

Proposta de Artigo Científico: Eletrificação Rural e OpenDSS

Título Provisório

Análise de Impactos e Otimização da Eletrificação Rural no Nordeste Brasileiro com Integração de Geração Distribuída e Armazenamento de Energia: Um Estudo de Caso Baseado em Simulações OpenDSS.

Resumo (Abstract)

A eletrificação rural é um pilar fundamental para o desenvolvimento socioeconômico e a segurança alimentar no Brasil. Este artigo propõe uma análise detalhada dos desafios e oportunidades da expansão da rede de distribuição em áreas rurais, com foco na região Nordeste, utilizando o software de simulação **OpenDSS**. O estudo de caso será baseado em um alimentador rural típico, onde serão modelados e avaliados os impactos da integração de sistemas fotovoltaicos (**PVSystem**) e sistemas de armazenamento de energia (**Storage System**). Serão realizados cálculos de fluxo de potência para avaliar a qualidade de energia, com ênfase na ocorrência e mitigação de **afundamentos de tensão** (voltage sags). Além disso, será modelada a eletrificação de cargas rurais de alta demanda, como **motores de irrigação**, utilizando curvas de carga (**Loadshape**) para simular o consumo real. Os resultados esperados incluem a identificação de soluções otimizadas para a expansão da rede, o dimensionamento ideal de recursos energéticos distribuídos e a proposição de estratégias para garantir a qualidade e a confiabilidade do fornecimento de energia no campo.

1. Introdução

- Contexto:** Importância da eletrificação rural para o agronegócio e o desenvolvimento social no Brasil.
- Problema:** Desafios inerentes às redes rurais (longas distâncias, baixa densidade de carga, perdas elevadas, problemas de qualidade de energia).
- Foco Regional:** Justificativa para a escolha da região Nordeste (ex: Bahia), destacando a relevância da irrigação e a alta incidência solar.
- Objetivo:** Apresentar o objetivo principal do artigo: analisar e otimizar a rede rural com a integração de PV e Storage, utilizando o OpenDSS.

2. Revisão Bibliográfica

- **OpenDSS:** Breve descrição do software e sua aplicação em estudos de sistemas de distribuição com Geração Distribuída (GD).
- **Eletrificação Rural e GD:** Estado da arte da integração de PVSystem e Storage System em redes rurais brasileiras.
- **Cargas Rurais:** Características e modelagem de cargas de alta potência, como motores de irrigação.
- **Qualidade de Energia:** Foco em afundamentos de tensão (voltage sags) e métodos de mitigação.

3. Metodologia: Estudo de Caso e Modelagem no OpenDSS

A metodologia será baseada em simulações computacionais no OpenDSS, utilizando um alimentador rural típico com as seguintes características:

3.1. Modelagem do Estudo de Caso (Alimentador Rural Típico)

Elemento	Localização (Bus)	Característica	Parâmetros Chave
Rede Base	Bus 1 a Bus 5	Radial, 13.8 kV, 60 Hz	Comprimento total de 15 km, condutores rurais típicos (ACSR 4/0, 2/0, #2, #4).
Cargas Base	Bus 2, 3, 4, 5	Residencial/Comercial	50 kVA por ponto de carga, curva de carga Loadshape residencial.
Carga de Irrigação	Bus 5 (Final da Derivação)	Motor de Indução Trifásico	150 kVA, curva de carga Loadshape de pico diurno.
PVSystem (GD)	Bus 4 (Ponto Crítico)	Geração Fotovoltaica	200 kWp, perfil solar Tshape típico da região.

Storage System	Bus 4	Armazenamento de Energia	50 kW / 200 kWh, controle para suporte de tensão.
----------------	-------	--------------------------	---

3.2. Modelagem no OpenDSS

A simulação será realizada em modo de **série temporal (Daily)** com passo de 1 hora, permitindo a análise do comportamento dinâmico da rede sob a influência das curvas de carga e da geração solar.

- **Rede:** Uso dos elementos `LineCode` e `Line` para modelar condutores e trechos.
- **Cargas:** Uso do elemento `Load` com a propriedade `Daily` apontando para as curvas `Loadshape` (Residencial e Irrigação).
- **GD:** Uso do elemento `PVSystem` com a propriedade `Daily` apontando para o perfil solar `Tshape`.
- **Armazenamento:** Uso do elemento `Storage` com o `StorageController` configurado para suporte de tensão (`Mode=Voltage`).

4. Cálculos e Análises

Serão definidos quatro cenários principais para comparação e uma análise de otimização:

4.1. Cenários de Simulação

Cenário	Descrição	Foco da Análise
Cenário 1: Base	Rede sem PV/Storage.	Perfil de tensão e perdas na condição mais crítica (pico de irrigação).
Cenário 2: Irrigação Crítica	Cenário 1 + Simulação de Falta.	Avaliação da profundidade do afundamento de tensão na Bus 5 (motor de irrigação).
Cenário 3: Com PVSystem	Cenário 1 + Inclusão do PVSystem.	Impacto da GD na elevação de tensão e na redução de perdas durante o dia.
Cenário 4: Otimizado (PV + Storage)	Cenário 3 + Inclusão do Storage System (suporte de tensão).	Mitigação dos afundamentos de tensão e controle da elevação de tensão.

4.2. Métricas de Desempenho

- **Qualidade de Tensão:** Tensão Mínima e Máxima (V_{min} e V_{max}) em pu, e o número de horas fora dos limites regulatórios.
- **Afundamentos de Tensão:** Profundidade e Duração do afundamento nas barras críticas.
- **Eficiência:** Perdas Ativas totais em kW e Perdas percentuais.
- **Desempenho de Storage:** Perfil do Estado de Carga (SOC) ao longo do dia.

4.3. Análise de Otimização

Será realizada uma análise de sensibilidade variando o dimensionamento (kVA/kWh) e a estratégia de controle do Storage System para determinar a configuração que oferece o melhor equilíbrio entre melhoria da qualidade de energia e custo.

5. Resultados Esperados

- **Cenário Base:** Caracterização do desempenho da rede rural sem GD e Storage (perfil de tensão e perdas).
- **Impacto da GD:** Quantificação dos impactos positivos e negativos da inserção de PVSystem na rede.
- **Mitigação de Afundamentos:** Demonstração da eficácia do Storage System na correção dos afundamentos de tensão.
- **Viabilidade da Irrigação:** Análise da capacidade da rede de suportar a demanda dos motores de irrigação, com e sem o suporte dos recursos distribuídos.
- **Recomendações:** Proposição de diretrizes técnicas para o planejamento e operação de redes rurais com alta penetração de recursos distribuídos.

6. Conclusão

Síntese dos principais achados e contribuições do artigo para a área de eletrificação rural e engenharia de sistemas de potência.

7. Referências

Lista de artigos e documentos técnicos relevantes (a ser preenchida).