



COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE MÉTODOS DE FLUXO DE CARGA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO ATIVAS

Lucas Felipe Amaral*¹, João Paulo Abreu Vieira¹

¹PPGEE – Universidade Federal do Pará

Resumo - Este trabalho realiza uma avaliação do desempenho de métodos de fluxo de carga para redes de distribuição ativas. Assim, utilizou-se os métodos: Newton-Raphson, Desacoplado rápido com normalização complexa e somatório de correntes. Tal análise foi realizada considerando-se o número de iterações necessárias, o tempo de processamento para cada método convergir e a acurácia dos dois últimos métodos citados.

Palavras-Chave - Desacoplado com normalização complexa, fluxo de carga, Geração distribuída, Newton-Raphson, somatório de correntes.

PERFORMANCE COMPARISON OF LOAD FLOWS METHODS IN ACTIVE DISTRIBUTION GRID.

Abstract - This paper provides a performance evaluation of the power flows methods: Newton-Raphson, Fast decoupled with complex PU normalization and current summation to active distribution system. Such study was performed taking in count the number of iterations, the processing time needed to each method reach convergence and the accuracy of the last two methods cited.

Keywords – Current summation, distributed generation, Fast decoupled with complex PU normalization, load flow, newton Raphson.

NOMENCLATURA

<i>tp</i>	Tempo de processamento em segundos.
<i>it</i>	Número de iterações.
<i>Gp</i>	Grau de penetração.
<i>sc</i>	Método somatório de correntes.
<i>NR</i>	Método de Newton Raphson.
<i>CPU</i>	Método Desacoplado rápido com normalização complexa.
<i>Met.</i>	Métodos de fluxo de carga.
δ	Ângulo de tensão (graus)
V	Tensão (PU).

*lucaslfa@ufpa.br

k	sobrescrito que indica número de iteração.
R_{cpu}	Resistência de linhas após aplicação de normalização complexa.
X_{cpu}	Reatância de linhas após aplicação de normalização complexa.
P_{cpu}	potência ativa das barras após aplicação de normalização complexa.
Q_{cpu}	potência reativa das barras após aplicação de normalização complexa.
Z_{pu}	Impedância das linhas com normalização PU.
S_{pu}	Potência aparente das barras com normalização PU.
α_{avg}	Valor médio do ângulo de carga em radianos.
μ_{avg}	Valor médio do máximo e mínimo valor do ângulo de carga em radianos.
ω	Índice de fator de potência

I. INTRODUÇÃO

Uma das operações mais importantes em SEP corresponde ao fluxo de carga, o qual consiste basicamente na determinação do estado do sistema. Ou seja, a obtenção de módulos e ângulos das tensões em todas as barras do sistema, para um cenário operativo que envolve um nível de geração e carga e uma topologia. Neste sentido podem ser utilizados vários métodos de fluxo de carga, dentre os quais se destacam os métodos de Newton-Raphson, Desacoplado rápido e o somatório de correntes, entre outros.

Ao longo do tempo, os estudos de fluxo de carga com relação aos métodos sempre foram destinados aos sistemas de transmissão, porém tem crescido a necessidade de se fazer tais estudos para sistemas de distribuição, pois estes que anteriormente tinham características de sistemas passivos e de topologia radial, tem adquirido características ativas e de topologia malhada, graças a implementação da geração distribuída (GD). A presença da GD e de malhas nas redes de distribuição introduz novas questões de caráter técnico, como o fluxo de potência que pode se tornar bidirecional.

Para aplicações em sistemas de transmissão são utilizados, principalmente, os métodos Newton-Raphson e desacoplado rápido. O primeiro é um método muito robusto e com excelentes características de convergência [6], porém demanda um custo computacional muito elevado, pois em seu algoritmo de solução é necessário em cada iteração a inversão de uma matriz extensa, chamada de jacobiana. Tal

desvantagem é superada pela utilização do segundo método, o desacoplado rápido [7], o qual simplifica a matriz jacobiana através do desacoplamento das variáveis P-V e Q-δ. Como a referida matriz é simplificada, o esforço computacional torna-se menor. Essa simplificação pode ser empregada com muito êxito em sistemas de transmissão.

Por outro lado, quando o método desacoplado rápido é aplicado aos sistemas de distribuição tal simplificação não se torna mais válida, pois tais redes possuem em seus alimentadores uma relação R/X elevada, algo que não ocorre em sistemas de transmissão. Essa característica do sistema de transmissão é responsável pelo desacoplamento P-V e Q-δ, de acordo com as equações constituintes do método Newton-Raphson, as quais servem de subsídio para o método desacoplado. Como os sistemas de distribuição possuem elevado valor R/X, o acoplamento das variáveis mencionadas deve ser considerado, o que torna o método desacoplado pouco aproveitável para redes de distribuição primárias.

Uma boa possibilidade como método fluxo de carga, corresponde ao desacoplado rápido com rotação de eixos [1]. Tal método através de uma adaptação nos dados de ramos da rede a ser simulada reduz o valor R/X para valores típicos de sistemas de transmissão, procedimento denominado rotação de eixos, o qual ao ser realizado permite o desacoplamento das variáveis P-V e Q-δ.

Como opção adicional para o problema de fluxo de carga em redes de distribuição têm-se os métodos de varredura, dentre os quais, destaca-se o método somatório de corrente [2], cuja formulação utiliza as leis de kirchoff de tensão e das correntes. Uma vantagem muito interessante de tal método é o fato de não necessitar a inversão de matrizes como acontece nos métodos derivados do método de Newton-Raphson. Logo, o método somatório de corrente não demanda um grande esforço computacional.

II. MÉTODOS DE FLUXO DE CARGA

Como já salientado, os métodos de fluxo de carga possuem a finalidade de encontrar variáveis essenciais para o controle de um sistema elétrico de potência, como a tensão e seu respectivo ângulo, além de potências ativas e reativas geradas, para um determinado nível de geração e demanda. A seguir são apresentados os embasamentos teóricos dos métodos utilizados neste trabalho, Newton Raphson, Desacoplado rápido com normalização complexa e Somatório de correntes.

A. Newton Raphson

O método de Newton Raphson tem o objetivo de resolver as seguintes equação de balanço de potência:

$$P_g - P_t - P_c = 0 \quad (1)$$

$$Q_g - Q_t - Q_c = 0 \quad (2)$$

Onde:

P_g - Potência ativa gerada.

Q_g - Potência reativa gerada.

P_t - Potência ativa transmitida.

Q_t - Potência reativa transmitida.

P_c - Potência ativa consumida.

Q_c - Potência reativa consumida.

Para a resolução de tais equações se desenvolve a variável P_i e Q_i utiliza-se assim os parâmetros de linhas: resistência,

reatância série além da condutância e susceptância em derivação dessas. Faz-se uso dos dados de barra como a potência ativa e reativa consumida e/ou gerada e chega-se a seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} \delta \\ V \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} \delta \\ V \end{bmatrix}^k - [J^k]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^k \quad (3)$$

Onde a matriz [J] surge a partir do desenvolvimento das equações (1) e (2). Para a resolução de tal equação faz-se necessário manter constante algumas variáveis. Tipicamente escolhe-se uma barra de geração para ser a referência do sistema para tensão e ângulo. Costuma-se atribuir tensão e potência ativa gerada constante as demais unidades de geração, chamadas de barras PV. Além disso as barras de carga geralmente possuem potência ativa e reativa de consumo especificadas, sendo chamadas de barras PQ. Estabelecendo-se esses parâmetros como constantes, encontra-se as demais variáveis através da equação (3).

B. Desacoplado com Normalização Complexa

Embora o método de Newton Raphson seja considerado confiável [6], este método possui uma desvantagem, a qual é a necessidade de inversão da matriz jacobiana a cada iteração, sendo um processo computacional lento, como forma de superar tal inconveniente, formulou-se o método desacoplado rápido [7]. Tal método considera desprezíveis a influência da potência ativa com relação a tensão e a potência reativa com relação ao ângulo da tensão, dessa forma realizando-se as devidas manipulações na matriz jacobiana a equação (3) torna-se as fórmulas abaixo:

$$\delta^{(k+1)} = \delta^{(k)} - [B''^{(k)}]^{-1} \Delta P / V^{(k)} \quad (4)$$

$$V^{(k+1)} = V^{(k)} - [B'^{(k)}]^{-1} \Delta Q / V^{(k)} \quad (5)$$

Onde:

[B^{''}] - matriz de susceptâncias [B] sem as linhas e colunas referentes à barra de referência;

[B[']] - matriz susceptância [B] sem as linhas e colunas referentes às barras PV e de referência.

Dessa forma, percebe-se a diminuição do esforço computacional, uma vez que será necessário inverter duas matrizes cujos parâmetros são constantes. Entretanto tal método é indicado para redes de transmissão em extra-alta tensão (EAT; V > 230 kV) e ultra-alta tensão (UAT; V > 750 kV), para um sistema de distribuição a metodologia do desacoplamento é pouco válida, pois em tais redes os valores da razão r/x são elevados, tornando assim mais intensas as relações PV-Qδ. Como consequência tem-se a possibilidade do método não convergir para tais redes.

Com o objetivo de superar o referido obstáculo, foi elaborado modificações no algoritmo do método desacoplado como o encontrado em [1], onde se faz modificações nos dados das linhas e barras para tornar o sistema elétrico semelhante a um sistema de transmissão. Tal operação é feita com base na normalização complexa, a qual consiste na escolha de uma base real para tensão e potência e de um ângulo base que possui o intuito de reduzir o valor r/x, a ser aplicado na potência base. Dessa forma antes de cada simulação realiza-se as seguintes transformações nos parâmetros da rede em todas as linhas e em todas as barras:

$$R_{cpu} = |Z_{pu}| \cdot \cos(\lambda + \theta_{base}) \quad (6)$$

$$X_{cpu} = \|Z_{pu}\|.sen(\lambda + \theta_{base}) \quad (7)$$

$$P_{cpu} = \|S_{pu}\|.cos(\gamma + \theta_{base}) \quad (8)$$

$$Q_{cpu} = \|S_{pu}\|.sen(\gamma + \theta_{base}) \quad (9)$$

Onde:

λ - Ângulo da potência complexa de cada barra.

γ - Ângulo da impedância de cada linha.

θ_{base} - Ângulo de normalização complexa.

A escolha do ângulo base também é feita em [1], utilizando-se os valores de resistência e reatância da rede além das potências de carga. Logo de acordo com [1] O primeiro passo do método proposto é achar a média aritmética dos diferentes valores de x/r do sistema de distribuição, como mostrado em (10).

$$\alpha_{AVG} = \sum_{i=1}^n \frac{arctg(xi/ri)}{n} \quad (10)$$

. Em alguns casos, o valor da média aritmética entre o valor máximo e mínimo de x/r pode ser feito como mostrado na equação (3.84) ou também como mostrado na equação (11).

$$\mu_{avg} = \frac{arctg(\frac{x}{r})_{MAX} + arctg(\frac{x}{r})_{min}}{2} \quad (11)$$

Leva-se em conta também o efeito do baixo fator de potência das cargas, uma correção adicional pode ser aplicada ao ângulo de rotação como mostrado em (12):

$$\omega = 1 - \frac{\sum_{i=1}^l cos(arctg(Qi/Pi))}{l} \quad (12)$$

Por fim tem-se o ângulo base que utiliza as informações das equações (10), (11) e (12), assim tem-se;

$$\theta^{rot} = (\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha_{avg} + \gamma_{avg}}{2})(1 + \omega) \quad (13)$$

A equação (13) leva a uma simples, mas efetiva forma de se determinar um ângulo de rotação adequado.

Por fim utilizando-se γ e θ de cada linha, obtém-se os valores de fluxos de carga e perdas de potência em cada linha através de uma normalização reversa.

C. Somatório de correntes

O método somatório de correntes [2] utiliza-se de algoritmo baseado nas leis de Kirchoff de tensão e de correntes, trata-se de um método de varredura elaborado especialmente para sistemas de distribuição radiais passivos. A formulação do somatório de correntes se inicia com o cálculo das injeções de corrente em cada barra através da equação abaixo:

$$I_i^{(k)} = S_i^{(k)}/V_i^{(k-1)} - Y_i V_i^{(k-1)} \quad (14)$$

Onde:

Y_i - Soma das admitâncias de todos os elementos shunts das barras i

S_i - Potência complexa das barras i .

Atribui-se inicialmente a corrente I_i ao ramo a jusante da barra i depois soma-se as correntes de cada ramo com a corrente do ramo a jusante se houver tal trecho, partindo-se dos pontos mais afastados da subestação em direção a esta, conforme equação abaixo:

$$I_{km} = I_m + \sum_{j \in F_m} I_{mj} \quad (15)$$

Onde:

F_m - conjunto das barras alimentadas pela barra m e I_m corresponde a corrente de malha.

I_{km} - corresponde a corrente no trecho entre as barras k e m .

Por fim calcula-se as tensões nodais partindo-se dos ramos mais próximos do nó raiz até os mais afastados. Como mostrado abaixo:

$$V_m = V_k - Z_{km}.I_{km} \quad (16)$$

Onde:

Z_{km} - Impedância dos trechos entre k e m .

Caso no sistema de distribuição haja unidades de geração distribuída deve-se verificar a natureza de tal geração, se esta tiver fator de potência fixo, tendo-se uma barra PQ, apenas subtrai-se da potência de carga da barra com geração os valores constantes gerados de potência ativa e reativa.

Porém caso a geração distribuída (GD) se comporte com tensão de saída constante, resultando em barra PV, então se realiza o procedimento baseado em [3] descrito anteriormente para geração em barras PQ apenas para a potência ativa gerada, além disso calcula-se uma corrente puramente imaginária I_q injetada na barra com GD, tal corrente é responsável por manter a tensão no valor especificado. O cálculo de tal corrente é descrito abaixo:

$$I_q^{(k)} = [Z_v]^{-1}[\Delta V]^{(k)} \quad (17)$$

Na equação acima $[\Delta V]^{(k)}$ é um vetor dado pela diferença entre o módulo da tensão desejada e o módulo da tensão realmente obtida em cada k iteração para cada barra PV, $[Z_v]$ é uma matriz quadrada, onde os elementos z_{ii} da diagonal principal corresponde a soma das impedâncias dos trechos existentes entre a barra i e a subestação, enquanto os elementos z_{ij} correspondem a soma das impedâncias dos trechos que as barras i e j compartilham entre si até o nó raiz. As dimensões de $[\Delta V]$ e $[Z_v]$ dependem da quantidade de barras PV do sistema.

III. RESULTADOS

Todas as simulações foram realizadas utilizando a linguagem matlab cuja versão utilizada é 7.12.0 (R2011a), onde para o método de Newton-Raphson e desacoplado com normalização complexa, utilizou-se o pacote matpower 5.1.

As simulações foram todas realizadas no computador Dell Inspiron 14 5000, com memória RAM de 4 GB e sistema operacional versão Windows 7 home premium de 64 bits. O processador nesse computador é o intel(R) Pentium(R) CPU N3700 @ 1,84 GHz.

Os sistemas testes utilizados foram 2, com características radiais. Posteriormente a tais sistemas foram adicionadas 3 unidades GD inicialmente como barras PQ e depois como barras PV. Nestas simulações alterou-se o grau de penetração entre 10% a 60% para se observar o comportamento apresentado para cada método.

Quanto a descrição das redes utilizadas, estas são chamadas de sistema teste 1 o qual possui 69 barras [4], o sistema teste 2 apresenta 476 barras [5], em ambos os sistemas são desprovidos de elementos em derivação.

O critério de convergência para os métodos Newton Raphson e desacoplado com normalização complexa é

baseado numa tolerância para as equações de balanço de potência como apresentado nas equações (1) e (2). Assim tem-se:

$$\text{Máx} (||\Delta S||) \leq \varepsilon \quad (18)$$

Onde:

ε - Tolerância estabelecida para que o método convirja.

Máx ($||\Delta S||$) - Valor máximo obtido em cada iteração do desvio de potência.

Para o método somatório de corrente utilizou-se o critério de convergência adotado em [2], na qual subtrai-se a potência aparente de cada barra pelo valor obtido na iteração anterior.

$$S^{(k)} = V^{(k)} I^{(k)*} - Y_i / |V^{(k)}|^2 \quad (19)$$

$$\text{Máx}(S^{(k)} - S^{(k-1)}) \leq \varepsilon \quad (20)$$

Adotou-se o valor de tolerância $\varepsilon = 10^{-6}$, assim como realizado em [1].

A. Comparação do número de iterações e tempo de processamento dos métodos

Os resultados com relação ao número de iterações e tempo de processamento necessários para cada método convergir está expresso nas tabelas I e II, para os sistemas testes 1 e 2 respectivamente:

Tabela I: Número de iterações e tempo de processamento para o sistema de 69 barras com unidades GD.

Métodos	Caso base		GD como PQ				GD como PV			
			Gp=20%		Gp=60%		Gp=30%		Gp=50%	
	it	tp	it	tp	it	tp	it	tp	it	tp
NR	3	0.44	3	0.75	2	0.61	3	0.55	3	0.74
CPU	5	0.36	4	0.39	4	0.34	4	0.40	4	0.60
SC	5	0.05	4	0.05	3	0.08	10	0.11	8	0.09

Tabela II: Número de iterações e tempo de processamento para o sistema de 476 barras com unidades GD.

Met.	Caso base		GD como PQ				GD como PV			
			Gp=20%		Gp=60%		Gp=30%		Gp=50%	
	it	tp	it	tp	it	tp	it	tp	it	tp
NR	3	9,20	3	9,17	3	8,38	3	11,93	3	10,92
CPU	7	0,89	7	0,92	8	0,90	7	1,50	8	1,90
SC	4	0,14	5	0,29	6	0,31	49	2,65	44	2,01

Como se observa em todas as simulações o tradicional método de Newton Raphson possui o menor número de iterações em todas as simulações realizadas, não obstante este é o método mais oneroso em termos computacionais, uma vez que a cada iteração é necessário realizar a inversão da matriz jacobiana, a qual é atualizada a cada iteração, por esta razão se verifica que se aumentando o tamanho do sistema, o tempo de processamento também seja mais elevado, pois a ordem da referida matriz seria maior.

O método de desacoplado com normalização complexa apresenta um número de iterações superior ao método de Newton Raphson, contudo observa-se valores baixos de iterações entre 4 e 8, o que mostra a adequação do método a sistema de distribuições e ainda observa-se a característica de um tempo de processamento pequeno, típico do método desacoplado tradicional [7], uma vez que a matriz jacobiana

se reduz a duas matrizes de susceptância, cujos valores são constantes, logo se faz necessário apenas uma inversão.

O método somatório de correntes mostrou-se o método mais veloz na maioria das simulações, além de necessitar de poucas iterações para convergir. Tal fato ocorre pelo fato de o método possuir um algoritmo que se baseia em operações matemáticas simples como detalhado nas equações (14) a (16).

Porém percebe-se que ao acrescentar unidades GD ao sistema especialmente caso essas sejam de tensão controlada, o número de iterações eleva-se consideravelmente, como se observa para o sistema de 476 barras para o grau de penetração de 30%, onde foi necessárias 49 iterações, consequentemente observa-se neste caso um aumento notável do esforço computacional em relação as demais simulações com o método somatório de correntes. Entretanto não se observou um aumento considerável do número de iterações nos demais métodos ao se adicionar unidades GD.

B. Verificação da acurácia dos métodos

Com o objetivo de apurar a acurácia dos métodos realizou-se a comparação do perfil de tensão obtido em cada método e para apresentação dos resultados, escolheu-se os valores de tensão do método Newton Raphson como referência, uma vez que este é um dos métodos mais conhecidos e utilizados atualmente, além da sua conhecida confiabilidade [6].

Então elaborou-se gráficos com os valores dos módulos das diferenças entre as tensões obtidas no método Newton Raphson por aquelas obtidas nos dois outros métodos, os resultados para o sistema de 69 barras são apresentados nas figuras 1 e 2 e na tabela III indicando os erros máximos abaixo.

Figura 1. Verificação da acurácia para o método desacoplado com normalização complexa, utilizando-se do sistema de 69 barras.

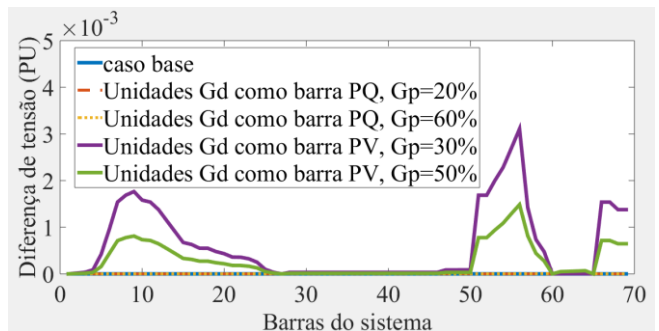


Figura 2. Verificação da acurácia para o método somatório de correntes, utilizando-se do sistema de 69 barras.

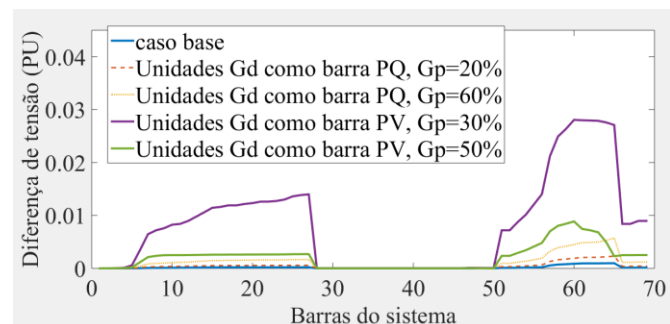


Tabela III: Detalhamento do valor dos erros dos métodos desacoplado com normalização complexa e somatório de correntes com relação ao método de Newton Raphson.

Met.	Caso base	GD como PQ		GD como PV	
		Gp=20%	Gp=60%	Gp=30%	Gp=50%
CPU	$1,72 \cdot 10^{-7}$	$4,60 \cdot 10^{-7}$	$3,90 \cdot 10^{-6}$	$3,11 \cdot 10^{-3}$	$1,48 \cdot 10^{-3}$
SC	$9,65 \cdot 10^{-4}$	$2,31 \cdot 10^{-3}$	$5,71 \cdot 10^{-3}$	$2,81 \cdot 10^{-2}$	$8,86 \cdot 10^{-3}$

Observa-se na figura 1 e na figura 2 e na tabela III que os métodos possuem boa acurácia para os sistemas sem GD, observa-se assim erros pequenos na terceira ou quarta casas decimais, ao se adicionar barras de geração PQ, verifica-se um aumento da diferença de tensão entre os métodos somatório de correntes e Newton Raphson, com valores maiores que 0,005, próximo a barra 65. Tal erro não é perceptível na figura 1 para o método desacoplado com normalização complexa.

Ao se considerar unidades GD como barras PV verifica-se um aumento nos valores dos gráficos das figuras 1 e 2 próximos a 0,0035 e 0,03 respectivamente, sendo este último valor considerado elevado e que compromete a confiabilidade do método somatório de correntes, entretanto o método desacoplado modificou apresentou desempenho mais aceitável, pois tal erro não compromete consideravelmente o valor final de tensão em volts.

Nas figuras 3, 4 e 5, realizou-se análise da acurácia dos métodos desacoplado com normalização complexa e nas figuras 6, 7 e 8 tem-se os resultados para o método somatório de correntes para o sistema de 476 barras, procedeu-se assim para este sistema, pois sendo este mais extenso que a rede anterior, torna-se necessário a fragmentação do resultado para que este se torne mais visualizável. Na tabela IV indica-se ainda os erros máximos.

Figura 3. Verificação da acurácia para o método desacoplado com normalização complexa, utilizando-se do sistema de 476 barras, para as primeiras 158 barras.

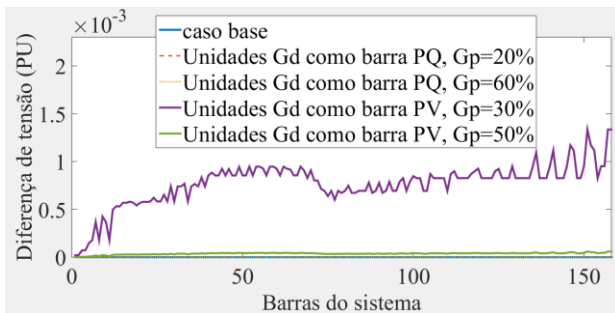


Figura 4. Verificação da acurácia para o método desacoplado com normalização complexa, utilizando-se do sistema de 476 barras, da barra 158 a barra 316.

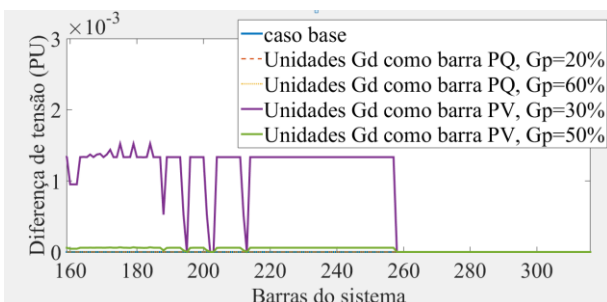


Figura 5. Verificação da acurácia para o método desacoplado com normalização complexa, utilizando-se do sistema de 476 barras, para as últimas 158 barras.

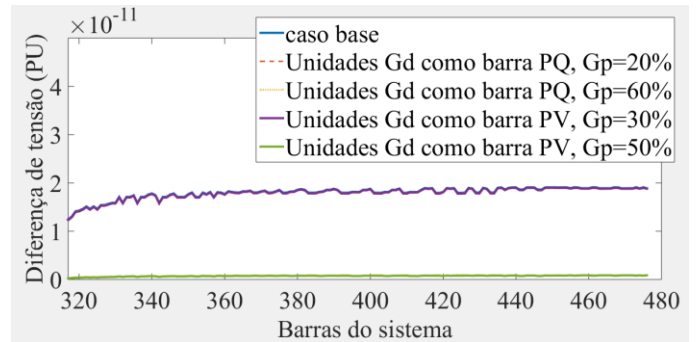


Fig. 6. Verificação da acurácia para o somatório de correntes, utilizando-se do sistema de 476 barras, para as primeiras 158 barras.

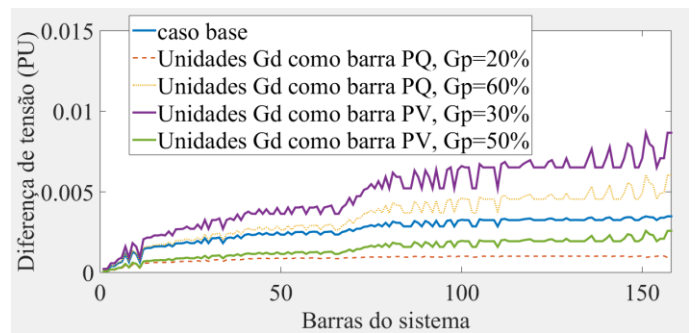


Fig. 7. Verificação da acurácia para o método somatório de correntes, utilizando-se do sistema de 476 barras, da barra 158 a barra 316.

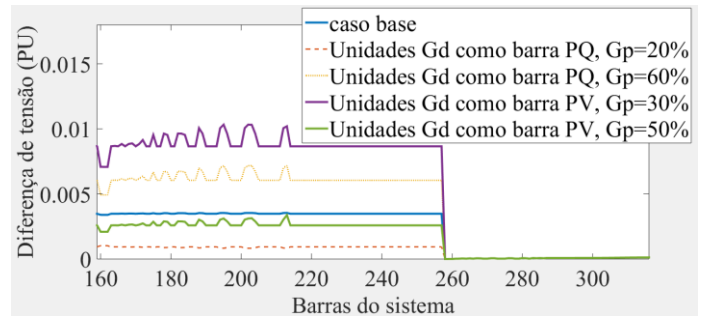


Figura 8. Verificação da acurácia para o método somatório de correntes, utilizando-se do sistema de 476 barras, das últimas 158 barras.

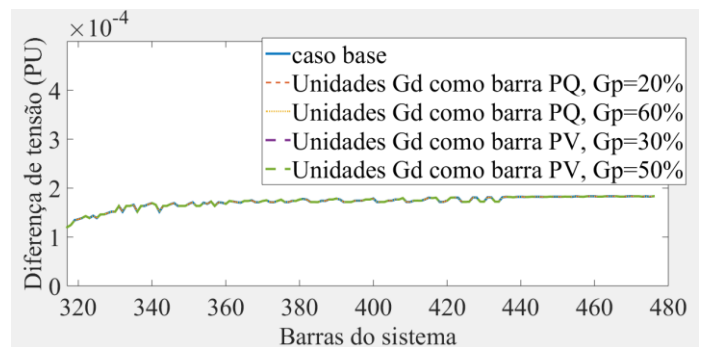


Tabela IV: Detalhamento do valor dos erros dos métodos desacoplado com normalização complexa e somatório de correntes com relação ao método de Newton Raphson.

Met.	Caso base	GD como PQ		GD como PV	
		Gp=20%	Gp=60%	Gp=30%	Gp=50%
CPU	$6,25*10^{-9}$	$1,11*10^{-9}$	$2,01*10^{-9}$	$1,52*10^{-3}$	$6,52*10^{-5}$
SC	$3,54*10^{-3}$	$1,03*10^{-3}$	$7,19*10^{-3}$	$1,03*10^{-2}$	$3,37*10^{-3}$

Percebe-se que não há uma diferença notória entre os resultados dos sistemas de 69 e 476 barras, verifica-se novamente nas figuras 3 a 8 e na tabela IV que as versões passivas das referidas redes possuem valores no máximo próximos a 0,004 para o método somatório de corrente, ao adicionar-se GD's em barras PQ, o método somatório de correntes apresenta valores próximos a 0,008, tal valor não se verifica para o método desacoplado com normalização complexa.

Ao adicionar-se barras PV, o método desacoplado modificado apresenta valor de erro máximo na figura 4, próximo de 0,0016, um valor que não compromete os valores de tensão em volts. Entretanto o método somatório de correntes apresenta erro de tensão máximo para o grau de penetração de 30% superior a 0,01, valor que prejudica a confiabilidade do método, fato também verificado anteriormente para a simulação com a rede de 69 barras.

IV. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados apresentados na seção anterior, o método Newton Raphson mostra-se um método que pode ser utilizado em sistemas de distribuição, entretanto o método se mostrou oneroso computacionalmente, especialmente para sistemas extensos, fator que pode ser indesejável se for necessário fluxo de carga em tempo real.

O método somatório de correntes apresentou um desempenho satisfatório para as redes de distribuição passivas demandando um tempo de processamento pequeno, poucas iterações e valores pequenos de desvio de tensão em relação ao método Newton Raphson. Porém ao se adicionar unidades GD, especialmente com controle de tensão, foi verificada uma

elevação no número de iterações e tempo de processamento, além do aumento do valor de desvio de tensão em relação ao método de Newton Raphson. Logo tal método não se torna recomendável para sistemas de distribuição ativos.

O método desacoplado com rotação de eixos apresentou o desempenho mais satisfatório entre todos os métodos, pois para este se verificou um número baixo de tempo de processamento, além disso a acurácia do método manteve-se em valores aceitáveis mesmo quando se adicionava barras PV nas redes de distribuição.

REFERÊNCIAS

- [1] O. L. Tortelli, E. M. Lourenço, Member, IEEE, A. V. Garcia, and B. C. Pal, Fellow, IEEE, "Fast Decoupled Power Flow to Emerging Distribution Systems via Complex pu Normalization", *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume: 30, pp. 1351 – 1358, Issue: 3, May 2015.
- [2] Giri Angga Setia ; Gibson H M Sianipar ; Reynaldi T Paribo, "The performance comparison between fast decoupled and backward-forward sweep in solving distribution systems", *3rd Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE)*, pp.753-762, November 2016.
- [3] D. Shirmohammadi, C.S. Cheng, "A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, pp. 671 – 679, Issue: 2, May 1995.
- [4] Baran, M. E., WU, F. F., "Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution System", *IEEE Transactions Power Delivery*, vol. 4, pp. 725-734, January 1989.
- [5] Jeferson De Souza Costa, "técnicas de otimização aplicadas a sistemas Elétricos de distribuição", dissertação de mestrado em engenharia elétrica, UFJF, Juiz de fora, MG, Agosto 2008.
- [6] B. Stott, M.Sc.Tech. "Effective starting process for Newton-Raphson load flows", *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, Vol. 118, Issue: 8, pp. 983-987, August 1971.
- [7] B. Stott, O. Alsac, "Fast Decoupled Load Flow", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-93, Issue: 3, pp. 859 – 869, May 1974.