232.
- El-Hafez, O.J., ElMekkawy, T.Y., Kharbeche, M.B.M., and Massoud, A.M. (2022). Economic energy allocation of conventional and large-scale PV power plants. *Applied Sciences*, 12(3), 1362.
- Freitas, P.R.R.d. (2015). Modelos avançados de análise de redes elétricas inteligentes utilizando o software opendss. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo.
- GTEL (2018). Cfam - complexo fotovoltaico angico e malta. URL <https://gtel-sp.com.br/pt/portfolio-items/cfam-complexo-fotovoltaico-angico-e-malta/>.
- Kato, T. and Suzuoki, Y. (2009). Large-scale penetration impact of photovoltaic power generation system on utility power plants. In *2009 Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, 1–4. IEEE, Seoul, Korea (South).
- Kersting, W.H. (2017). *Distribution system modeling and analysis*. CRC press.
- Lucena, M.D.d., Brito, N.S.D., Dantas, F.B., da Costa Silva, A.D., Simões, M.C.S., Diniz, D.S., and Soares, R.A. (2020). Um algoritmo baseado na busca tabu para localização Ótima de geradores fotovoltaicos. *Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Automática*, 2(1), 1–6.
- Merrouni, A.A., Elalaoui, F.E., Mezrhab, A., Mezrhab, A., and Ghennioui, A. (2018). Large scale PV sites selection by combining GIS and analytical hierarchy process. case study: Eastern morocco. *Renewable energy*, 119, 863–873.
- Monticelli, A.J. (1983). *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. E. Blucher.
- Nexans, C. (2013). Alumínio condutores nus. *Catálogo, maio*.
- Obeng, M., Gyamfi, S., Derkyi, N.S., Kabo-bah, A.T., and Peprah, F. (2020). Technical and economic feasibility of a 50 MW grid-connected solar PV at UENR nsoatre campus. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119159.
- Paes, Junior, M.R.d.C. (2014). *Alocação otimizada de centrais solares fotovoltaicas no sistema de distribuição do oeste do Estado da Paraíba*. Mestrado em engenharia elétrica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.
- Ramadan, A., Ebeed, M., Kamel, S., and Nasrat, L. (2019). Optimal allocation of renewable energy resources considering uncertainty in load demand and generation. In *2019 IEEE Conference on Power Electronics and Renewable Energy (CPERE)*, 124–128. IEEE, Aswan, Egypt.
- Rediske, G., Rosa, C.B., Rigo, P.D., Gastaldo, N.G., and Michels, L. (2019). Identificação de locais ideais para instalação de usinas de energia fotovoltaica: um estudo de caso. In *XXXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, 1–13. ENEGEP, Santos, Brasil.
- Thong, V., Driesen, J., and Belmans, R. (2007). Transmission system operation concerns with high penetration level of distributed generation. In *2007 42nd International Universities Power Engineering Conference*, 867–871. IEEE.
- WEG (2019). Weg - parque solar angico e malta. URL <https://www.youtube.com/watch?v=nEGTdGKOAMw>.