

Análise da Variação de Tensão na Rede de Distribuição com a Inserção de Acumuladores de Energia

Leticia Saba Alves
UNIFACS
leticia.saba2013@gmail.com

Daniel Barbosa, Kleber Freire da Silva
UFBA
dbarbosa@ufba.br; kfreire@ufba.br

Resumo — Considerando a importância de se melhorar a qualidade da energia elétrica entregue aos consumidores, baseando-se no avanço das tecnologias e na possibilidade de instalar dispositivos geradores ou armazenadores de energia mais próximos aos consumidores, este trabalho apresenta estudos sobre os impactos provocados nos níveis de tensão das redes de distribuição elétrica ao se inserir dispositivos de armazenamento de energia ao longo de alimentadores de média tensão.

Palavras-chaves — Armazenamento de Energia, Qualidade de Energia, Rede de Distribuição.

I. INTRODUÇÃO

Com o aumento no consumo de energia elétrica, resultado do crescente desenvolvimento da sociedade, as empresas do setor elétrico vêm buscando aperfeiçoar seus produtos e serviços de modo a melhorar a eficiência e a confiabilidade, principalmente em relação ao Sistema de Distribuição (SD). Desta forma, diversos estudos são realizados no intuito de diminuir as perdas, de reduzir os impactos ao meio ambiente e de melhorar a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) fornecida ao consumidor [1]-[4].

É importante salientar que o SD se destaca por se confundir com a topografia das cidades e por conectar fisicamente o sistema de transmissão, ou unidades de geração de médio e pequeno porte, aos consumidores finais [5]. No Brasil esse sistema é regulamentado por um conjunto de regras dispostas em resoluções da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), cujo objetivo é normatizar e padronizar as atividades relacionadas ao desempenho e à confiabilidade do SD [6].

Dentre os documentos disponibilizados pela agência reguladora, evidenciam-se os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), que disciplinam o relacionamento entre as distribuidoras de energia elétrica e demais agentes (unidades consumidoras e centrais geradores) conectados aos sistemas de distribuição, bem como, o relacionamento entre estas e a ANEEL no que diz respeito ao intercâmbio de informações [7].

Diante deste cenário, e da constante busca por melhores indicadores operacionais aliados à necessidade de minimizar os impactos ambientais, a Geração Distribuída (GD) se torna uma alternativa de geração interessante, visto que esta é

caracterizada pela produção de energia elétrica junto ou próximo aos consumidores, interligada diretamente ao sistema de distribuição. Desta forma, evitam-se as perdas técnicas relacionadas ao transporte de energia e reduzem-se os impactos ambientais relacionados aos grandes empreendimentos de geração [8].

Normalmente, os sistemas de GD usam fontes de geração solar ou eólica, que por serem renováveis contribuem para a diminuição da emissão de gás carbônico (CO₂) e esgotamento progressivo das reservas de combustíveis fósseis, principalmente petróleo e carvão natural [1]. No entanto, essas matrizes são intermitentes e não possuem a mesma eficiência durante todo o dia, o que pode provocar variações nos níveis de tensão e, conseqüentemente, impactar nos indicadores de QEE entregues aos consumidores.

Para compensar ou atenuar a intermitência causada por esse tipo de geração, tem-se o crescente interesse em sistemas de armazenamento energético, os quais se adaptam aos diferentes ritmos de produção e de demanda por eletricidade, armazenando energia nos momentos em que há excesso de produção e cedendo energia quando ocorre o contrário [5].

Todavia, a inserção de acumuladores de energia (AE) está associada a uma série de impactos técnicos que promovem problemas na QEE, como por exemplo, dificuldade na regulação da tensão devido aos harmônicos e possibilidade do aumento das perdas na rede provenientes da inversão do fluxo de potência [5]. Em face a isso, pesquisadores e engenheiros vêm realizando estudos objetivando analisar os impactos na melhoria da confiabilidade do sistema de energia ao utilizar a tecnologia de armazenamento, principalmente em lugares integrados à geração de energias renováveis [3], [9]-[12].

Em corroboração com os relatos na literatura supracitados, este trabalho visa analisar os impactos gerados na QEE pela inserção de acumuladores de energia na rede de distribuição através de simulações computacionais. O presente estudo, foi baseado em um alimentador de distribuição (AL) existente utilizando parâmetros reais com o objetivo de aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos.

II. ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Os sistemas de armazenamento de energia são considerados um estágio intermediário entre a produção de

energia e o seu consumo, pois ele reduz a exportação da energia gerada para o sistema de distribuição durante a baixa demanda, desviando parte desta energia gerada para um dispositivo de armazenamento, o qual suprirá o SD no período de altas demandas.

Com o uso dos dispositivos de armazenamento nas redes de distribuição de energia elétrica, a possibilidade de equilíbrio entre a geração e a demanda se torna possível, visto que os dispositivos de armazenamento são carregados durante os períodos de baixa demanda de energia e utilizados durante os horários de pico de consumo, a fim de evitar variações de frequência e de tensão na rede, tornando a curva de carga mais *plana* [5]. É importante salientar que o funcionamento dos sistemas de armazenamento de energia é baseado em diversos fenômenos físicos ou químicos, que envolvem essencialmente a transformação de energia elétrica em outro tipo de energia, de modo que quando demandada, é revertida novamente em energia elétrica [5].

Basicamente, os sistemas de armazenamento de energia são compostos por três componentes principais: o meio de armazenamento, responsável pela forma como a energia será armazenada; o Sistema de Conversão de Potência (PCS), que é responsável pela transformação de corrente contínua para corrente alternada, e vice-versa; e, a planta, que são todos os dispositivos responsáveis por interligar a rede elétrica ao sistema de conversão [13].

Os dispositivos de armazenamento são categorizados em função do tipo de tecnologia utilizada no armazenamento da energia, uma vez que esses componentes definirão o comportamento do sistema quando conectados à rede elétrica.

Desta forma, os principais sistemas são constituídos por: banco de baterias; supercapacitores que possuem como característica o armazenamento de alta densidade de potência com capacidade de ciclo elevada; volantes mecânicos (*flywheels*), que suportam cargas críticas durante interrupções no sistema elétrico; armazenadores pneumáticos hidráulicos e supercondutores magnéticos. Todavia, a tecnologia mais empregada é baseada nas baterias, pois apesar do alto custo de implantação e de manutenção, elas se tornam mais relevantes devido às suas características de armazenamento de energia em baixa escala e por poderem entregar energia em curto prazo [5].

III. SISTEMA ELÉTRICO SIMULADO

A Fig. 1 representa um alimentador urbano modelado com parâmetros reais disponibilizados por uma concessionária de energia elétrica. Este sistema foi utilizado como base para os devidos estudos referentes à análise dos impactos gerados pela inserção de acumuladores de energia na rede de distribuição elétrica. Sendo assim, nessa seção serão apresentados os elementos utilizados no sistema modelado.

O *software* utilizado para modelagem do sistema foi o OpenDSS (*Open Distribution System Simulator*), visto que este é uma ferramenta de código aberto e apropriado para simulação em sistemas de distribuição, permitindo analisar e estudar várias configurações do SD com diferentes componentes, incluindo os acumuladores de energia [14].

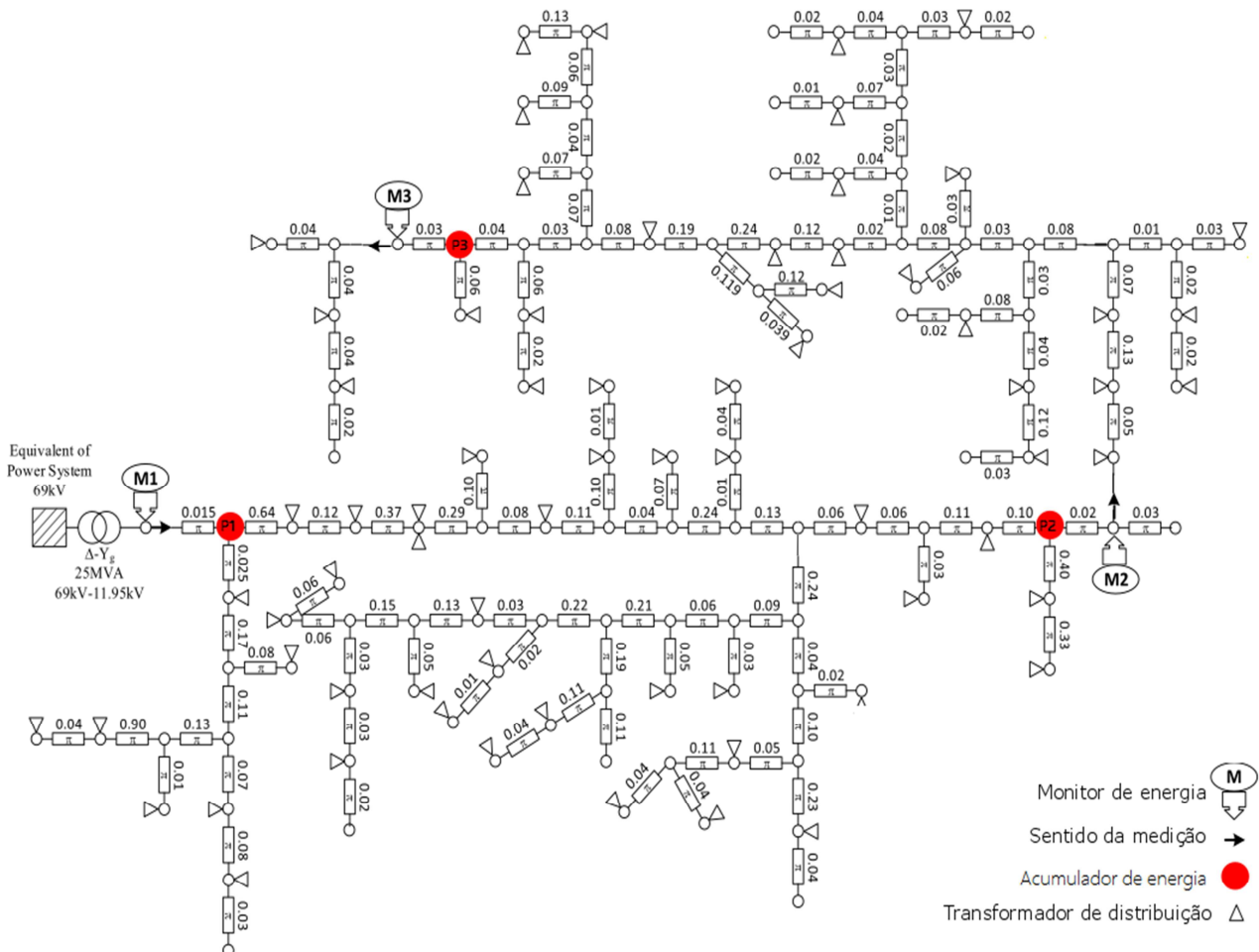


Fig. 1. Sistema Elétrico Modelado.

A. Rede Elétrica de Distribuição

O alimentador de distribuição utilizado é radial de 11,95kV, urbano, composto por 132 nós, nos quais incluem-se clientes residenciais e comerciais. Este sistema é derivado de uma subestação abaixadora com transformador de 25MVA, cujo carregamento foi considerado a partir de medições de campo.

B. Perfil de Carga

As cargas deste alimentador foram modeladas como RL em delta com fator de potência de 0,92 indutivo, ou seja, considerou-se o equivalente na alta do transformador de distribuição. A demanda total do alimentador em estudo, considerando as unidades consumidoras interligadas na média tensão, é de 6.656,74 kW. Fig. 2 esboça a curva de carga típica do alimentador em um dia útil.

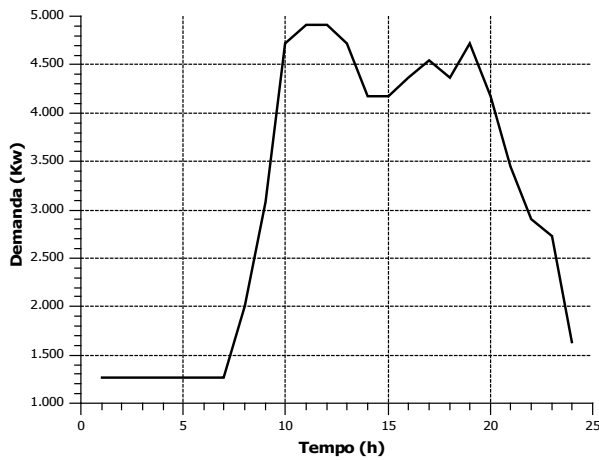


Fig. 2. Curva de Carga.

C. Acumulador de Energia

O acumulador de energia (*Object Storage*) foi modelado conforme manual do OpenDSS e apresentado, com os parâmetros, na Fig. 3 [15]. A parametrização deste objeto foi definida seguindo as características do sistema utilizado, incluindo a tensão de trabalho 11,95 kV; a curva de carga e de descarga do acumulador de energia; e a sua capacidade máxima de armazenamento, baseada no período de maior demanda do sistema durante 1 dia. Com base na curva de carga do sistema obteve-se um período de atuação do AE de 11h. Sendo assim, e sabendo-se que a demanda do sistema é de 6.656,74 kW, o alimentador tem que conseguir suprir uma carga de 73.224,14 kWh.

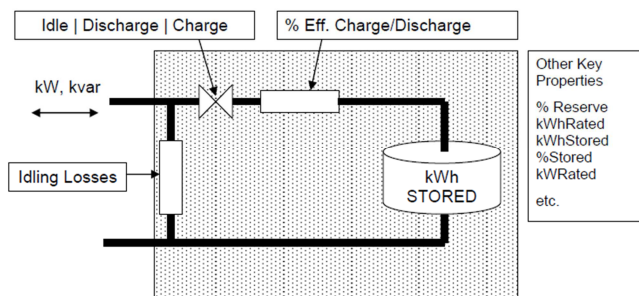


Fig. 3. Modelo Genérico do Acumulador (OpenDSS).

É importante salientar que o dimensionamento do AE foi feito baseado em [16] e sua curva de carga e de descarga está demonstrada na Fig. 4. Nesta, é possível verificar que o AE está sendo carregado quando a curva possui um valor negativo e descarregado proporcionalmente quando positivo, ou seja, conforme a curva de carga do alimentador (Fig. 2). Assim, quando a demanda é baixa, o AE está carregando e durante o horário de maior demanda do sistema, o AE está injetando potência na rede elétrica.

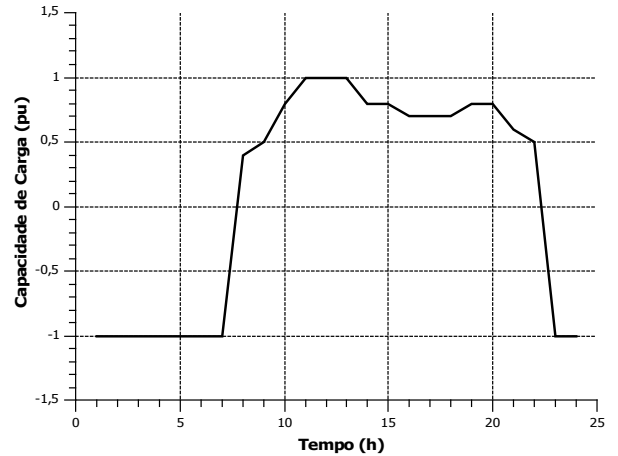


Fig. 4. Curva de Carga e Descarga do AE.

IV. RESULTADOS

Após a definição das características do alimentador, bem como o tipo de acumulador a ser utilizado, o presente estudo considerou a inserção dos AE's na rede de distribuição elétrica em 6 etapas. Na primeira etapa, verificou-se o comportamento do alimentador sem a presença do AE. Para isso, foram inseridos três medidores de qualidade da energia elétrica localizados no início (M1), no meio (M2) e no final (M3) do alimentador, respectivamente, conforme indicação na Fig. 1.

Na etapa 2, foi escolhido o ponto de maior queda de tensão, no caso o final do alimentador, para verificar o impacto provocado pelo AE de acordo com a potência injetada no sistema.

Nas etapas 3, 4 e 5, um AE foi inserido com a potência definida no item B da seção IV em alguns pontos do SD de forma a verificar qual a contribuição deste acumulador para esta rede e os seus respectivos impactos nos níveis de tensão dos barramentos.

Para a última etapa foi feita uma análise com o objetivo de melhorar o perfil de carga e descarga do AE, ou seja, o teste foi feito modificando a curva de carga e descarga, afim de obter uma melhoria na estabilidade da tensão no ponto de maior queda, M3.

A. Alimentador sem inserção de acumuladores de energia

O comportamento das tensões nos três pontos de medição quando o alimentador está funcionando sem que haja acumuladores de energia inseridos na rede é caracterizado pelas curvas da Fig. 5.

Pode-se observar que as tensões se comportam de forma regular sem grandes variações no período de 0h às 9h da manhã, apesar da existência de uma pequena diferença entre

as tensões na entrada, no meio e no final do AL. Entretanto, a medida que a demanda aumenta, no período entre 7h e 19h, a queda de tensão se torna significativa, principalmente nos pontos mais distantes da subestação, conforme pode ser verificado nas curvas dos medidores M2 e M3.

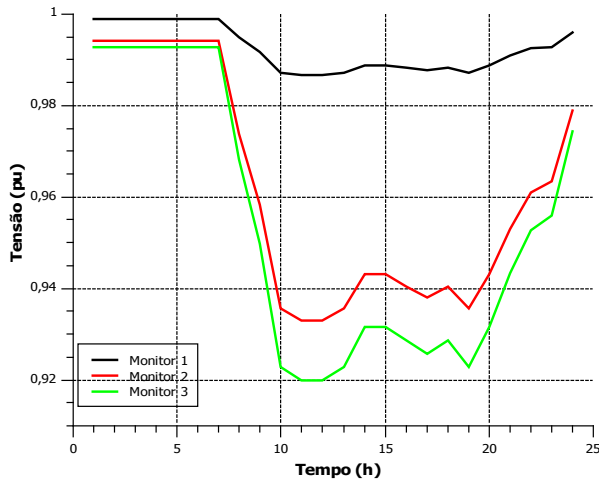


Fig. 5. Tensões nos medidores sem acumuladores na rede.

Esta variação nos níveis de tensão nos pontos analisados prejudica a QEE entregue ao consumidor, uma vez que pode gerar transtornos ao interferir na operação de muitos equipamentos. Além disso, é factível verificar que os valores observados estão em desacordo aos limites estabelecidos no Módulo 8 do PRODIST, visto que a tensão adequada deve ficar entre 0,93 pu e 1,05 pu, e neste alimentador, a variação de tensão é considerada precária (entre 0,90pu e 0,93pu), conforme Tabela 1 [6].

TABELA I. PONTOS DE CONEXÃO EM TENSÃO NOMINAL SUPERIOR A 1 kV E INFERIOR A 69 kV.

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação de Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Precária	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

B. Conexão de Acumuladores de energia no final do alimentador, com variação da potência injetada.

Nessa etapa, foi avaliado o comportamento do sistema ao ser submetido à inserção de um AE no final do AL, localização onde a queda de tensão é mais significativa, com variadas potências. O objetivo destes testes é analisar se a potência de saída do AE interfere de forma considerável na variação de tensão da rede. O sistema foi submetido a potências de 30, 50, 80 e 100% da demanda total, indicadas na Fig. 6. Vale ressaltar que essa potência inicial foi escolhida de maneira empírica.

Como pode ser observado, o melhor aproveitamento para o ponto analisado, representado pelo M3, foi para a potência de 30%, pois conseguiu manter a tensão estável por mais tempo e quando o AE entra em estado de carregamento o resultado da tensão não fica fora dos limites estipulados pelo PRODIST. Além disso, é possível notar que essa configuração manteve a tensão em aproximadamente 0,98 pu, ao longo de todo o dia.

Para as outras potências analisadas, o resultado foi mais ineficiente, pois quanto mais alta a potência injetada maior a variação de tensão no M3 entre os períodos de baixa e de alta demanda.

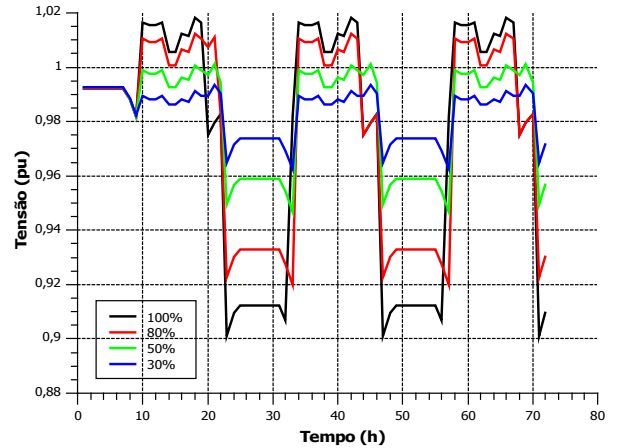


Fig. 6. Tensões nos medidores com AE no final do alimentador, para variadas potências.

Com base nos resultados encontrados nessa etapa das simulações com potências variadas, considera-se para as próximas análises a utilização da parametrização do acumulador que respondeu melhor ao sistema, ou seja, com potência de 30%.

C. Conexão de acumuladores de energia no início do alimentador.

A Fig. 7 mostra o comportamento das tensões quando inserido um AE, no início do alimentador, ou seja, no ponto P1 da Fig. 1. Pode-se observar que os níveis de tensão encontrados não são satisfatórios, uma vez que o comportamento do sistema continua semelhante à configuração original, quando não possuía nenhum AE. Tal fato sugere que essa configuração não agrega ganhos que tornem interessante a inserção de AE próximos à geração, no início do AL.

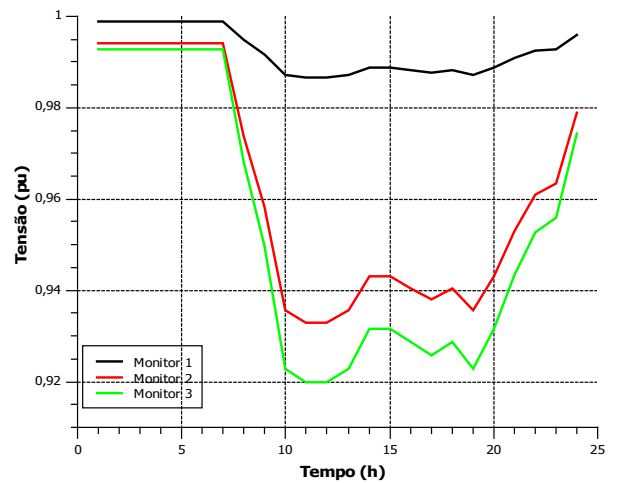


Fig. 7. Tensões nos medidores com AE no início do alimentador.

D. Conexão de Acumuladores de energia no meio do alimentador.

Ao inserir o AE no meio do alimentador, no ponto P2 da Fig.1, é possível notar que os níveis de tensão apresentaram uma melhora significativa nos três pontos de medição, sem que houvesse nenhuma violação frente aos indicadores definidos no PRODIST, mesmo no período de maior demanda da carga do alimentador.

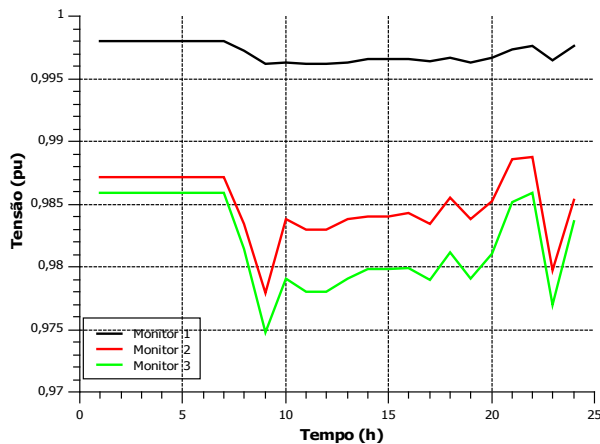


Fig. 8. Tensões nos medidores com AE no meio do alimentador

E. Conexão de Acumuladores de energia no final do alimentador.

Nessa etapa foi inserido o AE no final do alimentador, onde a queda de tensão se mostrava em maior intensidade que nos outros pontos. Ao coletar os dados fornecidos pelos medidores, foi possível observar que ocorreu o aumento de tensão de forma significativa em todos os pontos monitorados, principalmente no M2 e M3, conforme Fig. 9.

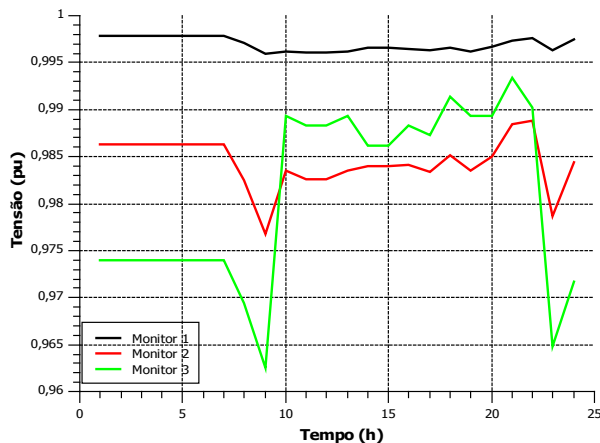


Fig. 9. Tensões dos medidores com AE no final do alimentador.

Neste momento as tensões nos pontos já estão com o nível de oscilação bem inferior ao inicial. Porém, como o objetivo é manter a tensão o mais horizontal ao longo da curva de carga diária, o próximo item apresentará o comportamento da rede frente a diferentes curvas de descarga do AE.

F. Conexão de Acumuladores de energia no final do alimentador, com variação na curva de carga e de descarga.

Para essa etapa do estudo, foi utilizada a configuração de AE que apresentou melhor eficiência nas etapas anteriores, configurado com potência de 30% e instalado no ponto P3. O

objetivo é reduzir as flutuações nos níveis de tensão no final do alimentador em função do tipo de curva de carga e descarga do AE.

Com o intuito de obter tal comportamento, foram utilizadas mais duas curvas de carga e descarga além da utilizada para todos os outros testes. A curva utilizada nos demais testes é denominada nesse item como sendo “Curva 1”, conforme mostra a Fig. 10. A escolha da curva do AE pode variar de acordo com o tipo de armazenamento, no entanto neste estudo foi escolhida de maneira empírica, de forma a demonstrar que a curva de carga e descarga interfere diretamente na resposta do sistema.

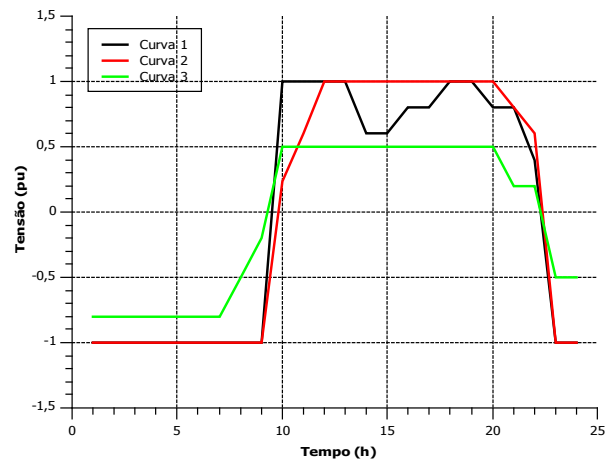


Fig. 10. Curvas de carga e descarga do AE.

Após a definição das curvas, uma série de testes foram realizados, cujos resultados estão apresentados na Fig. 11. A partir desta figura, pode-se constatar que a curva de descarga do AE que melhor atendeu ao perfil de demanda no final do alimentador (M3) foi a “Curva 3”, pois possibilitou uma melhor variação dos níveis de tensão ao longo do dia, melhorando ainda mais a eficiência do AE sobre a rede.

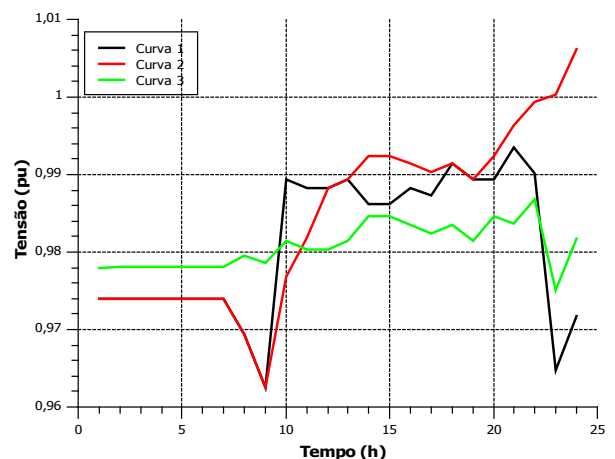


Fig. 11. Tensões no ponto M3, para cada curva de carga.

Com a utilização da nova curva de carga (curva 3), nota-se também uma melhoria no ponto de medição 2, ou seja, os níveis de tensão também apresentam um resultado mais uniforme ao longo do dia, conforme é apresentado na Fig. 12. A variação de tensão nos pontos analisados passou a ter uma oscilação na faixa entre 0,99 e 0,98 pu, o que indica que a aplicação desse tipo de tecnologia deve ser avaliada em face ao perfil da curva de carga e descarga do AE.

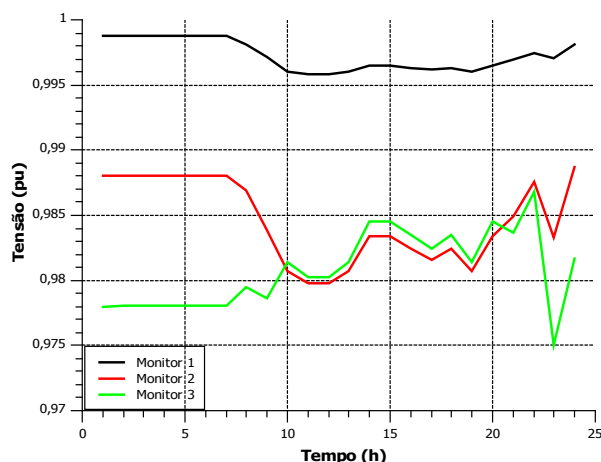


Fig. 12. Tensão nos medidores com a curva de carga 3.

V. CONCLUSÃO

Neste artigo foram apresentados alguns aspectos referentes à QEE em redes elétricas de distribuição quando existe a conexão de um sistema acumulador de energia. O parâmetro analisado foi a variação de tensão decorrente da demanda do sistema.

Comparando os resultados encontrados durante os testes realizados, é possível concluir que com a instalação de um AE em alguns dos pontos estudados nesse sistema de distribuição, posicionados no início, meio ou fim do AL, contribuem com a melhoria da QEE, uma vez que os parâmetros analisados passaram a ficar compreendidos dentro dos limites estipulados pelo módulo 8 do PRODIST. Diante desse fato, evita-se que a concessionária seja penalizada e favorece-se os consumidores, pois estes passam a ter uma menor flutuação nos níveis de tensão.

No entanto, baseado nos resultados encontrados durante os testes, pode-se afirmar que a inserção de AE em alguns pontos específicos no decorrer do alimentador apresentou uma melhor resposta do sistema, como no caso que se colocou o AE no final do AL. Foi possível concluir ainda que o ajuste da potência de saída do AE influencia na sua autonomia e na capacidade de manter o nível de tensão pelo tempo necessário, sendo encontrado o valor de 30% como ideal apenas para o estudo de caso aqui apresentado.

Por fim, é factível salientar a importância de se realizar uma análise sobre a parametrização, tipo de armazenamento e topologia de implantação do AE antes da sua inserção no sistema de distribuição, pois dependendo das suas características de carga e descarga, a QEE pode ser melhorada ou degradada na circunvizinhança.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Universidade Salvador (UNIFACS) pela disponibilização dos recursos necessários, bem como aos Engenheiros Vinicius Barboza e Pedro Henrique S. da Silveira Pinto pelas contribuições durante o desenvolvimento deste trabalho.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] F. Marina, P. Dionizio e S. Falcondes, "Impacto da Geração Fotovoltaica Distribuída em Parâmetros de Qualidade de Energia Elétrica", XI CBQEE, 2016.
- [2] N. Adarsh e A. Raja, "Design and Strategy for the Deployment of Energy Storage Systems in a Distribution Feeder With Penetration of Renewable Resources," *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, vol. 6, pp. 1085 – 1092, 2015.
- [3] A. Narimani, G. Nourbakhsh, G. F. Ledwich e G. R. Walker, "Impact of electric energy storage scheduling on reliability of distribution system," *Power Electronics and Drive System, IEEE 11th International Conference on*, pp. 405 – 408, 2015.
- [4] H. Dong, T. Liting, Y. Xavier, N. Xingvan e Z. Kun, "The impact analysis of distribution grid based on Battery energy storage system," *Electricity Distribution (CICED), China International Conference on*, pp. 51 – 56, 2014.
- [5] F. Pedro, "Integração e Controle de dispositivos de armazenamento de energia em redes de distribuição de baixa tensão." Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Faculdade de Engenharia Universidade do Porto. 2015
- [6] Agência nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Módulo 8– Qualidade de Energia Elétrica, Revisão 6, 2014.
- [7] Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE), A Distribuição de Energia. Disponível em www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia Acessado 17 de Agosto de 2016.
- [8] R. Bruno, "Estudos Elétricos para Avaliação do Impacto da Geração Distribuída na rede de Distribuição Elétrica e na Forma de Microrredes", 2010. Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000711.pdf Acessado 17 de agosto de 2016.
- [9] D. Roger, T. Jason e D. Gauthier, "Storage Simulations for Distribution System Analysis", 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013), Stockholm, 2013, pp. 1-4.
- [10] X. Yixing e C. Singh, "Adequacy and Economy Analysis of Distribution Systems Integrated With Electric Energy Storage and Renewable Energy Resources," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, pp. 2332-2341, 2012.
- [11] H. Dong, T. Liting, Y. Xavier, N. Xingyan e Z. Kun, "The impact analysis of distribution grid based on Battery energy storage system," *CICED 2014*.
- [12] Q. Yan, B. Zhang e M. Kezunovic, "The demand response support under weather impacts using PV generation and EV energy storage," 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Florence, 2016, pp. 1-6.
- [13] Hussein Ibrahim e Adrian Ilinca, "Techno-economic analysis of different energy storage technologies", *Energy Storage - Technologies and Applications*, Dr. Ahmed Zobaa (Ed.), InTech, 2013.
- [14] D. Roger, "OpenDSS Manual, 2016". Disponível em: <https://sourceforge.net/projects/electricdss/>. Acessado em 17 de Setembro de 2016.
- [15] D. Roger, "OpenDSS Storage Element and STORAGECONTROLLER Element, 2011". Disponível em: <https://sourceforge.net/projects/electricdss/>. Acessado em 17 de Setembro de 2016.
- [16] O. Alexandre, C. Rachid and B. Antoine, "Sizing and Optimal Operation of Battery Energy Storage System for Peak Shaving Application," *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*, pp. 621 - 625, 2007.