

Análise de Redes Utilizando o *Software* OpenDSS

P. Marcolin, R. Biazzini, D. P. Bernardon

Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
pedro_marcolin@hotmail.com

L. F. Miranda

CPFL Energia
Campinas, Brasil
lfortes@cpfl.com.br

Resumo — Nos últimos anos, o setor elétrico, em um sentido global, passou por mudanças significativas com o avanço e desenvolvimento de novas tecnologias. Nesse sentido, o controle de qualidade da energia elétrica, desde a geração, passando pela transmissão e distribuição, ganhou uma relevância ainda maior por parte das agências regulamentadoras e das empresas do setor. Sabendo disso, este trabalho traz uma análise do comportamento de um sistema de potência perante alterações nele aplicado. Para tanto, foram feitos estudos de caso para analisar como a rede se comporta mediante inserção de geração distribuída, banco de capacitores, sistema de armazenamento, entre outros equipamentos, focando sempre na análise dos níveis de tensão, corrente, perdas e carregamento. Todos os estudos foram feitos utilizando o *software* OpenDSS, que realiza o cálculo do fluxo de potência da rede, mostrando como o sistema se comporta com as alterações na rede.

Keywords—Fluxo de potência, geração distribuída, níveis de tensão, OpenDSS, sistemas de potência.

I. INTRODUÇÃO

Fornecer energia, priorizando a qualidade e a confiabilidade do produto, é um dos desafios encontrados pelas concessionárias de energia. Atualmente, devido a crescente penetração de geradores distribuídos ao sistema, tais desafios vêm aumentando no que diz respeito ao controle dos níveis de tensão, capacidade e perdas ao longo das linhas e alimentadores. A grande questão a cerca disso é o quão grande pode ser essa penetração sem que haja consequência indesejáveis a operação do sistema [1].

Com relação aos sistemas de geração distribuída (GD), ou cogeração, que relembra o princípio da utilização da eletricidade, por se tratar de unidades geradores menores e normalmente situadas no entorno do consumidor final, são conectadas diretamente nas linhas de distribuição. Com isso, são retardados gastos com ampliação de linhas de transmissão, as perdas nas redes são reduzidas e servem como complemento às grandes centrais geradoras [3].

Com o crescimento vertiginoso dos sistemas de geração distribuída, principalmente com fontes de geração de energia renováveis, como a solar e eólica, o armazenamento de energia ganha um ímpeto ainda maior no Brasil e no mundo, pois essas fontes alternativas são intermitentes, ou seja, produzem energia não necessariamente quando há demanda, mas principalmente, podem estar indisponíveis quando a demanda é alta. Por conta

disso, o armazenamento de energia passa a ser crucial para a segurança energética do sistema [4].

A instalação de bancos de capacitores (BCs) torna-se frequentemente necessária pois visa não só a redução das perdas ativas e reativas e melhoria nos perfis de tensão, mas também o controle do fluxo de potência, melhoria da estabilidade do sistema, redução do custo de operação do sistema, correção de fator de potência e compensação da energia reativa [2].

Sabendo disso, fica claro a importância de se analisar o comportamento da rede perante alterações nela aplicada bem como as consequências que cada elemento pode trazer ao sistema. Logo, este presente trabalho tem a finalidade de mostrar, por meio de estudos de casos, as mudanças ocorridas no sistema após inserção de novos equipamentos como gerador a diesel, banco de capacitores, geração distribuída e sistema de armazenamento. Todas as análises foram realizadas em cima dos valores de níveis de tensão, corrente, perdas e carregamento da rede simulados por meio do *software* OpenDSS.

II. ANÁLISE DE REDES UTILIZANDO O SOFTWARE OPENDSS

O *software* OpenDSS foi desenvolvido com a finalidade de modelar sistemas de potência (SEPs) em uma linguagem intuitiva, sem tanta complexidade de programação. Foi dada grande importância aos algoritmos que seriam utilizados pelo mesmo para execução dos cálculos de fluxo de potência, visto que, cada vez mais, sistemas automatizados eram inseridos juntos à rede, aumentando a complexidade das operações [2].

Análises de sistemas com GD foi o fator motivador de desenvolvimento do OpenDSS, porém destaca-se que, devido aos novos conceitos dos sistemas *Smart Grids*, novas funcionalidades são aplicáveis, cujas características tornam o *software* uma ferramenta diferenciada para simulações no ambiente de distribuição de energia [5].

O OpenDSS possui diversos tipos de solução: fluxo de potência instantâneo (*Snapshot Power Flow*), diário ou anual (*Daily/Yearly Power Flow*). Vale destacar que o modo *daily* é fundamental para estudos de fluxo de potência dos SEPs atuais, visto que grande parte das cargas são modeladas através de uma curva de carga característica, que mostra o perfil de consumo de um determinado local.

Quando a análise do fluxo de potência é finalizada, as perdas, tensões, fluxos e outras informações tornam-se disponíveis para todo o sistema, cada componente e certas áreas pré-definidas. Por exemplo, para cada instante de tempo, as perdas são mostradas em quilowatts (kW). Além disso, medidores de energia podem ser usados para mostrar os fluxos no decorrer de um intervalo de tempo, sendo muito utilizado para o modo *daily* [2].

O OpenDSS possui uma linguagem própria de programação, com determinadas funções que executam comandos desejados, tanto para cadastro dos elementos, como para rodar o fluxo de potência e obter/analisar os resultados. Para tanto, são inseridos *scripts* adequados ao circuito a ser simulado [5].

III. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso baseou-se em definir um sistema de potência simples, que será o caso base, e realizar o cálculo do fluxo de potência por meio do OpenDSS. Também foram definidas estratégias para correção de possíveis violações na rede, tais como níveis de tensão, perdas e carregamento.

O sistema analisado, representado pela Figura 1, possui as seguintes características:

- Geração: 69 kV, trifásico em 60 Hz;
- Transformador: Delta-Estrela, de 69/13,8 kV, com potência nominal de 5 MVA;
- Carga: 1000 kW, 13,8 kV, com fator de potência (FP) de 0,95, ligada em estrela;
- Linha de Transmissão: conectada entre o secundário do transformador e a carga, com 50 km de comprimento.

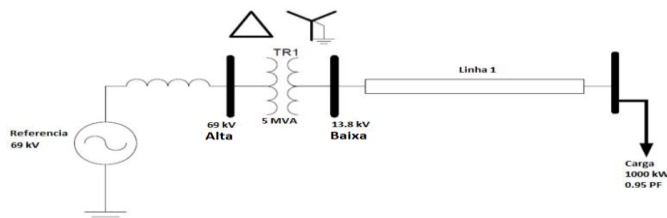


Figura 1. Sistema de potência em estudo.

Partindo do caso base, propuseram-se novos casos, adicionando geradores, banco de capacitores, troca do condutor da linha, estudo com curva de carga, inserção de geração distribuída além da implementação de um sistema de armazenamento, e os respectivos resultados foram comparados, com a finalidade de se obter um sistema que operaria dentro das normas vigentes.

A. Caso Base

Configurando a rede proposta no *software* e simulando o fluxo de potência, priorizou-se a análise dos seguintes parâmetros:

- Tensões de linha nas barras e nas cargas;
- Correntes que percorrem o circuito;
- Potências nos elementos do circuito;
- Perdas no transformador e na linha.

Essa análise é muito importante, visto que é possível determinar se o circuito está operando dentro dos limites aceitáveis de tensão estabelecido pela norma (entre 0,95 e 1,05 pu), correntes menores que a máxima suportada pela linha e também se as perdas estão baixas.

Após executado o fluxo de potência, foi possível obter os resultados que estão mostrados na Tabela 1:

TABELA I. RESULTADOS DE TENSÃO, CORRENTE E PERDAS OBTIDOS PELO FLUXO DE POTÊNCIA NO OPENDSS.

Variável Analisada	Análise	Resultado	Admissível
Tensão (pu)	Barra - Baixa	0,9711	0,95 – 1,05
	Barra – Carga	0,775	0,95 – 1,05
Corrente (A)	Linha – Linha1	194,44	100
Perdas (%)	Perdas Totais	18,03	-

Outra análise feita foram as quedas de tensões ao longo do circuito. Para isso, foi utilizado o comando do *EnergyMeter*, que, colocado em um ponto específico do SEP, irá medir as quedas a partir deste ponto.

No caso em questão, foi medido as quedas de tensões a partir do transformador. O resultado pode ser analisado pela Figura 2:

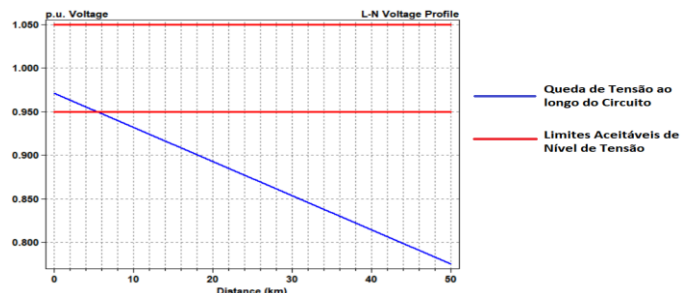


Figura 2. Perfil de tensões a partir do transformador do SEP – caso base.

Analisando os resultados mostrados na Tabela I e na Figura 2, podem ser feitas as seguintes considerações:

- A tensão na barra Baixa está dentro das normas, porém, na Carga, percebe-se que a tensão está muito abaixo do limite estabelecido;
- A corrente na linha que liga a carga ao transformador está 94,44 % acima da capacidade que a mesma suporta;

- Analisando as perdas, 18,03% da potência que é gerada é perdida no transformador e na linha que liga o transformador à carga.

Percebe-se que o circuito do caso base não está em condições regulares para operação. Visto isso, propuseram-se soluções para rearranjar o sistema de potência estudado, de forma que essas violações fossem corrigidas.

B. Caso 1: Inserção de gerador e banco de capacitor

Primeiramente, foi proposta a inserção de um gerador a diesel e um banco de capacitor ligado a carga. Essa solução foi pensada visto que seria aumentado o nível de tensão ao longo do circuito, diminuindo a corrente e, conseqüentemente, as perdas, essas que na grande maioria são perdas Joule, que são calculadas através da seguinte fórmula:

$$P = R \times I^2 \quad (1)$$

O gerador adicionado possui potência nominal de 1500 kW. Já o banco de capacitor possui 600 kVAr.

Após a inserção do gerador e do banco de capacitor na rede e executado o fluxo de potência, foram obtidos novos resultados, como mostra a Tabela II:

TABELA II. RESULTADOS DE TENSÃO, CORRENTE E PERDAS OBTIDOS PELO FLUXO DE POTÊNCIA NO OPENDSS PARA O CASO 1.

Variável Analisada	Análise	Resultado	Admissível
Tensão (pu)	Barra – Carga	0,8557	0,95 – 1,05
Corrente (A)	Linha – Linha1	137	100
Perdas (%)	Perdas Totais	7,25	-

O perfil de tensão, a partir do transformador, também foi obtido. O resultado está ilustrado pela Figura 3:

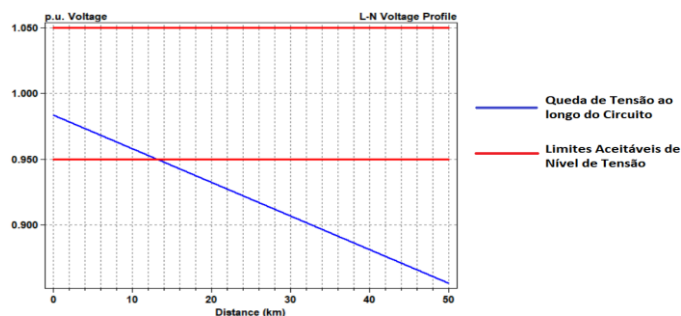


Figura 3. Perfil de tensões a partir do transformador do SEP – Caso 1.

Para analisar os resultados do caso base e caso 1, a Figura 4 compara os valores de tensão no lado de baixa tensão do transformador e na carga, ao passo que a Tabela III compara os níveis de corrente e as perdas:

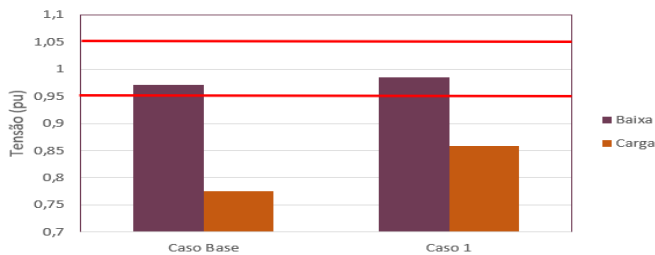


Figura 4. Comparação dos níveis de tensão entre caso base e caso 1.

TABELA III. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE CORRENTE E PERDAS ENTRE CASO BASE E CASO 1.

Variável Analisada	Análise	Resultado (Caso base)	Resultado (Caso 1)
Corrente (A)	Linha – Linha1	194,44	137
Perdas (%)	Perdas Totais	18,03	7,25

Analisando os resultados, percebe-se uma melhora nos mesmos em relação ao caso base (sem gerador e sem banco de capacitor). Porém, os valores obtidos ainda não são suficientes para a operação dentro das normas, visto que a corrente ainda está acima da nominal permitida (37% maior) e o nível de tensão na carga é de 0,8557 pu, sendo que o mínimo permitido é de 0,95 pu.

C. Caso 2: Mudança do condutor da Linha 1.

Partindo do caso 1, para tentar resolver os problemas dos níveis de tensão e corrente, o condutor da linha que liga a carga ao transformador foi alterado. Para escolher outro condutor, foi proposto um modelo de cabo que suportasse maior fluxo de corrente e que as impedâncias de sequência do mesmo tivessem valores menores em relação ao cabo que já estava sendo usado, o que reflete em menos quedas de tensão na linha.

A Tabela IV mostra os parâmetros do novo condutor utilizado na linha que liga o transformador à carga:

TABELA IV. PARÂMETROS ELÉTRICOS DOS CONDUTORES.

Parâmetro Elétrico	Condutor do Caso base e Caso 1	Novo Condutor
R1 (Ω/km)	0,1	0,01
X1 (Ω/km)	0,15	0,015
R0 (Ω/km)	0,22	0,022
X0 (Ω/km)	0,6	0,06
C1 (nF/km)	4,4	1,4
C0 (nF/km)	2,6	0,6
Corrente Admissível (A)	100	200

Com isso, foi possível executar novamente o fluxo de potência no OpenDSS. Em seguida, os resultados foram obtidos, conforme mostra a tabela V:

TABELA V. RESULTADOS DE TENSÃO, CORRENTE E PERDAS OBTIDOS PELO FLUXO DE POTÊNCIA NO OPENDSS PARA O CASO 2.

Variável Analisada	Análise	Resultado	Admissível
Tensão (pu)	Barra – Carga	0,9703	0,95 – 1,05
Corrente (A)	Linha – Linha1	79,26	200
Perdas (%)	Perdas Totais	0,98	-

Foi possível obter a queda de tensão ao longo do circuito, conforme mostra a figura 5:

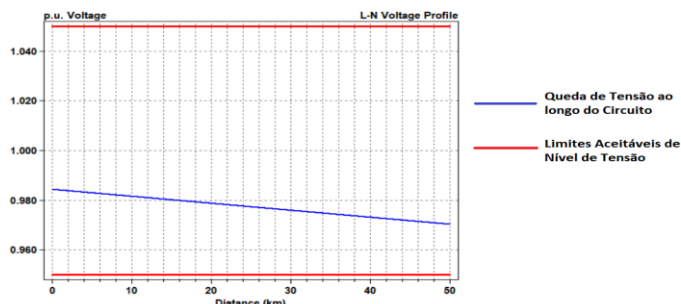


Figura 5. Perfil de tensões a partir do transformador do SEP – Caso 2

Com os resultados dos casos base, caso 1 e caso 2, foi possível compará-los, conforme mostra a figura 6 e a tabela VI:

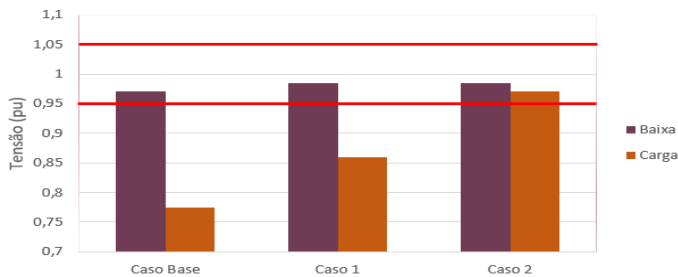


Figura 6. Comparação nos níveis de tensão entre caso base, caso 1 e caso 2.

TABELA VI. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE CORRENTE E PERDAS ENTRE CASO BASE, CASO 1 E CASO 2.

Variável Analisada	Análise	Resultado (Caso base)	Resultado (Caso 1)	Resultado (Caso 2)
Corrente (A)	Linha – Linha1	194,44	137	79,26
Perdas (%)	Perdas Totais	18,03	7,25	0,98

Analisando os valores das tabelas V e VI, além da figura 6, percebe-se uma incrível melhora em todos os quesitos no caso 2 em relação ao caso base e caso 1:

- A tensão na carga, agora, está de acordo com a norma;
- A corrente na linha 1 está dentro do que é suportado pelo condutor (até 100 A), sendo que a mesma sofreu uma redução de 42,15% em relação ao caso 1;

- As perdas diminuíram significativamente, reduzindo em 86,48% em relação ao caso 1, sendo que as mesmas agora valem somente 0,98% de toda potência do circuito.

D. Caso 3: Inserção de curva de carga.

Seguindo na linha de estudo do caso 2 e partindo do pressuposto que, em uma residência, toda carga instalada não é utilizada em todos os horários, foi proposta a inserção de uma curva de carga para modelar a carga já existente, analisando como o sistema se comporta em diferentes horários do dia, onde a demanda por energia não é igual.

A curva de carga inserida no OpenDSS está ilustrada na Figura 7:

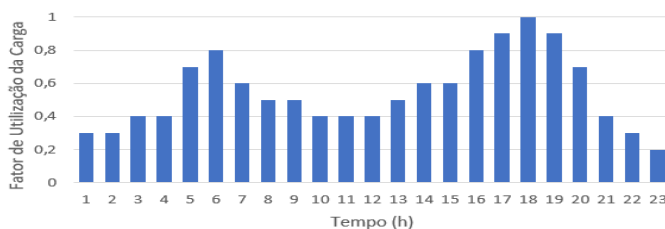


Figura 7. Curva de carga da carga em estudo.

Após rodado o fluxo de potência, alguns resultados para análise foram obtidos, conforme mostram as figuras 8 e 9:

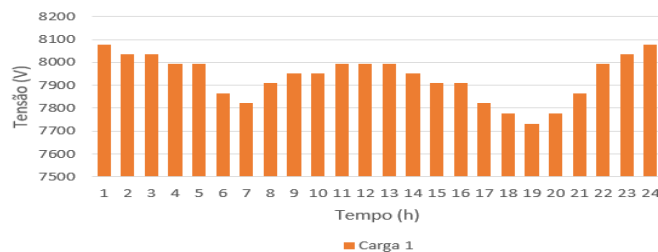


Figura 8. Níveis de tensão ao longo das horas do dia na carga.

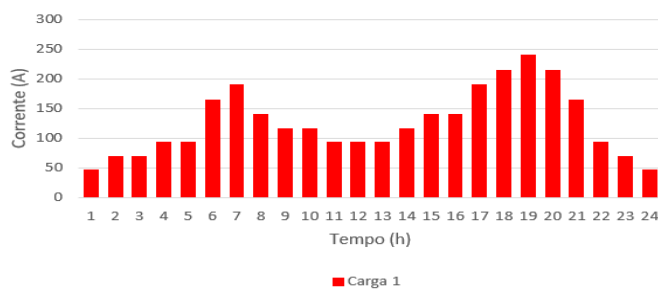


Figura 9. Níveis de corrente ao longo das horas do dia na carga.

Analisando as figuras 8 e 9, percebe-se que, entre as 17 e 21 horas, que são os horários de maior consumo, a corrente

aumenta e a tensão diminui, o que reflete em maiores perdas nesse período, conforme ilustra a figura 10:

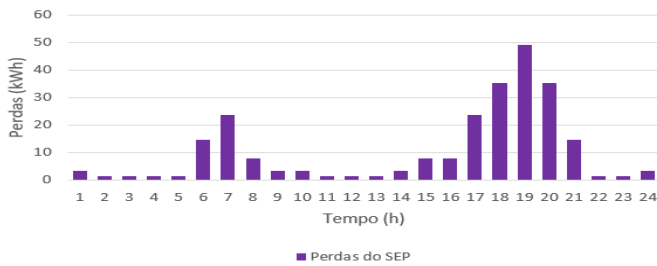


Figura 10. Perdas no circuito.

E. Caso 4: Inserção de geração distribuída.

Partindo do caso 3, foi proposta a inserção de um sistema de geração distribuída conectada à carga, através da utilização de painéis fotovoltaicos, com a finalidade de aumentar os níveis de tensão, além de ser uma forma de geração de energia que, cada vez mais, tem sido investida em escala mundial, seja em residências ou indústrias.

No OpenDSS, foi inserido uma curva de geração de energia solar, que está mostrada na figura 11:

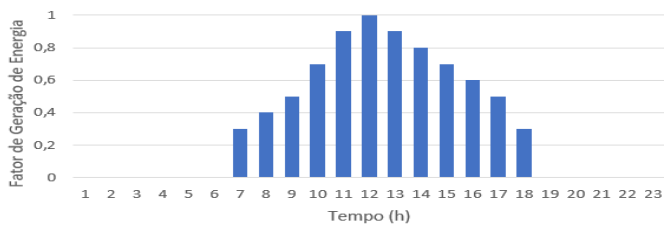


Figura 11. Curva de geração de energia solar.

Após a inserção da curva de geração, além dos painéis fotovoltaicos, com potência nominal de 4 MW, foi executado novamente o fluxo de potência, obtendo os seguintes resultados, que são comparados aos obtidos no caso 3:

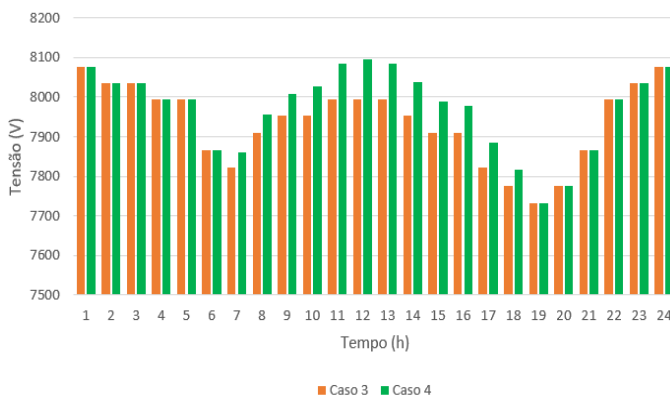


Figura 12. Níveis de tensão ao longo das horas do dia na carga nos casos 3 e 4.

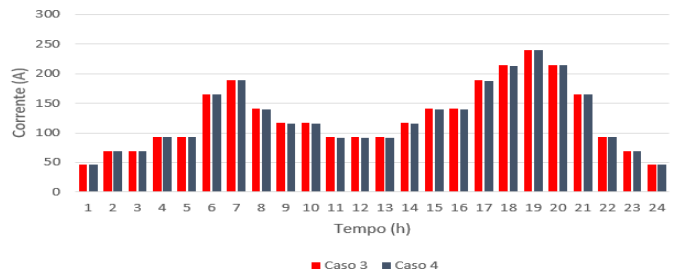


Figura 13. Níveis de corrente ao longo das horas do dia na carga nos casos 3 e 4.

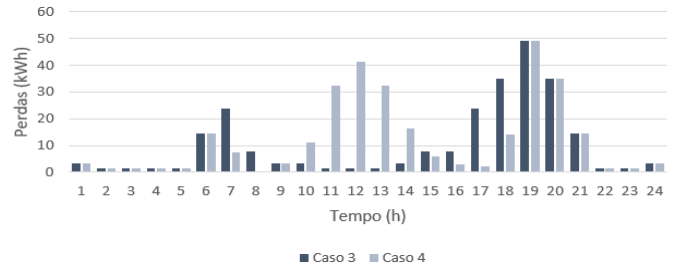


Figura 14. Perdas no circuito nos casos 3 e 4.

Analisando os resultados, percebe-se que, com a inserção de GD, eleva-se os níveis de tensão quando a mesma está atuando; com relação às perdas, estas são maiores quando a geração está no seu pico. Os níveis de corrente permanecem praticamente inalterados.

F. Caso 5: Inserção de um banco de Baterias.

Partindo da linha de raciocínio do caso 4, analisaram-se que as maiores perdas se concentram nos horários de pico. Por isso, foi proposta a inserção de um banco de baterias junto a carga, que se carregam nos horários de menor consumo e atuam nos picos de demanda, reduzindo o fluxo de potência proveniente da rede elétrica.

Esse sistema será composto de um banco de baterias, que armazenam até 8000 kWh quando estão totalmente carregadas, e fornecem no máximo 2000 kWh ao sistema.

A figura 15 ilustra os períodos onde o sistema de armazenamento está recebendo energia da rede, carregando o banco de baterias (curva abaixo de 0 pu) ou fornecendo energia à carga (curva acima de 0 pu):

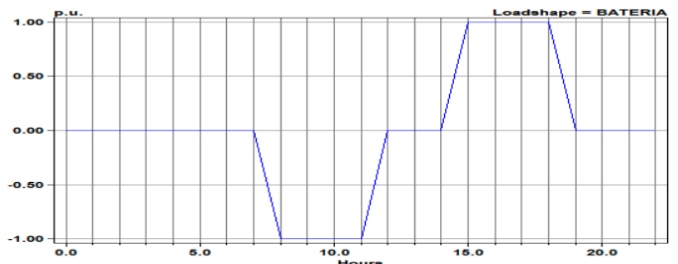


Figura 15. Curva de Recarga/Fornecimento de energia pelo banco de baterias.

Após adicionado o banco de baterias no OpenDSS, foi possível executar o fluxo de potência e comparar os resultados obtidos com os casos 3 e 4, conforme mostram as figuras 16, 17 e 18:

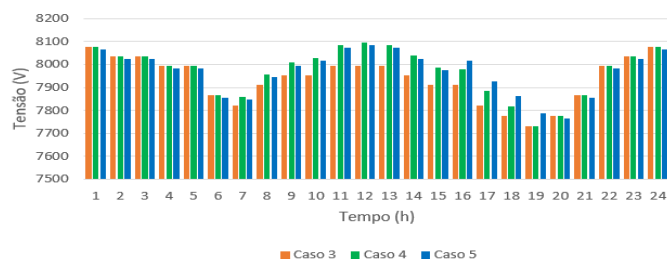


Figura 16. Níveis de tensão ao longo das horas do dia na carga nos casos 3, 4 e 5.

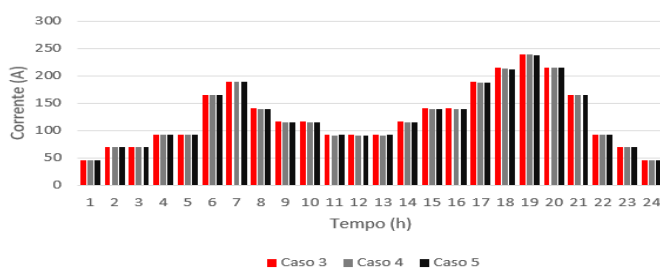


Figura 17. Níveis de corrente ao longo das horas do dia na carga nos casos 3, 4 e 5.

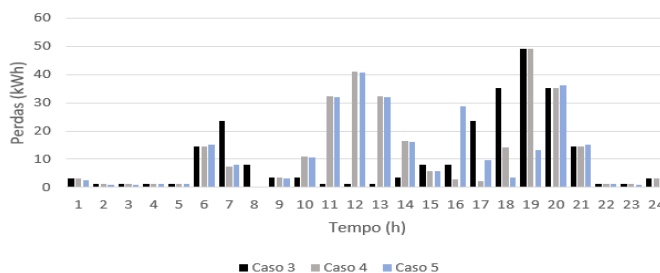


Figura 18. Perdas no circuito nos casos 3, 4 e 5.

Através dos resultados obtidos e analisando as figuras 16, 17 e 18, percebe-se que o banco de baterias eleva o nível de tensão nos horários de pico, reduzindo as perdas da rede nesse período.

IV. CONCLUSÃO

Após os estudos de caso, partindo-se do caso base, foi possível observar a importância de se estudar o fluxo de potência em sistemas elétricos, visto que muitos não obedecem às normas exigidas pelos agentes regulamentadores do sistema elétrico brasileiro. Por isso, ressalta-se a importância de se

utilizar *softwares* com análises de operação de SEPs, como o OpenDSS.

A partir dos estudos de caso, analisou-se como o sistema se comporta com alterações no mesmo, pois os sistemas de potência reais cada vez mais estão sendo expandidos com a inserção de geração distribuída, bancos de capacitores, além dos sistemas de armazenamento.

Foi possível observar, através dos estudos de caso, que a inserção de bancos de capacitores junto à carga aumenta o nível de tensão, visto que injeta reativos na rede. Além disso, foi visto a importância da escolha do condutor da linha, sendo que, na rede em estudo, a escolha de um novo condutor melhorou significativamente os níveis de tensão, corrente e perdas.

Posteriormente, um novo tipo de estudo, com a inserção de uma curva de carga, mostrou que, em horários de maior consumo, a operação do sistema se torna mais crítica, aumentando os níveis de corrente e perdas, e reduzindo os níveis de tensão.

Foram propostos os casos 4 e 5 para resolver os problemas com a inserção da curva de carga, com GD e um sistema de baterias, com base que são cada vez mais presentes nas redes elétricas atuais e que realmente melhoraram os resultados que foram analisados ao longo do trabalho.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio técnico e financeiro da CPFL Energia pelo projeto “Soluções Inovadoras de Eficiência Energética e Minigeração em Instituição Pública Federal de Ensino Superior: Uma Abordagem na UFSM” (P&D/ANEEL).

REFERÊNCIAS

- [1] D.T Rizy, H. Li, F. Li, Y. Xu and S. Adhikari, “Impact of Varying Penetration of Distributed Resource with & without Volt/Var control: Case Study of Varying Load Types” in 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, p. 1-7, 2011.
- [2] JUNIOR, S. B. S, *Análise de operação de sistemas de distribuição utilizando o OpenDSS*. 2010. 135f. Trabalho de Conclusão de Curso - Univesidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- [3] JÚNIOR, J. D. A, *Análise de microgeração fotovoltaica em um sistema de distribuição Utilizando o OpenDSS*. 2016. 32f. Monografia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- [4] FGV ENERGIA, *Boletim de Conjuntura do Setor Energético*. Rio de Janeiro, 2017.
- [5] Fabiano, F. C, *Estudo do Simulador OpenDSS*. 2014. 119f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.