

# Aplicação de Equivalentes de Rede em Sistemas de Distribuição com Malhas entre Subestações

Gustavo M. Hebling\* Julio A. D. Massignan\*  
 Marcos H. M. Camillo\*\* João A. B. London Junior\*

\* *Escola de Engenharia de São Carlos, USP, (e-mail: gustavo.hebling@usp.br, julio.massignan@usp.br, jbalj@usp.br).*  
 \*\* *COPEL S/A, (e-mail: marcos.camillo@copel.com)*

**Abstract:** In the context of abnormal conditions in the electrical distribution systems, situations may occur where the normally radial network topology becomes meshed demanding a fast response. This meshed condition, even if temporary, demands an evaluation of the operational condition with a load flow calculation to guarantee that operational constraints are satisfied. Among the possible meshed scenarios, the meshed condition of different substation demands an extension of the network modelling up to the transmission system since a single angular reference is required for both feeders. In order to reduce the exchange of information between transmission and distribution operators this work proposes a reduced model using network equivalents to represent the influence of the transmission system in the load flow calculation of the meshed distribution feeders. Simulations are carried with a real Brazilian distribution network showing this strategy keeps an acceptable accuracy in terms of overall power flow solution.

**Resumo:** No contexto de condições anormais nos sistemas de distribuição de energia elétrica, podem surgir situações em que a topologia da rede normalmente radial se transforma em malhada e uma resposta rápida é necessária. Esta condição malhada mesmo que temporária exige uma avaliação da condição operacional através do cálculo de fluxo de potência, garantindo que restrições operativas sejam satisfeitas. Dentre as possíveis situações de malha, a condição de malha entre subestações distintas exige uma extensão do modelo até os sistemas de transmissão vide a necessidade de uma única referência angular para ambos os alimentadores. Para reduzir a necessidade de intercâmbio de informações entre operadores de transmissão e distribuição, este trabalho utiliza um modelo reduzido utilizando equivalentes de rede para representar a influência do sistema de transmissão durante o cálculo de fluxo de potência nos alimentadores malhados. Testes de simulação em uma rede real de distribuição demonstram que esta estratégia possibilita manter uma acurácia aceitável em termos de qualidade de solução.

**Keywords:** Distribution Systems, Power Flow, Meshed Operation, Network Equivalent, Service Restoration.

**Palavras-chaves:** Sistemas de Distribuição; Fluxo de Potência; Operação Malhada; Equivalentes de Rede; Restabelecimento de Energia.

## 1. INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Distribuição (SDs) normalmente operam em topologia radial e com fluxo de potência unidirecional porém, existem situações em que é necessário operar a rede de forma malhada seja de forma momentânea no caso de manobras para reestabelecimento de energia como apresentado em Camillo (2016) ou de forma permanente como apresentado em propostas para aumento de segurança e confiabilidade em Chen (2004); Huang (2002) e com a operação de geradores distribuídos como em Davoudi (2016).

Para garantir a operação adequada de um SD é necessário verificar o atendimento das restrições de segurança da rede e dos equipamentos tanto no cenário radial quanto no cenário malhado. A ferramenta que proporciona essa análise é o cálculo de fluxo de potência e o mais frequentemente

aplicado em SDs é o Método de Varredura Direta/Inversa (VDI), devido a sua eficiência computacional e rapidez. Foram propostos, em Shirmohammadi (1988), alguns métodos que estendem a formulação do VDI para aplicação em cenários malhados, o chamado método de Varredura Direta/Inversa Compensado. Uma formulação utilizando o método de Newton-Raphson desacoplado é apresentada em Tortelli (2015) enquanto que em Li (2016) é utilizada a matriz incidência para o cálculo de fluxos de potência.

A estratégia de solução para o cenário malhado depende principalmente da topologia resultante do sistema após o fechamento da chave de malha. Como apresentado em Massignan (2017), existem soluções bastante diretas para os casos de malha dentro de um mesmo alimentador e entre alimentadores distintos de uma mesma subestação. O cenário de malha entre alimentadores de subestações

distintas, entretanto, demanda maiores esforços como o conhecimento prévio da diferença angular entre as subestações após o fechamento da chave de malha ou de informações do sistema de transmissão.

Uma vez que pode existir um número grande de possibilidades de malha em um SD, seria necessário um estudo prévio para levantar todas as possíveis diferenças angulares. Uma opção menos custosa computacionalmente seria modelar a rede de transmissão entre as barras das subestações como a abordagem de Durce (2011), que busca representar tanto os sistemas de transmissão como distribuição no cálculo de fluxo de potência. Esta proposta, porém, necessita de grande intercâmbio de informações entre os operadores de transmissão e distribuição.

Neste artigo é proposto o uso de equivalentes de rede para representar o efeito do sistema de transmissão no cenário de malha entre subestações distintas. Desta forma pode-se efetuar o cálculo de fluxo de potência em sistemas de distribuição nesta condição particular de malha garantindo uma única barra de referência para os alimentadores malhados e mantendo acurácia aceitável. É avaliada também uma versão simplificada, incluindo a modelagem somente até o primário das subestações para verificar o impacto na qualidade da solução, uma abordagem ainda mais pragmática em termos de intercâmbio de informações.

A estrutura do artigo é a seguinte: na segunda seção são apresentados os cenários de malha possíveis e soluções propostas na literatura. Na terceira seção, é apresentada a formulação teórica dos equivalentes de rede. Na quarta seção é apresentado o sistema de teste que utiliza dados reais da região de Londrina/PR bem como os resultados das simulações computacionais. A última seção é reservada para conclusões.

## 2. SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO MALHADOS

Em um SD, podem ser definidos três casos de malha que diferem de acordo com a topologia resultante após o fechamento da chave de malha. Estes casos são:

- Caso 1: malha entre duas barras pertencentes a um mesmo alimentador
- Caso 2: malha entre duas barras pertencentes a alimentadores distintos de uma mesma subestação
- Caso 3: malha entre duas barras pertencentes a alimentadores diferentes conectados em subestações distintas

Na figura 1 são ilustrados os três casos, em uma rede fictícia. No primeiro caso, não é necessário incluir uma modelagem adicional para solução do fluxo de potência. A barra do secundário da subestação tem a função de barra de referência para o sistema e a aplicação do método de Newton-Rhapson, por exemplo, é imediata.

No segundo caso de malha, uma vez que a topologia resultante envolve alimentadores diferentes de uma mesma subestação não é possível obter uma única barra de referência sem uma extensão do modelo. Para obter uma barra de referência angular e fechamento do balanço de potência, é incluída a modelagem do transformador da subestação e também a barra do primário. Nesta barra, outros ali-

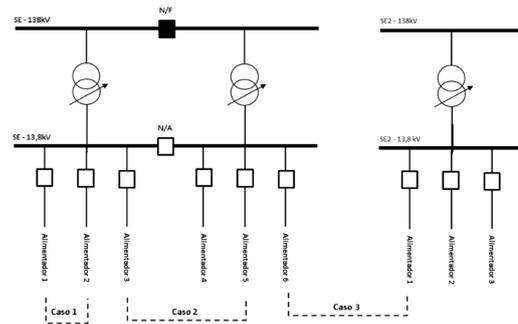


Figura 1. Casos de malha possíveis em SDs. Fonte: Elaborada pelo Autor.

mentadores não incluídos na malha são modelados como injeções de potência ativa e reativa.

O terceiro caso possível de malha em um SD, entre alimentadores distintos de subestações diferentes, também exige uma extensão da modelagem para obter a solução. Uma estratégia como do caso 2 pode ser inviável uma vez que podem existir muitas barras no nível de transmissão até uma barra comum entre as subestações, e as informações do sistema de transmissão geralmente não são acessíveis aos operadores de distribuição. Em Massignan (2017) é proposto utilizar as diferenças angulares entre as subestações para contornar a ausência de uma barra única de referência e, conhecendo-se a diferença angular após o fechamento da malha, foi mostrado que a solução do fluxo de potência é bastante próxima ao obtido com um sistema contendo todas as informações do sistema de transmissão.

A abordagem utilizando diferenças angulares, apesar de produzir uma solução aceitável para o fluxo de potência, consiste num problema de grande dimensão computacional, uma vez que podem existir diferentes posições de chaves num SD além de diferentes cenários de carga, gerando um número elevado de condições e diferenças angulares necessárias de serem conhecidas previamente ao fechamento de uma chave.

Uma estratégia mais prática, proposta neste artigo, é representar a influência do sistema de transmissão por meio de um equivalente de rede, o que diminui o volume de informações necessárias aos operadores da distribuição. O esforço computacional de obtenção de um equivalente pode ser feito *offline* para diferentes cenários de carga do sistema de transmissão.

Na próxima seção é apresentada a formulação teórica e metodologia de obtenção dos equivalentes de rede.

## 3. EQUIVALENTES DE REDE

Em Monticelli (1983) é apresentada a teoria dos equivalentes de rede que tem como característica a possibilidade de representar uma parcela de uma rede elétrica e seus efeitos de forma reduzida. Essa redução é feita através da eliminação de barras utilizando o método de Eliminação de Gauss e o resultado são os parâmetros equivalentes que representam a rede suprimida. Partindo-se das equações nodais em (1), para eliminar uma barra  $k$  do sistema, aplica-se o método de Eliminação de Gauss de forma a zerar os coeficientes que multiplicam a variável de tensão

$E_k$  e as admitâncias das barras  $i$  e  $j$  que sejam adjacentes a barra  $k$  são alteradas de acordo com a equação (2).

$$\mathbf{Y}\mathbf{E} = \mathbf{I} \quad (1)$$

$$Y'_{i,j} = Y_{i,j} - \frac{Y_{i,k}Y_{k,j}}{Y_{k,k}} \quad (2)$$

A injeção de corrente em uma barra  $m$  adjacente a barra  $k$ , por sua vez, é alterada de acordo com a equação (3).

$$I'_m = I_m - \frac{Y_{m,k}}{Y_{k,k}} I_k \quad (3)$$

Para a aplicação dos equivalentes de rede utilizando a Eliminação de Gauss no caso 3 de malha definido anteriormente, ou seja, obter uma eliminação em um número maior de barras é preciso delimitar as redes interna e externa. A rede interna consiste no conjunto de barras que serão mantidas após a aplicação do algoritmo enquanto que a rede externa é o conjunto de barras que se deseja eliminar. A interface entre essas duas redes é feita pelas barras de fronteira. Considerando o caso de malha entre subestações distintas, é conveniente definir as barras de fronteira como sendo as barras das subestações. Conforme a figura 2, a rede interna é a rede de distribuição da qual são conhecidas as informações necessárias para o cálculo do fluxo de potência e a rede externa é a rede de transmissão que se deseja representar por meio do equivalente.

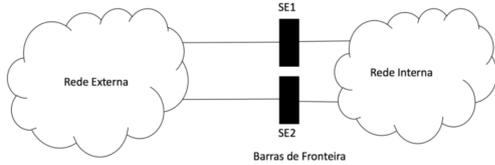


Figura 2. Casos de malha possíveis em SDs. Fonte: Elaborada pelo Autor.

Considerando a equação (1) que contém a matriz de admitância nodal, o vetor de tensões e vetor de injeções de correntes, é possível representar a separação em redes interna e externa, além das barras de fronteira utilizando os subscritos  $i$ ,  $e$  e  $b$  respectivamente, conforme equação (4).

$$\begin{bmatrix} Y_{ee} & Y_{eb} & 0 \\ Y_{be} & Y_{bb} & Y_{bi} \\ 0 & Y_{ib} & Y_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_e \\ E_b \\ E_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_e \\ I_b \\ I_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

A eliminação das barras pertencentes à rede externa provoca alterações apenas nas barras de fronteira e as novas admitâncias são dadas pela equação (5) e as novas injeções de corrente são dadas pela equação (6).

$$Y'_{bb} = Y_{bb} - Y_{be}Y_{ee}^{-1}Y_{eb} \quad (5)$$

$$I'_b = I_b - Y_{be}Y_{ee}^{-1}I_e \quad (6)$$

O sistema resultante, na forma matricial seguindo a formatação  $\mathbf{Y}\mathbf{E} = \mathbf{I}$  é apresentado na equação (7).

$$\begin{bmatrix} Y_{bb} - Y_{be}Y_{ee}^{-1}Y_{eb} & Y_{bi} \\ Y_{ib} & Y_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_b \\ E'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_b - Y_{be}Y_{ee}^{-1}I_e \\ I_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

Considerando um fechamento de malha na rede interna como uma alteração de impedância  $\Delta Y_{ii}$  e aplicando as equações (5) e (6) chega-se no sistema da equação (8) que mostra que, para uma mesma rede externa, o fechamento de uma malha na rede interna não gera a necessidade de recalcular a impedância equivalente utilizada no equivalente de rede.

$$\begin{bmatrix} Y_{bb} - Y_{be}Y_{ee}^{-1}Y_{eb} & Y_{bi} \\ Y_{ib} & Y_{ii} + \Delta Y_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_b \\ E'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_b - Y_{be}Y_{ee}^{-1}I_e \\ I_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

Como o problema de fluxo de potência é não-linear, é necessário uma extensão da formulação para o cálculo de injeções de potência ativa e reativa utilizadas no cálculo das tensões complexas do sistema. Essa extensão é dada pelas equações (9) e (10) e configura o equivalente de rede chamado de Ward Não-Linear. Apesar da impedância equivalente se manter igual entre os cenários radial e malhado, as injeções de potência equivalente podem sofrer alterações em diferentes cenários de carregamento e topologia de malha. Aplicar o mesmo equivalente é, portanto, uma aproximação que assume um comportamento constante destas injeções.

$$P_{km}^{eq} = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km}^{eq} \cos(\theta_{km}) + B_{km}^{eq} \sin(\theta_{km})) \quad (9)$$

$$Q_{km}^{eq} = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km}^{eq} \sin(\theta_{km}) - B_{km}^{eq} \cos(\theta_{km})) \quad (10)$$

#### 4. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

A teoria de equivalentes de rede apresentada na seção anterior foi aplicada a um sistema real de subtransmissão/distribuição da região de Londrina/PR. O principal objetivo da simulação computacional da obtenção do equivalente é verificar sua aplicabilidade na ferramenta de fluxo de potência. O sistema real utilizado para testes contém, em sua totalidade, 2456 barras em três alimentadores além de 436 transformadores de distribuição, 165 chaves normalmente fechadas, na topologia radial, e 30 chaves normalmente abertas, que podem permitir a operação em malha ou transferência de carga.

Na figura 3 é possível ver a topologia dos três alimentadores do sistema. Esses alimentadores estão conectados na rede de subtransmissão que pode ser visualizada na figura 5. Para simulação do caso de malha entre as subestações, foram utilizados os alimentadores conectados as barras denominadas SE-1 e SE-2.A e foram simulados dois casos distintos de malha, fechando as chaves *Switch 1* e *Switch 2*, indicadas na figura 3.

Uma vez que os dados da rede até o nível de transmissão, isto é, 230 kV foram disponibilizados é possível calcular a solução do fluxo de potência incluindo a modelagem do sistema de subtransmissão. Na figura 5, é possível

ver a barra de referência utilizada, denominada 889. Esta solução do fluxo de potência considerando uma barra comum no sistema de transmissão é base de comparação para o uso do equivalente de rede, e o sistema contendo a modelagem de subtransmissão/distribuição é chamado "Sistema Completo" no restante deste artigo. Como podem existir diferentes conexões que resultam em uma topologia malhada em sistemas reais de grande porte, vale ressaltar que a extensão da modelagem incluindo a rede de transmissão pode não ser possível em todos os casos devido, primeiro, a necessidade de incorporar um número grande de informações do sistema de transmissão com um custo computacional elevado e, segundo, a própria disponibilidade dessas informações a respeito do sistema de transmissão aos operadores da distribuição.

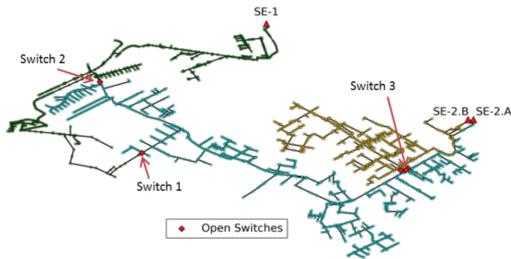


Figura 3. Alimentadores da região de Londrina/PR utilizados para teste. Fonte: Elaborada pelo Autor.

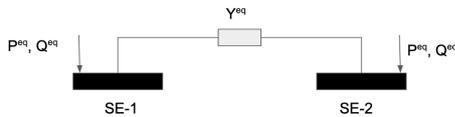


Figura 4. Representação do Equivalente de rede. Fonte: Elaborada pelo Autor.

#### 4.1 Aplicação do Equivalente de Rede

A primeira avaliação do equivalente de rede foi feita definindo as barras de fronteira como as barras do primário das subestações envolvidas na malha, isto é, as barras denominadas SE-1 e SE-2.A conforme apresentado na figura 3. O sistema de transmissão e subtransmissão aos quais as subestações estão conectadas formam a rede externa enquanto as barras dos dois alimentadores formam a rede interna. A rede resultante, com a impedância equivalente e injeções calculadas é chamada de Rede Reduzida, e uma representação dessa rede com foco nas barras de fronteira pode ser vista na figura 4.

Na tabela 1 são apresentados os valores máximo dos erros de magnitude em p.u., ( $\epsilon_{mag}^{max}$ ), e ângulo em graus, ( $\epsilon_{ang}^{max}$ ), de tensão calculados para a solução do fluxo de potência do Sistema Reduzido em relação ao Sistema Completo nas subestações envolvidas na malha considerando as duas possibilidades de chave. Observa-se que o equivalente representa bem a rede de subtransmissão, levando a um erro bastante pequeno de magnitude de tensão e também um erro da ordem de um grau. O equivalente é, portanto, uma solução factível e bastante precisa para o caso de malha entre subestações distintas.

Além dos erros de magnitude e ângulo de tensão foram computadas as perdas totais nos alimentadores no cenário

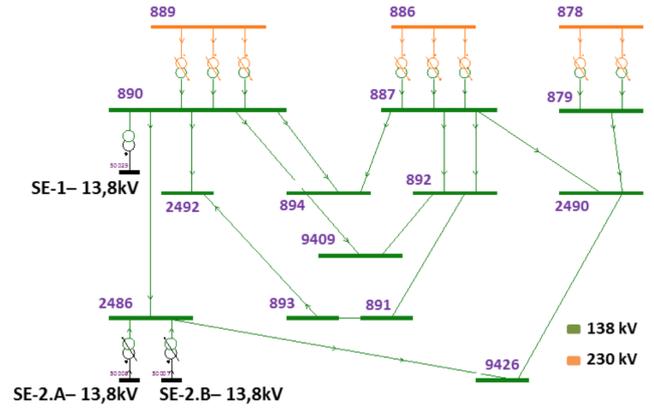


Figura 5. Sistema de subtransmissão utilizado para testes. Fonte: Elaborada pelo Autor.

malhado no Sistema Reduzido obtido com o fechamento da chave *Switch 2* e no Sistema Completo. Os valores, em MW e MVar, respectivamente são apresentados na tabela 2, onde observa-se que outros resultados do cálculo também se assemelham entre o Sistema Completo e Reduzido.

Tabela 1. Comparação de Resultados do Sistema Completo e Reduzido.

Chave	$\epsilon_{mag}^{max}$ (p.u.)	$\epsilon_{ang}^{max}$ (graus)
Switch 1	0.0001348	1.07647
Switch 2	0.0001572	1.07646

Tabela 2. Comparação de perdas nos alimentadores entre os Sistemas Completo e Reduzido.

Chave	Perdas Ativas (MW)	Perdas Reativas (MVar)
Completo	6.7241e-03	1.3423e-02
Reduzido	6.9617e-03	1.3630e-02

Além do cálculo de perdas nos alimentadores, são apresentados na tabela 3 e 4 os valores de fluxo de potência das barras de fronteira para a rede interna no Sistema Reduzido e o valor correspondente da mesma linha no Sistema Completo para o cenário malhado. A condição de operação do alimentador é mantida com a utilização do equivalente, dado que os fluxos de potência a partir da subestação mantém a mesma magnitude e sinal.

Tabela 3. Comparação de fluxos de potência entre Sistema Completo e Reduzido na SE-1.

Sistema	$P_{SE-1}$ (MW)	$Q_{SE-1}$ (MVar)
Completo	3.07804	1.30399
Reduzido	3.17310	1.41620

Tabela 4. Comparação de fluxos de potência entre Sistema Completo e Reduzido na SE-2.

Sistema	$P_{SE-2}$ (MW)	$Q_{SE-2}$ (MVar)
Completo	3.48968	1.47176
Reduzido	3.39485	1.35916

Os principais ganhos do equivalente obtido com o sistema radial aplicado em um sistema malhado são, em primeiro lugar, o ganho de performance computacional uma vez que o procedimento de obtenção do Sistema Reduzido e seus parâmetros pode ser feito *offline* e utilizado posteriormente para obter a solução do fluxo de potência. E, em

segundo lugar, a diminuição da quantidade de informações necessárias aos operadores do sistema de distribuição. A influência da disponibilidade de informações foi avaliada verificando o impacto da definição das barras de fronteira e rede externa e interna, apresentados na próxima seção.

#### 4.2 Avaliação da Definição de Barras de Fronteira

O equivalente apresentado anteriormente, chamado "EQ1", define as barras de fronteira como as barras do secundário das subestações envolvidas na malha. Com objetivo de melhorar os resultados obtidos, foi avaliada a influência da escolha das barras de fronteira no resultado de fluxo de potência caso houvesse maior disponibilidade de informações aos operadores da distribuição. Esse aumento de informações foi representado com a extensão da modelagem de uma das subestações até o nível de 138kV, incluindo linhas e transformadores. Este sistema é chamado "EQ2". Simulando uma disponibilidade ainda maior de informações, foi modelado o sistema "EQ3" definindo-se como fronteira ambas as barras do primário das subestações.

O mesmo procedimento de obtenção do equivalente já descrito foi aplicado e o cenário malhado utilizado para comparação foi o obtido com o fechamento da chave *Switch 2*, que se mostrou o com erro mais elevado na seção anterior. Na figura 6 é possível ver a melhoria de desempenho conforme o nível de informações disponíveis aumenta uma vez que os erros de magnitude (Mag.) e ângulo (Ang.) são reduzidos em ambos os sistemas "EQ2" e "EQ3". Já o desempenho entre os sistemas "EQ2" e "EQ3" é semelhante em ângulo de tensão e apresenta uma pequena diferença, menor que a tolerância especificada para o fluxo de potência em magnitude.

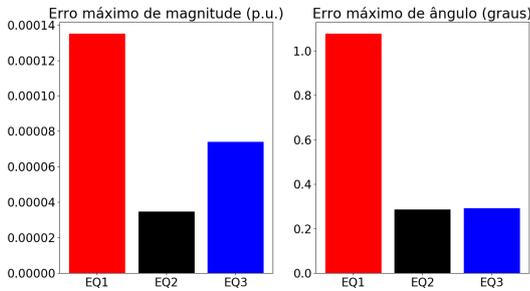


Figura 6. Erros obtidos com os equivalentes EQ1, EQ2 e EQ3. (Fonte: Elaborada pelo Autor)

#### 4.3 Proposta Simplificada

Como apresentado, o caso de malha entre subestações distintas necessita de modelagens adicionais para solução do fluxo de potência devido a ausência de uma barra única de referência. Em Massignan (2017) é mostrado que há uma diferença angular significativa entre as barras dos secundários das subestações envolvidas na malha. Entretanto, a diferença angular entre as barras do primário é menor, geralmente em torno de  $1^\circ$ . Uma forma de diminuir o esforço computacional envolvido na obtenção do equivalente além da necessidade de intercâmbio de informações entre operadores, seria estender a modelagem dos alimentadores até o nível do primário das subestações e

considerar a diferença angular entre elas como sendo nula uma vez que, na prática, esta é pequena. Esta proposta é semelhante ao Sistema "EQ3" apresentado anteriormente porém não inclui na modelagem a impedância equivalente do sistema de subtransmissão nem injeções equivalentes, somente são incluídas na modelagem as barras do primário das subestações e linhas que conectam ao secundário com controle de tensão, se houver. Este sistema é chamado Sistema Simplificado e foi simulado no cenário malhado com o fechamento da chave *Switch 2*.

Na tabela 5 são apresentados os erros máximos de magnitude de tensão em p.u. e ângulo em graus entre a solução do Sistema Completo e Simplificado. Apesar da pequena diferença angular observada, o erro máximo de magnitude de tensão é superior a todas as propostas de equivalente de rede apresentadas na seção anterior e o erro de ângulo de tensão tem desempenho pior que os equivalentes "EQ2" e "EQ3". Por se tratar de uma simplificação, os resultados obtidos estão dentro da expectativa, ou seja, a ausência de informações do sistema de subtransmissão resulta em um desempenho inferior do fluxo de potência.

Tabela 5. Comparação de Resultados do Sistema Completo e Simplificado.

Sistema	$\epsilon_{mag.}^{max}$ (p.u.)	$\epsilon_{ang.}^{max}$ (graus)
Simplificado	0.0002384	0.42626

A proposta simplificada considera que a diferença angular entre as barras do primário das subestações é igual a zero. Uma vez que Massignan (2017) mostra que a variação da diferença angular é pequena, entre  $-1^\circ$  e  $1^\circ$ , foi avaliada a sensibilidade do Sistema Simplificado nesta faixa com passos de  $0.1^\circ$ . Os perfis de tensão em ambos os alimentadores envolvidos na malha são apresentados nas figuras 7 e 8. Apesar de provocar pequena variação na magnitude da tensão, mesmo nos extremos de diferença angular considerados, os fluxos de potência se alteram o que pode ser visto nas tabelas 6 e 7. No extremo negativo de variação considerada é observada uma situação atípica de fluxo reverso na SE-1 o que representa uma condição de operação distinta daquela observada considerando a diferença angular nula.

Tabela 6. Comparação de fluxos de potência entre Sistema Completo e Simplificado na SE-1.

Diferença Angular	$P_{SE-1}$ (MW)	$Q_{SE-1}$ (MVar)
$0^\circ$	2.88436	1.03181
$1^\circ$	3.80463	2.18736
$-1^\circ$	1.96338	-0.11397

Tabela 7. Comparação de fluxos de potência entre Sistema Completo e Simplificado na SE-2.

Diferença Angular	$P_{SE-2}$ (MW)	$Q_{SE-2}$ (MVar)
$0^\circ$	3.6836	1.74414
$1^\circ$	2.77103	0.58063
$-1^\circ$	4.62031	2.87988

Assumir a diferença entre as subestações como sendo nula é uma simplificação, o que agrega um certo erro na solução do fluxo de potência mas pode ser uma estratégia pragmática na ausência de informações. Ainda que os valores

de magnitude de tensão e ângulo sejam próximos com esta simplificação, podem ocorrer diferenças nos fluxos de potência das linhas o que tem impacto direto na operação do sistema de distribuição.

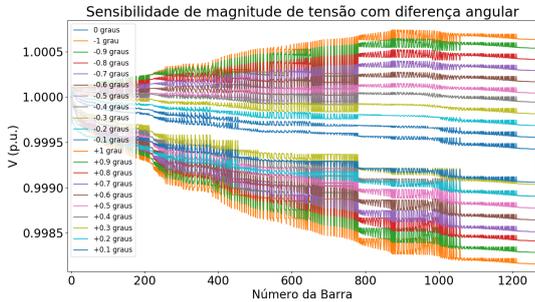


Figura 7. Variação no perfil de tensão do alimentador 1. (Fonte: Elaborada pelo Autor)

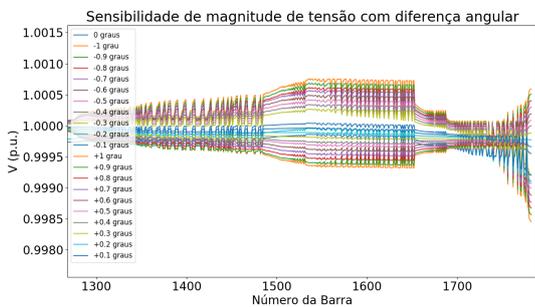


Figura 8. Variação no perfil de tensão do alimentador 2. (Fonte: Elaborada pelo Autor)

## 5. CONCLUSÃO

Foi apresentado um estudo sobre a obtenção da solução de fluxo de potência para o caso de malha entre subestações distintas em sistemas de distribuição. Em estudos anteriores mostra-se que para a correta solução é necessário conhecer a abertura angular após o fechamento da malha. Isto ocorre pois com duas subestações envolvidas não se tem uma única referência angular. Neste artigo foi proposto utilizar um equivalente de rede obtido na situação radial para solucionar o fluxo de potência malhado uma vez que a impedância se mantém constante entre cenários.

A comparação dos resultados do fluxo de potência entre o Sistema Completo e Reduzido mostra que o equivalente de rede pode ser usado para solucionar o fluxo de potência em diferentes topologias de malha. Também foi avaliado como a definição das redes interna e externa do equivalente impacta na solução na forma de maior disponibilidade de informações aos operadores de distribuição. Com a inclusão de barras do primário das subestações se observa que a performance do equivalente melhora quanto mais informações estão disponíveis. A ausência de informações também foi avaliada com a simulação de um Sistema Simplificado uma vez que é conhecida a faixa de variação das diferenças angulares no nível de 138 kV e se observa uma solução factível e passível de ser aplicada como uma estratégia pragmática.

Os equivalentes considerados neste artigos são obtidos a partir de condições estáticas de carregamento e topologia da rede de subtransmissão, no futuro é previsto o estudo da obtenção de equivalentes em tempo real caracterizando de forma mais fiel a condição atual do sistema de subtransmissão. Além disso, outros tópicos que podem ser estudados em trabalhos futuros são: a existência de múltiplas malhas, implementação de controles e limites do fluxo de potência além do controle de tensão e o desempenho de métodos aproximados de fluxo de potência com o equivalente.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade de São Paulo (USP), a COPEL Distribuição S/A e ao projeto PD ANEEL PD 2866-0504/2018. Também agradecem às agências de fomento CAPES, CNPq (processo: 308297/2018-0) e FAPESP (processo nº 2016/19646-6).

## REFERÊNCIAS

- Camillo, M.H.M et al., (2016). "Determination of switching sequence of service restoration in distribution systems: application and analysis on a real and large-scale radial system". in: IEEE TD Conference and Exposition. Dallas.
- Chen, T.H. et al., (2004) "Feasibility study of upgrading primary feeders from radial and open-loop to normally closed-loop arrangement". IEEE Trans. on Power Systems, vol. 19, no. 3, pp. 1308-1316.
- Davoudi, M., Cechi V., Aguero, J. R., (2016). "Newtork reconfiguration with relaxed radiality constraint for increased hosting capacity of distribution systems". IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, MA, USA.
- Durce, C. C. et al., (2011). "Power flow analysis for interconnected TD networks with meshed topology". 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies, Manchester.
- Huang, W. T. and Chen, T. H., (2002). "Assessment of upgrading existing primary feeders from radial to normally closed loop arrangement". In: IEEE TD Conference and Exhibition, Asia Pacific.
- Li, H. et al., (2016). "An improved hybrid load flow calculation algorithm for weakly-meshed power distribution system," Int. J. of Electr. Power Energy Syst. vol. 74, pp. 437-445.
- Lima, L. R., et al., (2018) "A method to compute flexible static equivalents for very large power networks" Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Niterói.
- Massignan, J. A. D. et al., (2017). Modelling Issues on Load Flow Calculation for Meshed Distribution Systems. IEEE Manchester Powertech.
- Monticelli, A. J., (1983). "Fluxo de carga em redes de energia elétrica", São Paulo: Edgard Blucher, 1983.
- Shirmohammadi, D. et al., (1988). Compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. IEEE Trans. on Power Systems, 3(2), pp.753-762.
- Tortelli, O. L. et al., (2015). "Fast decoupled power flow to emerging distribution systems via complex pu normalization," IEEE Trans. Power Systems, vol. 30, no. 3, pp. 1351-1358.