

Compartilhamento de Desequilíbrio de Tensão em uma Usina que utiliza Biogás para Geração de Energia Elétrica

Jéssica Amaral de Araújo
Núcleo de Qualidade da Energia
Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
jessica.araujo1@ufu.br

Vinícius Henrique Farias Brito
Núcleo de Qualidade da Energia
Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
viniciushfb2@gmail.com

Matheus Amaral Alves
Núcleo de Qualidade da Energia
Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
matheusamaralalves@ufu.br

Ivan Nunes dos Santos
Núcleo de Qualidade da Energia
Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
ivan.ufu@gmail.com

Resumo — Este trabalho científico aborda um estudo de compartilhamento de responsabilidade de desequilíbrio de tensão em uma usina que utiliza o biogás para a geração de energia elétrica. O objetivo é determinar as parcelas de contribuição do supridor e do consumidor em relação ao fator de desequilíbrio de tensão encontrado no ponto de acoplamento comum – PAC – desta instalação. Para tanto, o artigo aplica o Método da Mudança de Estado Controlada, via chaveamento de capacitor monofásico, a partir de simulações computacionais realizadas no *software* Matlab/Simulink. Através da aplicação desta metodologia foi possível verificar que o compartilhamento de responsabilidade de desequilíbrio de tensão entre os agentes envolvidos ocorreu de forma coerente, demonstrando que o método em questão é adequado para esta finalidade.

Palavras-Chave — *Desequilíbrio de Tensão, Biogás, Compartilhamento de Responsabilidade, Método da Mudança de Estado Controlada.*

I. INTRODUÇÃO

Acompanhando a tendência mundial de descentralização da produção de energia elétrica, a utilização de biogás como combustível tem sido uma das alternativas utilizadas para a produção de energia de forma sustentável, contribuindo para a melhoria no gerenciamento de resíduos urbanos [1] e, também, para a transição energética. Todavia, destaca-se a necessidade de estudos para verificação quanto às perturbações do âmbito de qualidade de energia, neste tipo sistema.

Dentre os principais problemas relacionados à qualidade de energia elétrica comuns nestes tipos de instalações, destacam-se distorções harmônicas de tensão, *flickers*, variação de tensão de curta duração e desequilíbrio de tensão. No entanto, tratando-se de uma planta de geração de energia elétrica a partir do biogás, o desequilíbrio de tensão requer maior atenção, devido à presença de máquinas rotativas no local. Assim, caso seja verificado elevados valores desse indicador, pode ocorrer uma série de prejuízos ao sistema elétrico, dentre eles: redução da vida útil de máquinas, aquecimento de condutores de fase e neutro e aumento de perdas [2].

Neste sentido, no que tange à rede de distribuição, o PRODIST traz os limites individuais de desequilíbrio de

tensão a serem obedecidos pelas instalações acessantes à rede elétrica de distribuição de energia [3].

A partir do contexto apresentado, este artigo tem como finalidade realizar um estudo de compartilhamento de responsabilidade de desequilíbrio de tensão em um ponto de conexão de uma usina que utiliza o biogás para a geração de energia elétrica, utilizando o Método da Mudança de Estado Controlada via chaveamento de capacitor monofásico. Ou seja, pretende-se investigar, a partir de estudos de casos computacionais, possíveis origens do fenômeno de desequilíbrio, por meio da aplicação da metodologia supramencionada.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno decorrente da diferença entre as amplitudes das três tensões de fase em um sistema elétrico trifásico, e/ou na defasagem de 120° entre os fasores de tensão [3].

Para determinar o fator de desequilíbrio, o método das Componentes Simétricas é uma abordagem amplamente estabelecida. Essa metodologia baseia-se na análise de um sistema trifásico desequilibrado, decompondo-o em três sistemas balanceados, denominados por componentes de sequência positiva, negativa e zero [4].

A. Cálculo do Fator de Desequilíbrio

O fator de desequilíbrio (*FD*) pode ser calculado através do percentual da divisão entre as magnitudes das tensões de sequência negativa (V_-) e positiva (V_+), conforme [3]:

$$FD = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100 \quad (1)$$

A Tab.1 traz os limites para este indicador para sistemas de distribuição, de acordo com a tensão nominal da instalação:

Tabela 1 – Limites para os desequilíbrios de tensão

Indicador	Tensão Nominal	
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$
FD95%	3,0 %	2,0 %

B. Método para Análise das Contribuições dos Desequilíbrios de Tensão

Após detectada uma violação do indicador de desequilíbrio de tensão no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), torna-se importante uma análise para determinar as parcelas de contribuição dos agentes conectados nesse ponto.

Em busca desse propósito, várias metodologias foram desenvolvidas, dentre as principais destacam-se: Corrente Conforme e Não-Conforme, Fluxo de Potência Trifásico, IEC, Superposição e Mudança de Estado Controlada.

O método da Corrente Conforme e Não-Conforme baseia-se no princípio de que a corrente drenada por uma carga pode ser dividida em uma parte que apresenta o mesmo comportamento da tensão denominada como corrente conforme, atribuída ao supridor, e outra parcela remanescente, denominada como Corrente Não Conforme, atribuída ao supridor [5].

Já o método de Fluxo de Potência Trifásico consiste na avaliação do sentido do fluxo de potência ativa de sequência negativa, no intuito de definir o principal responsável pelo desequilíbrio no sistema. Para isso, baseia-se no fato de que se o valor da potência de sequência negativa for positivo, atribui-se que a responsabilidade do supridor é dominante, devido ao seu fluxo coincidente com a potência de sequência negativa. Caso contrário, atribui-se ao consumidor a responsabilidade pelo desequilíbrio do sistema. Ressalta-se que esta metodologia não consegue determinar parcelas de responsabilidade para cada agente, somente identificar o principal contribuidor [6].

Outra estratégia amplamente difundida é baseada no relatório técnico TR IEC 61000.3.13. O método proposto se baseia na avaliação do fator de desequilíbrio no PAC antes e após a conexão do consumidor. Assim, o fator de desequilíbrio pré-conexão é atribuído à rede de suprimento, e a parcela resultante da diferença entre os indicadores pré e pós-conexão é adotada como sendo a contribuição do consumidor [7].

Quanto ao Método da Superposição [8], este se baseia no Teorema da Superposição para a determinação das contribuições dos agentes conectados ao PAC. Dessa forma, com base nas tensões e correntes no ponto de análise e, também, nas informações de impedância de sequência negativa do sistema, é possível determinar os percentuais de responsabilidade entre as partes envolvidas.

De fato, estudos demonstram que dentre os métodos existentes, o método da Superposição se destaca, mostrando-se adequado sob o ponto de vista teórico [2], [9], [10]. Todavia, o método em questão possui uma dificuldade prática que é a determinação das impedâncias de sequência negativa dos agentes. Nesse contexto, surge o Método da Mudança de Estado Controlado (MEC) via chaveamento de capacitor monofásico. Vale destacar que a metodologia baseada na mudança de estado foi inicialmente proposta para a análise de distorções harmônicas [11], por meio da inserção de um banco de capacitores trifásico e equilibrado no PAC. Posteriormente, estudos indicaram que o fenômeno do desequilíbrio de tensão pode ser abordado de forma similar à distorção harmônica no que se refere ao compartilhamento de responsabilidades [2], viabilizando, assim, a aplicação do método da Superposição nesse contexto. Assim, em [2] e [12], foi proposto o Método da Mudança de Estado

Controlado (MEC) via chaveamento de capacitor monofásico, com o propósito de provocar perturbações controladas nas componentes de sequência negativa no PAC, permitindo a determinação das contribuições individuais dos agentes para o desequilíbrio observado.

O MEC utiliza as fundamentações do método da Superposição, todavia, apresenta uma estratégia prática para determinar a sequência negativa dos agentes, e assim calcular as parcelas de responsabilidade de cada unidade. Para tanto, o MEC é baseado na inserção de uma pequena fonte de perturbação no PAC a fim de provocar uma alteração nas condições operativas do sistema, consequentemente causando alterações nas tensões e correntes de sequência negativa originalmente presentes no local de monitoramento, conforme mostrado na Fig.1 [2]. Para causar a perturbação no sistema, é sugerido a utilização de um capacitor monofásico.

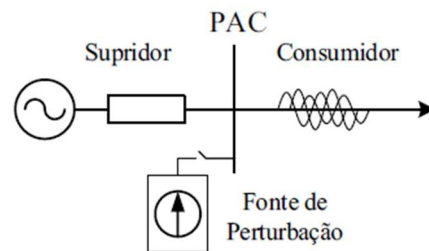


Figura 1 – Representação do Método da Mudança de Estado Controlada

Portanto, com a inserção da fonte de perturbação, são desenvolvidas as equações que permitem determinar a parcela de responsabilidade do agente supridor (à montante do PAC) e do agente consumidor (à jusante do PAC). Conforme indicado em [2], cada agente pode ser representado através de um circuito equivalente de Norton. Em se tratando de uma análise relacionada ao fenômeno de desequilíbrio, o circuito equivalente pode ser representado em termos das componentes de sequência negativa. As Fig. 2 e Fig. 3 mostram o circuito equivalente de Norton da conexão entre os agentes supridor e consumidor, antes e após a conexão da fonte perturbadora, respectivamente.

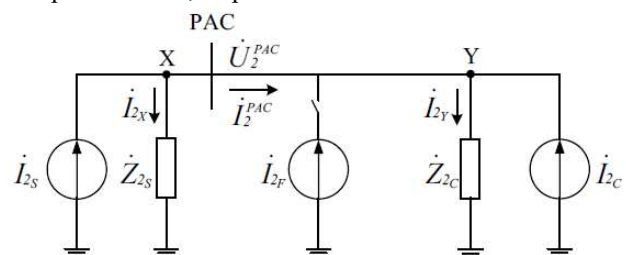


Figura 2 – Representação do Equivalente de Norton antes da conexão

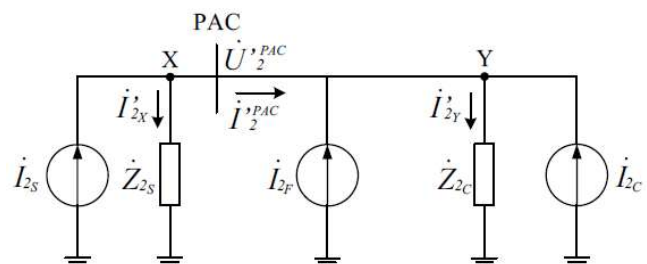


Figura 3 – Representação do Equivalente de Norton depois da conexão

Onde:

- $\dot{U}_2^{PAC}$ e $\dot{U}'_2^{PAC}$ são as tensões de sequência negativa no PAC antes e após a conexão da fonte perturbadora, respectivamente;
- $\dot{I}_2^{PAC}$ e $\dot{I}'_2^{PAC}$ são as correntes de sequência negativa no PAC antes e após a conexão da fonte perturbadora, respectivamente;
- $\dot{I}_{2S}$ e $\dot{I}_{2C}$ representam as fontes de corrente de sequência negativa representativas das contribuições do supridor e do consumidor, respectivamente;
- $\dot{Z}_{2S}$ e $\dot{Z}_{2C}$ são as impedâncias equivalentes de sequência negativa do supridor e do consumidor, respectivamente;
- $\dot{I}_{2F}$ representa a corrente de sequência negativa da fonte de perturbação.

Ao aplicar-se as Leis de Kirchhoff das correntes no nó X, têm-se:

$$\dot{I}_{2S} - \frac{\dot{U}_2^{PAC}}{\dot{Z}_{2S}} - \dot{I}_2^{PAC} = 0 \quad (2)$$

$$\dot{I}_{2S} - \frac{\dot{U}'_2^{PAC}}{\dot{Z}_{2S}} - \dot{I}'_2^{PAC} = 0 \quad (3)$$

Ao isolar as impedâncias do supridor, têm-se:

$$\dot{Z}_{2S} = \frac{\dot{U}_2^{PAC}}{(\dot{I}_{2S} - \dot{I}_2^{PAC})} \quad (4)$$

$$\dot{Z}_{2S} = \frac{\dot{U}'_2^{PAC}}{(\dot{I}_{2S} - \dot{I}'_2^{PAC})} \quad (5)$$

Igualando-se as impedâncias de sequência negativa antes e após a conexão da fonte de perturbação, obtêm-se a corrente de sequência negativa gerada pelo desequilíbrio do supridor:

$$\dot{I}_{2S} = \frac{(\dot{U}_2^{PAC} \cdot \dot{I}'_2^{PAC}) - (\dot{U}'_2^{PAC} \cdot \dot{I}_2^{PAC})}{(\dot{U}_2^{PAC} - \dot{U}'_2^{PAC})} \quad (6)$$

Ao aplicar-se as Leis de Kirchhoff das correntes no nó Y, têm-se:

$$\dot{I}_2^{PAC} - \frac{\dot{U}_2^{PAC}}{\dot{Z}_{2C}} + \dot{I}_{2C} = 0 \quad (7)$$

$$\dot{I}'_2^{PAC} + \dot{I}_{2F} - \frac{\dot{U}'_2^{PAC}}{\dot{Z}_{2C}} + \dot{I}_{2C} = 0 \quad (8)$$

Ao isolar as impedâncias do consumidor, têm-se:

$$\dot{Z}_{2C} = \frac{\dot{U}_2^{PAC}}{(\dot{I}_{2C} + \dot{I}_2^{PAC})} \quad (9)$$

$$\dot{Z}_{2C} = \frac{\dot{U}'_2^{PAC}}{(\dot{I}'_2^{PAC} + \dot{I}_{2C} + \dot{I}_{2F})} \quad (10)$$

Igualando-se as impedâncias de sequência negativa antes e após a conexão da fonte de perturbação, obtêm-se a corrente de sequência negativa gerada pelo desequilíbrio do consumidor:

$$\dot{I}_{2C} = \frac{(\dot{U}'_2^{PAC} \cdot \dot{I}_2^{PAC}) - \dot{U}_2^{PAC} (\dot{I}'_2^{PAC} + \dot{I}_{2F})}{(\dot{U}_2^{PAC} - \dot{U}'_2^{PAC})} \quad (11)$$

Por fim, aplicando o Teorema da Superposição, pode-se calcular as tensões de responsabilidade do agente supridor ($\dot{U}_{2S}$) e do agente consumidor ($\dot{U}_{2C}$).

$$\dot{U}_{2S} = \dot{I}_{2S} \cdot \frac{(\dot{Z}_{2S} \cdot \dot{Z}_{2C})}{(\dot{Z}_{2S} + \dot{Z}_{2C})} \quad (12)$$

$$\dot{U}_{2C} = \dot{I}_{2C} \cdot \frac{(\dot{Z}_{2S} \cdot \dot{Z}_{2C})}{(\dot{Z}_{2S} + \dot{Z}_{2C})} \quad (13)$$

Onde:

$$\dot{U}_2^{PAC} = \dot{U}_{2S} + \dot{U}_{2C} \quad (14)$$

As componentes vetoriais representativas de cada agente devem ser projetadas sobre o vetor total, conforme ilustra a Fig.4 [2].

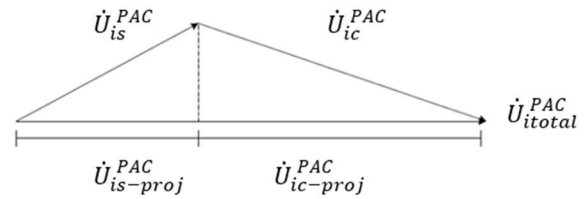


Figura 4: Representação da projeção das componentes vetoriais sobre o vetor total.

Assim é possível calcular as parcelas de responsabilidade do supridor ($R_{is}\%$) e consumidor ($R_{ic}\%$), conforme abaixo:

$$R_{is}\% = \frac{|\dot{U}_{2S-pr}^{PAC}|}{|\dot{U}_{2S-pr}^{PAC}| + |\dot{U}_{2C-proj}^{PAC}|} * 100 \quad (15)$$

$$R_{ic}\% = \frac{|\dot{U}_{2C-pr}^{PAC}|}{|\dot{U}_{2S-proj}^{PAC}| + |\dot{U}_{2C-proj}^{PAC}|} * 100 \quad (16)$$

A Fig.5 representa a utilização de capacitor monofásico como fonte de perturbação, com conexão entre a fase A e o terra [2].

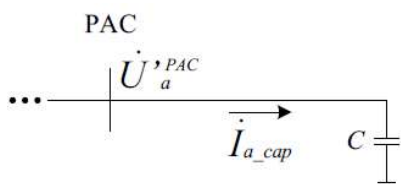


Figura 5: Diagrama Representativo do Capacitor Monofásico conectado fase-terra

Para o cálculo da corrente de sequência negativa do capacitor utiliza-se a matriz de Fortescue [2]:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{cap} \\ \dot{I}_{cap1} \\ \dot{I}_{cap2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_{a_cap} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Assim:

$$\dot{I}_{cap0} = \dot{I}_{cap1} = \dot{I}_{cap2} = \frac{\dot{I}_{a_cap}}{3} \quad (17)$$

Portanto, conhecendo a capacitância, pode-se calcular a corrente da fonte de perturbação através da equação abaixo:

$$\dot{I}_{cap2} = \frac{j\omega C}{3} \times \dot{U}'_{a}^{PAC} \quad (18)$$

III. ESTUDO DE CASO: IMPLEMENTAÇÃO NO SOFTWARE SIMULINK/MATLAB

Para a realização dos estudos de compartilhamento de desequilíbrio, foi feito um estudo de caso, no qual se utilizou o sistema elétrico apresentado na Fig. 6. O sistema é composto por um agente supridor, à montante do PAC, e um agente consumidor, à jusante do PAC. Para representação do supridor, utilizou-se um equivalente de Thévenin, ou seja, uma fonte de tensão e uma impedância série. Em relação ao consumidor, este foi modelado tendo como referência uma usina termoeletrica de biogás real localizada na cidade de Uberlândia/MG. A planta em questão utiliza biogás proveniente de um aterro sanitário como insumo para produção de energia elétrica. Atualmente, a usina opera com três grupos moto-geradores, cada um com uma potência instalada de 1426 kW, resultando em uma potência total de 4,27 MW. A geração da planta é contínua, ou seja, as máquinas operam de forma constante, gerando 1426 kWh. Na sequência são apresentados os detalhes da modelagem do sistema elétrico, o qual foi simulado utilizando o software *Simulink/Matlab*.

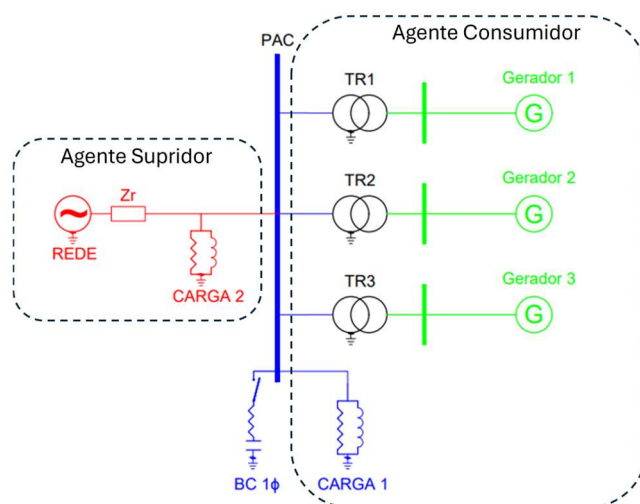


Figura 6: Diagrama Representativo do Sistema

Para a modelagem dos geradores síncronos, foi empregado o elemento "*Simplified Synchronous Machine*". Esse elemento proporciona uma representação simplificada de uma máquina síncrona, no entanto, reproduz com fidelidade os aspectos elétricos que são objeto do presente estudo. As características principais dos geradores estão apresentadas na Tab. 2.

Tabela 2 – Características Principais dos Geradores Síncronos

Parâmetro	Gerador 1	Gerador 2 e Gerador 3
Potência nominal	2000 kVA	2000 kVA
Tensão nominal	380 V	480 V
Potência ativa	1426 kW	1426 kW
Velocidade	1800 rpm	1800 rpm

Conforme esclarecido, os geradores operam em baixa tensão, com níveis de 380V e 480V. Portanto, para a injeção de energia na rede de distribuição, eles são conectados a três transformadores trifásicos com potência de 2000 kVA cada, com ligação D-Yg, os quais são responsáveis por elevar o nível de tensão para 13,80 kV. O elemento "*Three-Phase Transformer (Two Windings)*" foi utilizado para representar os transformadores nesta planta. A Tab.3 apresenta as características dos transformadores.

Tabela 3 – Características dos Transformadores

Parâmetro	Trafo 1	Trafo 2 e Trafo 3
Potência nominal	2000 kVA	2000 kVA
Tensão nominal	13,8 kV/380 V	13,8 kV/480 V
Reatância de dispersão	8%	8%
Ligação	D1-Yg	D1-Yg

Para modelar o sistema supridor, utilizou-se o elemento "*Three-Phase Source*", configurado em Yg, com uma tensão nominal de 13,80 kV. Vale ressaltar que a planta de biogás

(consumidor) está distante da subestação da distribuidora, como resultado, a potência de curto-circuito do sistema é reduzida. Portanto, empregou-se 50 MVA como potência de curto-circuito da fonte supridora, e relação X/R igual à 7.

Com o objetivo de introduzir desequilíbrio ao sistema, procedeu-se a conexão de uma carga monofásica no lado do consumidor (CARGA 1) e no lado no supridor (CARGA 2). As cargas são iguais e possuem potência igual à 500 kW e 83,3 kVar. As cargas monofásicas são utilizadas para a implementação dos casos que serão implementados neste artigo. Conforme descrito abaixo serão analisadas três situações distintas:

- **Caso 1:** Apenas o supridor possui carga desequilibrada (CARGA 1 desconectada e CARGA 2 conectada ao sistema). Vale destacar que essa condição operativa é condizente com a situação real da planta em operação;
- **Caso 2:** Apenas o consumidor possui carga desequilibrada (CARGA 1 conectada e CARGA 2 desconectada ao sistema);
- **Caso 3:** O supridor e o consumidor possuem carga desequilibrada de mesma potência (CARGA 1 e 2 conectadas ao sistema).

Finalmente, para viabilizar a aplicação da metodologia estudada neste trabalho, um banco de capacitores monofásico com valor de capacitância igual a 25 μ F foi conectado ao PAC. O chaveamento deste equipamento é o componente principal para análise e aplicação da metodologia.

IV. ESTUDO DE CASO: RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a simulação e aplicação do Método da Mudança de Estado Controlada, foram calculados todos os parâmetros necessários para o cálculo das contribuições de responsabilidade do desequilíbrio de tensão total no PAC, apresentados na Tab.4.

Tabela 4 – Grandezas Calculadas				
Variável		Caso 1	Caso 2	Caso 3
U2s [V]	Mód.	63,33	0,0022	62,93
	Âng.(°)	16,89	53,06	15,60
I2s [A]	Mód.	20,59	0,0007	20,13
	Âng.(°)	-65,45	-29,28	-63,33
Z2s [Ω]	Mód.	3,93	3,84	3,93
	Âng.(°)	81,38	81,93	81,38
U2c [V]	Mód.	0,0026	63,32	62,93
	Âng.(°)	165,65	16,89	15,60
I2c [A]	Mód.	0,0009	20,59	20,13
	Âng.(°)	83,29	-65,46	-66,33
Z2c [Ω]	Mód.	14,03	15,23	15,24
	Âng.(°)	85,83	84,26	84,16

U2pac [A]	Mód.	63,32	63,32	125,86
	Âng.(°)	16,89	16,89	15,60
I2pac [V]	Mód.	4,51	16,46	11,88
	Âng.(°)	-68,96	115,02	-115,23

As tensões associadas com as contribuições dos agentes (U2s e U2c) e os valores de tensão de sequência negativa total no PAC (U2pac), encontram-se apresentados no diagrama fasorial da Fig. 7, para os três casos em análise no presente estudo.

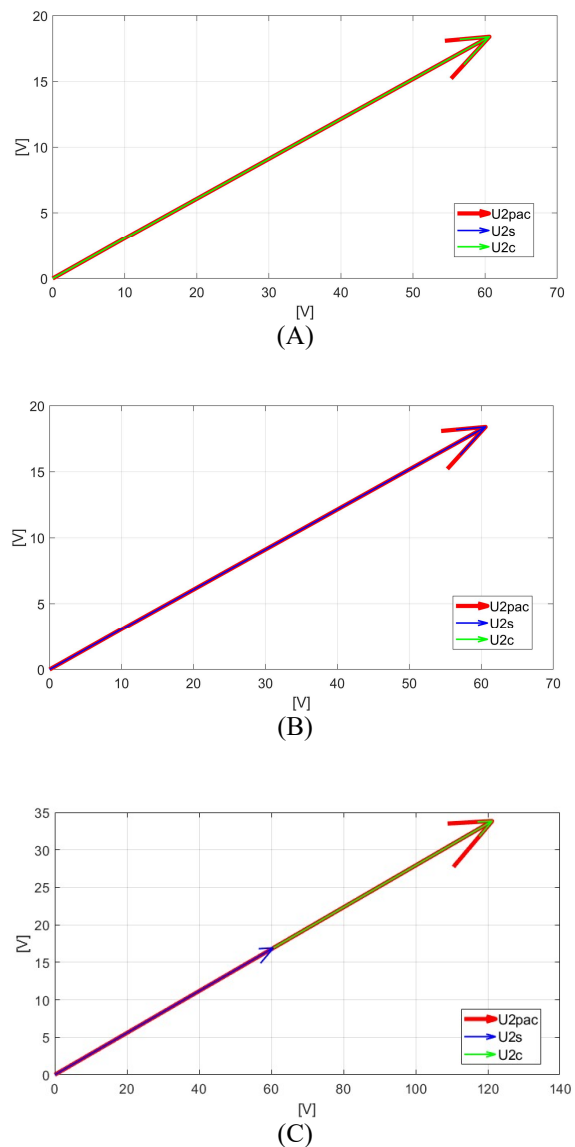


Figura 7: Diagramas fasoriais das tensões de sequência negativa no PAC e respectivas contribuições dos agentes.

Na sequência, é possível realizar o cálculo do fator de desequilíbrio total no PAC, assim como os percentuais de responsabilidade que cabe a cada agente, conforme mostrado na Tab.5.

Tabela 5 – Fator de Desequilíbrio Total no PAC e Percentuais de Responsabilidade do Supridor e Consumidor

Variável	Caso 1	Caso 2	Caso 3
FD [%]	0,80	0,80	1,59
Responsabilidade do supridor [%]	100	0	50
Responsabilidade do consumidor [%]	0	100	50

Em relação ao Método da Mudança de Estado Controlada, nota-se que os resultados ficaram coerentes com a expectativa física. Assim, para os Casos 1 e 2 o método atribuiu toda a responsabilidade ao agente que possuía a carga desequilibrada, ou seja, atribuiu, respectivamente, responsabilidade para o sistema supridor e para a planta de biogás. Já no Caso 3, a responsabilidade ficou dividida igualmente entre os agentes, conforme expectativa.

De forma complementar, para fins de análise, também foi simulada a situação em que a carga monofásica está inserida no supridor e o consumidor está desconectado (*background unbalance*). Nessa situação, o fator de desequilíbrio encontrado no PAC é de 1,02%.

Assim, pode-se inferir, a partir do resultado aqui encontrado, em comparação com o Caso 1, que: o efeito da conexão dos geradores (máquinas síncronas) na rede elétrica em questão provoca uma diminuição do fator de desequilíbrio no PAC, reduzindo de 1,02% para 0,8%, conforme já era esperado. Neste quesito, pode-se afirmar que esta redução de magnitude advém principalmente devido à baixa magnitude da impedância de sequência negativa do consumidor (Z2c), característica comum de cargas motrizes trifásicas. Dessa forma, parte da corrente de sequência negativa proveniente do supridor flui pela impedância Z2c, diminuindo a tensão de sequência negativa no PAC. Com isso, é possível constatar que o método de chaveamento capacitivo é sensível à presença de motores nas instalações avaliadas.

V. CONCLUSÃO

O presente artigo apresentou um estudo de caso de compartilhamento de desequilíbrio de tensão, utilizando o método da Mudança de Estado Controlada via chaveamento de capacitor monofásico, em uma usina que utiliza biogás para a geração de energia elétrica.

Foram considerados três casos no estudo, com a conexão de uma carga desequilibrada no supridor, no consumidor ou em ambos, dependendo do cenário simulado.

Diante dos resultados encontrados nos Casos 1 e 2, observa-se que o método de chaveamento capacitivo demonstra coerência com a expectativa física, atribuindo toda a responsabilidade ao agente com a carga desequilibrada. Já no Caso 3, a responsabilidade ficou igualmente dividida entre os agentes, o que mostra, novamente, que o método em questão se mostra adequado.

Através do estudo realizado é possível verificar que o Método da Mudança de Estado Controlada via chaveamento de capacitor monofásico apresentou-se aplicável para um sistema real, sendo possível obter as contribuições e responsabilidade de cada agente no PAC.

Ressalta-se que o banco de capacitores monofásico utilizado na aplicação do método deve possuir potência suficiente para induzir uma mudança de estado nas grandezas elétricas medidas no PAC. Portanto, capacitores com potência muito reduzida podem não ser viáveis para aplicação do método. Nesses casos, recomenda-se a utilização de uma outra carga monofásica alternativa, como um reator monofásico de maior potência, de modo a garantir a perturbação necessária para a efetiva aplicação da metodologia.

Por fim, ressalta-se que este é um estudo inicial no que tange à temática do compartilhamento de responsabilidade sobre o desequilíbrio de tensão. Entretanto, o objetivo ora almejado é chamar a atenção para esta problemática de qualidade da energia elétrica que deve ter sua importância aumentada na rede de distribuição nos próximos anos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERENCIAS

- [1] K. R. Salomon, “Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás Proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade”, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.
- [2] R. Gregory, “Propostas de metodologias para a determinação das contribuições sobre os desequilíbrios em sistemas elétricos trifásicos”, Tese (Doutorado), Universidade Federal de Uberlândia, 2020. doi: 10.14393/ufu.te.2020.725.
- [3] A. N. de E. Elétrica, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica”, 2018. [Online]. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/Módulo_8-Revisão_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9
- [4] C. L. Fortescue, “Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks”, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. XXXVII, n° 2, p. 1027–1140, 1918, doi: 10.1109/T-AIEE.1918.4765570Y.
- [5] K. Srinivasan e R. Jutras, “Conforming and non-conforming current for attributing steady state power quality problems”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, n° 1, p. 212–217, 1998.
- [6] T. E. Seiphetlho e A. P. J. Rens, “On the assessment of voltage unbalance”, em *Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010*, IEEE, set. 2010, p. 1–6. doi: 10.1109/ICHQP.2010.5625366.
- [7] “IEC/TR 61000-3-13. Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3-13: Limits - Assessment of emission limits for the connection of unbalanced installations to MV, HV and EHV power systems”, 2012.
- [8] W. Xu e Y. Liu, “A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, n° 2, p. 804–811, 2000, doi: 10.1109/61.853023.
- [9] M. Arvelos Moraes, R. C. Filiagi Gregory, B. Moraes Ganesini, J. C. de Oliveira, e I. Santos, “Análise Comparativa dos Métodos para o Compartilhamento da Responsabilidade dos Desequilíbrios de Tensão em Sistemas Elétricos”, *Galoa Events Proceedings*, ago. 2021. doi: 10.17648/cbqee-2021-130581.
- [10] M. A. Moraes, “Uma proposta para a atribuição de responsabilidades sobre desequilíbrios de tensão através da análise de componentes independentes”, Universidade Federal de Uberlândia, 2022. doi: 10.14393/ufu.te.2022.5040.
- [11] A. C. dos Santos, I. N. Santos e J. C. de Oliveira, “Capacitor switching methodology for responsibility sharing of harmonic voltage distortions”, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, jul. 2015. doi: 10.1002/2050-7038.12135.
- [12] R. C. Filiagi Gregory, A. C. dos Santos, I. N. Santos, L. Ran e J. C. de Oliveira, “A practical approach for determining voltage imbalance

contributions from suppliers and consumers”, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, set. 2020. doi: 10.1002/2050-7038.12627.