

Avaliação de Método para Atribuição da Responsabilidade pelo Desequilíbrio de Tensão em Sistemas com Motores Elétricos

Pedro H. L. S. Pinto, Marcus V. B. Mendonça, Fabrício A. M. Moura

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Departamento de Engenharia Elétrica, Uberaba - Minas Gerais
pedro_gmf@hotmail.com, marcus.mendonca@uftm.edu.br, fabricio.moura@uftm.edu.br.

Resumo — Diversas condições de desequilíbrio de tensão produzem diferentes efeitos prejudiciais ao adequado funcionamento de equipamentos do sistema elétrico, como os motores de indução trifásico. Assim, é imprescindível saber os responsáveis pelo desequilíbrio, estando de um lado a distribuidora de energia com o dever de prover um fornecimento de acordo com a regulamentação e, de outro, o consumidor que almeja receber energia com qualidade e tem obrigação de manter sua instalação conforme as normas. Neste cenário, o presente artigo tem como objetivo avaliar o método da corrente conforme e não-conforme diante de um sistema elétrico com a presença de cargas desequilibradas e de um motor de indução trifásico no que tange à atribuição de responsabilidade devido ao desequilíbrio de tensão.

Palavras-chaves — Qualidade da energia elétrica, atribuição de responsabilidade, desequilíbrio de tensão, método da corrente conforme e não-conforme.

I. INTRODUÇÃO

O sistema de distribuição de energia elétrica é o mais afetado pelo desequilíbrio de tensão se comparado aos demais. E como, aproximadamente, 60% da energia produzida é usada para alimentar motores elétricos em sistemas industriais, é de suma importância avaliar a responsabilidade por esse desequilíbrio de tensão [1]. No entanto, não são muitos os estudos que apresentam informações quanto a identificação da origem do desequilíbrio de tensão [2].

Sabe-se que a presença de altos níveis de desequilíbrio de tensão provoca sobreaquecimento, solicitação do isolamento, perdas excessivas e redução da vida útil de motores e transformadores, ou até mesmo o acionamento indevido dos seus sistemas de proteção, levando à parada de processos de produção. Além disso, tais condições de funcionamento podem fazer com que surjam correntes harmônicas não características em dispositivos de acionamento eletrônico de motores, o que dificulta ainda mais a tarefa de eliminação destes efeitos [2], [3].

O Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) determina os seguintes limites para o fator de desequilíbrio de tensão (FD): 3,0% para tensão nominal (V_n) menor ou igual a 1,0 kV, e

2,0% para V_n maior que 1 kV e menor que 230 kV. Define ainda, para o cálculo do FD, o método das componentes simétricas ou, alternativamente, o método CIGRÉ [4].

Diante destes aspectos, torna-se importante conhecer a origem do desequilíbrio de tensão de forma que seja plausível definir ações com o intuito de mitigar os seus efeitos ou propor soluções corretivas. Além disso, a identificação das parcelas de responsabilidades relativas aos agentes envolvidos conduz ao justo estabelecimento de possíveis sanções, quando o fator de desequilíbrio de tensão superar os limites.

Dentro deste contexto, o presente trabalho propõe-se a contribuir de maneira significativa com os estudos para a identificação da responsabilidade pelo desequilíbrio de tensão através da avaliação do desempenho do método da corrente conforme e não-conforme em um sistema elétrico com presença de carga não estática.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para que um sistema elétrico opere com eficiência, tanto na transmissão quanto na distribuição, é imprescindível atentar-se para a qualidade da energia elétrica (QEE). E um dos fatores que compromete esta qualidade é o desequilíbrio de tensão, que ocorre quando as tensões em um sistema trifásico apresentam magnitudes diferentes e/ou defasagem angular entre as fases diferentes de 120° elétricos [5].

O desbalanceamento de cargas nas fases da alimentação é a principal razão do surgimento de desequilíbrio de tensão, pois para impedâncias diferentes tem-se correntes distintas. Desta forma, as principais fontes de desequilíbrio de tensão encontram-se geralmente nos sistemas de distribuição, onde existem, muitas vezes, cargas monofásicas distribuídas de forma inadequada entre as fases [5].

A. Principais Métodos para o Cálculo do Desequilíbrio de Tensão

Dentre os principais métodos usados para o cálculo do fator de desequilíbrio de tensão, pode-se citar o método das Componentes Simétricas e o método CIGRÉ.

O método das componentes simétricas, proposto por Fortescue em 1918, baseia-se no princípio de que um sistema trifásico desequilibrado pode ser decomposto em três

sistemas simétricos e equilibrados, os quais são: um sistema de sequência positiva ou direta, que possui fasores na mesma sequência de fases do sistema desequilibrado original; um sistema de sequência negativa, que possui fasores em sequência inversa àqueles do sistema desequilibrado original; e por fim, um sistema de sequência zero, que possui fasores paralelos. Dessa forma, o FD é definido pela razão entre os módulos das tensões de sequência negativa e positiva. Este método pode ser usado tanto para tensões de linha quanto para tensões de fase [2].

O método CIGRÉ é um método proposto pelo *Conseil International des Grands Réseaux Electriques* (CIGRÉ) que é utilizado nos casos em que os instrumentos de medição realizam apenas leituras dos módulos das tensões [1]. Este método, para determinar o FD, faz uso de uma expressão com base em uma grandeza adimensional que correlaciona as tensões de linha. Enfatiza-se que o método CIGRÉ é considerado equivalente ao método das componentes simétricas, pois ambos os métodos retornam o mesmo valor de FD [2].

B. Métodos para Atribuição de Responsabilidade pelo Desequilíbrio de Tensão

Os principais métodos usados para a atribuição de responsabilidade pelo desequilíbrio de tensão são [2], [6]:

- *Método da IEC*: usado apenas quando é possível medir o nível de desequilíbrio do sistema antes e depois da conexão de uma instalação e dessa forma identificar o nível de emissão de desequilíbrio desta instalação;
- *Método do fluxo de potência trifásico*: associa a potência ativa de sequência negativa ao desequilíbrio de tensão. Isto é feito através do fluxo de potência de sequência zero, positiva e negativa, conforme as componentes simétricas do sistema em estudo;
- *Método da corrente conforme e não-conforme*: faz uso da premissa de que a corrente total demandada por uma carga é a soma de duas correntes, uma conforme e outra não-conforme ao desequilíbrio apresentado na tensão de fornecimento, as quais possuem indícios do nível de degradação da qualidade da energia. Este é o método analisado neste trabalho, sendo melhor descrito adiante.

Em [2], foram avaliados tais métodos de atribuição em um sistema elétrico composto por cargas estáticas. Os resultados obtidos demonstram que o último método apresentou melhor desempenho em relação aos demais. Isto, por sua vez, foi um fator relevante na escolha deste método para ser analisado no presente trabalho envolvendo, agora, cargas com comportamento dinâmico.

C. Método da Corrente Conforme e Não-Conforme

O método da corrente conforme e não-conforme, definido em [6], parte da proposição de que a corrente absorvida por uma carga corresponde à adição de duas correntes teóricas. Denomina-se corrente conforme uma parcela da corrente que possui os mesmos padrões gráficos da tensão. Ela é responsável por 100% da potência de sequência positiva na

frequência fundamental. A diferença entre a corrente total e a corrente conforme é chamada corrente não-conforme, a qual é atribuída à carga. Dessa forma, tanto a corrente conforme quanto a não-conforme possuem todas as formas de deterioração da qualidade [6].

Assim, se a impedância de uma carga estiver equilibrada, ela absorverá somente corrente conforme. No entanto, se uma carga, de alguma forma, alterar as características da forma de onda das tensões de alimentação, ela absorverá tanto corrente conforme quanto corrente não-conforme [2]. Destaca-se que, em [2], tal método apresentou bons resultados em sistemas contendo apenas cargas estáticas.

Do método das componentes simétricas é possível obter as tensões das componentes de sequência zero ($\bar{V}_0$), positiva ($\bar{V}_1$) e negativa ($\bar{V}_2$) através das tensões de fase $\bar{V}_A$, $\bar{V}_B$ e $\bar{V}_C$, conforme (1) [7].

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_A \\ \bar{V}_B \\ \bar{V}_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

O mesmo princípio é usado para determinar as correntes das componentes de sequência zero ($\bar{I}_0$), positiva ($\bar{I}_1$) e negativa ($\bar{I}_2$) através das correntes de fase $\bar{I}_A$, $\bar{I}_B$ e $\bar{I}_C$, conforme (2).

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_A \\ \bar{I}_B \\ \bar{I}_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

A corrente conforme é uma parcela da corrente que possui o mesmo nível de desequilíbrio da tensão, sendo responsável por toda potência ativa e reativa de sequência positiva. Deste modo, a corrente conforme de sequência positiva ($\bar{I}_{c1}$) é igual à corrente de sequência positiva ($\bar{I}_1$). Já as correntes conforme de sequência zero ($\bar{I}_{c0}$) e negativa ($\bar{I}_{c2}$) são proporcionais às suas respectivas tensões $\bar{V}_0$ e $\bar{V}_2$. As equações (3), (4) e (5) expressam esses conceitos [6].

$$\bar{I}_{c1} = \bar{I}_1 \quad (3)$$

$$\bar{I}_{c2} = \bar{I}_1 \cdot \frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} \quad (4)$$

$$\bar{I}_{c0} = \bar{I}_1 \cdot \frac{\bar{V}_0}{\bar{V}_1} \quad (5)$$

As correntes não-conforme de sequência positiva ($\bar{I}_{nc1}$), negativa ($\bar{I}_{nc2}$) e zero ($\bar{I}_{nc0}$) são iguais à diferença entre as correspondentes corrente de sequência e sua respectiva corrente conforme, como mostrado em (6), (7) e (8) [6].

$$\bar{I}_{nc1} = 0 \quad (6)$$

$$\bar{I}_{nc2} = \bar{I}_2 - \bar{I}_{c2} \quad (7)$$

$$\bar{I}_{nc0} = \bar{I}_0 - \bar{I}_{c0} \quad (8)$$

Os valores das correntes não-conforme de cada fase do sistema trifásico ($\bar{I}_{ncA}$, $\bar{I}_{ncB}$ e $\bar{I}_{ncC}$) podem ser obtidos através das componentes simétricas da corrente não-conforme, ou seja, das correntes $\bar{I}_{nc1}$, $\bar{I}_{nc2}$ e $\bar{I}_{nc0}$, de acordo com (9). Estas são as correntes desequilibradas atribuídas à carga [6].

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{ncA} \\ \bar{I}_{ncB} \\ \bar{I}_{ncC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_{nc0} \\ \bar{I}_{nc1} \\ \bar{I}_{nc2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Salienta-se que, em um sistema desequilibrado, estará presente a componente de sequência negativa. Deste modo, o fator de desequilíbrio dado pelo método das componentes simétricas está relacionado com as correntes $\bar{I}_{c2}$ e/ou $\bar{I}_{nc2}$ [2].

D. Metodologia de Aplicação do Método da Corrente Conforme e Não-Conforme

Como exposto anteriormente, a corrente conforme, por ser responsável por 100% da potência de sequência positiva na frequência fundamental, é atribuída à fonte. Já a corrente não-conforme é atribuída à carga. Sabe-se ainda que em um sistema equilibrado tem-se apenas a componente de sequência positiva, ou seja, a corrente de sequência negativa está ligada ao desequilíbrio do sistema.

Assim, para a atribuição do percentual de contribuição com o desequilíbrio de tensão do sistema, referente a cada parte (fonte e carga), fez-se uso da corrente de sequência negativa e das correntes conforme e não-conforme de sequência negativa.

A Fig. 1 ilustra vetorialmente estas correntes e a projeção das correntes conforme e não-conforme de sequência negativa sobre a corrente de sequência negativa total, com base em (7).

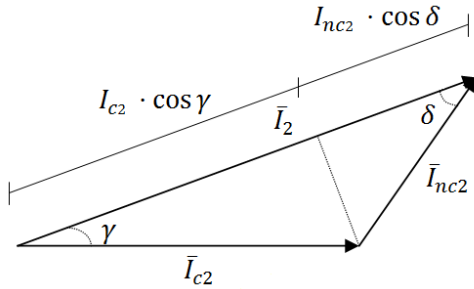


Fig. 1. Representação vetorial da corrente de sequência negativa e das correntes conforme e não-conforme de sequência negativa e suas projeções.

Então, baseando-se na Fig. 1, os percentuais de contribuição com o desequilíbrio de tensão do sistema, referentes à fonte e à carga, os quais denotam a parcela de responsabilidade de cada parte, são calculados conforme (10) e (11).

$$p c I_{c2Fonte} = \frac{|\bar{I}_{c2}| \cdot \cos \gamma}{|\bar{I}_2|} \times 100 \quad (10)$$

$$p c I_{nc2Carga} = \frac{|\bar{I}_{nc2}| \cdot \cos \delta}{|\bar{I}_2|} \times 100 \quad (11)$$

Onde: $p c I_{c2Fonte}$ e $p c I_{nc2Carga}$ representam, respectivamente, os percentuais da projeção das correntes conforme e não-conforme de sequência negativa sobre a corrente de sequência negativa do sistema, os quais correspondem a parcela de responsabilidade de cada parte, e γ e δ são os ângulos destas projeções.

Portanto, neste trabalho, a aplicação do método da corrente conforme e não-conforme para a atribuição de responsabilidade pelo desequilíbrio de tensão foi estabelecida por meio do uso de (10) e (11). Para tanto, este método foi implementado no *software* MATLAB.

III. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO SIMULADO

O sistema elétrico utilizado como teste nas simulações agrega os principais atributos que compõe um sistema real, no qual uma instalação industrial é suprida eletricamente por uma concessionária de distribuição de energia elétrica.

No sistema elétrico usado, a concessionária é representada por uma fonte de tensão em série com uma impedância, a qual representa o nível de curto-circuito da concessionária. Após esta, tem-se uma representação de uma subestação de distribuição constituída por dois transformadores em paralelo e um banco de capacitores utilizado para a correção do fator de potência. Por fim, tem-se quatro alimentadores de distribuição, os quais suprem energia elétrica para quatro instalações comerciais e industriais, compostas por cargas lineares resistivas e indutivas, e por um motor de indução trifásico.

O *software* ATP (*Alternative Transients Program*) foi empregado para a modelagem e simulação deste sistema elétrico. A Fig. 2 apresenta o sistema modelado. Um sistema elétrico similar a este já foi empregado em um estudo de análise de compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas [8].

A. Condições de Operação do Sistema Elétrico

As simulações realizadas foram divididas, basicamente, em três condições de operação, as quais são descritas a seguir.

1) Condição de Operação I:

Na primeira condição de operação, aplica-se um nível de desequilíbrio de tensão na fonte de alimentação do sistema, obtendo-se, assim, o seguinte caso:

- Fonte de alimentação (concessionária) com um desequilíbrio de tensão de 1,91%.

A Tabelas I apresenta os valores das tensões do sistema supridor para este caso.

TABELA I: TENSÕES EFICAZES DO SISTEMA SUPRIDOR PARA UM DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO DE 1,91%.

Tensão na saída da Concessionária				
Tensão [V]	Fase A	Fase B	Fase C	Desequilíbrio
Magnitude [V]	81.210	78.910	78.920	1,91%
Ângulo [Graus]	-0,2527	-121,2	120,7	

2) Condição de Operação II:

Nesta segunda condição de operação, é estabelecido um desbalanceamento nas cargas do sistema. Ou seja, o sistema supridor está equilibrado enquanto que algumas das instalações comerciais e industriais possuem carregamento distinto nas fases. Os seguintes casos foram aplicados:

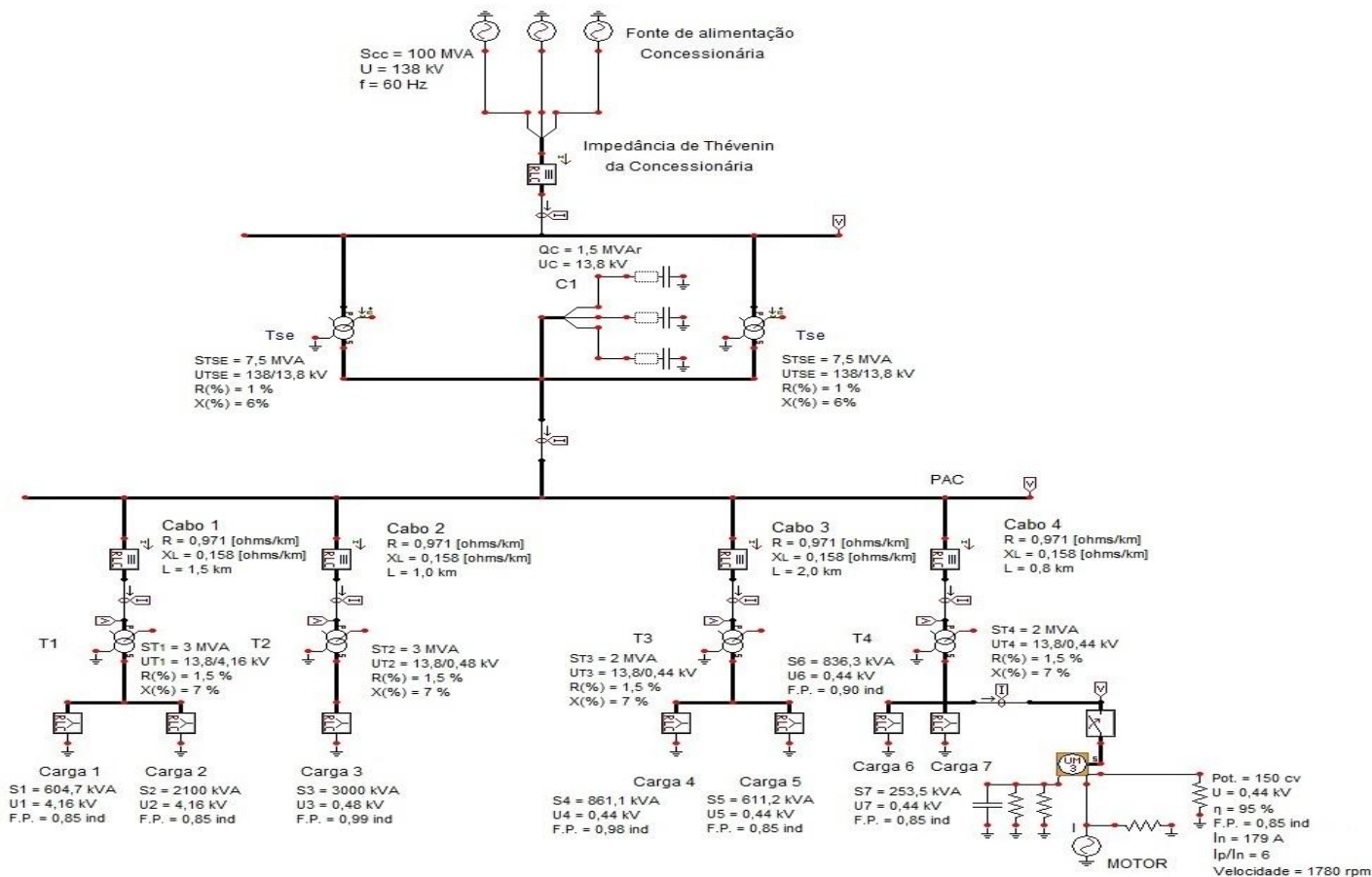


Fig. 2. Diagrama unifilar do sistema elétrico implementado no software ATP.

- Carga 3 desequilibrada;
- Cargas 2 e 3 desequilibradas.

O desequilíbrio aplicado nas cargas é realizado dividindo-se em percentuais diferentes a potência de cada carga ao longo de cada fase. As Tabelas II e III mostram o modo como o desbalanceamento é provocado na carga 2 e na carga 3, respectivamente.

TABELA II: DIVISÃO DA POTÊNCIA DA CARGA 2 ENTRE AS FASES.

Carga 2	
Potência Nominal (kVA)	2100
Percentual da potência na fase A	9,53%
Percentual da potência na fase B	33,33%
Percentual da potência na fase C	57,14%

TABELA III: DIVISÃO DA POTÊNCIA DA CARGA 3 ENTRE AS FASES.

Carga 3	
Potência Nominal (kVA)	3000
Percentual da potência na fase A	6,67%
Percentual da potência na fase B	33,33%
Percentual da potência na fase C	60,00%

3) Condição de Operação III:

Nesta última condição de operação, tem-se desequilíbrio tanto na fonte de alimentação quanto nas cargas do sistema.

Para isso, faz-se uso da condição de operação I juntamente com o segundo caso da condição de operação II. Dessa forma, obtém-se o seguinte caso:

- Fonte de alimentação com um desequilíbrio de tensão de 1,91% e cargas 2 e 3 desequilibradas.

A Fig. 3 e a Fig. 4 exibem, respectivamente, os perfis da tensão e da corrente medidos no ponto de acoplamento comum (PAC) para esta condição de operação do sistema elétrico. Destas duas imagens, é possível notar o quão desequilibrado está a tensão, e mais ainda a corrente.

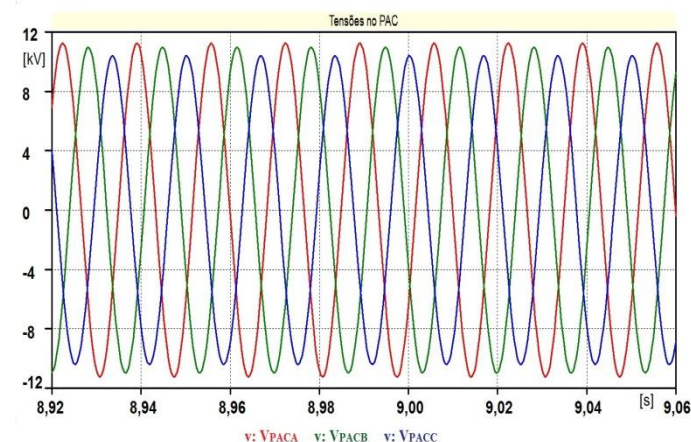


Fig. 3: Perfil de tensão mensurado no PAC na condição de operação III.

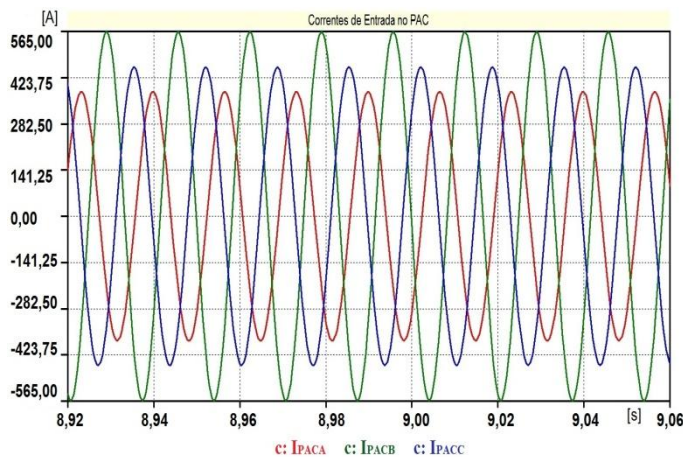


Fig. 4: Perfil de corrente mensurado no PAC na condição de operação III.

IV. RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados da aplicação do método da corrente conforme e não-conforme, e com estes dados são feitas as devidas análises no que se refere ao compartilhamento e identificação das responsabilidades relativas ao desequilíbrio de tensão. Ressalta-se que para o cálculo do FD foi usado o método das componentes simétricas.

• Resultados para a Condição de Operação I

A Tabela IV apresenta os dados para esta condição de operação, onde é possível observar que em cada ponto de medição o fator de desequilíbrio de tensão ficou em torno de 1,9%. Desta tabela, constata-se que o método da corrente conforme e não-conforme atribuiu com eficácia o maior percentual de responsabilidade pelo desequilíbrio de tensão à fonte de alimentação (concessionária). No primário do transformador 2, observa-se que o percentual atribuído à indústria é negativo, o que indicaria que este consumidor está operando de forma a diminuir o desequilíbrio de tensão neste ponto. No entanto, esta unidade consumidora está operando com cargas balanceadas, inviabilizando a referida compensação observada por meio do método.

No primário do transformador 4, onde se tem o motor de indução conectado no secundário, é possível notar que o percentual atribuído à concessionária é menor que nos outros pontos, o que pode indicar a influência do motor sobre a resposta do método.

TABELA IV: RESULTADOS PARA A CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO I

Sistema Elétrico com desequilíbrio na fonte de 1,91%			
Ponto de Medição	FD%	Percentual de Responsabilidade	
		Concessionária	Indústria
1° Trafo 1	1,92%	96,63%	3,37%
1° Trafo 2	1,95%	101,30%	-1,30%
1° Trafo 3	1,93%	96,92%	3,08%
1° Trafo 4	1,94%	66,26%	33,74%

• Resultados para a Condição de Operação II

Nesta parte dos resultados, inicialmente analisando o primeiro caso desta condição de operação, onde se tem

apenas a carga 3 desequilibrada, verifica-se na Tabela V que o maior fator de desequilíbrio de tensão ocorre no primário do transformador 2 (FD = 2,06%), sendo que no secundário está presente a carga 3. Neste ponto, constata-se que o método atribui corretamente o maior percentual à Indústria, inclusive tem-se um percentual negativo atribuído à concessionária, indicando que a mesma está agindo de forma a diminuir o desequilíbrio de tensão neste ponto.

Nos outros três pontos de medição (primários dos transformadores 1, 3 e 4), nota-se que o maior percentual de responsabilidade é atribuído à concessionária. Estes resultados estão corretos, pois de fato o desequilíbrio de tensão tem origem externa, visto destes três pontos de medição, indicando para eles que a concessionária ou outras cargas têm responsabilidade sobre o desequilíbrio de tensão identificado.

TABELA V: RESULTADOS PARA O 1º CASO DA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO II

Sistema Elétrico com desequilíbrio na carga 3			
Ponto de Medição	FD%	Percentual de Responsabilidade	
		Concessionária	Indústria
1° Trafo 1	1,86%	105,62%	-5,62%
1° Trafo 2	2,06%	-2,85%	102,85%
1° Trafo 3	1,73%	99,39%	0,61%
1° Trafo 4	1,69%	64,87%	35,13%

A Tabela VI exhibe os resultados para o segundo caso desta condição de operação, na qual pode-se notar que os maiores FD estão nos dois alimentadores onde estão as cargas 2 e 3 que estão desequilibradas (FD de 2,87% e 3,07%, respectivamente). Assim como no caso anterior, constata-se que o método atribui acertadamente o maior percentual de responsabilidade para as indústrias nestes dois pontos, e que no primário dos transformadores 3 e 4 o maior percentual é atribuído à concessionária, que corresponde ao restante do sistema não vinculado a estes dois alimentadores. Por sua vez, isto indica que o método da corrente conforme e não-conforme conseguiu de fato identificar as origens principais destes desequilíbrios de tensão.

TABELA VI: RESULTADOS PARA O 2º CASO DA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO II

Sistema Elétrico com desequilíbrio nas cargas 2 e 3			
Ponto de Medição	FD%	Percentual de Responsabilidade	
		Concessionária	Indústria
1° Trafo 1	2,87%	-5,47%	105,47%
1° Trafo 2	3,07%	-4,27%	104,27%
1° Trafo 3	2,71%	97,08%	2,92%
1° Trafo 4	2,72%	67,10%	32,90%
PAC	2,71%	-5,35%	105,35%

Na Tabela VI tem-se um ponto de medição a mais, que é o PAC. Neste ponto, pode-se observar que o método indicou corretamente a origem do desequilíbrio de tensão nas indústrias, atribuindo maior percentual para estas. Nota-se ainda que o método indica com percentuais negativos que a concessionária está agindo de maneira a diminuir tal desequilíbrio de tensão, isto devido aos elementos que caracterizam o nível de curto-circuito da concessionária.

E, novamente, atenta-se para o fato que no alimentador onde o motor está presente, logo após o transformador 4, para os dois casos, os percentuais atribuídos tanto à concessionária quanto à indústria ficaram bem próximos dos valores obtidos na condição de operação I. Isso mostra que o motor de indução trifásico, por possuir impedância de sequência negativa diferente da impedância de sequência positiva, influencia negativamente o método da corrente conforme e não-conforme, uma vez que esta diferença entre as impedâncias não é tratada na elaboração/formulação deste método.

• Resultados para a Condição de Operação III

Nesta última condição de operação, cujos resultados podem ser vistos na Tabela VII, é possível observar um FD da ordem de 4,5% em todos os pontos de medição, exceto no primário do transformador 2, onde o FD é ligeiramente maior. Nesta condição de operação, também é apresentado o valor obtido para o PAC.

Nota-se que no PAC o método atribuiu o maior percentual de responsabilidade à indústria, o que indicaria que o desequilíbrio de tensão causado pelas duas cargas desequilibradas (cargas 2 e 3) é maior que o provocado pelo desequilíbrio de fases da concessionária. Porém, das Tabelas IV e VI é possível atestar que o desequilíbrio causado por cada parte isoladamente não apresenta uma diferença tão grande, o que não justifica a diferença acentuada entre os percentuais de responsabilidade atribuídos à concessionária e à indústria no PAC.

TABELA VII: RESULTADOS PARA A CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO III

Sistema com desequilíbrio em ambas as partes: fonte com 1,91% e cargas 2 e 3 desequilibradas			
Ponto de Medição	FD%	Percentual de Responsabilidade	
		Concessionaria	Indústria
1° Trafo 1	4,46%	-4,31%	104,31%
1° Trafo 2	4,67%	-3,49%	103,49%
1° Trafo 3	4,47%	98,11%	1,89%
1° Trafo 4	4,49%	67,28%	32,72%
PAC	4,48%	-3,15%	103,15%

Ainda da Tabela VII, observa-se que nos dois alimentadores onde estão presentes as cargas desequilibradas (transformadores 1 e 2) o método atribui corretamente o maior percentual de desequilíbrio para as indústrias, identificando assim a presença de fontes de desequilíbrio de tensão nestes dois pontos de medição. Contudo, os percentuais atribuídos não demonstram adequada relação quando se considera a presença isolada de desequilíbrio por parte da fonte ou das cargas.

No entanto, no alimentador onde o motor está presente (transformador 4) outra vez os percentuais de responsabilidade atribuídos à concessionária e à indústria apresentaram valores bem próximos aos das outras condições de operação. Apesar do maior percentual corretamente atribuído à concessionária, visto que a origem do desequilíbrio é externa à instalação consumidora relativa a este ponto de medição, o percentual atribuído à indústria é muito significativo. Isto comprova a influência negativa do motor sobre o método da corrente conforme e não-conforme.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma avaliação do método da corrente conforme e não-conforme aplicado em um sistema elétrico com a presença de cargas desequilibradas e de um motor de indução trifásico. Para tal análise, foram utilizados os *softwares* ATP e MATLAB como ferramentas computacionais para as simulações e obtenção dos resultados.

Com base nos dados e resultados obtidos, é possível concluir que o método da corrente conforme e não-conforme obteve resultados satisfatórios, atribuindo corretamente a responsabilidade pelo desequilíbrio de tensão, nos alimentadores onde estavam presentes cargas estáticas para os casos onde havia apenas uma fonte de desequilíbrio. Para os demais casos e pontos de medição, o método foi capaz apenas de definir a origem predominante do desequilíbrio. Ademais, o método conseguiu identificar, em alguns casos, a possibilidade de um agente agir de forma a compensar o desequilíbrio de tensão.

No entanto, no alimentador onde o motor de indução trifásico estava presente, observou-se que as parcelas de responsabilidade permaneceram praticamente com os mesmos valores para todas as condições de operação analisadas, com percentuais consideráveis atribuídos à instalação consumidora que contém o motor e outras cargas balanceadas. Isto, por sua vez, não deveria ter ocorrido, visto que a concessionária, representando o restante do sistema, teria responsabilidade já que o motor de indução trifásico se apresenta como uma carga equilibrada. Desta forma, o presente estudo demonstra que o motor de indução tem influência negativa sobre o método da corrente conforme e não-conforme, e tal influência decorre do fato que este motor possui impedâncias de sequências positiva e negativa deferentes e esta diferença não é levada em consideração na elaboração e formulação do método investigado.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] G. Paulillo. "Qualidade de energia: Capítulo III - Desequilíbrios de tensão". *Revista O Setor Elétrico*, São Paulo, n. 86, p. 42-48, março 2013.
- [2] L. F. L. Arão. "Avaliação comparativa entre métodos para atribuição de responsabilidades devido ao desequilíbrio de tensão". 2014. 111 f. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica) - Faculdade de Tecnologia, departamento de engenharia elétrica, Universidade de Brasília, Brasília - DF. 2014. Publicação: PPGEE.DM – 557/14.
- [3] D. L. R. Holanda. "Análise comportamental do motor de indução trifásico submetido a desequilíbrios de tensão sob o ponto de vista de conjugado e rendimento". 2012. 89 f. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica) - Faculdade de Tecnologia, departamento de engenharia elétrica, Universidade de Brasília, Brasília - DF. 2012. Publicação: PPGEE.DM – 498/12.
- [4] ANEEL PRODIST. (2017). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8, Revisão 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Brasília.
- [5] E. F. Fuchs, M. A. S. Masoum. "Power Quality in power systems and electrical machines". California, Second Edition, Elsevier Inc, 2008.
- [6] K. Srinivasan, R. Jutras. "Conforming and non-conforming current for attributing steady state power quality problems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 1, pp. 212-217, 1998.
- [7] C. L. Fortescue. "Method of Symmetrical Co-ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks," *Trans. AIEE*, vol. 37, no. 2, pp. 1027-1140, 1918.
- [8] A. C. Santos. "Uma contribuição ao processo do compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas via chaveamento de unidades capacitivas". 2015. 93 f. Dissertação (mestrado em ciências) - Faculdade de engenharia elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG. 2015.