

Estudo de Impacto dos Armazenadores de energia nas perdas dos Sistemas de distribuição com Geração Distribuída

Camilo Sepúlveda, Rafael Pagnossin, Luciane Canha, Mauricio Sperandio

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

casepulvedar@unal.edu.co, rafaelop93@gmail.com, lucianecanha@ufsm.br, mauricio.sperandio@ufsm.br

Abstract—This work presents an analysis of the impact of the storage systems for energy losses in distribution system with distributed generation (DG). For this analysis a short description of the characteristic of the distributed generation was developed. The paper compares different kinds of storage systems (SS) showing its characteristics. The analysis was modeled using the DSSIM Simulator based in the OPEN DSS EPRI's software, considering the IEEE 123 nodes distribution test system. The results show the impact of the charging and discharging of the storage systems for the energy losses in distribution systems. Finally, conclusions about some scenarios considering DG and SS are presented.

Index Terms—Distribution Systems, Distributed Generation, Storage Systems, Smart Grids, active losses, wind generation.

I. INTRODUÇÃO

Com o crescimento tecnológico e o interesse focado na eficiência energética, cada vez mais vê-se uma mudança no conceito clássico do sistema elétrico que evolui rapidamente para o conceito das redes elétricas inteligentes (*smart grids*). As *smart grids* constituem-se por um sistema que reúne os recursos energéticos centralizados e distribuídos, incluindo o uso intensivo de fontes renováveis e a participação ativa do controle e gerenciamento da demanda. Este novo conceito envolve a aplicação de tecnologias de comunicação e controle as quais permitem maior conhecimento sobre o estado do sistema elétrico de distribuição, aumentando a qualidade do fornecimento e possibilitando o surgimento de mercados mais competitivos. [1].

Dentro do contexto das redes inteligentes, o uso de tecnologias renováveis é favorecido tanto por sua sustentabilidade, como por sua disponibilidade em amplas áreas geográficas [2]. Isso é um diferencial em relação às fontes convencionais, que estão concentradas em países específicos. Além de serem consideradas como energias limpas, as fontes renováveis como solar fotovoltaica e eólica também oferecem a vantagem de evitar uma volatilidade de preços baseadas na geração por combustíveis fósseis [2]. Desta forma, com a aplicação de incentivos econômicos, torna-se atrativa a instalação de sistemas distribuídos para a produção de energia

elétrica, baseados em fontes renováveis [3]. As possibilidades associadas à nova dinâmica de mercado que se abre com a GD favorecem a disseminação destes sistemas os quais podem trazer benefícios como: melhorias no perfil de tensão e redução de perdas do sistema e, continuidade do atendimento, quando o sistema de transmissão apresenta alguma contingência, [4] [5].

Entretanto, a intermitência é um problema comumente relacionado às fontes renováveis, reduzindo sua capacidade para serem despachadas e sendo críticas para aplicações isoladas [2]. Também, com a presença da GD em redes de distribuição, os fluxos tornam-se bidirecionais, transformando o sistema de distribuição anteriormente passivo em uma rede ativa [5]. Esta presença de fluxos reversos pode apresentar problemas no sistema acrescentando as perdas, dependendo da alocação e tamanho da GD [6].

Além do uso da geração distribuída, sistemas eficientes de armazenamento podem ser uma opção viável para atender as necessidades da demanda em redes de distribuição [2]. Neste sentido, dependendo da configuração do armazenador, sua influência no sistema pode contribuir ou não para mitigar o efeito dos fluxos reversos da rede. Desta forma, este trabalho apresenta análises que procuram mostrar que as características dos armazenadores permitem diminuir ou aumentar o efeito dos fluxos reversos sobre as perdas do sistema. Para isto, é feita uma breve descrição das características da geração distribuída e dos armazenadores de energia e logo são realizados testes num sistema de distribuição considerando estes dispositivos. Para realizar os testes, foi empregado o software DSSIM [7] que é um simulador baseado no OPENDSS da EPRI [8], podendo servir como interface gráfica deste. O estudo realizado utiliza um sistema teste adaptado da IEEE de 123 barras [9], e considera como fonte de geração da GD a energia eólica.

II. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A geração distribuída (GD) pode ser vista como a geração instalada perto do ponto do consumidor, atendendo a demanda local ou permitindo fornecer energia ao resto do sistema. Segundo o CIGRE [10], as fontes de geração distribuída não devem exceder o nível de 50-100 MW e são caracterizadas por não ser despachadas centralmente. As fontes renováveis de

energia podem ser classificadas em solar fotovoltaicas (PV), eólica, hidráulica, geotérmica, ondas e biocombustíveis [2]. Os últimos anos têm mostrado um incremento significativo no desenvolvimento das fontes de renováveis de geração distribuída para interconexão com a rede de distribuição. Os custos associados com a geração distribuída e o armazenamento da energia estão decrescendo com o tempo, favorecendo a sua evolução. Assim, a arquitetura tradicional dos sistemas elétricos, baseada no despacho centralizado, está avançando para uma arquitetura composta por micro redes com geração distribuída [2].

Entre estes tipos de fontes renováveis a solar e a eólica são as mais estudadas. A energia solar (PV) é uma das tecnologias de geração distribuída mais caras, porém apresenta um impacto ambiental favorável. Embora estejam presentes altos custos, associados com as tecnologias fotovoltaicas, sua instalação é justificável pela grande disponibilidade de energia solar e dos benefícios ambientais associados. Por outro lado, a energia eólica tem mostrado um amplo crescimento em nível mundial nos últimos anos e é considerada como uma das líderes das tecnologias limpas. As aplicações das tecnologias de geração distribuída dependem dos requerimentos individuais. Algumas delas podem ser [11]:

- Carga de base: O sistema opera em paralelo com a rede de distribuição. Parte da energia pode ser utilizada ou vendida e usar a rede como um suporte para manutenção do sistema. O sistema está sempre em operação e reduz o consumo de eletricidade.
- Carga de pico: É usada para fornecer eletricidade durante períodos pico, conseguindo reduzir os picos de demanda dos consumidores, dado que nestes períodos o custo da energia é mais caro.
- Suporte à rede: Algumas vezes as concessionárias, ou grandes consumidores, requerem reforços na rede pela instalação de plantas pequenas incluindo subestações, para evitar e resolver congestionamentos devido a altas demandas em diferentes épocas do ano ou a faltas na rede. A geração distribuída pode ajudar a atender estas necessidades, aumentando a capacidade dos sistemas elétricos.
- Melhoria da qualidade: Se a qualidade da energia está abaixo dos limites estabelecidos pelo órgão regulador, a GD ajuda a melhorar a qualidade no fornecimento da energia, eliminando flutuações na onda da tensão e reduzindo a duração nas interrupções.

III. ARMAZENADORES DE ENERGIA

O armazenamento da energia é uma parte vital dos Sistemas de geração distribuída, dado que apresentam capacidade adicional de geração a partir da reserva da energia gerada em excesso pelas fontes de GD. Entre as formas de armazenamento da energia, tem-se [12]:

Sistema de Armazenamento de Ar Comprimido: Conhecida como CAES (*Compressive Ar Storage*), esta é uma tecnologia usada para aplicação em grande escala, a qual usa o excedente de energia elétrica gerada por uma usina para

comprimir ar durante períodos abaixo do pico. Este ar é descomprimido em câmaras para alimentar turbinas e incrementar a produção de energia elétrica durante períodos de demanda pico.

PHS: O Sistema PHS (*Pumped Hydro Storage*) usa duas áreas de reservatório de água, uma acima da outra para armazenar energia. Esta metodologia permite assegurar disponibilidade de água por pelo menos um ano, em países áridos sem sistemas hidroelétricos maiores.

Armazenamento de Hidrogênio: O hidrogênio tem uma alta entalpia de 120 MJ/kg, sendo três vezes maior que a gasolina. Pelo tanto o hidrogênio parece ser um bom candidato como fonte de energia, e métodos de armazenamento tem-se investigado intensivamente com o tempo. Entre estes métodos destacam-se: Compressão e armazenamento num tanque de pressão, Refrigeração num estado líquido e manutenção em frio num tanque isolado: Absorção física em carvão, Hidróxidos de metal, Compostos complexos. No entanto, por enquanto os métodos de armazenamento são altamente caros [13].

Flywheels: Usam a energia fora da demanda pico para mover o rotor estando numa pista de vácuo. A energia é logo conservada em forma cinética até que é necessário usa-la. Quando a demanda é alta, a energia cinética é empregada para produção de energia elétrica.

Supercapacitores: São capacitores convencionais com área aumentada que permite uma alta densidade de energia em comparação com os capacitores convencionais. Embora tenha uma alta densidade de energia tem pouca habilidade de armazenamento em comparação com outros armazenadores [14].

SMES: Os SMS (*Superconductor Magnetic Storage*), usam uma tecnologia com cabos supercondutores para armazenamento de campo magnético como energia.

Baterias: O armazenamento químico ou baterias são as formas mais populares e frequentemente os métodos usados para armazenamento de energia. Esta tecnologia é classificada em dois tipos. As baterias de fluxo, usadas para aplicações a grande escala, e as baterias tradicionais usadas comumente em sistemas de distribuição. As baterias de fluxo têm um tempo de vida longo e uma eficiência de 75-85%, devido a apresentarem pequenos índices de auto descargas, porém é uma tecnologia de alto custo.

As baterias tradicionais são normalmente a forma utilizada para armazenamento de energia em sistemas de geração distribuída com energias renováveis. Estas vêm de várias formas e tipos. As típicas formas de comparar cada tipo de bateria utilizam os seguintes critérios: profundidade possível de descarregamento da bateria, custo, número de ciclos de carga/descarga toleráveis pela bateria, eficiência, auto descarregamento, maturidade da tecnologia e densidade de energia [12], [15].

Dentro das baterias tradicionais, as feitas por ácido e níquel-cádmio são as tecnologias mais avançadas. A fácil utilização das baterias de ácido e seu baixo custo levam à preferência desde tipo de sistema de armazenamento entre os mencionados anteriormente. Baterias de íons de lítio têm uma alta eficiência, ciclo de vida e alta profundidade de descarregamento, mas por enquanto são demasiadamente caras para serem implementadas em larga escala [12]. [15]. As baterias de sódio-enxofre são caras e tem-se uma necessidade adicional de serem mantidas a 300°C para uso ótimo. As baterias de níquel-cádmio têm um bom ciclo de vida com uma profundidade de descarga de 100%, sendo úteis para operação diária em conjunto com fontes renováveis, porem tem custos elevados e são tóxicas. Baterias de brometo de zinco são relativamente imaturas em sua tecnologia e uso, pelo qual devem ser ainda estudadas para poder desenvolver sua aplicação. Finalmente as baterias de ácido têm mostrado um comportamento favorável à rede no seu uso em sistemas de energia isolados e por serem uma opção barata em termos de baterias de células [12], [15]. A Tabela I apresenta uma comparação de tecnologias e eficiências de diversos tipos de sistemas armazenadores de energia [12], [15].

TABELA I. COMPARAÇÃO DAS TECNOLOGIAS

Tipo	Capacidade Máxima (MW)	Duração Descarga	Eficiência (%)
CAES	100-300	6-20h	64
PHS	100-4000	4-12h	70-85
Flywheel	1.65	3-120 s	90
SMES	100-400	Mín	90-95
Supercapacitores	100	S	95
Baterias Fluxo	2-100	10-100 h	85
Bateria Tradicional			
Acido	50	1min – 8 h	80-85
Sódio-enxofre	350	8h	75-86
Lítio	16	10h	95
Cádmio	50	1min – 8h	60-70

Como se pode observar da Tabela I, cada tipo de tecnologia apresenta diferentes graus de eficiência. Dentre as mais eficientes estão os SMES e os supercapacitores, e dentre as menos eficientes as CAES.

IV. ESTUDO DO CASO

Conhecendo-se as características básicas dos armazenadores e da geração distribuída, foi realizado um estudo das perdas de energia do sistema considerando diferentes cenários. Em primeiro lugar, o sistema testado está baseado no sistema de distribuição teste IEEE de 4.160 kV e 123 barras [9]. O sistema foi modelado para poder-se observar melhor o comportamento do sistema em relação às perdas de energia. Para testar o sistema utilizou-se o programa DSSIM que é uma adaptação do OPENDSS, o qual permite analisar sistemas de distribuição avaliando o comportamento horário do sistema, calculando as tensões e correntes das barras e ramos. As perdas horárias de potência do sistema (testadas por hora durante um dia) são apresentadas na Figura 1.

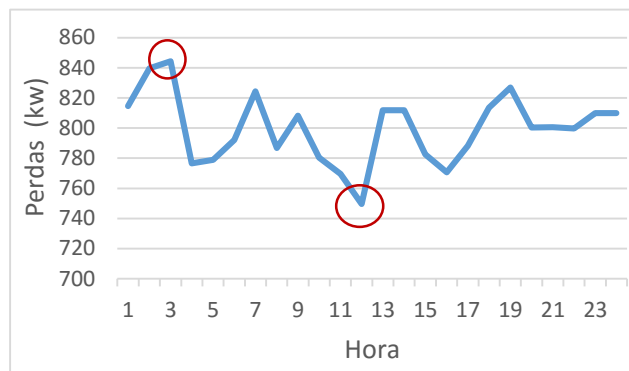


Figura 1. Perdas de Horarias de Potência do sistema 123 barras

Como se pode observar da Figura 1, as perdas de potência do sistema estão aproximadamente entre 750 kW e 844 kW (indicadas nos círculos vermelhos). Para analisar o impacto da GD no sistema foi adicionado um gerador na barra 65. A figura 2 mostra o sistema testado com o ponto de alocação da GD indicado em vermelho. Também, os dispositivos alocados na barra 65 se mostram na Figura 3.

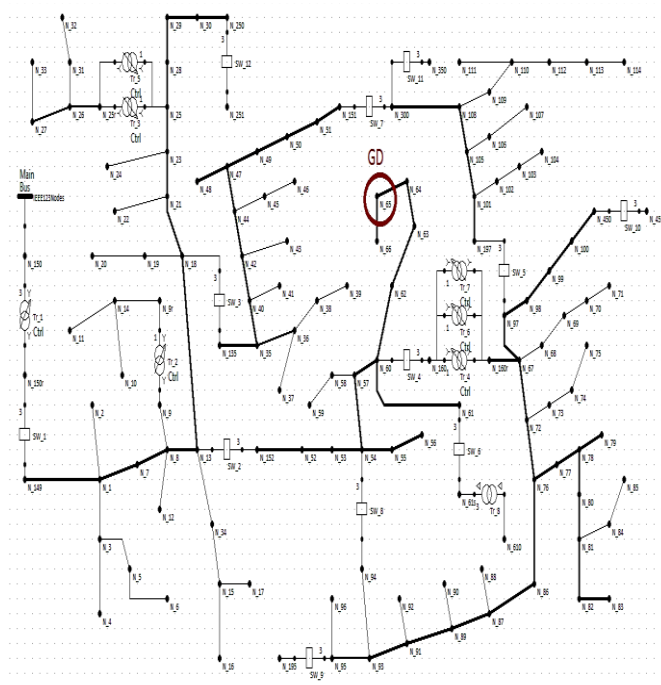


Figura 2. Sistema 123 Barras com o ponto de alocação da GD.

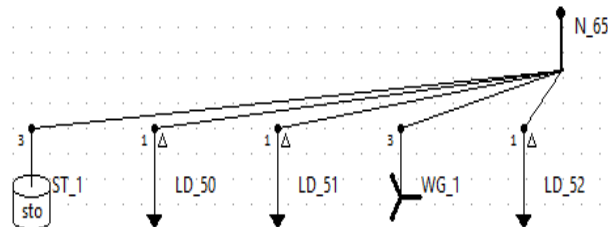


Figura 3. Dispositivos adicionados para o estudo

O comportamento do sistema, com a inclusão da GD, se apresenta na Figura 4. Para este caso, foi usado um gerador

eólico com uma capacidade nominal de 2000 kW. Na Figura 4 pode-se observar que conforme a energia gerada pela GD é injetada no sistema, as perdas do sistema são menores em comparação com o caso inicial, o que mostra que a geração distribuída pode contribuir para redução das perdas ativas, tendo, neste caso, um valor máximo de 762 kW e mínimo de 595 kW, indicados nos círculos vermelhos na Figura 4.

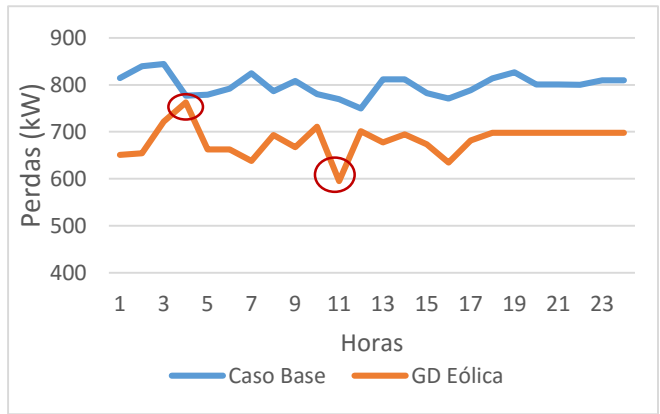


Figura 4. Perdas Horárias de Potência considerando a inclusão da GD

Para poder observar o comportamento do sistema com armazenadores foi adicionado um sistema de armazenamento com capacidade de 1000 kW, eficiência de 80%, e nível de auto descarga de 80% de modo a representar o comportamento das baterias tradicionais de ácido. O sistema armazenador foi adicionado na mesma barra onde foi alocada a GD, conforme apresenta a Figura 2. Dois diferentes casos foram avaliados para o armazenador, o estado de carregamento, e o estado de descarga. A Figura 5 mostra o comportamento do armazenador em estado de carregamento.

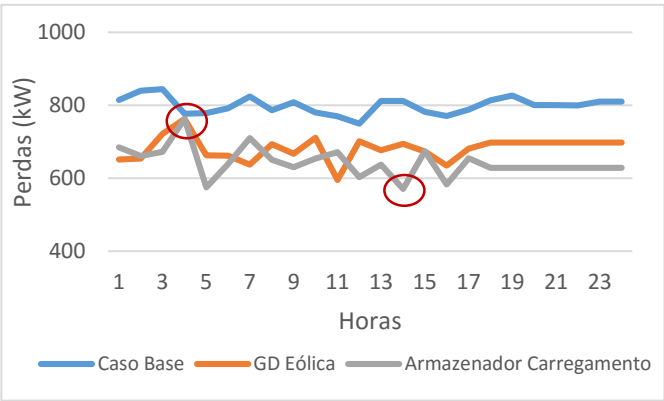


Figura 5. Comportamento das Perdas de Potência com o armazenador carregando.

Como se pode observar da Figura 5 conforme o armazenador começa a absorver energia da rede, os fluxos reversos ocasionados pela GD são reduzidos fazendo com que as perdas sejam minimizadas durante a maior parte do tempo de operação do sistema. Assim, para este caso as perdas potência máximas foram 762 kW e as mínimas de 570 kW (indicadas nos círculos vermelhos). Levando em conta os valores mínimos, as perdas reduziram-se em 24% com o

armazenador em comparação com o caso inicial e em 3% considerando a inclusão da GD.

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos para o armazenador em estado de descarga. Neste caso, se pode observar que em alguns momentos, conforme é descarregado o armazenador as perdas do sistema aumentam. Isto se deve ao fato de que aumentam os fluxos reversos no sistema analisado pois agora o armazenador está fornecendo energia em conjunto com a GD. Desta forma, as perdas de potência máximas para este estado do armazenador foram 2% maiores em comparação com o caso com GD com valor de 776,42 kW (indicada no círculo vermelho).

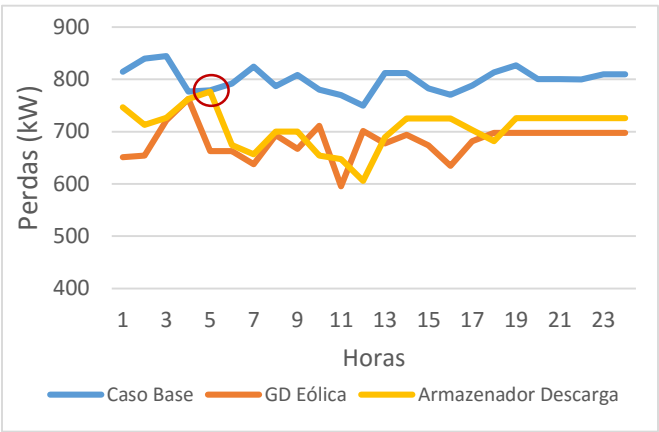


Figura 6. Comportamentos das Perdas de Potência com o armazenador em descarga.

É possível apresentarem-se casos em que a GD não é suficiente para atender a carga. Assim o armazenador pode contribuir em estado de fornecimento de energia à redução das perdas do sistema. Esta situação se pode observar nas horas 11 a 13 da figura 6, onde as perdas são menores em comparação com o caso com GD. Deve-se salientar que mesmo incorporando o armazenador em estado de descarga, para os casos estudados, nenhum deles apresentou perdas maiores em comparação com o caso base. Finalmente, a Tabela II mostra que as perdas totais de energia com o uso da GD e o armazenador são menores em comparação com o caso base. Desta forma, para os casos estudados o uso do armazenador em carregamento consegue ter a maior redução das perdas de energia com valor de 19,57%, e o uso de armazenador em descarga apresenta a menor redução com valor de 11,58%.

TABELA II. COMPARAÇÃO DAS PERDAS DE ENERGIA NOS SISTEMAS ESTUDADOS.

Caso	Perdas de energia (kWh)	Redução (%)
Base	19.190,61	—
GD Eólica	16.365,29	14,7224
Armazenador Carregamento	15.434,18	19,57428
Armazenador Descarga	16.966,89	11,58755

V.CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma pequena introdução ao conceito da geração distribuída e dos armazenadores de energia, assim como estudou seu impacto no sistema de distribuição. O impacto do armazenador foi avaliado com relação às perdas. A análise feita mostra uma tendência do armazenador a reduzir as perdas do sistema quando está em operação conjunta com o sistema de geração distribuída, o que mostra uma aplicação útil deste tipo de equipamento. No entanto também foi visto que dependendo da configuração do armazenador e do estado de carregamento da GD, as perdas de potência do sistema podem também aumentar, por isto é importante definir o modo de operação adequado do sistema de armazenador de modo a garantir uma operação ótima do sistema. Assim é recomendável usar o armazenador em carregamento para reduzir as perdas dadas por um excesso de geração distribuída, e usar em descarregamento quando a GD não é suficiente para atender o sistema. O anterior não só permite mitigar as perdas como também evita o estresse dos equipamentos como linhas pelo aumento da corrente, consequência dos fluxos reversos no sistema.

VI.REFERÊNCIAS

- [1] M. Zangiabadi e J. Kvaløy, "A market-based approach for optimal operation of customer-owned DG units in Smart Grids," em *Electricity Distribution (CIRED 2013), 22nd International Conference and Exhibition on*, Stockholm, 2013.
- [2] P. Paliwal, N. Patidar e R. Kema, "Planning of grid integrated distributed generators: A review of technology, objectives and techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, nº 1, pp. 557-570, December 2014.
- [3] H. Lee Willis, *Distributed Power Generation: Planning and Evaluation*, New York: CRC Press, 2000.
- [4] J. Driesen e F. Katiraei, "Design for distributed energy resources," *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 6, nº 3, pp. 30-40, 2008.
- [5] A. Anwar e A. Mahmood, "CF-PSO based loss sensitivity clustering technique to identify optimal DG allocation nodes for energy efficient smart grid operation," em *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2014 IEEE 9th Conference*, Hangzhou, 2014.
- [6] C. Sepulveda, M. Resener, S. Haffner e L. A. Pereira, "Computational model for the analysis of distributed generation in systems including smart grids," em *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America*, Montevideo, 2015.
- [7] D. Montenegro, "DSSim-PC, Electrical Distribution System Simulator for PC. Universidad de los Andes," 07 01 2013. [Online]. Available: <http://sourceforge.net/projects/dssimpc/?source=navbar>.
- [8] R. C. Dugan, "Reference Guide The Open Distribution System Simulator (OpenDSS). Operation Manual V7.4.3.," 2012.
- [9] IEEE PES- Power System Analysis, Computing and Economics Com., Distribution System Analysis Subcommittee, "IEEE 123 Node Test Feeder," 2004.
- [10] N. Acharya, P. Mahat e N. Mithulananthan, "An analytical approach for DG allocation in primary distribution network.," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 28, nº 10, pp. 669-678, 2006.
- [11] R. Viral e D. Khatod, "Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, nº 7, pp. 5146-5165, September 2012.
- [12] G. Coppez, S. Chowdhury e S. Chowdhury, "Impacts of energy storage in distributed Power Generation: A review," em *Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on*, Hangzhou, 2010.
- [13] Y. Shuang, T. Mays e R. Dunn, "A new methodology for designing hydrogen energy storage in wind power systems to balance generation and demand," em *Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN '09. International Conference on*, Nanjing, 2009.
- [14] A. Srivastava, A. Kumar e N. Schulz, "Impact of Distributed Generations With Energy Storage Devices on the Electric Grid," *Systems Journal, IEEE*, vol. 6, nº 1, pp. 110-117, March 2012.
- [15] K. Divya e J. Østergaard, "Battery energy storage technology for power systems—An overview," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, nº 4, pp. 511- 520, April 2009.