



Eficiência energética

Por José Carlos de Oliveira, Adrian Ribeiro Ferreira, Paulo Henrique Oliveira Rezende e Vinicius Henrique Farias Brito*

Capítulo VII

Variações de tensão de curta duração como fatores de influência sobre a eficiência dos processos produtivos e perspectivas normativas

INTRODUÇÃO

A energia elétrica é considerada um produto comercial que deve atender a distintos requisitos associados com a qualidade. De fato, as agências reguladoras agem no sentido de assegurar que os consumidores devem ser supridos com uma energia confiável e com nível de qualidade compatível com as exigências impostas pelos mais distintos tipos de cargas e unidades de consumo, de forma tal que estes venham a operar de forma segura, satisfatória e eficiente. Questões associadas com os níveis das tensões de alimentação, distorções das formas de onda, desequilíbrios entre as grandezas trifásicas, variações de tensão de longa e curta duração (VTCDs) podem resultar em paradas de produção, operação imprópria de equipamentos, redução da vida útil de dispositivos eletroeletrônicos, e mesmo prejuízos de ordem financeira. Não obstante o reconhecimento de que inúmeras publicações tenham sido disponibilizadas envolvendo os efeitos dos mais diversos indicadores de qualidade com questões técnicas diversas, ainda perduram questionamentos a exemplo de: os fenômenos de qualidade da energia realmente se apresentam como problemas? Quais as intensidades destes? Quais os níveis de riscos que ficam submetidos equipamentos e instalações? Quais as orientações voltadas para os investimentos a serem feitos para a compatibilização dos padrões de qualidade aos requisitos dos produtos supridos aos consumidores? Qual a expressão dos impactos sobre a eficiência energética das instalações? À luz destas questões, considera-se essencial o conhecimento dos problemas manifestados diante das situações apresentadas na forma de perda da qualidade dos suprimentos elétricos visto que tais efeitos sejam minimizados.

Focando, pois, de forma pontual nas consequências econômicas

dos fenômenos associados com a perda da qualidade da energia elétrica, estas podem ser consideradas sob diversos ângulos, a exemplo de perda total ou parcial de processos; perdas adicionais na forma de energia dissipada; perdas associadas com a redução da vida útil de equipamentos e queda da qualidade dos produtos gerados. Estes fatores de interferência na eficiência dos processos se apresentam em diferentes escalas de tempo. Assim, o processo avaliativo da relação entre a operação de um sistema elétrico sob condições não ideais e suas consequências financeiras se apresenta com enormes desafios a serem transpostos. Abordando a matéria na sua forma conceitual, vale destacar que as questões financeiras vinculadas com os problemas de qualidade da energia podem ser consideradas de duas formas: os custos diretos e os indiretos. Estes, quanto a sua natureza, podem ainda ser compreendidos como oriundos de: distúrbios manifestados nos barramentos de suprimento, susceptibilidade dos componentes que perfazem as cargas alimentadas e as perdas associadas com os danos ou mal funcionamento dos equipamentos e perdas de processos. Isto posto, fica entendido que estudos relacionados com a Qualidade da Energia Elétrica têm como interesse a análise do suprimento elétrico com o objetivo de investigar o cumprimento dos padrões mínimos estabelecidos pelas normas vigentes.

Neste contexto, uma série de fenômenos está atrelada com a degradação da tensão de suprimento, todavia, as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs) têm sido a principal preocupação de diversos consumidores [1]. Esses eventos são caracterizados por desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo inferior a três minutos [2]. Não obstante a pequena duração destes fenômenos, os efeitos provocados podem ser extremamente danosos para os processos e

equipamentos elétricos, sobretudo, sob o ponto de vista financeiro. Para demonstrar a relevância desse distúrbio na rede, são apresentados na Figura 1 resultados que expressam as principais causas de reclamações por parte dos consumidores [1] quanto a questões associadas com a perda da qualidade da energia elétrica.

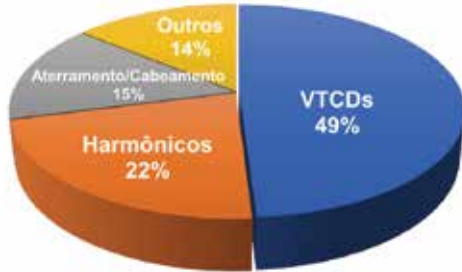


Figura 1 – Porcentual dos distúrbios reclamados.
Fonte: Adaptado de [1].

A respeito de mecanismos para o acompanhamento desse fenômeno nas redes elétricas, a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), através do Procedimento da Distribuição (Prodist), utiliza uma abordagem quantitativa para traduzir os fenômenos das VTCDs quanto ao número de ocorrências, intensidade e duração em um indicador que venha a expressar a situação operacional de uma determinada rede elétrica pertencente aos sistemas de distribuição. A metodologia aponta para o cálculo de um indicador, denominado Fator de Impacto (FI), o qual expressa, de forma conjunta, o número de eventos, suas intensidades e relevâncias. Muito embora os desafios impostos por esta medida pioneira, é notório que a utilização do FI tende, após um período de maturação, a definir os critérios para o estabelecimento futuro de limites para as VTCDs. Naturalmente, o assunto é complexo e, como dito, exigirá muita experiência de campo para a proposição

de números que representem um equilíbrio dos interesses entre os agentes envolvidos no processo, a saber, o supridor e o consumidor.

Dentro deste vasto campo de conhecimento, esta contribuição técnica se reveste do objetivo de evidenciar, em um primeiro momento, uma exemplificação prática da correlação entre a incidência das VTCDs e os impactos econômicos, a nível de prejuízo para as unidades de consumo. Na sequência, são feitos esclarecimentos voltados para o estabelecimento de meios destinados a quantificar e qualificar os fenômenos quanto à sua relevância, traduzindo-os em indicadores numéricos e, por fim, são tecidas considerações básicas sobre meios para a identificação da responsabilidade dos fenômenos ora tratados.

EXEMPLIFICAÇÕES SOBRE OS IMPACTOS FINANCEIROS EM SETORES INDUSTRIAIS

No que tange aos impactos financeiros causados pelas VTCDs, diversos autores têm realizado trabalhos com o propósito de quantificar as perdas financeiras associadas com a manifestação do distúrbio em pauta [3-10].

Na indústria do ramo alimentício, especificamente na área de trigo e derivados, são apresentados em [3] e [4] os efeitos que as VTCDs causam no processo de produção. Assim, se observa que, em média, o tempo de restabelecimento do sistema elétrico é em torno de 15 minutos após a interrupção da produção. Diante disso, como consequências tem-se efeitos sobre a qualidade do produto até a restauração da produção; as linhas de transporte requerem um tempo médio de 2 horas para a liberação da linha de produção; podem ocorrer queimas dos módulos de entrada e saídas de CLPs, e também, em sensores dos processos da indústria e erros de leitura das variáveis do processo pelo CLP. Estas referências indicam um número total de 170 desligamentos provocados por VTCDs

Remova as abraçadeiras com segurança usando a ferramenta EVO cut

MADE FOR REAL®

HellermannTyton

O uso de alicate, tesoura ou outras ferramentas de corte pode **danificar** os cabos.

Mais detalhes pelo QR Code

Seu uso é recomendado em aplicações em que **firos e chicotes** possuem **alto valor agregado.**

www.hellermanntytonbrasil.com.br
 11 2136-9090
vendas@hellermanntyton.com.br

durante o período de 1 ano, tendo um prejuízo de cerca de 1 milhão de reais contabilizando somente a parada de produção. Esse valor não considera os custos relacionados com as horas paradas para manutenção nos equipamentos e processos, bem como a queima de componentes em função dos desligamentos. Ou seja, a perda financeira total certamente é superior ao montante anteriormente citado.

Outro segmento fortemente afetado é a indústria automobilística. Uma das empresas de maior volume de produção no Brasil, cuja fabricação total supera 1 veículo por minuto [5], relata que no ano de 2019 foram totalizadas 36 horas de parada para todas as unidades fabris no Brasil. Estes números, por si só, esclarecem a relevância da continuidade operacional das empresas e seus efeitos na forma de prejuízos econômicos.

Setores que operam com um grande consumo e processamento de dados também são afetados pela baixa qualidade de energia, esse é o caso da indústria de telecomunicações [6]. Nesse ramo, o funcionamento inadequado de equipamentos em razão da ocorrência das VTCDs pode acarretar em erros de informações e interrupções de serviço, que, conseqüentemente, geram prejuízos significativos a uma grande quantidade de clientes. Com isso podem ocorrer danos em cadeia e prejuízos no andamento dos serviços.

No campo têxtil, diversos equipamentos são sensíveis às VTCDs de forma que a ocorrência de variações de tensão entre 6 e 10 ciclos já é suficiente para causar a interrupção de toda a produção, e ainda, a retomada do processo requer horas de trabalhos. Complementando os dados relativos a esse setor, a referência [7] mostra que as perdas de produção em 10 meses de funcionamento chegaram a US\$ 280.000,00.

No que diz respeito a área da produção de celulose, em [8] é citado o caso de uma empresa nacional. Esta referência evidencia os efeitos das paradas e queima de equipamentos devido aos eventos relacionados aos fenômenos ora tratados.

Para complementar as informações sobre a correlação entre os

distúrbios supra referidos e seus impactos econômicos, a Tabela 1 sintetiza os prejuízos financeiros atrelados com a incidência de VTCDs para os diversos setores industriais apresentadas em [9]. Os números refletem avaliações conduzidas no exterior, mas as preocupações são igualmente aplicáveis ao Brasil.

Por fim, ainda voltado para a questão da quantificação financeira dos efeitos do fenômeno tratado neste trabalho, a Figura 2 obtida de [10] fornece indicativos financeiros para tipos distintos de unidades de produção.

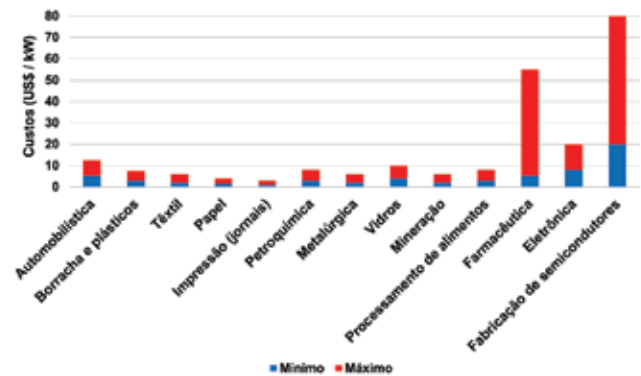


Figura 2 – Perdas financeiras relacionadas às VTCDs por unidades de produção. Fonte: Adaptado de [10].

ASPECTOS NORMATIVOS

De acordo com o Prodist-Módulo 8, as VTCDs podem ser classificadas de acordo com a magnitude da tensão residual durante a permanência do evento, bem como com o seu tempo de duração. Sob o ponto de vista quantitativo, a amplitude de uma ocorrência individual de VTCD é definida pela equação (1).

$$V_e = \frac{V_{res}}{V_{ref}} \times 100 \quad (1)$$

TABELA 1 – CUSTOS/PREJUÍZOS ASSOCIADOS COM A INCIDÊNCIA DE VTCDs (UNIÃO EUROPEIA E ESTADOS UNIDOS)

Tipo de indústria	Perdas típicas por evento (€ ou US\$)	País/Região
Mercado financeiro	6.000.000 (por hora)	UE
Telecomunicações	30.000 (por minuto)	UE
Produção de semicondutores	3.800.000	UE
Centro de informática	750.000	UE
Aço	350.000	UE
Vidro	250.000	UE
Fabricação de equipamentos	100.000	EUA
Automobilística	75.000	EUA
Fabricação de papel	30.000	EUA
Indústria química (plástico, vidro, etc.)	5.000	EUA

Em que:

V_e - Amplitude da VTCD (em %);

V_{res} - Tensão eficaz residual da VTCD;

V_{ref} - Tensão eficaz de referência.

Quanto a sua duração, a ocorrência do fenômeno é definida pela expressão (2).

$$\Delta t_e = t_f - t_i \quad (2)$$

Em que:

Δt_e - duração da VTCD;

t_i - Instante inicial da VTCD;

t_f - Instante final da VTCD.

A detecção de um evento de VTCD irá depender se o sistema em questão é monofásico ou polifásico. Para sistemas monofásicos, uma VTCD tem seu início quando a tensão eficaz viola o limiar de afundamento, elevação ou interrupção e termina quando a tensão transpõe seu limiar somado à tensão de histerese. Quando se trata de sistemas polifásicos, a VTCD inicia quando uma das fases do sistema viola seu limiar. Seu término é quando a tensão eficaz em todas as fases do sistema transcende o limiar de violação acrescido da tensão de histerese, retornando para a faixa normal de operação. Aqui, a terminologia histerese trata de um acréscimo no limiar de afundamento ou elevação no instante final de um evento. Dessa forma, tem-se uma diferença de magnitude entre os valores de limiares do início e término de um evento. Lembrando que eventos simultâneos e/ou consecutivos de VTCDs em um período de 3 (três) minutos registrados em um determinado ponto de monitoração devem ser agregados de forma a compor uma única ocorrência de VTCD.

No que tange ao período total para amostragem dos eventos VTCD agregados, este é de 30 dias, e para sua contabilização, estes devem ser considerados correlacionando ao nível de relevância

da ocorrência em consonância com um fator de ponderação (f_{pi}) advindo de estudos de sensibilidade das cargas que perfazem um complexo elétrico. A Tabela 2 apresenta a estratificação dos eventos, nos termos estabelecidos pelo Prodist, em 9 regiões de sensibilidade, sendo que para cada uma delas atribui-se o mencionado fator de valorização do fenômeno registrado.

Dessa forma, o Fator de Impacto (FI) caracteriza, de forma quantitativa, a severidade da incidência de um conjunto de eventos de VTCD, e é calculado de acordo com a expressão a (3), a qual correlaciona o número de ocorrências, seu fator de ponderação e um valor de referência definido pelos Procedimentos de Rede. Este último é obtido por meio de levantamentos de campo visando retratar um equilíbrio entre as condições reais encontradas para os sistemas de distribuição em operação no país e requisitos mínimos de atendimento.

$$FI = \frac{\sum_{i=A}^I (f_{ei} \times f_{pi})}{FI_{BASE}} \quad (3)$$

Sendo:

f_{ei} = frequência de ocorrência das VTCDs, apuradas por meio de medição apropriada, em um período de 30 dias consecutivos, para cada região de sensibilidade i , sendo $i = A, B, C, D, E, F, G, H$ e I .

Por fim, para o estabelecimento de medidas regulatórias justas, além da metodologia proposta para a compatibilização dos interesses das duas partes, a supridora e a consumidora, cabe ainda uma outra área meritória para discussões. Esta se encontra associada com a identificação da origem do fenômeno aqui tratado. De fato, há de se reconhecer que este poderá ser advindo da rede supridora impactando negativamente sobre a consumidora, ou, numa via inversa, o fenômeno tratado teria sido produzido pela

TABELA 2 – ESTRATIFICAÇÃO DAS VTCD COM BASE NOS NÍVEIS DE SENSIBILIDADE DAS DIVERSAS CARGAS

Amplitude (pu)	Duração						
	[16,67 ms - 100 ms]	(100 ms - 300 ms]	(300 ms - 600 ms]	(600 ms - 1 seg]	(1 seg - 3 seg]	(3 seg - 1 min]	(1 min - 3 min]
> 1,15	REGIÃO H			REGIÃO I			
(1,10 - 1,15]	REGIÃO H			REGIÃO I			
(0,85 - 0,90]	REGIÃO A						
(0,80 - 0,85]	REGIÃO A						
(0,70 - 0,80]	REGIÃO B		REGIÃO D		REGIÃO G		
(0,60 - 0,70]	REGIÃO B		REGIÃO D		REGIÃO G		
(0,50 - 0,60]	REGIÃO C		REGIÃO D		REGIÃO F		
(0,40 - 0,50]	REGIÃO C		REGIÃO D		REGIÃO F		
(0,30 - 0,40]	REGIÃO E		REGIÃO D		REGIÃO F		
(0,20 - 0,30]	REGIÃO E		REGIÃO D		REGIÃO F		
(0,10 - 0,20]	REGIÃO E		REGIÃO D		REGIÃO F		
< 0,10	REGIÃO E		REGIÃO D		REGIÃO F		

Fonte: Prodist - Módulo 8 [2].

rede elétrica interna ao consumidor. Para tanto, estudos têm sido conduzidos no âmbito internacional e nacional [11] e [12] e uma contribuição feita no contexto da referência [13] se mostra com atrativos científicos e técnicos para a solução desta questão.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O contexto da eficiência energética se apresenta imbuído do conceito de se conseguir o melhor desempenho de um processo, de forma competente e produtiva, com segurança, qualidade e confiabilidade. Neste sentido, a temática aqui abordada se mostra extremamente consonante com estas diretrizes. De fato, como apontado no início das discussões, vários outros indicadores de qualidade se apresentam com impactos direto sobre a eficiência e outros efeitos, todavia, não de forma tão pontual e direta como as VTCDs. Isto se comprova quando dos levantamentos de campo, voltados para uma caracterização das áreas de maiores preocupações dos consumidores, como aqui expresso. Todavia, apesar deste reconhecimento, o fenômeno se mostra um dos mais difíceis de regulamentação, como pode ser detectado através das mais diversas orientações normativas encontradas no mundo. Procurando fazer as primeiras investidas nesta direção, a Aneel, por meio do Prodist, estabeleceu os primeiros passos nesta direção, fato este consolidado no referido documento regulatório. Sem a pretensão de uma determinação punitiva, foi elaborada uma proposta visando contemplar um equilíbrio entre os padrões de qualidade e as exigências impostas pelas unidades consumidoras. Esta, uma vez submetida e devidamente fundamentada na elaboração de um banco de dados permitirá, certamente, o estabelecimento de limites coerentes e equilibrados que venham a atender uma parte, sem os grandes prejuízos financeiros elucidados neste trabalho. Assim, é de se esperar num horizonte próximo, evoluções no processo da delimitação de indicadores, como já ocorre com outros fenômenos atrelados com a qualidade da energia elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. K. LUNA, "Uma Contribuição ao Estudo de VTCDs Aplicado a Equipamentos Eletrônicos Alimentados por Conversor CA-CC" Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Brasil, 2005;
- [2] ANEEL, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica" 2018;
- [3] R. M. Maia and M. V. Cruz, "Aspectos da Sensibilidade de uma planta industrial durante Variações de Tensão de Curta Duração" 2011. Artigo da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), p. 5;
- [4] R. M. Maia, "Caracterização das Variações de Tensão de Curta Duração e seus Impactos em uma Planta da Indústria Alimentícia". Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Brasil, 2011;
- [5] OSE, "Qualidade da Energia Elétrica: Tendências e Desafios" 2020. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=Or9oFP0vNac>. [Acessado em: 11-Jul-2021];
- [6] A. B. Amaral, "O impacto da insuficiência no fornecimento de energia elétrica nas empresas brasileiras do setor de telecomunicações" Universidade de São Paulo (USP), Brasil, 2017;
- [7] É. M. Motoki and N. Kagan, "Procedimentos para Mitigação da Qualidade de Energia na Indústria Têxtil" in XII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia, 2007, p. 6;
- [8] D. S. Diniz, G. L. Máximo, and M. P. Spagnol, "Procedimentos para Mitigação do Impacto de Qualidade de Energia na Indústria Fabricante de Papel" in XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, 2008, p. 10;
- [9] F. Salim, K. M. Nor, D. M. Said, and A. A. A. Rahman, "Voltage Sags Cost Estimation for Malaysian Industries" in IEEE International Conference Power & Energy (PECON), 2014, p. 7;
- [10] A. de Almeida, L. Moreira, and J. Delgado, "Power Quality Problems and New Solutions" in ICREPQ, 2003, p. 9;
- [11] M. De Santis, C. Noce, P. Varilone, and P. Verde, "Analysis of the origin of measured voltage sags in interconnected networks" in Electric Power Systems Research, 2017, p. 10;
- [12] FERREIRA, A. R.; OLIVEIRA, J. C. DE; REZENDE, P. H. O. "Uma Proposta para a Identificação da Responsabilidade das VTCDs através da Transferência dos Indicadores de Desequilíbrios nos Transformadores de Conexão". Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica" (CBQEE). Anais. p.6, 2021. Foz do Iguaçu, Brasil;
- [13] FERREIRA, Adrian Ribeiro. "Uma proposta metodológica para a atribuição da responsabilidade das VTCDs baseada na correlação dos fatores de desequilíbrio" 2021. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.377>.

*José Carlos de Oliveira é graduado em engenharia elétrica pela Unifei, com mestrado pela mesma instituição e doutorado pela University of Manchester Institute of Science and Technology. Foi professor titular da Universidade Federal de Itajubá de 1971 a 1981 e, no período de 1982 a 2017, ocupou a mesma posição junto a Universidade Federal de Uberlândia. Atualmente é professor colaborador do programa de pós-graduação da UFU onde continua exercendo atividades de ensino, pesquisa e extensão em sistemas elétricos de potência, com destaque a área da qualidade da energia elétrica.

Adrian Ribeiro Ferreira atua como Professor na Engenharia Elétrica e no curso Técnico em Eletrônica do Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM) Campus Paracatu-MG. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Triângulo Mineiro (2018). Mestre (2021) e doutorando na área de Qualidade da Energia Elétrica pelo Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica (NQEE) da Universidade Federal de Uberlândia.

Paulo Henrique Oliveira Rezende é professor na Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Obteve o título de Doutor (2016) e Mestre (2012) pela Universidade Federal de Uberlândia, ambos no Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica sob a orientação do Professor José Carlos de Oliveira. Nesta mesma Instituição graduou-se (2010) com certificado de estudos em Sistemas de Energia Elétrica (Eletrotécnica). Vinícius Henrique Farias Brito possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Mato Grosso (2016). Trabalhou na Prefeitura de Rondonópolis no cargo de Engenheiro Eletricista (2017 e 2018). Finalizou o mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (2020). Atualmente é aluno de Doutorado em Engenharia Elétrica, no Núcleo de Qualidade da Energia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia. Realiza pesquisas na área de Qualidade da Energia. Também atua como pesquisador em Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D).