

## Capítulo III

# Desequilíbrios de tensão

Por Gilson Paulilo\*

O desequilíbrio em um sistema elétrico trifásico é uma condição na qual as três fases apresentam diferentes valores de tensão em módulo ou defasagem angular entre fases diferentes de  $120^\circ$  elétricos ou, ainda, as duas condições simultaneamente.

O desequilíbrio de tensão também é muitas vezes definido como o desvio máximo dos valores médios das tensões ou das correntes trifásicas, dividido pela média dos mesmos valores, expresso em porcentagem. O desequilíbrio pode ser definido usando-se a teoria das componentes simétricas. A razão entre os componentes de sequência negativa ou zero, com a componente de sequência positiva, pode ser usado para especificar a porcentagem do desequilíbrio.

As origens destes desequilíbrios geralmente são nos sistemas de distribuição, os quais possuem cargas monofásicas distribuídas inadequadamente, fazendo surgir no circuito tensões de sequência negativa. Este problema se agrava quando consumidores alimentados de forma trifásica possuem uma má distribuição de carga em seus circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito da concessionária. Tensões desequilibradas podem também ser resultados da queima de fusíveis em uma fase de um banco de capacitores trifásicos.

Segundo os Procedimentos de Distribuição (Prodist), da Aneel, o desequilíbrio de tensão é

analisado com base no fator de desequilíbrio, que exprime a relação entre as componentes de sequência negativa e sequência positiva da tensão expressa em termos percentuais da componente de sequência positiva.

### Conceitos sobre desequilíbrios

O conceito de desequilíbrio de tensão em um sistema elétrico é uma condição na qual as três fases apresentam diferentes valores de tensão em módulo ou defasagem angular entre fases diferente de  $120^\circ$  elétricos ou, ainda, as duas condições.

Em um sistema trifásico ideal, livre de desequilíbrios, considerando a fase "a" na referência e sequência de fases positiva, tem-se em pu:

$$V_a = 1,0 \angle 0^\circ$$

$$V_b = 1,0 \angle -120^\circ$$

$$V_c = 1,0 \angle +120^\circ$$

Na realidade, porém, as tensões não são perfeitamente equilibradas. Isso se deve a desequilíbrios que aparecem internamente às instalações das concessionárias e dos consumidores, estando diretamente relacionado com as cargas instaladas.

No caso específico de as amplitudes das tensões apresentarem valores em módulo diferentes de 1,0 pu,

porém, mantendo-se o defasamento angular de  $120^\circ$  entre fases, esta situação é definida como um problema de queda de tensão. Verifica-se, dessa maneira, que este problema, extensivamente estudado ao longo dos anos e que recebeu um sem-número de proposições para a mitigação dos seus efeitos, constitui-se em um caso particular no universo dos desequilíbrios de tensão.

Considerando-se cargas trifásicas e monofásicas em um sistema elétrico, ele é equilibrado quando circulam correntes equilibradas. No caso de cargas monofásicas, ele é considerado equilibrado quando estas forem cuidadosamente distribuídas ao longo das fases, de forma que, no ponto comum, a corrente seja, idealmente, igual a zero. Por este motivo é importante se fazer, com cautela, a distribuição de cargas monofásicas nas fases do sistema. Entretanto, no sistema elétrico, não existem conectadas somente cargas monofásicas totalmente dissociadas das cargas trifásicas ou vice-versa. O que se tem é a associação dessas cargas no sistema, tornando-se impossível prever quais cargas e em que instante estarão em operação.

Isso demonstra o grau de complexidade que o sistema pode apresentar e a dificuldade no trabalho de balanceamento destas ao longo das três fases do sistema.

Este fato fez com que, durante muito tempo, toda a atenção fosse concentrada em solucionar os problemas de quedas de tensão, convivendo-se, então, conscientemente, com os desequilíbrios do sistema. Isso pode ser comprovado pelo fato de os próprios engenheiros de planejamento das concessionárias trabalharem com um limite de até 2% de desequilíbrio de tensão nos níveis de transmissão e de subtransmissão (tensões iguais ou superiores a 13,8 kV) em seus estudos. Soma-se a isso o fato de os equipamentos trifásicos não possuírem, na realidade, impedâncias iguais em cada fase. Estes, por consequência, absorvem correntes desequilibradas que, por sua vez, provocam o aparecimento de tensões desequilibradas. Dessa forma, no ponto de acoplamento comum entre a concessionária e os consumidores, já se considera certo grau de desequilíbrio, com origem nos equipamentos instalados – geradores, transformadores e linhas de transmissão – respectivamente, nos setores de geração, transmissão e distribuição.

De acordo com a literatura clássica e com vários trabalhos apresentados ao longo dos anos, o grau ou fator de desequilíbrio de tensão de um sistema elétrico pode ser definido de diversas maneiras. Dentre elas, destacam-se:

- O grau de desequilíbrio é definido pela relação entre os módulos da tensão de sequência negativa e da tensão de sequência positiva. Esta definição está baseada no fato de que um conjunto trifásico de tensões equilibradas possui apenas componentes de sequência positiva. O surgimento, por alguma razão, de componentes de sequência zero, provoca apenas a assimetria das tensões de fase. As tensões de linha, cujas componentes de sequência zero são sempre nulas, permanecem equilibradas. Entretanto, a presença de componentes de sequência negativa

também introduz uma assimetria nas tensões de linha. Este fator, em porcentagem, é dado por:

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \times 100$$

Em que:

FD% - Fator de desequilíbrio de tensão em porcentagem;

$V_-$  - Módulo da tensão de sequência negativa;

$V_+$  - Módulo da tensão de sequência positiva.

- A operação de motores de indução trifásica com tensões desequilibradas causa sérios danos ao mesmo, como será apresentado no item seguinte. A fim de quantificar este efeito, a norma NEMA – MG1 – 14.34 define o fator desequilíbrio de tensão como a relação entre o máximo desvio da tensão média e a tensão média, tomando-se como referência as tensões de linha. Este fator, em porcentagem, é dado por:

$$VUF\% = \frac{\Delta V}{U_{AV}} \times 100$$

Em que:

$\Delta U$  - máximo desvio da tensão média [V];

$U_{AV}$  - tensão média [V].

- Alternativamente, pode-se usar a expressão conhecida como CIGRÉ-C04, que é dada por:

$$VUF = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}{1 + \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}}$$

Em que:

$$\beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2}$$

- Por fim, o IEEE recomenda que o desequilíbrio trifásico possa ser obtido pela seguinte relação:

$$VUF = \frac{3 \cdot (V_{MAX} - V_{MIN})}{V_A + V_B + V_C} \cdot 100 \%$$

As definições anteriores indicam maneiras diferentes de avaliação dos desequilíbrios de tensão no sistema elétrico apresentadas na normalização internacional. Elas constituem-se nas definições mais utilizadas. Todavia, novos métodos e definições de como se avaliar desequilíbrios de tensão, bem como de outras grandezas elétricas – como potência ativa, potência reativa, potência aparente, potência de distorção, dentre outras – considerando-se condições não senoidais dos sinais de tensão e corrente, estão sendo propostos atualmente.

A Tabela 6.1 apresenta um resumo das principais normas

e recomendações de várias instituições para calcular o desequilíbrio de tensão.

**TABELA 1 – PRINCIPAIS RECOMENDAÇÕES SOBRE DESEQUILÍBRIOS**

Recomendações/Normas	Expressões
IEC	$K = \frac{V_2}{V_1} \times 100$
ONS / PRODIST	$K = \frac{V_2}{V_1} \times 100$ ou $K = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}$ , em que $\beta = \frac{V_{AB}^4 + V_{BC}^4 + V_{CA}^4}{(V_{AB}^2 + V_{BC}^2 + V_{CA}^2)^2}$
CENELEC	$K = \frac{V_2}{V_1} \times 100$
NRS 048	$UB = \frac{V_N}{V_P} \times 100$ ou $UB = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}$ , em que $\beta = \frac{V_{12}^4 + V_{23}^4 + V_{31}^4}{(V_{12}^2 + V_{23}^2 + V_{31}^2)^2} \times 100$
ANSI	$FDV\% = \frac{DV_{MAX}}{V_{MED}} \times 100$
IEEE	$FDV\% = \frac{3 \cdot (V_{MAX} - V_{MIN})}{V_A + V_B + V_C} \times 100$

### Origens dos desequilíbrios

Os desequilíbrios de tensão afetam fortemente o nível de distribuição de energia elétrica se comparado com os demais níveis. Por este motivo, as fontes destes estão diretamente associadas com as cargas elétricas e com os arranjos utilizados para sua alimentação neste nível de tensão.

De uma maneira geral, salvas as características exclusivas de alguns sistemas isolados, como no caso de sistemas ferroviários eletrificados, as fontes dos desequilíbrios de tensão são as seguintes:

- A combinação de cargas monofásicas e trifásicas desequilibradas, principalmente cargas especiais como fornos a arco e máquinas de solda, no mesmo sistema de distribuição, sendo as cargas monofásicas desigualmente distribuídas ao longo das três fases do sistema;
- Em sistemas de transmissão de energia elétrica, devido às características das impedâncias das linhas, aparecem desequilíbrios de tensão. Uma das maneiras de se minimizar os seus efeitos é fazer a transposição das fases nas torres de transmissão de energia elétrica. Em sistemas de distribuição, porém, isso é uma prática não usual, o que contribui para que o sistema permaneça desequilibrado.

Estas causas são as mais frequentes. Contudo, ainda são relatados transformadores conectados em delta aberto, abertura de fusíveis em bancos de capacitores, dentre outras causas.

Em sistemas específicos, como sistemas ferroviários, a influência das cargas monofásicas na rede de alimentação se torna mais evidente. Neste sistema, a carga característica, locomotivas

elétricas, são cargas puramente monofásicas controladas atualmente por semicondutores de potência. Na rede de alimentação são utilizadas topologias especiais de transformadores como, por exemplo, as conexões Scott e conexões Woodbridge. Essas conexões permitem minimizar, em parte, o desequilíbrio gerado pelas cargas de tração devido à brusca variação de carga de acordo com os períodos de aceleração e frenagem.

### Consequências dos desequilíbrios

Tensões desequilibradas provocam consequências danosas no funcionamento de alguns equipamentos elétricos, comprometendo, na maioria dos casos, o seu desempenho e a sua vida útil. Entretanto, por mais paradoxal que possa parecer, as cargas elétricas se constituem na principal fonte de desequilíbrio, como visto anteriormente. A fim de esclarecer esta relação de causa/efeito, o comportamento de cargas lineares, do tipo motores de indução trifásicos, e de cargas não lineares, do tipo conversores estáticos CA-CC, operando sob esta condição é apresentado a seguir.

### Cargas lineares – motores de indução

As características de desempenho de um motor de indução trifásico são um conjunto de grandezas eletromecânicas e térmicas que definem o comportamento operacional deste sob determinadas condições. Desta forma, em função da potência exigida pela carga em um determinado instante e das condições da rede de alimentação, o motor apresenta valores definidos de rendimento, fator de potência, corrente absorvida, velocidade, conjugado (torque) desenvolvido, perdas e elevação de temperatura.

Dessa maneira, quando as tensões de alimentação apresentam desequilíbrios, seja em módulo ou em ângulo, ocorrem alterações nas características térmicas, elétricas e mecânicas dos motores de indução, afetando o seu desempenho e comprometendo a sua vida útil.

Vários estudos foram efetuados desde a década de 1950 no sentido de explicar os efeitos que ocorrem internamente aos motores de indução. Em 1959, Williams provou que o motor apresenta redução de rendimento. Em 1959, Gafford avaliou a sobrelevação da temperatura e a diminuição da vida útil do motor. Em 1963, Berndt apresentou um método de avaliação do motor e em 1985 Cummings estudou métodos de proteção do motor contra desequilíbrios de tensão.

Quando as tensões de linha aplicadas aos motores de indução apresentam variações tanto no módulo quanto no ângulo de fase, a primeira consequência é a deformação do campo magnético girante, originando uma operação semelhante àquela existente quando o entreferro não é uniforme. Neste caso, é inevitável a produção de esforços mecânicos axiais e radiais sobre o eixo, com o aparecimento de vibrações, ruídos, batimento, desgaste e o aquecimento excessivo dos mancais em consequência de correntes parasitas que podem aparecer no sistema eixo-mancais-terra. A deformação do campo magnético

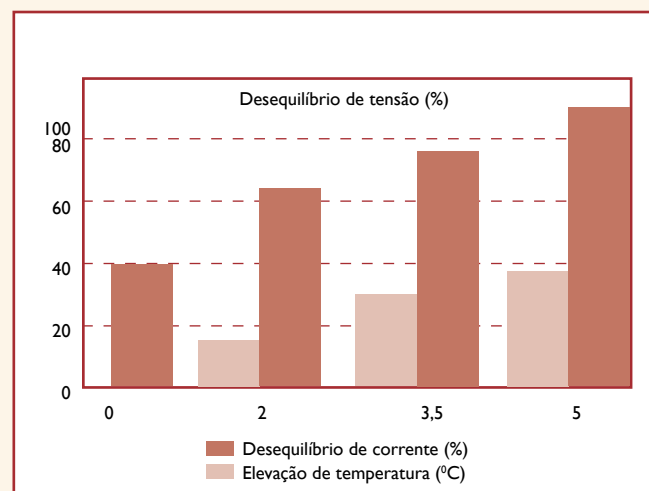
girante é resultado da composição dos campos de sequência positiva e negativa: a de sequência positiva executando as mesmas funções caso o campo fosse normal e o de sequência negativa opondo-se ao anterior e produzindo o desequilíbrio magnético do motor. Outro efeito importante é o fato das impedâncias de sequência negativa possuírem valores muito pequenos, resultando em um desequilíbrio de corrente bastante elevado. Conseqüentemente, a elevação de temperatura do motor operando com uma determinada carga e sob determinado desequilíbrio será maior que o mesmo operando sob as mesmas condições e com tensões equilibradas. Isso causa o sobreaquecimento do motor e a diminuição da sua vida útil. Um exemplo destes efeitos está apresentado na Tabela 2, para um motor de 5 Hp.

**TABELA 2 – EFEITOS DOS DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO EM MOTORES ELÉTRICOS – MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO: 5 HP, 1725 RPM, 230 V, 60 Hz**

CARACTERÍSTICA	DESEMPENHO		
Tensão Média [V]	230	230	230
Desequilíbrio de Tensão [%]	0,3	2,3	2,3
Desequilíbrio de Corrente [%]	0,4	40	17,7
Elevação Temperatura [°C]	0	40	30

A importância desta tabela está nos seguintes fatos:

- Aproximadamente 60% da energia produzida é consumida na alimentação de motores elétricos nos sistemas industriais;
- Um pequeno desequilíbrio de tensão – da ordem de 2,3% – é responsável por um desequilíbrio de corrente – da ordem de 17% – juntamente com uma elevação de temperatura de 30 °C;
- Sabe-se que a cada 10 °C de elevação de temperatura, a vida útil da isolamento de um motor elétrico diminui pela metade.



**Figura 1 – Exemplo gráfico do uso das componentes simétricas.**

Estes dados demonstram o impacto econômico decorrente dos efeitos dos desequilíbrios de tensão nos motores de indução, uma vez que se agregam às deficiências impostas na operação os custos de manutenção preventiva e corretiva. Um estudo mais recente, conduzido por Lee em 1998 investigou os efeitos de diferentes

desequilíbrios de tensão com o mesmo VUF no desempenho de um motor de indução e a influência destes no sistema de potência. A partir de oito diferentes situações, monofásicas, bifásicas e trifásicas, considerando elevação e diminuição das tensões, resultando em desequilíbrios da ordem de 4% e 6%, foram investigados o rendimento e o fator de potência. Além das conclusões já apresentadas, o estudo mostrou:

- A importância de se considerar o valor da tensão de sequência positiva que, quando muito elevada, provoca um baixo fator de potência e alto rendimento;
- As piores situações em relação à sobrelevação de temperatura ocorrem para desequilíbrios trifásicos considerando diminuição das tensões;
- Uma vez que os desequilíbrios causam perdas excessivas e aumento no consumo, estes também influenciam a estabilidade do sistema de potência, sendo necessária a sua incorporação a estudos desta natureza.

De uma maneira geral, os efeitos em outras características elétricas podem ser resumidos da seguinte maneira:

- Torque: os torques de rotor bloqueado e de frenagem diminuem. Em condições extremamente severas, o torque pode não ser o adequado para a aplicação;
- Velocidade nominal: a velocidade nominal diminui ligeiramente;

- Corrente de rotor bloqueado: o desequilíbrio desta corrente será da mesma ordem que o desequilíbrio das tensões;
- Ruído e vibração: como já citado anteriormente, estes efeitos aparecerão, sendo mais severos em motores de dois polos.

### ***Cargas não lineares – sistemas multiconversores CA – CC***

A utilização de sistemas multiconversores CA-CC foi largamente difundida nas aplicações industriais nos últimos 20 anos. Isso ocorreu devido ao estágio de desenvolvimento adquirido pela eletrônica de potência e pela eletrônica de controle que permitiram a disponibilidade de componentes cada vez mais potentes associados a esquemas de controle cada vez mais eficazes.

Podem-se citar como exemplos práticos de dispositivos desenvolvidos a partir desta tecnologia os sistemas de acionamento para motores de corrente contínua e para motores de corrente alternada. Apesar de serem sistemas que competem entre si em nível de aplicações, ainda hoje é possível se encontrar nichos específicos de mercado em que um sistema se sobrepõe ao outro. Vale lembrar, porém, que a tendência do mercado, em um futuro próximo, é a utilização em larga escala de acionamentos para motores de corrente alternada.

Os conversores estáticos de potência são dispositivos que possuem, por natureza, uma característica não linear gerando harmônicos no sistema de fornecimento de energia. Como resultado

direto, estes sistemas apresentam normalmente fatores de potência ruins e que variam com a carga. Estes sistemas, da mesma forma que qualquer outro, foram projetados para trabalharem sob condições equilibradas de fornecimento na frequência fundamental. Na prática, porém, os sistemas de alimentação são desequilibrados dentro de certa faixa, tornando complexo o problema de geração harmônica, degradando as características e a qualidade da corrente de entrada do conversor e interferindo significativamente na tensão de saída.

Vários trabalhos estão disponíveis na literatura investigando estes problemas, abordando a modelagem do conversor através de diferentes métodos. Contudo, dois métodos podem ser, basicamente, distinguidos: o método no domínio do tempo e o método no domínio da frequência. A análise temporal tem a vantagem de prever o comportamento do conversor em regimes transitórios. Um sistema de equações diferenciais descreve o funcionamento do conversor e sua solução é encontrada por meio de técnicas de análise numérica. Os harmônicos são avaliados pela Transformada Rápida de Fourier (FFT). Como inconveniente, tem-se o longo tempo de simulação para se atingir o regime permanente, ou seja, depende-se um grande esforço computacional. Alguns dos simuladores que utilizam este método: EMTP, EMTPDC, ATP, SABER, etc. Por sua vez, o método frequencial consiste em descrever o conversor por um sistema de equações em regime permanente e sua resolução é obtida por um método iterativo. Em alguns casos, são relatados problemas de convergência na aplicação deste método.

### Limites dos desequilíbrios

Antes de serem apresentadas as soluções para desequilíbrios de tensão, serão apresentados os limites permissíveis dos desequilíbrios de tensão em sistemas elétricos definidos por diversas normas, tanto em nível nacional como em nível internacional. Estes valores constituem-se como indicadores da necessidade ou não de se adotar medidas de mitigação, de modo a se respeitar a normalização vigente. Estes limites estão apresentados na Tabela 3 a seguir.

**TABELA 3 – LIMITES PERMISSÍVEIS PARA DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO**

NORMA	LIMITE
NEMA MG I 14-34 (1)	2%
ANSI C.84.1-1989 (2)	3%
IEEE Orange Book – 446/1995 (3)	2,5%
GTCP/CTST/GCPS – ELETROBRÁS (4)	1,5% e 2%
ONS e ANEEL	2%

### Observações:

- 1) Reconhecendo o efeito prejudicial dos desequilíbrios sobre o desempenho do motor, a norma Nema recomenda ainda fatores a serem aplicados ao motor operando sob condições de desequilíbrio. Além disso, estuda-se a possibilidade da redução deste limite para 1%;
- 2) Máximo valor medido sem carga no sistema;
- 3) Desequilíbrio trifásico permissível;

4) Limite global de desequilíbrio de tensão e limite de desequilíbrio de tensão por consumidor na conexão a redes de transmissão e subtransmissão.

Apesar dos diferentes valores encontrados na tabela anterior, adota-se, de maneira geral, o limite de 2% para desequilíbrios de tensão, sem qualquer tipo de prejuízo à operação de cargas lineares e não lineares.

### Referências

- DUGAN, R. C.; McGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. *Electrical power systems quality*. New York: McGraw-Hill, 2ª Edição.
- BOLLEN, M. H. J. *Understanding power quality problems: voltage sags in interruptions*. Wiley-IEEE Press, Oct. 1999.
- ARRILAGA, J.; WATSON, N. R. *Power system harmonics*. New York: Wiley-IEEE Press, November 2004, Second Edition.
- PAULILLO, G. *Proposta de um mitigador de harmônicos não característicos através da compensação de desequilíbrios de tensão*. Tese de Doutorado (Universidade Federal de Itajubá), Itajubá-MG, 2001.
- PAULILLO, G. *Um compensador de desequilíbrios de tensão*. Dissertação de Mestrado (Universidade Federal de Itajubá), Itajubá-MG, 1996.
- PAULILLO, G.; ABREU, J. P. G. *Development of a voltage imbalance electromagnetic compensator*. *Computational Methods in Circuits and Systems Applications*, WSEAS Press, 2003, p. 253-257.
- ABREU, J. P. G.; ARANGO, H.; PAULILLO, G. *Proposal for a line drop and unbalance compensator*. *Proceedings of the 7th IEEE PES International Conference on Harmonics and Quality of Power – ICHQP, Las Vegas, p. 276-279, Oct. 1996*.
- ABREU, J. P. G.; ARANGO, H.; PAULILLO, G. *A novel electromagnetic compensator*. *Proceedings of the 14th International Conference on Electricity Distribution – CIRED'97, Birmingham, 1997*;
- ABREU, J. P. G.; GUIMARÃES, C. A. M.; PAULILLO, G. *Reducing harmonics in multiconverter systems under unbalanced voltage supply – a novel transformer topology*. *Proceedings of the IEEE PES Summer Meeting 2000, Seattle, Jul. 2000*.
- ABREU, J. P. G.; ARANGO, H.; PAULILLO, G. *Compensador de Desequilíbrios e de Quedas de Tensão*. *Anais do XI CBA – Congresso Brasileiro de Automática, USP – São Paulo, p. 1.661-1.665, 1996*.

\* GILSON PAULILO é engenheiro eletricista, com mestrado e doutorado em Qualidade de Energia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá. Atualmente, é consultor tecnológico em energia no Instituto de Pesquisas Eldorado, em Campinas (SP). Atuação voltada para áreas de qualidade de energia elétrica, geração distribuída, eficiência energética e distribuição.

### Continua na próxima edição

Confira todos os artigos deste fascículo em [www.osetoreletrico.com.br](http://www.osetoreletrico.com.br)  
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail [redacao@atituedeeditorial.com.br](mailto:redacao@atituedeeditorial.com.br)