I CONGRESSO INTERNACIONAL
MULTIDISCIPLINAR

SIMPLIFICAÇÃO DO MODELO DA REDE E SEU IMPACTO NA ANÁLISE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Felipe Hernández García
Universidade Federal do Rio Grande

Mario Orlando Oliveira
Universidad Nacional de Misiones

Renato Gonçalves Ferraz
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Arturo Suman Bretas
Pacific Northwest National Laboratory

RESUMO
Este trabalho analisa o impacto da utilização da redução de Kron nas variáveis de estado de um sistema elétrico trifásico, mesmo quando este não cumpre as condições necessárias para sua aplicação. A redução é aplicada a um modelo de linha elétrica para eliminar a equação correspondente ao condutor de neutro da mesma. O programa ATP é empregado para modelar e simular o comportamento de um sistema elétrico considerando diferentes graus de desequilíbrio como referência para a comparação dos resultados. Os resultados mostram que em determinadas condições de desequilíbrio a redução de Kron pode originar erros significativos nas variáveis de estado do sistema.

Palavras-chave: Sistemas elétricos de potência, Desequilíbrio, Redução de Kron.

1 INTRODUÇÃO

A eletricidade é um bem imprescindível na vida moderna, para a indústria, o comércio, os serviços e o setor residencial. Desse modo ela tem que ser oferecida com qualidade o que significa suprimento contínuo e características apropriadas para seu consumo.

Garantir tais características significa estudar continuamente os Sistemas Elétricos de Potência (SEP), seja na etapa de projeção quanto de exploração, de modo a prever seu comportamento. Estes estudos relacionam um número muito elevado de variáveis, devido à complexidade e magnitude dos SEP.

As leis de Kirchhoff e de Ohm, por exemplo, permitem a elaboração de sistemas de equações através dos quais os estudos são conduzidos. Ocorre que os sistemas podem ser relativamente grandes e complexos, envolvendo tempos significativos para sua solução, inclusive quando programas

computacionais são utilizados. Por causa disto vários métodos têm sido utilizados para reduzir o tamanho dos sistemas, quando estes cumprem determinadas condições. Algumas das numerosas aplicações destes métodos são apresentadas em [3-6, 12].

As linhas elétricas são um dos componentes principais dos SEP. Quando estes sistemas são equilibrados, ou seja, simétricos, transpostos e de cargas balanceadas, através do conductor do neutro não circula corrente, de modo que pode ser desconsiderado na análise dos sistemas. Sistemas equilibrados facilitam então a utilização de modelos simplificados para a linha elétrica.

Entretanto, se os sistemas estão desequilibrados parte da corrente flui até os geradores ou transformadores através do neutro, influenciando nas três fases, devido ao efeito das indutâncias mútuas. Os sistemas de distribuição de energia, mesmo com cargas balanceadas, mostram desequilíbrios intrínsecos devido à manifestação de indutâncias mútuas diferentes entre as fases. Estas indutâncias podem não ser muito diferentes, de modo que pode ser pequeno o erro produzido, durante a análise, ao assumir que não circula corrente através do neutro. Contudo, uma rede atendendo vários consumidores percebe variações constantes dos níveis de carga nas fases. Nestas condições de desequilíbrio, não é correto manter o mesmo modelo para o estudo do sistema. Esta foi a premissa para o desenvolvimento deste trabalho, que visou quantificar as possíveis diferenças entre ambas as metodologias de análise.

O programa de análise de fenômenos eletromagnéticos ATP/EMTP [7] serviu de ferramenta para a realização das simulações, sendo determinadas as indutâncias próprias e mútuas dos condutores da linha elétrica através das equações de Carson [9]. As diferenças observadas nos cenários estudados são associadas ao valor do desequilíbrio do sistema.

2 REDUÇÃO NOS SISTEMAS DE EQUAÇÕES

É muito comum na engenharia a formulação de sistemas de equações para representar diversos fenômenos que acontecem de forma natural, em processos industriais, entro outros.

Um sistema de n equações independentes, como apresentadas em (1), em que a quantidade de incógnitas é também n, pode ser representado de forma matricial, como (2):

$$\begin{aligned} &a_1x_1 + a_2x_2 + \ldots + a_nx_n = y_1 \\ &b_1x_1 + b_2x_2 + \ldots + b_nx_n = y_2 \\ &\ldots \\ &n_1x_1 + n_2x_2 + \ldots + n_nx_n = y_n \end{aligned} \qquad (1)$$

$$[Y]=[C][X] \qquad (2)$$

onde C representa a matriz dos coeficientes a_1.....n_n das variáveis independentes x, e Y é o

conjunto das variáveis dependentes. *C* tem ordem *n* x *n* e os vetores *X* e *Y* têm ordem *n* x 1.

Se em algum momento *m* variáveis dependentes têm valor zero, o sistema pode ser reduzido a *n-m* equações, devido à possibilidade de expressar *m* das variáveis independentes como função das outras variáveis. Por exemplo, em um sistema de três equações, sendo $y_2 = 0$, podemos expressar x_2 em função das variáveis x_1 e x_3. Isto é:

$$x_2 = -\left(\frac{b_1}{b_2}x_1 + \frac{b_3}{b_2}x_3\right) \tag{3}$$

Substituindo x_2 na primeira e na terceira equações de (1) obtemos:

$$\begin{aligned}\left(a_1 - \frac{a_2 b_1}{b_2}\right)x_1 + \left(a_3 - \frac{a_2 b_3}{b_2}\right)x_3 = y_1 \\ \left(c_1 - \frac{c_2 b_1}{b_2}\right)x_1 + \left(c_3 - \frac{c_2 b_3}{b_2}\right)x_3 = y_3\end{aligned} \tag{4}$$

que agora é um sistema de apenas duas equações.

No caso em que y_1 e y_3 sejam conhecidas a solução do sistema será dada por:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 - \frac{a_2 b_1}{b_2} & a_3 - \frac{a_2 b_3}{b_2} \\ c_1 - \frac{c_2 b_1}{b_2} & c_3 - \frac{c_2 b_3}{b_2} \end{bmatrix}^{-} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_3 \end{bmatrix} \tag{5}$$

Comprova-se que y_2 não participa, explicitamente, da solução do sistema de equações, porém, o valor de x_2 será conhecido, através de (3), uma vez determinados x_1 e x_3.

No exemplo, a segunda equação de (1) não foi necessária para a solução do sistema de equações, dado que o sistema foi reduzido, a matriz foi reduzida, o que é sempre importante para a redução da complexidade dos cálculos e a diminuição do tempo para a obtenção da solução. Na atualidade, a utilização de programas computacionais têm reduzido enormemente este tempo, contudo, sempre que seja possível é conveniente reduzir a ordem da matriz, pois tal tempo é inversamente proporcional à ordem da mesma [8].

Com $y_2 = 0$ obtivemos (3), onde x_2 foi colocada em função das outras variáveis. Contudo, x_1 ou x_3 poderiam ter sido as escolhidas e, no caso, substituídas no sistema de equações original para obter (4). De qualquer forma, assim como no exemplo, é usual escolher a variável cuja posição nas equações coincide com o número da equação que estará sendo eliminada. Este processo de eliminação de

equações é conhecido como *redução de Kron* na engenharia elétrica [10]. Com tal redução, os elementos da nova matriz *C* são determinados como:

$$c_{jk} = c_{jk} - \frac{c_{jp} c_{pk}}{c_{pp}} \tag{6}$$

onde *p* é o número da equação que está sendo eliminada do sistema original. Por exemplo, para $p = 2$ obtemos a seguinte matriz:

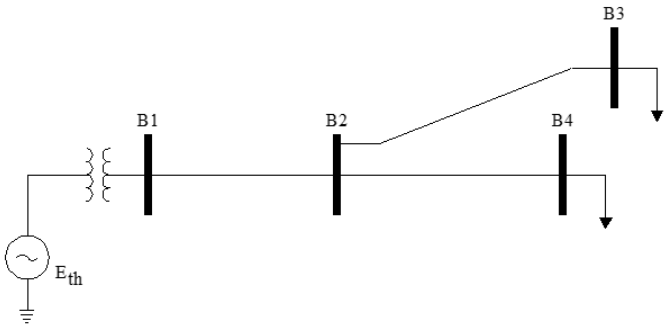
$$C = \begin{bmatrix} a_1 - \frac{a_2 b_1}{b_2} & 0 & a_3 - \frac{a_2 b_3}{b_2} \\ 0 & 0 & 0 \\ c_1 - \frac{c_2 b_1}{b_2} & 0 & c_3 - \frac{c_2 b_3}{b_2} \end{bmatrix} \tag{7}$$

Com (7) e (5) observa-se que o elemento *pp* atuou como "pivote", eliminando-se a fila e a coluna que nele se interceptaram.

3 A REDUÇÃO DE KRON EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Para exemplificar a aplicação da redução de Kron considera-se o sistema de quatro barras da Fig.1, o qual constitui parte de uma rede elétrica.

Fig. 1. Diagrama unifilar de sistema elétrico de potência.



A aplicação da lei de Kirchhoff nas malhas da rede resulta em um sistema de equações, resumido matricialmente como:

$$[\dot{V}] = [\bar{Z}_{bus}][\dot{I}] \tag{8}$$

onde *Ve I* representam os vetores das tensões e correntes de barras, respectivamente, e Z_{bus} representa a matriz de impedância de mesmas. Por conveniência, no sistema de equações, a numeração das equações se corresponde com o número das barras na Fig.1.

Com a informação das impedâncias das linhas é determinada a matriz Z_{bus}, conforme o procedimento mostrado em [11], resultando em:

$$\left[\overline{Z}_{bus}\right]=\begin{bmatrix} 0-16{,}75i & 0+11{,}75i & 0+2{,}50i & 0+2{,}50i \\ 0+11{,}75i & 0-19{,}25i & 0+2{,}50i & 0+5{,}00i \\ 0+2{,}50i & 0+2{,}50i & 0-5{,}80i & 0+0{,}00i \\ 0+2{,}50i & 0+5{,}00i & 0+0{,}00i & 0-8{,}30i \end{bmatrix} \text{pu}$$

De acordo com a Fig.1, em que apenas as barras 3 e 4 têm carga, considera-se o seguinte vetor corrente:

$$\left[\dot{I}\right]=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1{,}00\angle -90° \\ 0{,}68\angle -135° \end{bmatrix} \text{pu}$$

com o qual obtemos as seguintes tensões de barra:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_3 \\ \dot{V}_4 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0{,}9691\angle -162° \\ 0{,}9673\angle -161° \\ 0{,}9996\angle -165° \\ 0{,}9487\angle -159° \end{bmatrix} \text{pu}$$

Para determinados estudos do sistema elétrico as barras 1 e 2 são de menor importância, já que nelas não está colocada nenhuma carga sensível, assim como nenhum gerador. De acordo com a redução de Kron a primeira e a segunda equação podem ser eliminadas de (8).

Após a eliminação e determinação da nova matriz Z_{bus}, as tensões resultam em:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_3 \\ \dot{V}_4 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0{,}9691\angle -162° \\ 0{,}9996\angle -165° \\ 0{,}9487\angle -159° \end{bmatrix} \text{pu}$$

Observa-se que as tensões das barras 1, 3 e 4 obtidas após a redução, são iguais às obtidas no

sistema original, o que confirma a validade e utilidade do método.

Para fins de comparação eliminamos a terceira equação de (8), obtendo como resultados os seguintes, os quais afastam-se significativamente dos valores originais:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0{,}4330 \angle -135° \\ 0{,}4364 \angle -135° \\ 0{,}4752 \angle -135° \end{bmatrix} \text{pu} \qquad (9)$$

4 A REDUÇÃO DE KRON NO MODELO DAS LINHAS ELÉTRICAS EM SISTEMAS TRIFÁSICOS

A linha elétrica é um dos principais componentes dos sistemas elétricos de potência. Dependendo do seu comprimento, longo, médio ou curto, tem modelos correspondentes. No caso dos sistemas de distribuição onde as distâncias entre a subestação e as cargas são curtas o modelo da linha pode ser considerado como sendo apenas o de uma impedância [1].

Para os sistemas trifásicos com neutro o modelo da linha, por unidade de comprimento, é dado por:

$$\left[\bar{Z}_l\right] = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{aa} & \bar{Z}_{ab} & \bar{Z}_{ac} & \bar{Z}_{an} \\ \bar{Z}_{ba} & \bar{Z}_{bb} & \bar{Z}_{bc} & \bar{Z}_{cn} \\ \bar{Z}_{ca} & \bar{Z}_{cb} & \bar{Z}_{cc} & \bar{Z}_{cn} \\ \bar{Z}_{na} & \bar{Z}_{nb} & \bar{Z}_{nc} & \bar{Z}_{nn} \end{bmatrix} \Omega/\text{u}$$

onde o elemento Z_{ii} corresponde à impedância própria da fase i e Z_{ij} à impedância mútua entre as fases i e j ($Z_{ij} = Z_{ji}$).

Em um trecho de linha, a queda de tensão no condutor correspondente à fase a, por exemplo, é dada por:

$$\bar{V}_{aa'} = \bar{Z}_{aa}\bar{I}_a + \bar{Z}_{ab}\bar{I}_b + \bar{Z}_{ac}\bar{I}_c - \bar{Z}_{an}\bar{I}_n \qquad (10)$$

E de forma geral:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{aa'} \\ \bar{V}_{bb'} \\ \bar{V}_{cc'} \\ \bar{V}_{nn'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{aa} & \bar{Z}_{ab} & \bar{Z}_{ac} & \bar{Z}_{an} \\ \bar{Z}_{ba} & \bar{Z}_{bb} & \bar{Z}_{bc} & \bar{Z}_{cn} \\ \bar{Z}_{ca} & \bar{Z}_{cb} & \bar{Z}_{cc} & \bar{Z}_{cn} \\ \bar{Z}_{na} & \bar{Z}_{nb} & \bar{Z}_{nc} & \bar{Z}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \\ -\bar{I}_n \end{bmatrix} \qquad (11)$$

4.1 SISTEMAS SIMÉTRICOS, TRANSPOSTOS E EQUILIBRADOS

Quando o sistema é simétrico e transposto, isto é, com suas três fases de igual impedância e quando o efeito das suas impedâncias mútuas tem sido cancelado durante a construção da linha, a tensão no terminal das cargas é simétrica, o seja:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V\angle\theta \\ V\angle\theta - 120° \\ V\angle\theta + 120° \end{bmatrix} \text{V}$$

onde V e θ simbolizam a relação da amplitude e o ângulo da tensão na barra da subestação com as correspondentes grandezas da impedância da linha até a barra da carga.

Sendo simétrica e transposta o modelo da linha simplifica-se para:

$$\left[\overline{Z}_l\right] = \begin{bmatrix} \overline{Z}_p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \overline{Z}_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \overline{Z}_p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \overline{Z}_p \end{bmatrix} \Omega/\text{u}$$

onde Z_p identifica a impedância própria dos condutores das fases e do neutro. Se além disto a carga em Y for balanceada e estiver aterrada, não haverá queda de tensão no neutro, porque através dele não circulará corrente nenhuma. Nesse caso (11) é simplificada para:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{aa'} \\ \dot{V}_{bb'} \\ \dot{V}_{cc'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Z}_p & 0 & 0 \\ 0 & \overline{Z}_p & 0 \\ 0 & 0 & \overline{Z}_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \qquad (12)$$

que na prática é equivalente a ter feito uma redução de Kron no sistema de equações correspondente.

4.2 SISTEMAS DESEQUILIBRADOS

Nas condições anteriores o sistema trifásico pode ser “reduzido” a um sistema monofásico. Isto é praticado desde os inícios das análises dos sistemas elétricos de potência trifásicos, também almejando simplificar os cálculos e agilizar a obtenção dos resultados.

Porém, os sistemas de distribuição mostraram que são “naturalmente” desequilibrados, porque

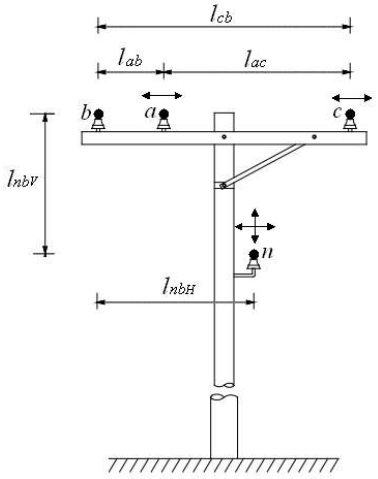
é praticamente impossível que as cargas sejam iguais nas três fases. Também são assimétricos, porque além da possibilidade de terem impedâncias de fases diferentes, o mais comum é que a linha não seja transposta, o que não elimina o efeito das impedâncias mútuas entre os condutores.

Nestas condições a corrente que circula através do neutro não é zero, nem é zero a queda de tensão no mesmo, e por tanto a quarta equação de (11) não deve ser eliminada através de um processo de redução de Kron, pois os resultados não seriam confiáveis, assim como não foram em (9).

4.3 PROGRAMA ATP. ESTUDO DE CASOS

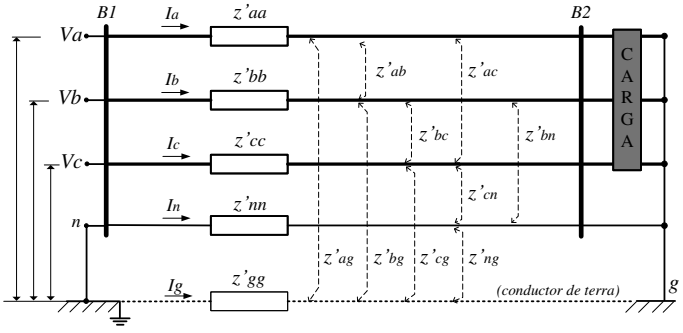
A Fig. 2 mostra a disposição dos quatro condutores no alimentador empregado neste estudo. Os condutores são do tipo 336,400 26/7 ACSR para as fases e 4/0 6/1 ACSR para o neutro, cujas características são especificadas em [1].

Fig. 2. Estrutura do alimentador para análise.



Para simplificar a análise considera-se o sistema de duas barras da Fig. 3, cuja linha tem 1 km de comprimento.

Fig. 3. Rede elétrica para análise.



As impedâncias próprias e mútuas dos condutores representados na Fig. 2 e Fig. 3 são determinadas empregando as equações de Carson e resultam ser:

$$\left[\overline{Z}_l\right] = \begin{bmatrix} 0{,}249 + 0{,}878\mathrm{i} & 0{,}059 + 0{,}529\mathrm{i} & 0{,}059 + 0{,}451\mathrm{i} & 0{,}059 + 0{,}446\mathrm{i} \\ 0{,}059 + 0{,}529\mathrm{i} & 0{,}249 + 0{,}878\mathrm{i} & 0{,}059 + 0{,}485\mathrm{i} & 0{,}059 + 0{,}459\mathrm{i} \\ 0{,}059 + 0{,}451\mathrm{i} & 0{,}059 + 0{,}485\mathrm{i} & 0{,}249 + 0{,}878\mathrm{i} & 0{,}059 + 0{,}457\mathrm{i} \\ 0{,}059 + 0{,}446\mathrm{i} & 0{,}059 + 0{,}459\mathrm{i} & 0{,}059 + 0{,}457\mathrm{i} & 0{,}427 + 0{,}961\mathrm{i} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Por causa das distâncias entre os condutores no alimentador não serem as mesmas, as impedâncias mútuas entre as fases, e entre estas e o neutro não são iguais. Desta forma o sistema experimentará um determinado grau de desequilíbrio o que reduz a possibilidade da corrente do neutro ser zero.

Embora a simplicidade do circuito possibilitaria um estudo analítico preferiu-se empregar o programa ATP para obter os resultados, tendo em vista que este circuito forma parte de outros mais complexos que vem sendo estudados com auxílio deste programa.

O gerador da rede é trifásico e simétrico com tensão de linha de 13,8 kV e 60 Hz. O transformador está constituído de três transformadores monofásicos, com reatância de j0,475 Ω. Por simplicidade não são consideradas indutâncias de aterramento no gerador nem na carga.

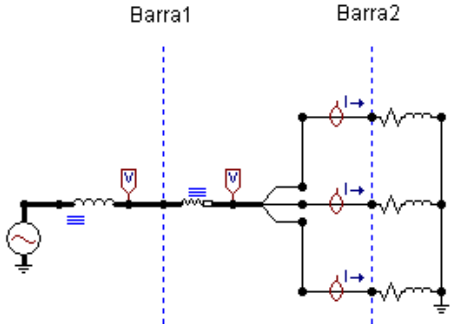
A Tabela I mostra as características das cargas empregadas para a análise. Seus valores foram propositalmente selecionados para revelar as diferenças que estavam sendo procuradas.

TABELA I - Características das cargas do sistema

Fase	Potência aparente (kVA)		
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
a	3582 + j2314	149,5 + j46,0	141,5 + j15,7
b	3634 + j2348	3466 + j2239	5718 + j3812
c	3615 + j2335	391,1 + j120,9	147,2 + j16,4
Nota:	0,01 % de desequilíbrio	1,00 % de desequilíbrio	1,85 % de desequilíbrio

A Fig. 4 mostra o circuito elétrico implementado no programa ATPdraw. Para os estudos a rede elétrica recebeu como parâmetros os dados de (13) ou os resultantes da aplicação da redução de Kron ao eliminar a equação correspondente ao neutro (linha 4 de Z_l). A estas configurações chamamos de “4 fios” e “3 fios”, respectivamente.

Fig. 4. Circuito elétrico implementado no programa ATPdraw.



As Tabelas II a IV mostram os resultados das tensões e correntes de barra nos cenários estudados para o sistema real (circuito a 4 fios) e após a redução de Kron (circuito a 3 fios).

TABELA II - Tensões e correntes de fase rms para o cenário 1

Fase	4 fios			3 fios		
	Vb1 (V)	Vb2 (V)	I (A)	Vb1 (V)	Vb2 (V)	I (A)
a	7816	7575	562,98	7816	7575	563,09
b	7814	7627	567,29	7814	7629	567,07
c	7814	7611	565,40	7814	7608	565,53

b1: barra 1;b2: barra 2

TABELA III - Tensões e correntes de fase rms para o cenário 2

Fase	4 fios			3 fios		
	Vb1 (V)	Vb2 (V)	I (A)	Vb1 (V)	Vb2 (V)	I (A)
a	7965	7941	19,70	7965	7942	19,46
b	7819	7606	542,47	7815	7476	555,71
c	7960	7958	51,44	7960	8086	50,82

b1: barra 1; b2: barra 2

TABELA IV - Tensões e correntes de fase rms para o cenário 3

Fase	4 fios			3 fios		
	Vb1 (V)	Vb2 (V)	I (A)	Vb1 (V)	Vb2 (V)	I (A)
a	7967	7936	17,94	7967	7940	17,54
b	7692	7317	939,22	7681	7074	980,98
c	7966	7987	18,54	7966	8219	18,15

b1: barra 1; b2: barra 2

O desequilíbrio do sistema foi determinado conforme a norma NEMA, MG1-1978 [2]:

$$\delta = \frac{\left| \max\left(V_{ab} - \overline{V}, V_{bc} - \overline{V}, V_{ac} - \overline{V} \right) \right|}{\left| \overline{V} \right|} \qquad (13)$$

onde $\overline{V}$ é o valor médio das tensões de linha.

Quando o sistema está equilibrado, ou quando o desequilíbrio é desprezível, como no cenário 1,

praticamente não há diferenças entre as tensões ou as correntes de fase, independentemente do tipo de configuração empregada. É o que mostra a Tabela I, onde as tensões e correntes na barra 2 (onde estão conectadas as cargas), são praticamente as mesmas para 4 ou 3 fios. Nestas condições a corrente do neutro é zero ou muito baixa, e a eliminação do condutor correspondente, para aplicar a redução de Kron, não tem efeitos significativos no sistema.

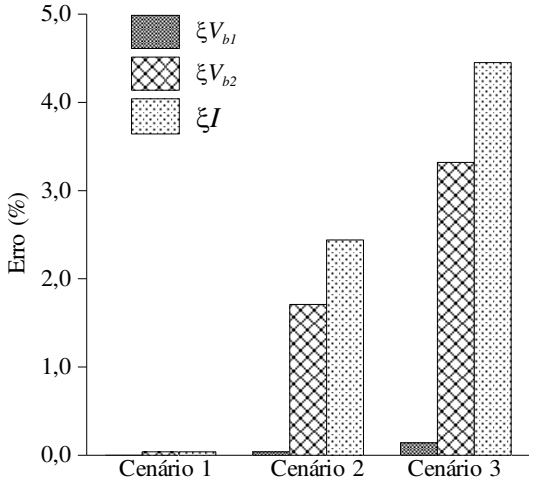
Entretanto, quando a redução de Kron é realizada nos sistemas com alto grau de desequilíbrio, como nos cenários 2 e 3, as tensões e correntes na barra da carga não refletem os valores reais do sistema (que seriam os correspondentes à configuração de 4 fios). Nos dois cenários mostrados os valores chegam a ser superiores e/ou inferiores aos reais, sendo maiores as diferenças na fase responsável do desequilíbrio.

A Tabela V mostra o erro relativo entre as configurações de 4 e 3 fios para as tensões e correntes de fase. A Fig. 5 mostra os valores máximos.

TABELA V - Erros relativos percentuais entre as configurações de 4 e 3 fios

Fase	Cenário 1			Cenário 2			Cenário 3		
	ζV_{b1}	ζV_{b2}	ζI	ζV_{b1}	ζV_{b2}	ζI	ζV_{b1}	ζV_{b2}	ζI
a	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	1,21	0,00	0,04	2,22
b	0,00	0,03	0,04	0,04	1,71	2,44	0,14	3,32	4,45
c	0,00	0,04	0,02	0,01	1,60	1,19	0,00	2,90	2,09

Fig. 5. Erros relativos máximos nas tensões e correntes de fase.



5 CONCLUSÕES

O conhecimento das tensões na carga é importante nos estudos de confiabilidade, de qualidade da energia, entre outros. Da mesma forma, o conhecimento das correntes permite o dimensionado dos sistemas de proteção.

A redução de Kron aplicada às linhas elétricas contribui a uma análise mais fácil e rápida dos sistemas e não tem efeito significativo nas grandezas dos mesmos, quando o sistema é equilibrado, ou quando o desequilíbrio é desprezível.

Este trabalho analisou um sistema com carga trifásica quase equilibrado e ficou comprovado que nessa condição as diferenças são mínimas. Porém, quando a carga passou a ser quase monofásica, desequilibrando o sistema significativamente, os resultados da aplicação da redução de Kron afastaram-se dos valores reais, tanto mais, quanto maior foi o desequilíbrio do sistema.

Sendo que o sistema analisado pode ser apenas uma seção de um sistema maior, entende-se que nesse sistema mais complexo, a "propagação de erros", devido à redução de Kron, pode reportar resultados grosseiros para as variáveis de estado do mesmo.

Para as condições analisadas neste trabalho o erro relativo máximo na corrente de fase mostrou ser de aproximadamente 2,5 vezes o valor do desequilíbrio do sistema, e de 1,8 na tensão de fase na carga.

Face a comprovação do efeito das características da linha sobre o erro foi duplicada a longitude da mesma, resultando em um erro relativo máximo de 8,2 %, isto é, aproximadamente 4,4 vezes o valor do desequilíbrio do sistema.

Os níveis de desequilíbrio analisados neste trabalho são aceitáveis e passíveis de manifestar-se em qualquer sistema. Porém, níveis superiores também são possíveis, de modo que a combinação *desequilíbrio-linha* pode reportar erros significativos quando realizada a redução de Kron para simplificar a análise dos mesmos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, P.M. Analysis of faulted power systems. Iowa: The Iowa State University Press, 1973.

ANSI/NEMA STANDARD PUBLICATION No. MG1-1978. Motors and generators. 1978.

BELKACEMI, M.; HARID, N. Fast reduction and modification of power system sparse matrices. Electric Power Components and Systems, v. 32, n. 4, p. 413-427, 2004.

CALISKAN, S.Y.; TABUADA, P. Towards Kron reduction of generalized electrical networks. Automatica, v. 50, n. 10, p. 2580-2587, 2014.

DEGENEFF, R.C.; GUTIERREZ, M.R.; SALON, S.J.; BUROW, D.W.; NEVINS, R.J. Kron's reduction method applied to the time stepping finite element analysis of induction machines. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 10, n. 4, p. 707-713, 1995.

DING, Y.; LI, H.; YE, H.; PEI, W.; XIONG, J.; HAO, L. Time-domain nonlinear stability analysis of multi-VSC system as affected by distribution feeder parameters. IEEE International Conference on Power Science and Technology (ICPST), p. 1-5, 2023.

EMTP. Programa ATP. Disponível em: http://www.empt.org. Acesso em: 27 nov. 2024.

GELVEZ-ALMEIDA, E.; BARRIENTOS, R. J.; VILCHES-PONCE, K.; MORA, M. A parallel computing method for the computation of the Moore–Penrose generalized inverse for shared-memory architectures. IEEE Access, v. 11, p. 28425-28435, 2023.

KERSTING, W.H. Distribution system modeling and analysis. Boca Ratón: CRC Press, 2002.

KRON, G. Tensor analysis of networks. New York: J. Wiley & Sons, 1939.

SAADAT, H. Power system analysis. 2. ed. McGraw-Hill's Primis Custom Publishing, 2002.

SINGAÑA, C.A.B.; SANTILLÁN, A.D.V. Métodos de simulación de armónicos en sistemas eléctricos de potencia. Iteckne, v. 17, n. 2, p. 105-112, 2020.