



**XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica**  
**SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro**  
**Rio de Janeiro - RJ - Brasil**

<b>Tarcisio Loddi</b>
<b>Companhia Paranaense de Energia</b>
loddi@copel.com

**Proposta de Cálculo de Fluxo de Potência Unificado para Redes de Transmissão e Distribuição**

**Palavras-chave**

Desacoplado Rápido  
Fluxo de Potência na Distribuição  
Geração Distribuída  
Rotação de Eixos

**Resumo**

Este trabalho tem por objetivo apresentar a experiência da utilização do método de cálculo do fluxo de potência em redes de distribuição, utilizando o método Desacoplado Rápido com a variação de rotação de eixos.

O mesmo mostra a busca de uma metodologia unificada de cálculo de fluxo de potência para redes de transmissão e distribuição. Onde é possível trabalhar esses dois sistemas com características próprias como um único conjunto de barras e linhas sem a necessidade alterações nas configurações dos sistemas. São descritos os resultados obtidos com o sistema de distribuição isolado trabalhando de forma radial, com geração distribuída indicando a validação do método. Depois o sistema de transmissão é unificado com o sistema de distribuição, também com as configurações radial e radial com geração distribuída.

**1. Introdução**

Atualmente os fluxos de carga utilizados pelas Concessionárias de Energia são tratados de maneira independente. Sendo utilizado um método para alta tensão e outro para o sistema de distribuição.

Na alta tensão, onde se opera com tensões acima de 69KV, é utilizado o método de Newton Raphson com suas variações: Completo, Desacoplado e Desacoplado Rápido [1], sendo esses sistemas de cálculos, bem desenvolvidos e com embasamentos teóricos e práticos comprovados.

No sistema de distribuição de energia, onde se opera em tensões menores de 35KV, o método mais utilizado é o Backward-Forward [5], chamado também de Back-Forward Sweep [5]. Esse método também possui uma literatura técnica bem desenvolvida e estruturada.

Com a rede elétrica cada vez mais interligada e a necessidade de atendimento a requisitos de qualidade cada vez mais rígidos, aliados a entrada cada vez maior de geração distribuída no sistema de distribuição, verifica-se a necessidade de novas práticas operacionais. Essas práticas criam a necessidade de se utilizar uma metodologia de cálculo de fluxo de potência onde seja possível a análise do sistema elétrico de transmissão e de distribuição como um todo [6]. As limitações de aplicação do método Backward-Forward para redes exclusivamente radiais [5] e do método de Newton-Raphson (e suas variações desacopladas) para redes de altas tensões, onde se verifica a predominância da reatância série das linhas com relação às suas resistências, aliadas a atual necessidade de integração entre redes de transmissão e distribuição inspirou o atual projeto de desenvolvimento de uma ferramenta unificada de fluxo de potência.

Este artigo apresenta alguns resultados relacionados a esse projeto, que consiste na avaliação do desempenho do método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido com Rotação de Eixos [7], referido daqui por diante por NDR-RE, para sistemas de distribuição. O método consiste no ajuste dos parâmetros série dos elementos da rede (resistência e reatância) relativos aos sistemas de distribuição, criando um uma rede fictícia que possua as mesmas características de uma rede de transmissão, permitindo, assim, a resolução do problema de fluxo de potência através do método Desacoplado Rápido [8].

Esta técnica não é nova, já tendo sido apresentada como uma provável solução para cálculo de redes de distribuição em [2], mas com o aprimoramento do método Backward-Forward esta solução foi deixada de lado. Com a evolução dos processadores dos computadores e as mudanças nas redes de distribuição, assumindo algumas características de rede de transmissão, este método voltou ser comentado e analisado.

Os estudos mais recentes sobre NDR-RE começaram a focar alternativas de escolha para encontrar o melhor método para realizar a rotação dos eixos, um único ângulo para adequar todo o circuito ou se poderia utilizar um ângulo para cada ramo. E quais seriam as vantagens e desvantagens de cada metodologia.

As simulações e testes foram conduzidos da seguinte forma. O método NDR-RE foi desenvolvido e aplicado na geração de redes fictícias associadas a sistemas de distribuição padrão do IEEE com ângulo único de rotação [7]. Os sistemas resultantes, foram tratados como sistemas de transmissão convencional, sobre os quais realizamos o cálculo de fluxo de potência utilizando ferramentas comerciais (ANAREDE) e programa computacional desenvolvido/melhorado durante a pesquisa para esse fim. O desempenho dos pacotes computacionais foram testados para diferentes situações permitindo a avaliação do método em análise.

Também participaram deste estudo os seguintes profissionais : Professora Dra. Elizete M. Lourenço ( [elizete@eletrica.ufpr.br](mailto:elizete@eletrica.ufpr.br)) e o Professor Dr. Odilon L. Tortelli ( [odilon@eletrica.ufpr.br](mailto:odilon@eletrica.ufpr.br)) ambos do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, UFPR. e Carolina Coreia Durce, ( [carolina.durce@eletrica.ufpr.br](mailto:carolina.durce@eletrica.ufpr.br)) mestranda do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná

## 2. Desenvolvimento

### 2.1. Método Newton-Raphson Desacoplado Rápido com Rotação dos Eixos

Essa técnica consiste basicamente em mudar o sistema de referência complexo através de uma rotação dos eixos real e imaginário, de modo que as impedâncias representadas no novo sistema de referência possuam relação  $r/x$  favorável ao desacoplamento adotado pelo método de fluxo de potência desacoplado rápido.

A Figura 1 ilustra a representação gráfica de uma impedância série, típica de uma linha de

transmissão em um sistema de alta tensão. Nesta é possível perceber que o valor da resistência  $r$  (? ou p.u. ?) é muito pequeno em relação ao valor da reatância  $x$  (? ou p.u. ?). Essas características das redes de alta tensão implicam em um forte acoplamento entre a abertura angular e o fluxo de potência ativa e, também, entre a diferença de potencial e a potência reativa, resultando no conhecido desacoplamento P?-QV.

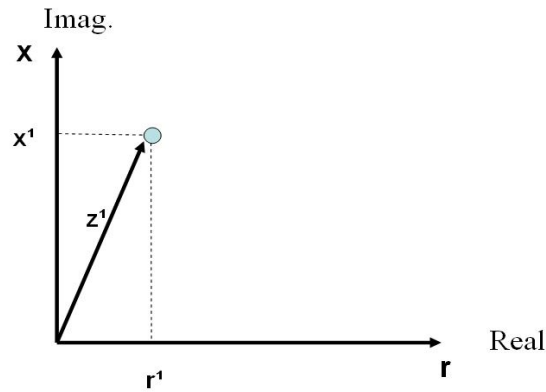


Fig. 1 – Representação Gráfica da Impedância Típica de Alta Tensão

Na Figura 2 está ilustrada graficamente uma impedância série típica de um alimentador de um sistema de distribuição. Neste caso percebe-se que o valor da resistência  $r$  (? ou p.u. ?) e da reatância  $x$  (? ou p.u. ?) tem proporções equivalentes, impedindo a aplicação das técnicas de desacoplamento adotadas pelos métodos desacoplados.

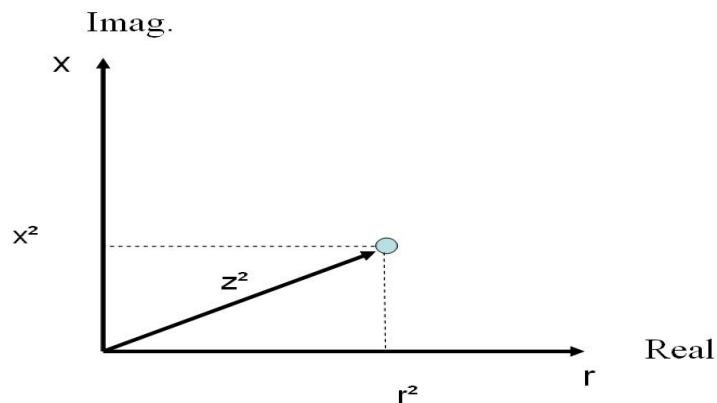


Fig. 2 - Representação Gráfica de Impedância de Média Tensão

De acordo com [2] uma impedância pode ser representada em outro plano real-imaginário, cujos eixos estejam defasados de um ângulo  $\theta$  em relação aos eixos anteriores. A Figura 3 ilustra a rotação de eixos aplicada a uma impedância típica de rede de distribuição. Nesse novo plano a impedância passa a ser representada pelas componentes  $r^{rot}$  e  $x^{rot}$ .

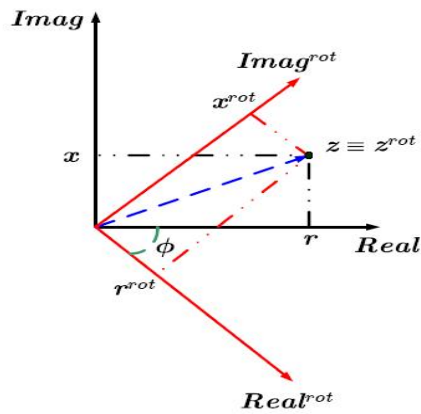


Fig. 3 – Rotação dos Eixos da Impedância

Sendo assim, verifica-se que essa técnica permite o ajuste dos valores de resistência e reatância dos elementos da rede, a partir do ângulo de rotação, para que esses apresentem as mesmas características da rede de alta tensão permitindo assim, a aplicação de métodos desacoplados de fluxo de potência.

O principal problema deste método consiste na definição do valor do ângulo de rotação para o sistema. Em [2] os autores propõem a determinação do ângulo a partir do ajuste da pior relação x/r do sistema, tornando-a adequada aos níveis de transmissão, em torno de 3 (três), por exemplo. A desvantagem dessa técnica é a necessidade de verificar se a aplicação do ângulo ao ramo com melhor relação não o torna inadequado ao desempenho dos métodos desacoplados.

A seguir apresentamos um método de escolha do valor de rotação do ângulo e comprovamos a sua utilização através da comparação dos resultados com casos bases.

## 2.2. Modelagem Matemática do Método

A rotação de eixos ilustrada na Figura 3 implica que:

$$Z^{rot} = Z \cdot e^{j\Phi} \quad (1)$$

onde Z é a impedância original do ramo.

Assim,

$$r^{rot} = r \times \cos \Phi - x \times \text{sen} \Phi \quad (2)$$

$$x^{rot} = x \times \text{sen} \Phi - r \times \cos \Phi \quad (3)$$

A relação  $r^{rot}/x^{rot}$  pode, então, ser expressa por:

$$\frac{r^{rot}}{x^{rot}} = \frac{r \times \cos \phi - x \times \text{sen} \phi}{x \times \text{sen} \phi - r \times \cos \phi} \quad (4)$$

Em (4) evidencia-se a possibilidade da utilização da variação do ângulo de rotação,  $\theta$ , na obtenção de uma nova relação  $r^{\text{rot}}/x^{\text{rot}}$ , adequada a aplicação do Fluxo de Potência Desacoplado Rápido.

A rede fictícia obtida com a aplicação do ângulo de rotação definido para todos os ramos da rede requer que as injeções de potência ativa e reativa nas barras sejam igualmente rotacionadas. Esta alteração se faz necessária para que os valores de magnitude e ângulo da tensão em cada barra da rede fictícia sejam os mesmos da rede original, evitando assim a necessidade de aplicação de um processo de “desrotação” aos estados da rede.

As relações entre potência complexa (S), tensão complexa (V), impedância (Z) e corrente (I) podem ser descritas como:

$$S = V \times I^* \quad (5)$$

e

$$I = \frac{V}{Z} \quad (6)$$

substituindo-se Z por  $Z^{\text{rot}} \times e^{(-j\theta)}$ , tem-se:

$$I = \frac{E}{Z^{\text{rot}} \times e^{(-j\theta)}} \quad (7)$$

A equação (7) mostra que se nas correntes for aplicada uma rotação de mesmo ângulo, mas de sentido oposto à aplicada às impedâncias, as tensões complexas serão as mesmas do sistema original. Assim, para a potência complexa tem-se:

$$S^{\text{rot}} = E \cdot (I^{\text{rot}})^* \quad (8)$$

ou

$$S^{\text{rot}} = S \cdot e^{j\theta} \quad (9)$$

Conseqüentemente, as potências ativa e reativa rotacionadas são expressas por:

$$P^{\text{rot}} = P \cdot \cos \theta - Q \cdot \sin \theta \quad (10)$$

$$Q^{\text{rot}} = P \cdot \sin \theta + Q \cdot \cos \theta \quad (11)$$

Dessa maneira, aplicando-se a rotação de eixos aos valores especificados de potência ativa e reativa,

além das impedâncias, o Fluxo de Potência Desacoplado Rápido apresentará bom desempenho e fornecerá o mesmo estado (tensões complexas) da rede original. Após a convergência, nas grandezas de interesse, é aplicada a rotação em sentido inverso, obtendo-se então os valores reais da rede.

### 2.3. Cálculo do Ângulo de Rotação

Como já citado anteriormente, o ângulo de rotação  $\theta$  é arbitrado. Busca-se um valor ideal para cada rede. Uma opção é o ângulo de rotação passar a ser calculado, e não mais arbitrado.

O desacoplamento sobre o qual baseia-se o fluxo de carga consiste em desconsiderar o efeito dos módulos das tensões nas barras sobre a injeção de potência ativa e o efeito dos ângulos das mesmas na injeção de potência reativa. Assim, para realizar o cálculo do ângulo de rotação, utiliza-se um critério que consiste em minimizar os acoplamentos entre P e V e entre Q e  $\theta$ : o ângulo  $\theta$  deve fazer com que as submatrizes N e M [4], obtidas após a rotação, tenham valores próximos a zero. Ou seja, o ângulo de rotação é um parâmetro a ser ajustado de forma a atender à hipótese do desacoplamento.

Com essa técnica obtém-se um ângulo de rotação  $\theta$  para cada barra k, diferentemente de um ângulo único aplicado a toda a rede. Cada equação nodal possui seu respectivo ângulo otimizado.

Inicialmente são calculados os ângulos das impedâncias de cada trecho k-m da rede de distribuição, definido por  $\alpha_{km}$ :

$$\text{tg } \alpha_{km} = (x_{km}/r_{km}) \quad (12)$$

O segundo passo consiste em se determinar o ângulo “ideal” de rotação para cada trecho. Considerando que pretende-se determinar a maior relação x/r possível (ou a menor relação r/x), o ângulo de rotação de cada trecho,  $\Phi_{km}$  é determinado por:

$$\Phi_{km} = 90^\circ - \alpha_{km} \quad (13)$$

Finalmente, um ângulo único para toda a rede é determinado a partir da média aritmética simples de todos os ângulos envolvidos, conforme proposto em [7].

$$\Phi_{\text{ótimo}} = (1/NI) \times \sum \Phi_{km} \quad (14)$$

onde NI é o número total de ramos do sistema.

A partir desse ângulo são determinados os valores rotacionados de resistência e reatância de cada ramo, ou seja:

$$r_{km}^{\text{rot}} = r_{km} \times \cos(\Phi_{\text{ótimo}}) - x_{km} \times \text{sen}(\Phi_{\text{ótimo}}) \quad (15)$$

$$x_{km}^{\text{rot}} = r_{km} \times \text{sen}(\Phi_{\text{ótimo}}) + x_{km} \times \cos(\Phi_{\text{ótimo}}) \quad (16)$$

Conforme mencionado anteriormente, as potências injetadas ativa e reativa são igualmente rotacionadas para garantir que o estado obtido para a rede fictícia seja o mesmo da rede original. Assim:

$$P_k^{rot} = P_k \times \cos(\Phi_{\acute{o}timo}) - Q_k \times \text{sen}(\Phi_{\acute{o}timo}) \quad (17)$$

$$Q_k^{rot} = P_k \times \text{sen}(\Phi_{\acute{o}timo}) + Q_k \times \cos(\Phi_{\acute{o}timo}) \quad (18)$$

## 2.4. Resultados

### 2.4.1- Casos Bases

Primeiramente são apresentados os resultados dos testes conduzidos com os sistemas teste padrão de 10 barras e 70 barras do IEEE. Os dados desses dois sistemas podem ser encontrados em [7].

A validação dos resultados foi realizada a partir da comparação dos mesmos com resultados obtidos com a aplicação do algoritmo Back-Forward Sweep [5] ao sistema original, referido nesse artigo por Caso Base.

Caso 1: Nesse caso foi utilizado o sistema de distribuição radial de 10 barras do IEEE cujo diagrama unifilar é apresentado na Figura 4, e que possui as seguintes características: 1 barra de geração; 9 barras de carga e 9 linhas de distribuição.



Fig. 4 –Caso Base de 10 Barras

### Resultados dos Casos Base

Tabela 1- Dados do Caso Base para o Sistema de 10

Barra	Tensão (KV)	Tensão (pu)	Ângulo (°)	P(W)	Q(Var)	R (pu)	X (pu)
1	23000	1,000	0				
2	22836	0,9929	-0,52	1840	460	0,0233	0,0780
3	22709	0,9873	-1,27	980	370	0,0026	0,1144
4	22158	0,9634	-2,33	1790	446	0,1411	0,2278
5	21804	0,9480	-2,65	1598	1840	0,1320	0,1150
6	21094	0,9171	-3,72	1610	600	0,3749	0,3266
7	20864	0,9071	-4,14	780	110	0,1711	0,1491
8	20446	0,8890	-4,62	1150	60	0,3885	0,2200
9	19750	0,8587	-5,40	980	130	0,9065	0,5134
10	19262	0,8375	-5,99	1640	200	1,0101	0,5721

A aplicação do método de rotação ótima de eixos descrito na Seção 2 foi aplicado aos dados do sistema da Fig. 4 gerando a rede fictícia apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Rede Fictícia do Sistema de 10 barras

De / Para	r em pu (rotacionado)	x em pu (rotacionado)	Barra	P em pu (rotacionado)	Q em pu (rotacionado)
1 para 2	-0,0349	0,0736	2	0,0106	0,0157
2 para 3	-0,0746	0,0868	3	0,0048	0,0093
3 para 4	-0,0476	0,2637	4	0,0103	0,0153
4 para 5	0,0212	0,1738	5	-0,0004	0,0244
5 para 6	0,0601	0,4935	6	0,0080	0,0152
6 para 7	0,0274	0,2253	7	0,0051	0,0060
7 para 8	0,1415	0,4235	8	0,0081	0,081
8 para 9	0,3302	0,9881	9	0,0064	0,0075
9 para 10	0,3679	1,1010	10	0,0108	0,0125

Tabela 3 - Comparação de Resultados

Resultado Anarede		Erro %		Resultado Matlab		Erro %	
Tensão (pu)	Ângulo (°)	Tensão	Ângulo	Tensão (pu)	Ângulo (°)	Tensão	Ângulo
1	0,0	0,00	0,00	1	0,0	0,00	0,00
0,9930	-0,5	-0,01	0,00	0,9929	-0,52	-0,00	0,00
0,9870	-1,3	0,04	-2,36	0,9873	-1,27	0,00	0,00
0,9630	-2,3	0,04	1,29	0,9634	-2,33	0,00	0,00
0,9480	-2,7	0,00	-1,89	0,9480	-2,65	0,00	0,00
0,9170	-3,7	0,01	0,54	0,9172	-3,72	0,01	0,00
0,9070	-4,1	0,01	0,97	0,9070	-4,13	0,01	0,24
0,8890	-4,6	0,00	0,43	0,8890	-4,61	0,00	0,22
0,8590	-5,4	-0,04	0,00	0,8376	-5,97	-0,01	0,19
0,8370	-6,0	0,06	-0,17	0,8376	-5,97	0,01	-0,33

Caso 2: Considera o sistema de 70 barras do IEEE, ilustrado na Figura 5, com as seguintes características: 1 barra de geração (SE), 69 barras de carga e 69 linhas de distribuição, conforme indicado na figura 6

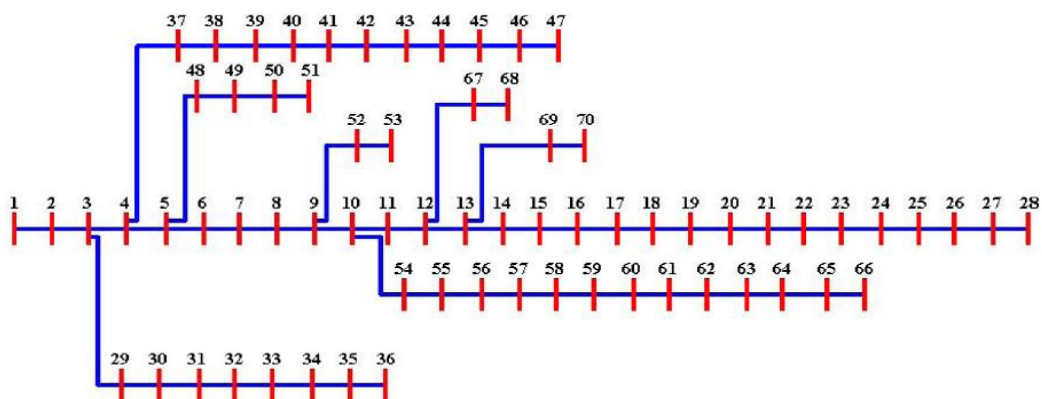


Fig. 5 – Caso Base de 70 Barras

A rede fictícia do Caso 2 pode ser facilmente obtida pela aplicação das técnicas de rotação apresentadas anteriormente. Por restrições de espaço os resultados obtidos não são apresentados nesse artigo.

O desempenho da aplicação do programa comercial e do programa desenvolvido em Matlab às redes



fictícias do Caso 1 e do Caso 2 estão resumidos na terceira e quarta colunas da Tabela 4, esta mesma tabela apresenta ainda a situação de convergência (ou não) obtida com a aplicação do método de Newton-Raphson à rede de distribuição original, ou seja sem as rotações propostas, considerando o programa comercial e também o programa em Matlab.

Tabela 4 - Comparação de Resultados entre os Métodos

Caso	Programa Comercial : Método N-R à Rede Original	Programa Comercial : Método D-R à Rede Fictícia		Programa Desenvolvido em Matlab	
		Convergência	Maior Erro(%) de tensão em relação caso base	Convergência	Maior Erro(%) de tensão em relação caso base
Caso 1	Convergiu em 2 iterações	Convergiu em 2 iterações	0,06	Convergiu em 5 iterações	0,01
Caso 2	Não convergiu	Convergiu em 2 iterações	0,14	Não convergiu	X

Com a efetivação do método após a comparação dos resultados obtidos com os casos bases, foi realizado a análise da inclusão de geração distribuída nestes casos e verificado o comportamento das tensões e ângulos das barras, bem como os sentidos dos fluxos de potencias ativas e reativas.

Como foram realizados vários testes com diferentes valores de GD instalados em diferentes barras estaremos mostrando apenas o comportamento dos casos bases. A validação de cada caso se fez através da comparação dos resultados apurados entre os dois programas computacionais.

A tabela 5 indica resumidamente o comportamento de cada caso com a inclusão da geração distribuída.

Tabela 5 - Comparação de Resultados com Geração Distribuída

Caso	Programa Comercial : Método N-R à Rede Original	Programa Comercial : Método D-R à Rede Fictícia		Programa Desenvolvido em Matlab	
		Convergência	Maior Erro(%) de tensão em relação caso base	Convergência	Maior Erro(%) de tensão em relação caso base
Caso 1	Convergiu em 2 iterações	Convergiu em 2 iterações	0,06	Convergiu em 5 iterações	0,01
Caso 2	Não convergiu	Convergiu em 2 iterações	0,14	Não convergiu	X

#### 2.4.2- Caso Unificado

*Com a realização de todos os testes indicados acima que validaram a utilização do método NDR-RE para redes de distribuição o próximo passo foi realização de simulações que permitisse verificar a possibilidade da unificação do fluxo de redes com características de transmissão, com redes com características de distribuição, utilizando-se de um único método e de uma única ferramenta computacional.*

Para isto foi utilizada a seguinte metodologia:

A - Escolhido o caso IEEE de 14 barras de um sistema de transmissão [6];

B - Selecionada a barra de numero 9 para acoplamento da rede de distribuição caso IEEE de 10 barras com os valores já rotacionados.

C - Realizada a subtração das potências ativas e reativas da barra 9 do valor total das potencias ativas e reativas referentes ao caso de 10 barras.

D - Introduzidas uma nova barra e duas novas impedâncias para simular o transformador que realizaria a função de baixar a tensão de transmissão para tensão de distribuição.

Tendo o caso sendo mostrado na figura 6 abaixo.

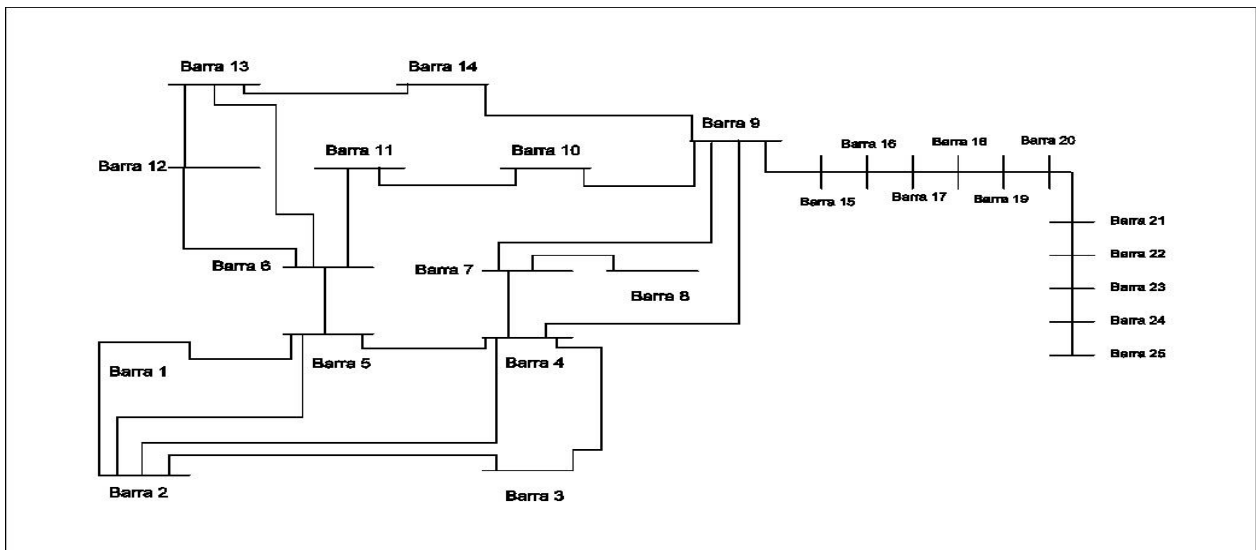


Figura 6 – Caso unificado.

Após essas alterações no caso base, verificou-se a ocorrência de convergência para os mesmos resultados de tensão e fluxo de potência de todas as barras e linhas do sistema de alta tensão. Os resultados obtidos na rede radial foram semelhantes, se a mesma fosse tratada de maneira isolada.

Essa simulação foi realizada no dois programas computacionais e os resultados foram semelhantes, conforme indicado na figura 7.

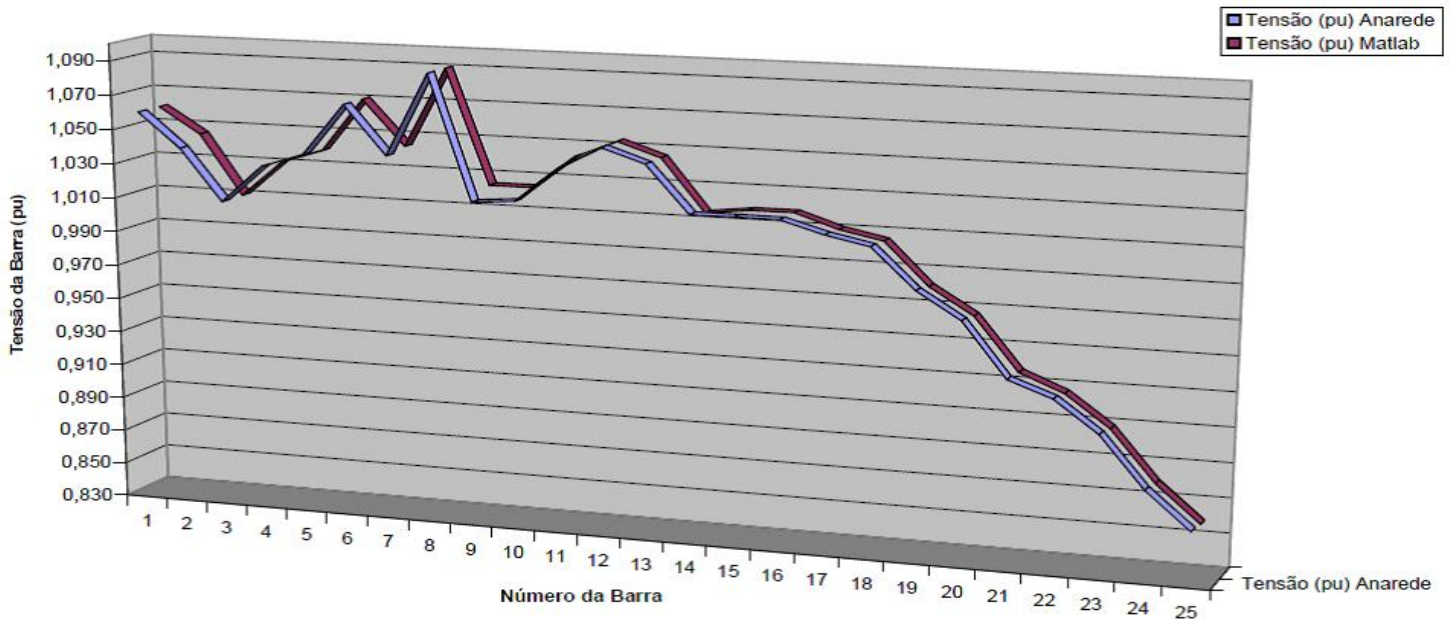


Figura 7 – Tensão das barras

Com este resultado favorável, realizou-se a inclusão de geração distribuída a rede radial (barra 25) e foi possível verificar novamente a convergência do caso. Os resultados obtidos na rede radial também foram semelhantes se a mesma fosse tratada de maneira isolada, conforme indicado na figura 8 .

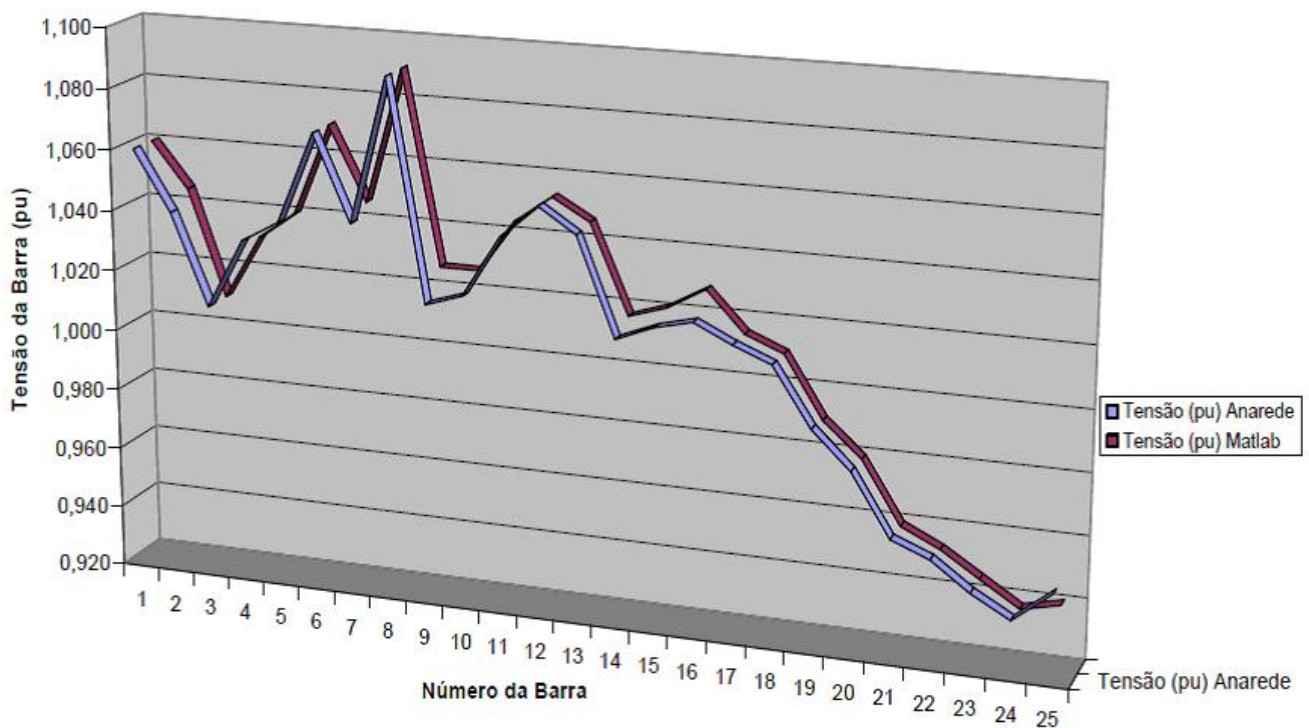


Figura 8 – Tensão nas barras com geração na barra 25

### 3. Conclusões

Nesse artigo foi apresentado que a utilização do Fluxo de Potência Desacoplado Rápido com a Rotação dos Eixos pode ser adaptado no uso de redes de distribuição, apresentando resultados confiáveis.

O software comercial (ANAREDE) apresentou excelente desempenho quando solicitado para resolução do fluxo de potência onde houve mudanças dos parâmetros da rede. Apresentando convergência em situações em que, se não fosse realizado a rotação dos eixos, isto não ocorreria.

Realizações importantes podem ser feitas com a utilização do Fluxo de Potência Desacoplado Rápido com a rotação dos eixos na solução do fluxo de carga. Como por exemplo a possibilidade de inclusão ao longo da rede de geração distribuída e realização de cálculo de fluxo de potência envolvendo paralelismo de alimentadores.

### 4. Referências bibliográficas

1. Monticelli A. "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica" Editora Edgard Blücher Ltda. 1983
  2. Garcia A, Monticelli A. "Simulação de Redes de Distribuição de Energia Elétrica através de Fluxo de Carga Desacoplado Rápido". IX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica - SENDI. Bahia, Setembro. 1984.
  3. Barbosa A., Colman E., Macedo W. and Souza. M. R. F de. "Aspectos práticos sobre a utilização de programas de fluxo de carga em sistemas de distribuição com configuração radial". XI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica - SENDI. Blumenau, Set. 1992.
  4. Stott B.. and Alsac O. "Fast Decoupled Load Flow". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol PAS-93, pg 859-869, NY, 1974.
  5. Pantuzi. A. V. "Desempenho de um Algoritmo Backward-Forward Sweep de Cálculo de Fluxo de Potência." Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Paulista – Julio Mesquita Filho, Abril, 2006.
  6. Bauab. G. H. S . "Cálculo de Fluxo de Carga em Sistemas de Transmissão com Alimentadores Primários de Distribuição." Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas , Julho, 2005.
  7. Gomes. R. B. "Resolução do Problema do Fluxo de Cargas para Rede de Distribuição Utilizando o Método Desacoplado Rápido com Rotação Automática de Eixos." Tese de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Maio, 2006.
  8. Barthold. L.O "Análise de Circuitos de Sistemas de Potência Vol.1" Curso de Engenharia em Sistema Elétricos de Potência - Série PTI Universidade Federal de Santa Maria
-