

ESTUDO DO FLUXO DE POTÊNCIA OTIMIZADO COM A ADIÇÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Maxwell Wesley Araujo Santos (UFPI) - max086@hotmail.com

João Victor Malheiros Tenório (UFPI) - jvictormalheiros@ufpi.edu.br

Amanda Maria Rodrigues Barroso (UFPI) - amandamrbarroso@gmail.com

Bartolomeu Ferreira Santos Junior (UFPI) - bartolomeuf@ufpi.edu.br

Resumo:

Dada a crise atravessada pelo Brasil em 2001, o setor elétrico brasileiro vem passando por constantes mudanças no que concerne a sua matriz energética, um dessas alterações é a descentralização das fontes de produção de energia. Nesse panorama, a geração distribuída apresenta-se como uma alternativa viável a essa mudança, acarretando no seu crescimento. Com esse aumento, há a necessidade de se estudar os impactos causado por ela. Neste trabalho é estudado o fluxo de potência ótimo no sistema 14 barras IEEE modificado com considerando diversos cenários.

Palavras-chave: *Fluxo de Potência, Fluxo de Potência Ótimo, Geração Distribuída*

Área temática: *Mercado, economia, política e aspectos sociais*

Subárea temática: *Impactos sociais, econômicos e ambientais de energias renováveis*

ESTUDO DO FLUXO DE POTÊNCIA OTIMIZADO COM A ADIÇÃO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Maxwell Wesley Araujo Santos – max086@hotmail.com
João Victor Malheiros Tenório – jvictormalheiros@ufpi.edu.br
Amanda Maria Rodrigues Barroso – amandamrbarroso@gmail.com
Bartolomeu Ferreira dos Santos Júnior – bartolomeuf@ufpi.edu.br
Universidade Federal do Piauí, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo: Dada a crise atravessada pelo Brasil em 2001, o setor elétrico brasileiro vem passando por constantes mudanças no que concerne a sua matriz energética, um dessas alterações é a descentralização das fontes de produção de energia. Nesse panorama, a geração distribuída apresenta-se como uma alternativa viável a essa mudança, acarretando no seu crescimento. Com esse aumento, há a necessidade de se estudar os impactos causado por ela. Neste trabalho é analisado o fluxo de potência ótimo no sistema 14 barras IEEE modificado com a inclusão da geração distribuída, considerando diversos cenários, avaliando-se a redução nos custos das perdas de potência ativa com a utilização do FPO (Fluxo de Potência Ótimo). Para os cálculos do fluxo de potência e fluxo de potência ótimo foi utilizada a Toolbox PSAT do software MATLAB.

Palavras-chave: Fluxo de Potência, Fluxo de Potência Ótimo, Geração Distribuída

1. INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica em determinada região, ou geração distribuída (GD), com o aumento gradativo da demanda mundial pelo consumo de energia, foi vista como solução diante o cenário nacional gerado pela crise no setor elétrico brasileiro, em 2001 (Vergílio, 2012). Buscando a diversificação da matriz elétrica nacional, o governo brasileiro vem estimulando a geração de energia através de fontes renováveis (Rodrigues 2016). Segundo a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, a GD (Geração Distribuída) gera energia a partir de fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras.

Esse tipo de geração proporciona uma diminuição da utilização das redes de transmissão e distribuição, reduzindo a necessidade de altos custos na construção de novas linhas para o abastecimento de energia. Assim, a qualidade do fornecimento de energia elétrica é superior ao da geração convencional, tornando o sistema mais estável, confiável e eficiente pois reduz perdas (Naruto, 2017). O alívio da sobrecarga e do congestionamento do sistema de transmissão, proporcionando maior confiabilidade ao sistema ao reduzir as quedas de tensão e os blecautes também são características da GD.

Além disso, na inserção da geração distribuída, a estabilidade de tensão e a corrente de curto circuito são parâmetros levados em consideração na avaliação do Sistema Elétrico de Potência (SEP), verificando se a operação está em níveis aceitáveis em situações de emergência (Ferreira, 2006). Esse sistema é estudado como um conjunto de barras ligadas, como no caso das linhas de transmissão e transformadores e também entre a barra de referência e as outras que compõe o sistema, tal como as cargas, os geradores e os compensadores síncronos.

As cargas e geradores são vistos como parte externa do SEP, sendo considerados como injeções de potência nas barras. A parte interna seria os circuitos passivos que são modelados como matriz admitância de barra. Impondo-se a conservação das potências ativa e reativa em cada nó da rede é possível obter as equações básicas que regem o comportamento dos fluxos de potência nas redes elétricas (Monticelli, 1983). Em suma, em cada nó da rede, a potência líquida injetada deve ser igual à soma das potências que fluem para os nós adjacentes.

A análise do fluxo de potência compreende-se na determinação do estado do sistema (tensão nodais e ângulos de fase), das distribuições dos fluxos e injeções de potência ativa e reativa nas barras. A partir disso pode-se obter os perfis de tensão e fluxos de cargas na rede, identificando condições incomuns de operação da rede (Raposo, 2016). Esse cálculo é realizado periodicamente ou quando há mudança na topologia do sistema.

Para a análise do regime permanente do sistema elétrico são utilizados programas que auxiliam no estudo aquisição e interpretação dos dados. Além disso, eles podem ser usados para otimizar algum ponto de operação, considerando uma função-objetivo, um conjunto de restrições físicas e operacionais e um conjunto de variáveis de controle. Os trabalhos desenvolvidos utilizam o que há de mais moderno em termos de otimização não-linear aplicada a SEP: o método de pontos interiores (Cepel, 2018). Também são desenvolvidos métodos para permitir a otimização de um sistema elétrico considerando um conjunto de contingências, no que se denomina fluxo de potência com restrição de segurança.

Contudo, apesar do sistema elétrico brasileiro ser desenvolvido, a energia medida pelas distribuidoras nas unidades consumidoras será sempre inferior à energia recebida dos agentes supridores. Assim, através do estudo dessas perdas, considerando a análise de fluxos de potência, é possível maximizar o aproveitamento de potência, incluindo até mesmo a geração distribuída.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Dois conceitos principais são abordados nesse artigo: fluxo de potência e fluxo de potência ótimo.

A análise do fluxo de potência é essencial em problemas de planejamento e operação de sistemas de energia elétrica. Por meio desse estudo, é possível determinar o módulo, ângulo das tensões das barras de um sistema e as potências ativa e reativa que circulam nas linhas de transmissão. Com isso, pode-se verificar sobrecargas, quedas de tensão, perdas de energia elétrica, etc.

De forma geral, as potências transmitidas de uma barra k a uma barra m são dadas por:

$$P_{km} = \frac{|V_k|^2}{|Z_{km}|} \cos(\varphi_{km}) - \frac{|V_k||V_m|}{|Z_{km}|} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km})$$

$$Q_{km} = \frac{|V_k|^2}{|Z_{km}|} \sin(\varphi_{km}) - \frac{|V_k||V_m|}{|Z_{km}|} \sin(\theta_{km} + \varphi_{km})$$

Onde:

- V_k – Tensão na barra k ;
- V_m – Tensão na barra m ;
- Z_{km} – Impedância entre as barras k e m ;
- φ_{km} – Ângulo de fase da impedância Z_{km} ;
- θ_{km} – Diferença entre os ângulos de fase das tensões V_k e V_m ;

O problema do fluxo de potência de um sistema de energia elétrica pode ser formulado por um sistema de equações e inequações algébricas que correspondem, respectivamente, às leis de Kirchhoff e a um conjunto de restrições operacionais da rede elétrica e de seus componentes. Com base nas variáveis nodais que são utilizadas como dados e nas que são utilizadas como variáveis, tem-se três tipos de barras:

- $P_Q - P_k$ e Q_k são constantes, calcula-se V_k e θ_k ;
- $P_V - P_k$ e V_k são constantes, calcula-se Q_k e θ_k ;
- $V_\theta - V_k$ e θ_k são constantes, calcula-se P_k e Q_k ;

As barras do tipo P_V e P_Q representam, respectivamente, as barras de geração e as barras de carga, enquanto a barra de referência fornece a referência angular do sistema. Montado o sistema de equações, de acordo com os dados e variáveis de cada barra, soluciona-se esse problema por meio de métodos numéricos. Os mais utilizados nessa solução são: o Método DC (Linearização), Método de Gauss-Seidel e o Método de Newton-Rhapsody.

O estudo do fluxo de potência ótimo usa uma generalização do problema de fluxo de potência para promover a otimização de variáveis de controle, tais como as potências geradas e perdas nas linhas de transmissão. Nele, ao invés de especificar-se as potências geradas, elas são calculadas no método numérico para otimizar uma função objetivo. Assim, por meio desse estudo, podemos otimizar custos de geração, perdas nas linhas de transmissão, despacho de potência reativa, desvios de geração, etc.

No cálculo do fator de potência ótimo, equações da rede de distribuição são especificadas como restrições de igualdade a serem satisfeitas na solução, enquanto limites operativos de equipamentos (limites físicos de fluxo nos ramos, limites físicos em taps e defasadores, etc.) são especificados como restrições de desigualdade, também a serem respeitados na solução. Além disso, nesse cálculo podemos incluir outros limites além dos de geração, restrições de segurança, variáveis de controle e diferentes funções custo (adequadas ao nosso objetivo).

A formulação não-linear do cálculo de FPO fica sendo:

$$\min c(x, u)$$

S . a.

$$g_p(x, u) = 0$$

$$g_Q(x, u) = 0$$

$$\underline{P}_g \leq P_g \leq \overline{P}_g$$

$$\underline{Q}_g \leq Q_g \leq \overline{Q}_g$$

$$\underline{v} \leq v \leq \overline{v}$$

$$\underline{t} \leq t \leq \overline{t}$$

Onde:

- x : Variáveis de estado (v, θ);

- u : Variáveis de controle;
- P_g : Potências ativas geradas;
- Q_g : Potências reativas geradas;
- v : Magnitudes de tensão;
- t : Fluxos de potência ativa nos ramos;

A partir desse sistema de equações e inequações não-lineares, pode-se solucionar o problema do FPO (Fluxo de Potência Ótimo) utilizando, novamente, métodos numéricos. Os métodos mais utilizados são: Método Iterativo Lambda, Método do Gradiente, Método de Newton-Rhaphsody, Método de Programação por Pontos Interiores.

3. PROBLEMÁTICA

Para o estudo do fluxo de potência, fluxo de potência ótimo e fluxo de potência ótimo com a inclusão de geração distribuída foi utilizada a Toolbox PSAT (Power System Analysis Toolbox) do MATLAB. Nessa ferramenta é possível analisar: fluxo de potência, fluxo de potência continuado, fluxo de potência ótimo, estabilidade de pequenos sinais, simulação no domínio do tempo, adicionar à simulação modelos de turbinas eólicas etc.

A função a ser otimizada é a de perda de potência ativa. No estudo, além das perdas, verificar-se-á os gastos referentes a elas, assim como o gasto total do sistema, os valores relativos ao custo da energia, em MWh, foram retirados do leilão de energia A-4/2019, sendo a geração principal hidroelétrica (R\$ 198,11/MWh) e a geração distribuída solar (R\$ 67,48/MWh). Serão analisados 5 cenários:

- 1) Comparação das perdas de potência ativa entre o fluxo de potência e o fluxo de potência otimizado;
- 2) Comparação das perdas de potência ativa entre o fluxo de potência ótimo sem geração distribuída e com geração distribuída próxima a carga da barra 3;
- 3) Comparação das perdas de potência ativa entre o fluxo de potência ótimo com geração distribuída próxima à carga da barra 3 e com gerações distribuídas próxima às cargas das barras 3 e 4;
- 4) Comparação das perdas de potência ativa entre o fluxo de potência ótimo com geração distribuída próxima às cargas das barras 3 e 4 e com gerações distribuídas próximas a todas as cargas;
- 5) Comparação das perdas de potência ativa entre o fluxo de potência ótimo com gerações distribuídas próximas a todas as cargas e com o sistema original sendo calculado apenas o fluxo de potência.

As barras 3 e 4 foram escolhidas como barras a receberem a geração distribuída nos cenários 3 e 4 por serem as barras de maior carga e, portanto, de maior influência no fluxo de potência. Uma grande parte da potência do sistema (em relação a direcionada às outras cargas) é destinada a elas, então, a adição da geração distribuída próxima as essas cargas acarretará em um maior impacto nas perdas de potência por transmissão, pois essas cargas serão alimentadas pelas gerações próximas a elas. Na Fig. 1 é mostrado o sistema gerado no software utilizado no estudo. Esse é um modelo IEEE 14 barras modificado onde serão inclusas as respectivas gerações distribuídas próximas às cargas. As gerações distribuídas adicionadas serão equivalentes à 20% das cargas à qual elas estão próximas. O valor de 20% foi escolhido por ser o valor que as redes de distribuição podem suportar, de acordo com Renato Povia, gerente de inovação da CPFL Energia. Os dados iniciais são mostrados na Tab. 1

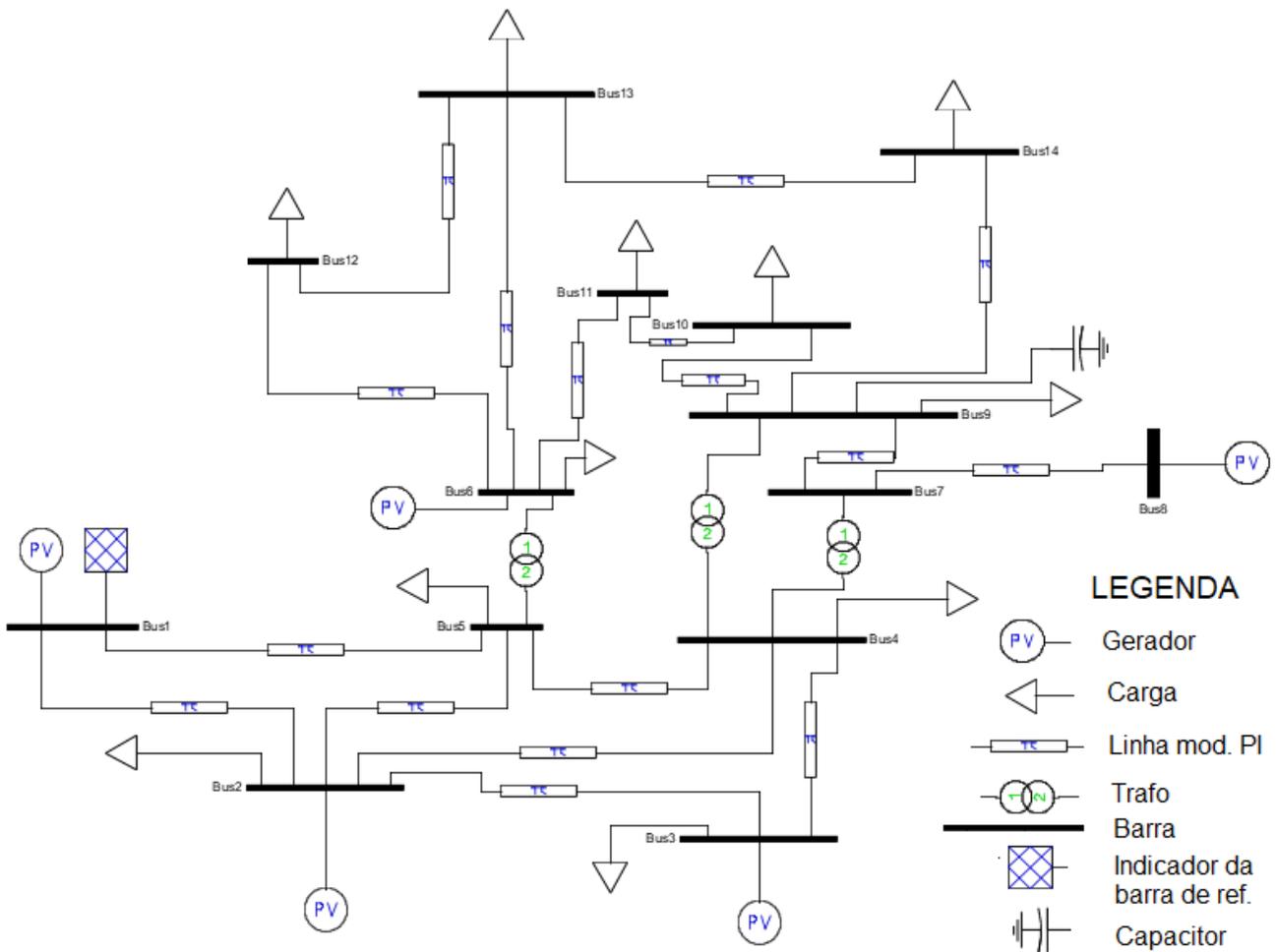


Figura 1 - sistema IEEE 14 modificado

Tabela 1 - valores do sistema estudado

Barra	Tensão	Ângulo	Carga	
	pu	graus	MW	MVAr
1	1,060	0	0	0
2	1,045	-4,9	21,7	12,7
3	1,010	-12	94,2	19
4	1,019	-10	47,8	-3,9
5	1,020	-8,7	7,6	1,6
6	1,070	-14	6,2	7,5
7	1,062	-13	0	0
8	1,090	-13	0	0
9	1,056	-14	20,5	16,6
10	1,051	-15	9	5,8
11	1,057	-14	3,5	1,8
12	1,055	-15	4,336	1,6
13	1,050	-15	13,5	5,8
14	1,036	-16	8,9	5

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Cenário 1 - Fluxo de potência e o fluxo de potência ótimo

Com o sistema original é possível, por meio do PSAT, obter os valores de potência ativa gerada, as perdas de potência ativa, os gastos referentes às perdas e os gastos totais do sistema para o fluxo de potência e o fluxo de potência otimizado, conforme mostrado na Tab. 1.

Tabela 2 – Valores de potência e gastos obtidos com fluxo de potência e fluxo de potência otimizado

	Potência ativa gerada MW	Perdas de potência MW	Gastos com perdas por hora em R\$	Gastos totais por hora em R\$
Fluxo de potência	251,03	13,79	2732,53	49.731,36
Fluxo de potência ótimo	249,50	12,26	2429,23	49.428,04

Com a otimização do fluxo de potência considerando as perdas de potência ativa, por hora seria economizado em torno de R\$ 303 e evitar-se-ia a perda de 1,531 MW. Essa diminuição não foi significativa em virtude da geração ocorrer principalmente na barra um e dois, o que reduz as combinações para otimização do fluxo de potência, em um sistema maior, esse valor seria mais considerável.

4.2 Cenário 2 - Sistema sem geração distribuída e com geração distribuída próxima a carga da barra 3

Para a inclusão da geração distribuída, foi adicionada uma fonte de potência ativa na barra 3, com valor aproximado de 20% da carga dessa barra, ou seja, 18,84 MW, a função custo da geração utilizada será linear cujo coeficiente é o valor do MWh da energia solar (R\$ 67,48). Os dois casos serão analisados com fluxo de potência otimizado. Na Tab.3 são mostrados os valores obtidos para os dois casos.

Tabela 3 - Valores de potência e gastos do sistema obtidos com fluxo de potência ótimo com e sem geração distribuída

	Potência ativa gerada MW	Perdas de potência MW	Gastos com perdas por hora em R\$	Gastos totais por hora em R\$
Sem GD	249,50	12,26	2429,22	49.428,05
Com GD na barra 3	248,10	10,87	2152,47	46.695,87

Com a inclusão da geração distribuída em uma carga do sistema o valor economizado com perdas por hora seria de R\$ 276. Já no que diz respeito aos gastos totais do sistema, a economia seria de R\$ 2732,18 por hora. O valor dos gastos totais do sistema é expressivo devido ao baixo valor do MWh da geração distribuída em relação à hidroelétrica (principal).

4.3 Cenário 3 - Geração distribuída na barra 3 e nas barras 3 e 4

Nesse cenário foi adicionada uma fonte de potência ativa na barra 4, com valor aproximado de 20% da carga dessa barra, ou seja, 9,56 MW, juntamente à fonte já colocada na barra 3. A função custo de geração para a barra 4 é a mesma da barra 3. Na Tab.4 são mostrados os valores obtidos para os dois casos.

Tabela 4 - Valores de potência e gastos do sistema obtidos com fluxo de potência ótimo e adicionando geração distribuída na barra 3 e nas barras 3 e 4

	Potência ativa gerada MW	Perdas de potência MW	Gastos com perdas por hora em R\$	Gastos totais por hora em R\$
Com GD na barra 3	248,10	10,87	2152,47	46.695,87
Com GD na barra 3 e 4	247,15	9,914	1964,06	45.252,99

Com a inclusão da geração distribuída na barra 4, o valor economizado com perdas por hora seria de R\$ 188,40. Já no que diz respeito aos gastos totais do sistema, a economia seria de R\$ 1442,88 por hora.

4.4 Cenário 4 – Geração distribuída nas barras 3 e 4 e geração distribuída em todas as barras

Nessa situação foram adicionadas fontes de potência ativa em todas as barras de carga, com valor aproximado de 20% da carga de cada barra. Assim, a geração distribuída total adicionada ao sistema foi de 47,45 MW. Na Tab.5 são mostrados os valores obtidos.

Tabela 5 - Valores de potência e gastos do sistema obtidos com fluxo de potência ótimo e adicionando geração distribuída nas barras 3 e 4 e em todas as barras

	Potência ativa gerada MW	Perdas de potência MW	Gastos com Perdas por hora em R\$	Gastos totais por hora em R\$
Com GD nas barras 3 e 4	247,15	9,91	1964,06	45.252,99
20 % de GD	245,20	7,96	1578,14	42.392,81

Com a inclusão da geração distribuída em todas as barras, o valor economizado com perdas por hora seria de R\$ 385,92. Já no que diz respeito aos gastos totais do sistema, a economia seria de R\$ 2860,18 por hora.

4.5 Cenário 5 – Fluxo de potência e fluxo de potência otimizado com geração distribuída

Na Tab.6 são mostrados os valores do fluxo de potência do sistema original e do fluxo de potência ótimo com a inclusão de 20% de geração distribuída. Esse cenário visa avaliar os impactos do FPO aliado à geração distribuída.

Tabela 6 - Valores de potência e gastos do sistema obtidos com fluxo de potência e fluxo de potência ótimo adicionando geração distribuída em todas as barras

	Potência ativa gerada MW	Perdas de potência MW	Gastos com perdas por hora em R\$	Gastos totais por hora em R\$
Fluxo de potência	251,03	13,79	2732,53	49.731,36
20 % de GD	245,20	7,96	1578,14	42.392,81

O valor economizado com perdas por hora seria de R\$ 1154,39. Já no que diz respeito aos gastos totais do sistema, a economia seria de R\$ 7338,55 por hora, isso representa cerca de 17,31% do valor total dos gastos do sistema com fluxo de potência otimizado e inclusão de 20% da carga suprida com geração distribuída.

5 CONCLUSÃO

A geração distribuída está em constante crescimento no Brasil, ela apresenta vantagens em diversos aspectos como na questão ambiental e, também, na parte econômica. Com esse crescimento, torna-se necessário o estudo a fim de apresentar os valores mostrando quão benéfica é essa fonte. Além disso, em consonância com o desenvolvimento das fontes de geração distribuída, é também de fundamental importância a melhoria nas técnicas de operação estática do sistema.

No primeiro cenário foi analisado o fluxo de potência otimizado em relação ao fluxo de potência não ótimo. Sem mudança nos elementos do sistema, somente com ferramental teórico, foi possível diminuir os gastos referentes às perdas do sistema.

Já nos cenários 2,3 e 4 foram analisados a inclusão da geração distribuída no sistema com o fluxo de potência otimizado em uma carga, simulando 20% dessa carga sendo suprida, e com a adição de fontes no sistema, simulando os impactos do crescimento da geração distribuída no sistema.

No cenário 5 é mostrada a comparação do fluxo de potência do sistema calculado sem otimização nas perdas de potência ativa e sem a inclusão de geração distribuída com o fluxo de potência otimizado e com 20% da carga sendo suprida por geração distribuída. Nesse cenário é possível observar o impacto significativo da otimização do fluxo de potência aliada ao uso das fontes renováveis.

Com os resultados obtidos, verifica-se a validade da otimização do fluxo de potência em relação às perdas de potência ativa no sistema. Além disso, com a inclusão e aumento da geração distribuída no sistema, conforme mostrado nos cenários supracitados, há a redução dessas perdas a medida que mais fontes são acrescentadas.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. ANEEL. “Resolução Homologatória nº 477 de 17 de Abril de 2012”. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/reh2007477.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2019
- CRUZ, J. L. C. “Geração Distribuída: O Setor Elétrico”. Ed. 93. Outubro de 2013. Disponível em: <<https://www.osetoreletrico.com.br/geracao-distribuida/>>. Acesso em: 15 novembro 2019.
- C. S. Ferreira et al. “Solução do problema de superação dos disjuntores pela alocação ótima de dispositivos limitadores de corrente de curto circuito utilizando algoritmos genéticos”. 2006. 12p. Artigo – Eletrobrás. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 2006.
- MONTICELLI, A. J.; CEPEL. “Fluxo de Carga em Redes de Energia elétrica”. 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1983.
- NARUTO, Denise Teiko. “Vantagens e desvantagens da geração distribuída e estudo de caso de um sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica”. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- RAPOSO, Antônio Adolpho Martins. “Alocação ótima de medidores para a estimação de estado em redes elétricas inteligentes”. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Eletricidade) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2016.
- RODRIGUES, Isabel Sampaio. “Geração Distribuída no Setor de Energia Elétrica no Brasil”. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- CEPEL. “Análise de Redes em Regime Permanente”. Disponível em: < http://www.cepel.br/pt_br/linhas-de-pesquisa/menu/analise-de-redes-em-regime-permanente-2.htm>. Acesso em: 15 mai. 2019
- ANEEL. Perdas de Energia. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=801&idPerfil=4>>. Acesso em: 15 nov. 2019.
- SAADAT, Hadi et al. Power system analysis. 1999.
- VIRGÍLIO, Karen Evelline Perusso. “Geração Distribuída e Pequenas Centrais Hidrelétricas: Alternativas para a Geração de Energia Elétrica no Brasil”. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- WOOD, Allen J.; WOLLENBERG, Bruce F.; SHEBLÉ, Gerald B. Power generation, operation, and control. John Wiley & Sons, 2013.

STUDY OF THE OPTIMAL POWER FLOW WITH THE ADDITION OF DISTRIBUTED GENERATION

Abstract. *Given the energy crisis experienced by Brazil in 2001, the Brazilian electric sector has been undergoing constant changes regarding its energy matrix, one of these alterations is the decentralization of sources of energy production. In this scenario, distributed generation is a viable alternative to this change, leading to its growth. With this increase, there is a need to study the impacts caused by it. In this work we study the optimal power flow in the 14 bar modified IEEE system with the inclusion of distributed generation, considering several scenarios, evaluating the reduction in costs of active power losses with the use of OPF (Optimal Power Flow). For calculations of the power flow and optimal power flow, the Toolbox PSAT of the MATLAB software was used.*

Key words: *Power flow, Optimal Power Flow, Distributed Generation*