

AVALIAÇÃO DOS INDICADORES DE VTCD COM BASE NO NÍVEL DE SENSIBILIDADE DOS EQUIPAMENTOS

MARCOS V. COSTA, JOSÉ M. C. FILHO

QmaP, Instituto de Sistemas Elétricos e Energia, Universidade Federal de Itajubá

E-mails: marcosvcost@gmail.com, jmaria@unifei.edu.br

Abstract— This paper presents an evaluation of voltage sags indices, especially the Impact Factor, proposed in the Brazilian regulatory scenario. In order to verify if this indice really reflects the impact suffered by consumers, its correlation with the number of equipment trips is assessed, which in turn is estimated using a probabilistic approach. Furthermore, new regions of sensitivity and weighting factors for the calculation of this indice are systematically defined, in order to obtain a higher correlation with the levels of sensitivity of different types of equipment widely used in modern industrial processes.

Keywords— Power quality, voltage sags, indices, equipment sensitivity.

Resumo— Este trabalho apresenta uma avaliação dos indicadores relativos às variações de tensão de curta duração, sobretudo do Fator de Impacto. A fim de verificar se tal indicador realmente reflete o impacto sofrido pelos consumidores, é avaliada a sua correlação com o número de desligamentos dos equipamentos, que por sua vez, é estimado utilizando uma abordagem probabilística. Além disso, são definidas, de maneira sistemática, novas regiões de sensibilidade e fatores de ponderação para o cálculo desse indicador, visando obter uma maior correlação com os níveis de sensibilidade de diferentes tipos de cargas utilizadas na indústria.

Palavras-chave— Qualidade da energia elétrica, variações de tensão de curta duração, indicadores, sensibilidade dos equipamentos.

1 Introdução

Com a modernização dos processos industriais e o desenvolvimento de novas tecnologias, a qualidade da energia elétrica (QEE) se tornou um assunto cada vez mais relevante, tanto para os consumidores quanto para as concessionárias.

Dentre os fatores que contribuíram para isso, pode-se citar o maior nível de sensibilidade dos equipamentos modernos frente aos problemas de QEE, a disseminação de cargas causadoras de distúrbios na rede e a própria desregulação do setor elétrico.

Ciente da relevância desse assunto, em 2013, a ANEEL contratou serviços especializados de consultoria, visando a obtenção de subsídios para o aperfeiçoamento da regulamentação que trata da qualidade do produto, constante no Módulo 8 do PRODIST. Apesar desse módulo abordar diversos fenômenos, até a sua revisão 7, somente a tensão em regime permanente era de fato regulada. Para os indicadores dos demais fenômenos, eram apresentados apenas valores de referência, sem nenhum tipo de penalidade quando da sua violação, e no caso das variações de tensão de curta duração (VTCD), não existiam sequer indicadores definidos, muito menos limites.

Assim, com base nos trabalhos realizados pela consultoria e nas contribuições recebidas no âmbito da Consulta Pública nº 18/2014 e da Audiência Pública nº 82/2015, entrou em vigor, no início de 2017, a revisão 8 do Módulo 8 do PRODIST, na qual foi definida uma metodologia própria para a avaliação das VTCD nas redes de distribuição, sendo criado um novo indicador, denominado Fator de Impacto (*FI*).

Com isso, houve grandes avanços no sentido de regulamentação desses fenômenos. No entanto, dado o caráter recente dessa metodologia, é de se esperar que alguns aprimoramentos ainda sejam necessários.

Neste contexto, este trabalho busca avaliar a adequação do indicador *FI*, considerando o nível de sensibilidade dos equipamentos frente às VTCD.

De modo a quantificar o impacto desses fenômenos sobre as indústrias, é estimado o número de desligamentos de alguns equipamentos amplamente utilizados nesse setor, por meio de uma abordagem probabilística, a qual leva em conta a incerteza envolvida na análise de sensibilidade das cargas.

Uma vez feito isso, é avaliada a correlação entre esse indicador e o número de desligamentos dos equipamentos, a fim de verificar se o mesmo realmente reflete o impacto sofrido pelos consumidores. Além disso, também são realizadas comparações com outros indicadores propostos na literatura técnica.

Por fim, são definidas, de maneira sistemática, novas regiões de sensibilidade e fatores de ponderação para o cálculo do Fator de Impacto, visando obter uma maior correlação com os níveis de sensibilidade de diferentes tipos de equipamentos.

2 Indicadores de VTCD

2.1 Fator de Impacto

Conforme definido no PRODIST (ANEEL, 2018), a contabilização dos eventos de VTCD deve ser realizada, em termos de magnitude e duração, de acordo com a estratificação apresentada na Tabela 1.

A magnitude do evento é dada pela amplitude da tensão residual em relação à tensão de referência, enquanto que a duração é dada pelo intervalo de tempo em que a tensão eficaz violou certo limite.

Dessa maneira, o Fator de Impacto deve ser calculado a partir da equação (1), considerando os eventos registrados no ponto de monitoramento dentro de um período de 30 dias consecutivos (ANEEL, 2018).

Tabela 1. Regiões de sensibilidade definidas para a contabilização dos eventos de VTCD (ANEEL, 2018).

Magnitude do evento [p.u]	Duração do evento [s]								
	[0,01667 - 0,1]	(0,1 - 0,3]	(0,3 - 0,6]	(0,6 - 1]	(1 - 3]	(3 - 60]	(60 - 180]		
> 1,15	H			I					
(1,10 - 1,15]									
(0,85 - 0,90]	A								
(0,80 - 0,85]									
(0,70 - 0,80]	B	D		G					
(0,60 - 0,70]									
(0,50 - 0,60]	C								
(0,40 - 0,50]									
(0,30 - 0,40]	E			F					
(0,20 - 0,30]									
(0,10 - 0,20]									
≤ 0,10									

$$FI = \frac{\sum_{i=A}^I (fe_i \cdot fp_i)}{FI_{BASE}} \quad (1)$$

sendo:

fe_i : frequência de eventos por região de sensibilidade;

fp_i : fator de ponderação; e

FI_{BASE} : Fator de Impacto Base.

Os fatores de ponderação e o Fator de Impacto Base são indicados na Tabela 2.

Tabela 2. Fatores definidos no PRODIST (ANEEL, 2018).

Região	fp	Frequência de ocorrência	
		(1 - 69) kV	[69 - 230) kV
A	0,00	-	-
B	0,04	5	4
C	0,07	4	3
D	0,15	3	2
E	0,25	2	1
F	0,36	1	1
G	0,07	4	1
H	0,02	1	1
I	0,04	1	1
FI_{BASE}		2,13	1,42

O Fator de Impacto Base, relativo a cada nível de tensão, é dado pelo somatório dos produtos dos fatores de ponderação pelas respectivas frequências de ocorrência. Ressalta-se que não são definidos limites por região de sensibilidade, sendo tais valores utilizados apenas como referência na obtenção de FI_{BASE} .

Assim sendo, para a avaliação das VTCD nas redes de distribuição, em média e em alta tensão, estabeleceu-se para o Fator de Impacto um valor de referência igual a 1 p.u.

2.2 Indicadores propostos na norma IEEE 1564

A norma IEEE 1564 (IEEE, 2014) propõe dois índices para a caracterização dos eventos de VTCD: o índice de severidade e o índice de energia.

O índice de severidade (Se) é obtido a partir da magnitude e duração do evento em combinação com uma curva de sensibilidade, conforme a equação (2).

$$Se = \frac{1 - Ve}{1 - V_{curva}(Te)} \quad (2)$$

sendo:

Ve : magnitude do evento (em p.u);

Te : duração do evento; e

$V_{curva}(Te)$: valor de magnitude dado pela curva de referência, para duração igual a Te .

Já o índice de energia (E_{VS}) é calculado de acordo com a equação (3).

$$E_{VS} = (1 - Ve^2) \cdot Te \quad (3)$$

Após calcular tais índices, pode-se quantificar o desempenho do ponto de monitoramento a partir da soma ou da média dos índices de cada evento registrado durante o período de apuração.

Os indicadores S_{site} e $S_{average}$ são calculados a partir do índice de severidade, com base nas equações (4) e (5), respectivamente (IEEE, 2014).

$$S_{site} = \sum_{i=1}^n Se_{(i)} \quad (4)$$

$$S_{average} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Se_{(i)} \quad (5)$$

sendo:

n : número de eventos registrados no ponto de monitoramento durante o período de apuração.

Do mesmo modo, pode-se obter os indicadores SEI e $ASEI$ a partir do índice de energia, conforme as equações (6) e (7), respectivamente (IEEE, 2014).

$$SEI = \sum_{i=1}^n E_{VS(i)} \quad (6)$$

$$ASEI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{VS(i)} \quad (7)$$

Esses indicadores se aplicam tanto para os afundamentos quanto para as elevações de tensão, com as devidas modificações. No entanto, recomenda-se que tais eventos sejam tratados de maneira separada, não devendo compor um único indicador (IEEE, 2014).

3 Sensibilidade dos equipamentos

3.1 Curvas de sensibilidade

O desempenho de um equipamento frente às VTCD é usualmente expresso através de curvas de sensibilidade, tais como a curva ITIC, CBEMA ou SEMI F47. Porém, ao utilizar curvas específicas para o equipamento analisado, pode-se obter resultados mais representativos a respeito de seu desempenho.

De acordo com os resultados de testes disponíveis na literatura técnica, em muitos casos, é possível representar a sensibilidade de uma carga por meio de uma curva retangular (Djokic, Milanovic and Kirschen, 2004), como mostra a Figura 1.

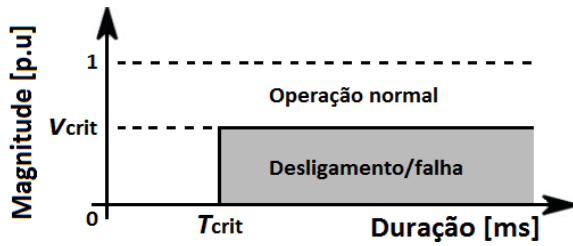


Figura 1. Curva de sensibilidade de um equipamento.

Ou seja, considera-se que a mesma é sensível a eventos de magnitude inferior a V_{crit} e duração superior a T_{crit} .

Entretanto, além de diferentes tipos de cargas possuírem curvas de sensibilidade distintas, os equipamentos de um mesmo tipo não possuem um único padrão de comportamento, podendo haver variações significativas devido a diferenças de fabricante, modelo, entre outras. Assim, para cada tipo analisado, não haverá uma única curva de sensibilidade, mas sim uma família de curvas (Gupta and Milanovic, 2006).

A Figura 2 indica as regiões que seriam obtidas se fossem testadas várias amostras de um determinado tipo de equipamento.

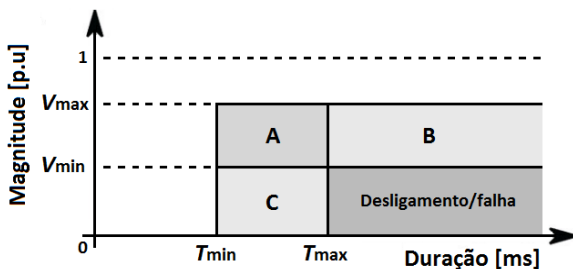


Figura 2. Incerteza ao avaliar a sensibilidade de um determinado tipo de equipamento (Gupta and Milanovic, 2006).

Cada amostra testada teria uma curva de sensibilidade própria, definida por um ponto (T_{crit} , V_{crit}) dentro da região A. Assim, os eventos com magnitude inferior a V_{min} e duração superior a T_{max} levariam à falha de todas as amostras, enquanto que nenhuma delas seria afetada por eventos com magnitude superior a V_{max} ou duração inferior a T_{min} . Já os eventos nas regiões A, B e C levariam à falha de algumas amostras, mas nem todas.

Logo, pode-se assumir que a sensibilidade do equipamento varia entre duas curvas, uma de sensibilidade mínima, dada pelo ponto (T_{max} , V_{min}), e outra de sensibilidade máxima, dada pelo ponto (T_{min} , V_{max}), as quais delimitam uma região de incerteza quanto ao seu desempenho frente às VTCD.

3.2 Sensibilidade dos equipamentos trifásicos

Ao avaliar a sensibilidade de um equipamento trifásico, deve-se levar em conta que diferentes combinações de tensão nas três fases resultam em diferentes efeitos na sua operação (Djokic *et al*, 2005).

Assumindo que a maioria das VTCD são causadas por faltas no sistema elétrico, pode-se limitar o número de combinações possíveis. Uma das alternativas consiste em classificar os eventos em função do número de fases em que houve redução da tensão, conforme os tipos definidos a seguir (CIGRE, 2010):

- tipo I: redução mais severa da tensão em uma das fases;
- tipo II: redução severa em duas das fases;
- tipo III: a tensão nas três fases é reduzida na mesma proporção.

A consideração de curvas de sensibilidade referentes aos três tipos de eventos permite uma avaliação mais precisa do desempenho do equipamento, pois se os testes fossem realizados em uma única fase por vez (tipo I), a sua sensibilidade poderia ser subestimada, enquanto que a aplicação de eventos de mesma magnitude e duração nas três fases simultaneamente (tipo III) poderia levar a uma avaliação sobrestimada da sua sensibilidade (Djokic *et al*, 2005).

3.3 Obtenção do tipo dos eventos

Para a classificação dos eventos, é utilizado o método proposto em (Bollen, Goossens and Robert, 2004).

O primeiro passo consiste em ordenar os valores de magnitude registrados nas três fases em ordem crescente, sendo obtidos V_X , V_Y e V_Z ($V_X \leq V_Y \leq V_Z$).

Em seguida, os eventos são separados conforme as seguintes condições (CIGRE, 2010):

- se $(V_Z - V_Y) < (V_Y - V_X)$: os dois maiores valores de magnitude são próximos, podendo se tratar de um evento tipo I ou tipo III;
- se $(V_Z - V_Y) \geq (V_Y - V_X)$: os dois menores valores de magnitude são próximos, indicando um evento tipo II ou tipo III.

Para distinguir entre os eventos tipo I e tipo III, compara-se a média dos dois maiores valores de magnitude ($V_{YZ} = (V_Y + V_Z)/2$) com o menor (V_X):

- se $V_{YZ} < 0,3 + 0,7 V_X$: o evento é tipo III;
- se $V_{YZ} \geq 0,3 + 0,7 V_X$: o evento é tipo I.

A distinção entre os eventos tipo II e tipo III é feita de maneira similar, comparando-se o maior valor de magnitude (V_Z) com a média dos dois menores ($V_{XY} = (V_X + V_Y)/2$):

- se $V_Z < 0,3 + 0,7 V_{XY}$: o evento é tipo III;
- se $V_Z \geq 0,3 + 0,7 V_{XY}$: o evento é tipo II.

3.4 Parâmetros de sensibilidade adotados

De modo a quantificar o impacto das VTCD sobre os consumidores, é estimado o número de desligamentos de quatro tipos de equipamentos amplamente utilizados na indústria (Gupta and Milanovic, 2006), sendo estes: o controlador lógico programável (CLP), o computador (PC), o contator e o inversor.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros adotados para cada tipo de equipamento, tendo como base os resultados de testes publicados na literatura técnica:

- CLP: (Gupta and Milanovic, 2006; Chan and Milanovic, 2007; Bodnar *et al*, 2016a; 2016b; Wu, Y. *et al*, 2016);
- PC: (Djokic *et al*, 2005; Gupta and Milanovic, 2006; Chan and Milanovic, 2007; Bok, Drapela and Toman, 2008; Bodnar *et al*, 2016a; 2016b);
- contator: (Djokic, Milanovic and Kirschen, 2004; Chan and Milanovic, 2007; Escribano, H. *et al*, 2012; Shareef *et al*, 2010);
- inversor: (Djokic *et al*, 2005; Gupta and Milanovic, 2006; Chan and Milanovic, 2007; Bodnar *et al*, 2016a; 2016b).

Tabela 3. Parâmetros adotados para cada tipo de equipamento.

Equipamento	Vmin [%]	Vmax [%]	Tmin [ms]	Tmax [ms]
CLP	25	80	20	400
PC	25	65	40	450
Contator	35	70	10	80
Inversor (I)	15	85	10	450
Inversor (II)	45	85	10	175
Inversor (III)	55	90	10	150

Como os inversores são equipamentos trifásicos, foram definidos diferentes níveis de sensibilidade para cada tipo de evento (tipos I, II e III), e para os contadores, considerou-se somente as curvas referentes aos ângulos de 0° e 90° (as quais englobam as demais), sendo a primeira aproximada por curvas retangulares.

4 Estimando o número de desligamentos

Assumindo que o desempenho de um equipamento possa ser representado por uma curva de sensibilidade retangular, definida por um ponto (T_{crit} , V_{crit}), pode-se estimar o número de desligamentos desse tipo de equipamento conhecendo como os valores de V_{crit} e T_{crit} se distribuem entre V_{min} e V_{max} e entre T_{min} e T_{max} , respectivamente (Gupta and Milanovic, 2006).

A distribuição das variáveis V_{crit} e T_{crit} pode ser obtida por meio de testes, sendo necessário um grande número de amostras para isso, ou pode-se assumir que tais variáveis seguem uma distribuição específica, sendo algumas opções:

- Distribuição uniforme: probabilidades iguais da sensibilidade do equipamento ser definida por um ponto qualquer dentro da região A (vide Figura 2);
- Distribuição normal: maior probabilidade da sensibilidade do equipamento ser definida por um ponto no centro da região A;
- Distribuição exponencial (crescente para V_{crit} e decrescente para T_{crit}): maior probabilidade da sensibilidade do equipamento ser definida por um ponto próximo ao canto superior esquerdo da região A;
- Distribuição exponencial (decrescente para V_{crit} e crescente para T_{crit}): maior probabilidade do ponto (T_{crit} , V_{crit}) estar próximo ao canto inferior direito da região A.

O número de desligamentos do equipamento pode ser estimado utilizando funções de massa de probabilidade ou funções de distribuição acumulada (Gupta and Milanovic, 2006):

4.1 Utilizando funções de massa de probabilidade

Sendo V_{crit} e T_{crit} variáveis aleatórias discretas e independentes, tem-se as funções de massa de probabilidade dadas pelas equações (8) e (9).

$$f_{V_{crit}}(x) = P(V_{crit} = x) \quad (8)$$

$$f_{T_{crit}}(x) = P(T_{crit} = x) \quad (9)$$

A probabilidade da curva de sensibilidade do equipamento ser definida pelo ponto (T , V) é igual à probabilidade de V_{crit} ser igual à V e de T_{crit} ser igual a T , podendo ser calculada pela equação (10).

$$P_{curva}(T, V) = f_{V_{crit}}(V) \cdot f_{T_{crit}}(T) \quad (10)$$

Assim, o número estimado de desligamentos (ENT) pode ser obtido a partir da equação (11).

$$ENT = \sum_{i=1}^{n_T} \sum_{k=1}^{n_V} P_{curva}(T_i, V_k) \cdot Ne(T_i, V_k) \quad (11)$$

sendo:

$Ne(T_i, V_k)$: número de eventos com magnitude inferior a V_k e duração superior a T_i ;

$n_V.n_T$: número de combinações das variáveis V_{crit} e T_{crit} , de modo que $\sum_{i=1}^{n_T} \sum_{k=1}^{n_V} P_{curva}(T_i, V_k) = 1$.

4.2 Utilizando funções de distribuição acumulada

Supondo um evento de magnitude Ve e duração Te , a probabilidade do mesmo resultar no desligamento do equipamento analisado é dada pelo somatório das probabilidades associadas às curvas de sensibilidade que englobam tal evento (definidas por valores de V_{crit} superiores Ve e por valores de T_{crit} inferiores a Te). Assim, pode-se considerar as funções de distribuição acumulada dadas pelas equações (12) e (13).

$$F_{V_{crit}}(x) = P(V_{crit} \leq x) \quad (12)$$

$$F_{T_{crit}}(x) = P(T_{crit} \leq x) \quad (13)$$

Logo, a probabilidade de desligamento do equipamento pode ser calculada a partir da equação (14).

$$P_{trip}(Te, Ve) = (1 - F_{V_{crit}}(Ve)) \cdot F_{T_{crit}}(Te) \quad (14)$$

Dessa forma, pode-se estimar o seu número de desligamento através da equação (15).

$$ENT = \sum_{i=1}^n P_{trip}(Te_i, Ve_i) \quad (15)$$

5 Base de dados utilizada

As análises apresentadas neste trabalho foram realizadas considerando uma base de dados proveniente de um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) financiado pela EDP, sendo composta pelos resultados de medições obtidos a partir de 61 pontos de monitoramento, instalados em subestações da EDP São Paulo e EDP Espírito Santo, durante o período de um ano.

6 Relação entre os indicadores de VTCD e o número de desligamentos dos equipamentos

Para que um indicador seja considerado adequado do ponto de vista de sensibilidade das cargas, o ideal seria que o mesmo fosse diretamente proporcional ao número de desligamentos dos equipamentos.

Com base nessa premissa, foram feitas análises de correlação entre os indicadores de VTCD e os valores mensais de ENT , utilizando para isso o coeficiente de correlação de Pearson, o qual permite avaliar o grau de associação linear entre duas variáveis.

Tal coeficiente varia entre -1 e 1 , sendo que valores próximos de 1 indicam que as variáveis são diretamente proporcionais, ou seja, um aumento no número de desligamentos seria seguido por um aumento no valor do indicador quase que na mesma proporção.

Os valores de ENT foram calculados conforme o método descrito em 4.2, o qual os autores julgaram ser mais fácil de implementar, sendo assumido que as variáveis V_{crit} e T_{crit} possuem distribuição normal.

No caso dos inversores, os valores de ENT foram calculados considerando os eventos tipos I, II e III de maneira separada, e então, somados.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 4. Coeficientes de correlação de Pearson.

Indicador	CLP	PC	Contator	Inversor
FI	0,739	0,624	0,791	0,874
$Ssite$	0,797	0,738	0,778	0,824
$Saverage$	0,405	0,427	0,352	0,319
SEI	0,295	0,337	0,241	0,219
$ASEI$	0,221	0,265	0,165	0,140

Em cada análise, foi realizado um teste de hipóteses quanto ao coeficiente de correlação populacional (ρ), considerando as hipóteses $H_0: \rho = 0$ e $H_1: \rho > 0$. Em todos os casos, foi obtido um valor-p inferior a 0,1%, permitindo rejeitar a hipótese nula (H_0) ao nível de significância 5%, adotado nos testes.

Com relação ao Fator de Impacto, apesar dos valores de coeficiente relativamente altos, verificou-se um número razoável de observações para as quais o valor desse indicador é baixo, mesmo quando se tem um número elevado de desligamentos. Por exemplo, foram verificados valores de ENT próximos de 5, no caso dos CLPs e PCs, e próximos de 7, no caso dos contadores e inversores, associados a valores de FI inferiores a 1 p.u. Dessa forma, podem haver meses em que o consumidor sofra várias paradas de processo, sem que isso seja refletido no valor desse indicador.

Também há observações em que ocorre o oposto, embora em menor proporção, podendo resultar em uma avaliação sobrestimada do impacto das VTCD.

Como pode-se notar, os resultados obtidos para o indicador $Ssite$ são próximos aqueles obtidos para o Fator de Impacto. De fato, a metodologia de cálculo desses dois indicadores é semelhante, isto é, para cada evento é atribuído um peso em função da sua severidade, e em seguida, as contribuições de todos os eventos registrados no período são somadas. Para o indicador FI , os pesos correspondem aos fatores de ponderação divididos por FI_{BASE} , e para o indicador $Ssite$, correspondem aos valores do índice Se .

Outra característica semelhante é que a contribuição de cada evento é limitada a partir de certos valores de magnitude e duração, não permitindo que os eventos mais severos tornem insignificante a parcela relativa aos eventos menos severos. Para o indicador FI , a contribuição máxima é igual a 0,17 (0,36/2,13), e para o indicador $Ssite$, igual a 10 (considerando a curva SEMI F47 como referência no cálculo do índice Se).

Do ponto de vista de sensibilidade das cargas, isso faz sentido, pois assume-se que os eventos muito severos têm o mesmo efeito sobre o desempenho dos equipamentos. Por exemplo, com base na Tabela 3,

verifica-se que uma interrupção de 2 minutos resultaria na falha dos equipamentos analisados do mesmo modo que uma interrupção de 1 minuto, logo, é plausível atribuir o mesmo peso para ambos os eventos.

Quanto ao indicador *Saverage*, foram obtidos coeficientes de correlação menores. Sendo tal indicador calculado a partir da média dos índices de severidade dos eventos registrados no período, tem-se um efeito de atenuação. Ou seja, como o número de eventos com valores de *Se* baixos tende a ser muito maior do que o número de eventos com valores altos, a contribuição média acaba se tornando reduzida. Além disso, se por um lado uma maior frequência de ocorrência de eventos tende a diminuir o valor desse indicador, por outro lado tende a aumentar o número de desligamentos.

O indicador *SEI*, assim como os indicadores *FI* e *Ssite*, também é dado pela soma das contribuições dos eventos registrados no período. Porém, como o índice *Evs* não é limitado como o índice *Se*, os eventos mais longos tendem a apresentar uma contribuição muito maior do que os eventos mais curtos. Por exemplo, uma interrupção de 2 minutos teria um valor de *Evs* 60 vezes maior do que uma interrupção de 2 segundos, embora ambos os eventos tenham o mesmo efeito sobre os equipamentos analisados (vide Tabela 3).

Os piores resultados em termos de coeficiente de correlação foram obtidos para o indicador *ASEI*. Como tal indicador é calculado a partir da média dos índices de energia dos eventos, tem-se as mesmas desvantagens que os indicadores *Saverage* e *SEI*. Ou seja, além do efeito de atenuação, tem-se o efeito de sombreamento devido aos eventos de maior duração.

7 Proposição de novos parâmetros para o cálculo do Fator de Impacto

Quanto maior a compatibilidade entre os fatores de ponderação e o nível de sensibilidade das cargas, maior será a correlação entre o Fator de Impacto e os valores de *ENT*.

Partindo dessa premissa, pode-se assumir que os fatores mais adequados seriam aqueles proporcionais à probabilidade de desligamento dos equipamentos.

Conforme discutido em 4.2, a probabilidade de um afundamento de tensão resultar na falha de um

equipamento específico pode ser calculada através da equação (14). Com base nessa equação, são obtidos fatores de ponderação para cada uma das classes definidas na Tabela 1, exceto para aquelas referentes às elevações de tensão.

Porém, como pode-se observar nessa tabela, cada classe é delimitada por dois valores de magnitude e de duração: um inferior (*Td* e *Vd*) e outro superior (*Tu* e *Vu*). Assim, para obter o fator correspondente a determinada classe, é utilizada a equação (16).

$$fp_i = \frac{1}{2} (P_{trip}(Td_i, Vu_i) + P_{trip}(Tu_i, Vd_i)) \quad (16)$$

Ou seja, considera-se a média entre probabilidade mínima ($P_{trip}(Td, Vu)$) e a probabilidade máxima ($P_{trip}(Tu, Vd)$) de desligamento do equipamento associadas a essa classe.

No caso dos inversores, como foram definidos níveis de sensibilidade distintos para cada tipo de evento, são obtidos três fatores de ponderação por classe. Assim, para obter os fatores equivalentes, relativos a esse equipamento, é utilizada a equação (17).

$$fp_i = 0,60 \cdot fp_{(I)i} + 0,26 \cdot fp_{(II)i} + 0,13 \cdot fp_{(III)i} \quad (17)$$

Para cada fator, é atribuído um peso igual às respectivas taxas de ocorrência dos eventos tipos I, II e III, calculadas a partir dos resultados de medições provenientes do projeto de P&D supracitado.

Dessa maneira, são obtidos fatores de ponderação correspondentes a cada tipo de carga analisada.

Verificou-se que, ao aplicar os fatores ajustados para certo equipamento, obtinha-se um aumento significativo do coeficiente de correlação associado ao mesmo. Assim, visando estabelecer um único conjunto de fatores, poderia ser feita a média ponderada dos fatores relativos aos quatro tipos de equipamentos.

No entanto, neste trabalho é feita a média simples, de modo a não priorizar nenhum tipo específico, sendo obtidos os fatores indicados na Tabela 5.

Todavia, como não seria prático a adoção de um fator de ponderação por classe, é feito o agrupamento das classes com fatores próximos, sendo estabelecidas as regiões de sensibilidade exibidas na Tabela 6.

Tabela 5. Fatores de ponderação obtidos para cada classe de magnitude e duração.

Magnitude do evento [p.u]	Duração do evento [s]						
	[0,01667 - 0,1]	(0,1 - 0,3]	(0,3 - 0,6]	(0,6 - 1]	(1 - 3]	(3 - 60]	(60 - 180)
(0,85 - 0,90]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(0,80 - 0,85]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
(0,70 - 0,80]	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
(0,60 - 0,70]	0,04	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
(0,50 - 0,60]	0,12	0,30	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
(0,40 - 0,50]	0,16	0,55	0,72	0,73	0,73	0,73	0,73
(0,30 - 0,40]	0,17	0,62	0,92	0,95	0,95	0,95	0,95
(0,20 - 0,30]	0,17	0,63	0,96	1,00	1,00	1,00	1,00
(0,10 - 0,20]	0,17	0,63	0,96	1,00	1,00	1,00	1,00
≤ 0,10	0,17	0,63	0,96	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabela 6. Regiões de sensibilidade propostas para o cálculo do indicador FI .

Magnitude do evento [p.u]	Duração do evento [s]						
	[0,01667 - 0,1]	(0,1 - 0,3]	(0,3 - 0,6]	(0,6 - 1]	(1 - 3]	(3 - 60]	(60 - 180]
(0,85 - 0,90]	A						
(0,80 - 0,85]							
(0,70 - 0,80]	B						
(0,60 - 0,70]							
(0,50 - 0,60]	C	D					
(0,40 - 0,50]		E	G				
(0,30 - 0,40]			F				
(0,20 - 0,30]							
(0,10 - 0,20]							
$\leq 0,10$							

Para definir o fator de ponderação relativo a cada uma dessas regiões, foram avaliadas diversas combinações de fatores, considerando as seguintes faixas de variação e passos:

- Região B: de 0,02 a 0,08, em passos de 0,01;
- Região C: de 0,08 a 0,24, em passos de 0,02;
- Região D: de 0,24 a 0,44, em passos de 0,02;
- Região E: de 0,44 a 0,68, em passos de 0,02;
- Região F: de 0,68 a 1,00, em passos de 0,02;
- Região G: de 0,68 a 0,82, em passos de 0,02.

Logo, foram testadas ao todo 504504 combinações. Os valores de FI foram recalculados para cada uma delas, resultando em novos valores para os coeficientes de correlação de Pearson. Dentre tais combinações, selecionou-se aquela que atendia aos seguintes requisitos (em ordem):

- Coeficientes de correlação maiores ou iguais a 0,900 para os quatro tipos de equipamento;
- Maior média dos coeficientes de correlação;
- Menor desvio máximo dos coeficientes de correlação em relação à média;
- Maior coeficiente de correlação máximo.

Os fatores de ponderação selecionados são indicados na coluna 2 da Tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros propostos para o cálculo do indicador FI .

Região	f_p	Frequência de ocorrência	
		(1 - 69) kV	[69 - 230) kV
A	0,00	-	-
B	0,04	7	4
C	0,08	5	3
D	0,32	3	2
E	0,52	2	1
F	0,94	1	1
G	0,76	1	1
FI_{BASE}		4,38	3,26

Com a alteração das regiões de sensibilidade, também foi necessário redefinir as frequências de ocorrência consideradas no cálculo do Fator de Impacto Base, sendo propostos os valores indicados nas colunas 3 e 4 da Tabela 7.

Os valores de FI_{BASE} foram obtidos da mesma maneira como é feito no PRODIST, isto é, a partir do somatório dos produtos dos fatores de ponderação pelas frequências de ocorrência.

Vale ressaltar que a alteração do Fator de Impacto Base não altera os coeficientes de correlação, podendo ser definidos novos valores para tal parâmetro a partir apenas do ajuste das frequências de ocorrência.

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos ao considerar os valores de FI calculados com base nos parâmetros propostos, comparando-os com aqueles apresentados na Seção 6.

Tabela 8. Coeficientes de correlação obtidos com base nos parâmetros definidos no PRODIST e nos parâmetros propostos.

Parâmetros	CLP	PC	Contator	Inversor
PRODIST	0,739	0,624	0,791	0,874
Propostos	0,952	0,902	0,916	0,902

Como pode-se observar, tem-se um aumento significativo dos coeficientes de correlação associados aos quatro tipos de equipamentos, e além disso, há um maior equilíbrio entre eles, sendo verificada uma diferença menos expressiva entre o maior e o menor valor.

8 Conclusões

Neste trabalho buscou-se avaliar a adequação do indicador FI , a fim de verificar se tal indicador realmente reflete o impacto das VTCD sobre os consumidores, sendo analisada a sua correlação com o número de desligamentos dos equipamentos, considerando quatro tipos de cargas amplamente utilizadas na indústria.

Ressalta-se que para estimar o número de desligamentos, também foi levada em conta a incerteza envolvida na análise de sensibilidade das cargas.

Com base nos resultados obtidos tanto para o Fator de Impacto quanto para os indicadores propostos na norma IEEE 1564, verifica-se que a metodologia

de cálculo do indicador *FI* parece ser a mais adequada para a avaliação do impacto das VTCD sobre os consumidores, já que os maiores valores de coeficiente de correlação foram obtidos para este indicador e para o indicador *Ssite*, os quais apresentam metodologias de cálculo semelhantes.

Ou seja, do ponto de vista de sensibilidade das cargas, o mais plausível é realizar a soma ponderada das contribuições referentes às ocorrências registradas no período, assumindo que, a partir de certos valores de magnitude e duração, os eventos têm o mesmo efeito sobre a operação dos equipamentos.

Em seguida, com o intuito de obter uma maior correlação com os níveis de sensibilidade das cargas, foram calculados fatores de ponderação para cada uma das classes definidas na tabela de contabilização de eventos de VTCD apresentada no Módulo 8 do PRODIST, considerando a probabilidade de desligamento dos equipamentos, e, através do agrupamento das classes com fatores próximos, foram estabelecidas novas regiões de sensibilidade para o cálculo do indicador *FI*.

Para definir o fator de ponderação relativo a essas regiões, foram testadas diversas combinações de fatores, dentre as quais selecionou-se aquela que melhor atendeu alguns requisitos pré-estabelecidos.

Com base nos resultados apresentados, pode-se dizer que os parâmetros propostos neste trabalho estão mais correlacionados com o nível de sensibilidade das cargas do que aqueles definidos no PRODIST.

Além disso, para a sua proposição, foi definida uma metodologia sistemática, a qual pode ser facilmente reproduzida, a fim de ajustar os parâmetros propostos, considerando bases de dados mais amplas ou a inclusão de outros tipos de equipamentos.

Vale destacar que foram considerados apenas os aprofundamentos de tensão, não sendo propostos critérios para a avaliação das elevações, devendo tais eventos serem tratados de maneira separada, conforme recomenda a norma IEEE 1564.

Além do mais, a metodologia utilizada neste trabalho não é aplicável às elevações de tensão, no que se refere ao método de classificação dos eventos e ao método aplicado para estimar o número de desligamentos. Sendo assim, seria necessário estabelecer outros critérios para avaliar o desempenho das cargas trifásicas frente a esses fenômenos e também para quantificar o seu impacto sobre os consumidores.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à EDP pelo financiamento do projeto de P&D e pelo apoio prestado na realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas

ANEEL (2018) Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - PRODIST, Módulo 8 - revisão 10. Brasília.

- Bodnar, R. et al (2016a). Methodology for determination of the number of equipment malfunctions due to voltage quality. 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), IEEE. pp. 1–6.
- Bodnar, R. et al (2016b). Methodology for quantification of equipment trips due to voltage sags. 2016 ELEKTRO, IEEE. pp. 264–268.
- Bok, J., Drapela, J. and Toman, P. (2008). Personal computers immunity to short voltage dips and interruptions. 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power, IEEE. pp. 1–6.
- Bollen, M.H.J., Goossens, P. and Robert, A. (2004). Assessment of voltage dips in HV-networks: deduction of complex voltages from the measured RMS voltages. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 19, n. 2, pp. 783–790.
- Chan, J.Y. and Milanovic, J.V. (2007). Severity indices for assessment of equipment sensitivity to voltage sags and short interruptions. 2007 Power Engineering Society General Meeting, IEEE. pp. 1–7.
- CIGRE (2010). Joint Working Group C4.110. Voltage dip immunity of equipment and installations. Technical Brochure 412.
- Djokic, S.Z. et al (2005). Sensitivity of AC adjustable speed drives to voltage sags and short interruptions. IEEE Transactions on Power Delivery, 20(1), pp. 494–505.
- Djokic, S.Z. et al (2005). Sensitivity of personal computers to voltage sags and short interruptions. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 20, n. 1, pp. 375–383.
- Djokic, S.Z., Milanovic, J.V. and Kirschen, D.S. (2004). Sensitivity of AC coil contactors to voltage sags, short interruptions, and undervoltage transients. IEEE Transactions on Power Delivery, 19(3), pp. 1299–1307.
- Gupta, C.P. and Milanovic, J.V. (2006). Probabilistic assessment of equipment trips due to voltage sags. IEEE Transactions on Power Delivery. v. 21, n. 2, pp. 711–718.
- Gupta, C.P. and Milanovic, J.V. (2006). Probabilistic methods for counting equipment trips due to voltage sags. International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, IEEE. pp. 1–8.
- Escribano, A.H. et al (2012). Influence of voltage dips on industrial equipment: Analysis and assessment. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 41(1), pp. 87–95.
- IEEE (2014). IEEE Std 1564-2014- Guide for Voltage Sag Indices. New York.
- Shareef, H. et al (2010). Experimental investigation of ac contactor ride through capability during voltage sag. 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering. IEEE. pp. 325–328.
- Wu, Y. et al (2016). Characterizing the tolerance performance of PLCs to voltage sag based on experimental research. 2016 APPEEC, IEEE. pp. 496–501.