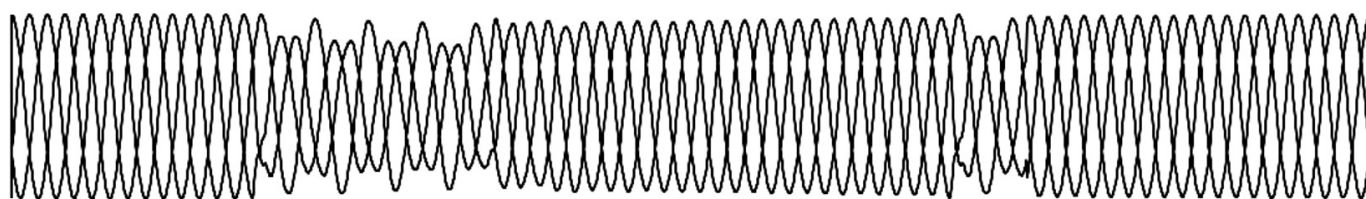


TUTORIAL

Agregação de Eventos de Variação de Tensão de Curta Duração

Revisão 5 – Abril/2020



Prof. Dr. José Rubens Macedo Jr.



Contribuíram para a revisão deste Tutorial:

Prof. Dr. José Carlos de Oliveira - UFU
Prof. Dr. Isaque Nogueira Gondim - UFU
Eng. Jules Renato Viana Carneiro, M.Sc. - EDP ESCELSA

SUMÁRIO

1) Introdução	4
2) Fundamentos teóricos	4
3) Agregação de eventos	8
3.1) Agregação de fases	8
3.2) Agregação temporal	11
4) Referências bibliográficas	12
Apêndice A (Exemplo de aplicação – Agregação de eventos)	13
Apêndice B (Exemplo de aplicação – Cálculo do Fator de Impacto)	15

1) Introdução

O módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST [1], em sua oitava revisão, apresenta aspectos específicos associados com a caracterização dos eventos de variação de tensão de curta duração (VTCD). Nesse sentido, o item 8.2.2 do módulo 8 do PRODIST estabelece de forma clara e objetiva os equacionamentos para caracterização de um evento individual de VTCD. Ao mesmo tempo, o item 9.1.11 estabelece a necessidade de agregação de eventos simultâneos e/ou consecutivos visando a consolidação do indicador denominado Fator de Impacto (FI), o qual, por sua vez, caracteriza a severidade da incidência de eventos de VTCD em um determinado ponto de monitoração. Diante desse contexto, o objetivo principal deste tutorial é apresentar os conceitos relacionados ao processo de agregação de eventos de variação de tensão de curta duração, assim como apresentar exemplos práticos de aplicação para as diversas situações passíveis de ocorrência nos sistemas elétricos de uma forma geral.

2) Fundamentos teóricos

Conforme estabelecido na bibliografia pertinente ao tema [1-3], um evento individual de variação de tensão de curta duração deve ser caracterizado pela sua duração e amplitude. No caso do PRODIST, as expressões utilizadas para determinação da amplitude e duração de um evento individual de VTCD são indicadas em (1) e (2), respectivamente:

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

onde

V_e é a amplitude do evento de VTCD (em %);

V_{res} é a tensão eficaz residual do evento de VTCD (em Volt);

V_{ref} é a tensão eficaz de referência (em Volt).

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

onde

Δt_e é a duração do evento de VTCD (em milissegundos);

t_f é o instante final do evento de VTCD;

t_i é o instante inicial do evento de VTCD.

A caracterização de um evento de VTCD deve ser efetuada considerando-se a variação momentânea ou temporária da tensão eficaz em um determinado barramento ou ponto de conexão. Nesse sentido, torna-se importante a definição do método de registro da tensão eficaz ao longo do tempo. Assim, o valor eficaz deve ser calculado com base nos valores discretos amostrados diretamente da tensão instantânea, conforme expressão (3).

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2} \quad (3)$$

sendo

N o número de amostras da tensão instantânea por ciclo da tensão fundamental;

v_i a i -ésima amostra da tensão instantânea em cada ciclo;

V_{rms} o valor eficaz calculado para uma janela de 1 ciclo de duração da tensão instantânea.

A referência [2] determina que a equação (3) deve ser aplicada a cada ciclo da tensão instantânea, a partir da passagem por zero, com atualização (ou deslizamento de janela) a cada $\frac{1}{2}$ ciclo. A referência [3], de forma particular, também considera o cálculo do valor eficaz para janelas consecutivas de 1 ciclo de duração, estabelecendo, porém, duas formas possíveis de deslizamento das janelas de cálculo do valor eficaz. Dessa forma, são especificados deslizamentos de janela a cada $\frac{1}{2}$ ciclo para medidores Classe A e 1 ou $\frac{1}{2}$ ciclo para medidores Classe S. Adicionalmente, as terminologias $V_{rms(1)}$ e $V_{rms(1/2)}$ são comumente utilizadas para diferenciar essas duas formas de cálculo do valor eficaz. A Figura 1 ilustra de forma simplificada o processo de obtenção do valor eficaz considerando-se os procedimentos de cálculo associados com $V_{rms(1)}$ e $V_{rms(1/2)}$.

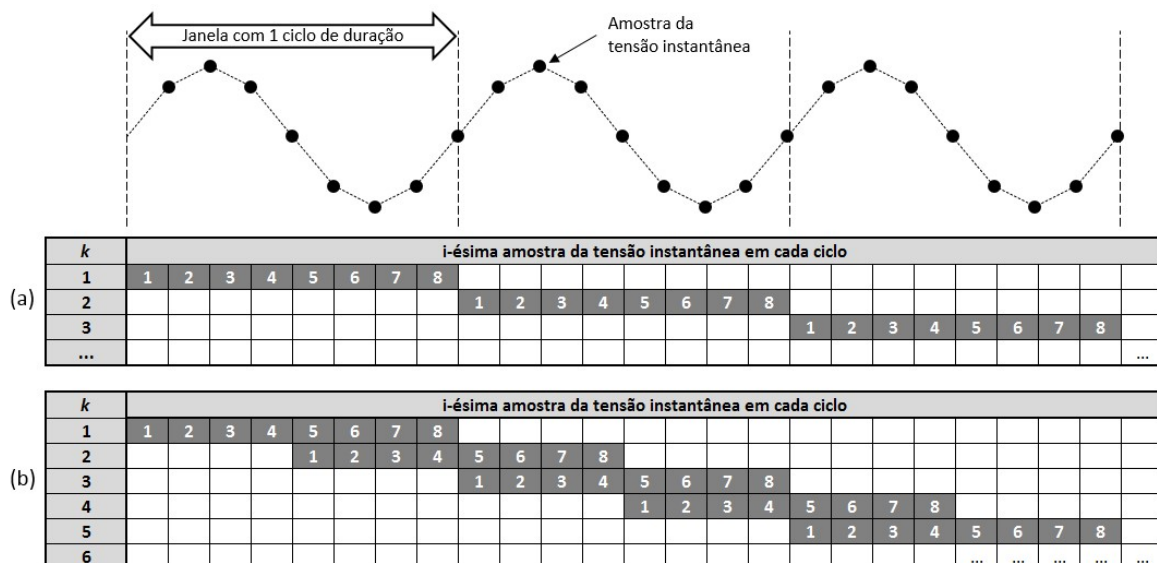


Figura 1 – Exemplo de cálculo do k -ésimo valor eficaz considerando-se uma tensão instantânea amostrada a uma taxa de 8 amostras por ciclo, sendo: (a) deslizamento da janela amostral a cada ciclo [$V_{rms(1)}$] e (b) deslizamento da janela amostral a cada $\frac{1}{2}$ ciclo [$V_{rms(1/2)}$].

A Figura 2 ilustra, a título de exemplo, os resultados obtidos para o cálculo da duração e amplitude de um mesmo evento de VTCD, com 33,33 ms (2 ciclos) de duração e 20% de amplitude, com início em 45° na onda de tensão instantânea, considerando-se $V_{rms(1)}$ e $V_{rms(1/2)}$.

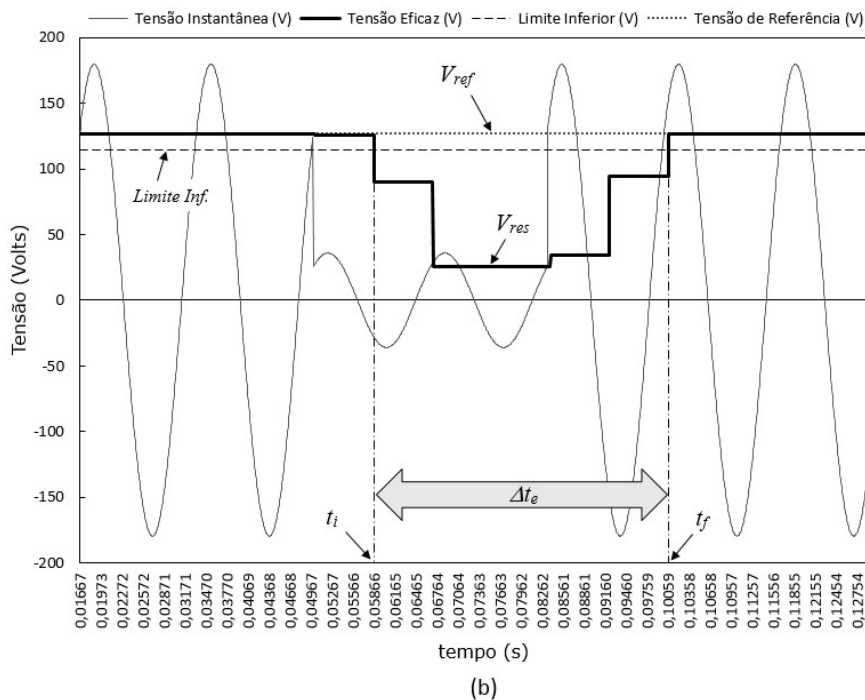
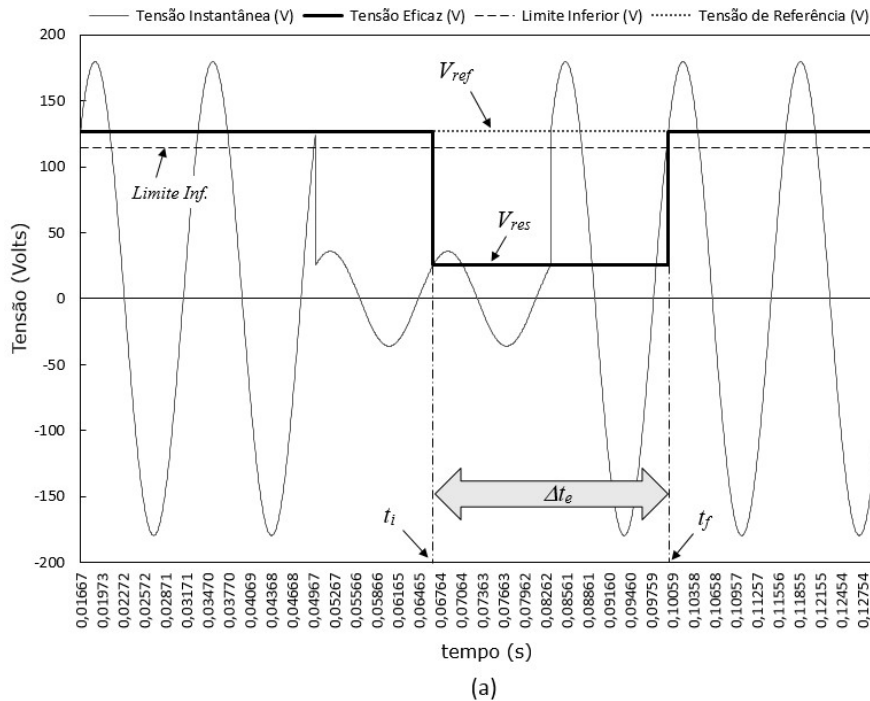


Figura 2 – Caracterização de um mesmo evento de VTCD considerando-se o cálculo do valor eficaz da tensão de duas formas distintas: (a) deslizamento da janela amostral a cada ciclo [Vrms(1)] e (b) deslizamento da janela amostral a cada ½ ciclo [Vrms(1/2)].

Analisando-se os resultados indicados na Figura 2, evidencia-se uma diferença entre os atributos do evento para as duas formas de cálculo consideradas. No caso da Figura 2(b), a duração do evento é aproximadamente ½ ciclo maior que a duração calculada na Figura 2(a). De fato, diferenças entre as duas formas de cálculo do valor eficaz, notadamente em termos de duração, poderão eventualmente ocorrer no caso de eventos muito rápidos ($\Delta t_e < 3$ ciclos).

Um outro conceito importante relacionado com a caracterização de eventos de VTCD diz respeito à utilização de um limite de histerese para definição da duração de cada evento. A terminologia histerese utilizada nesse contexto não deve ser confundida com fenômeno da histerese magnética, responsável pelo atraso entre a densidade de fluxo e o campo magnético em materiais ferromagnéticos. No contexto específico das VTCDs, essa terminologia representa um limite um pouco maior (ou menor, no caso das Elevações Momentâneas de Tensão) para identificação do instante final de um evento. Essa prática torna-se importante no caso de eventos nos quais a tensão comporta-se de forma oscilante em torno do limiar de identificação do instante final do evento, podendo levar a erros de interpretação que resultem na caracterização de múltiplos eventos quando, na realidade, se trata de um único evento de VTCD. A Figura 3 ilustra a aplicação da histerese na caracterização de eventos de afundamentos e elevações momentâneas de tensão.

Apesar do fato de que o uso da histerese não se encontra indicado de forma explícita no PRODIST, o mesmo documento, em seu item 9.1.3, estabelece que os instrumentos de medição devem atender aos requisitos mínimos estabelecidos na norma IEC 61000-4-30. Dessa forma, em consonância com o estabelecido em [3], **o valor de histerese típico a ser considerado pelos medidores de parâmetros da qualidade da energia elétrica será igual a 2% da tensão de referência (V_{ref}).**

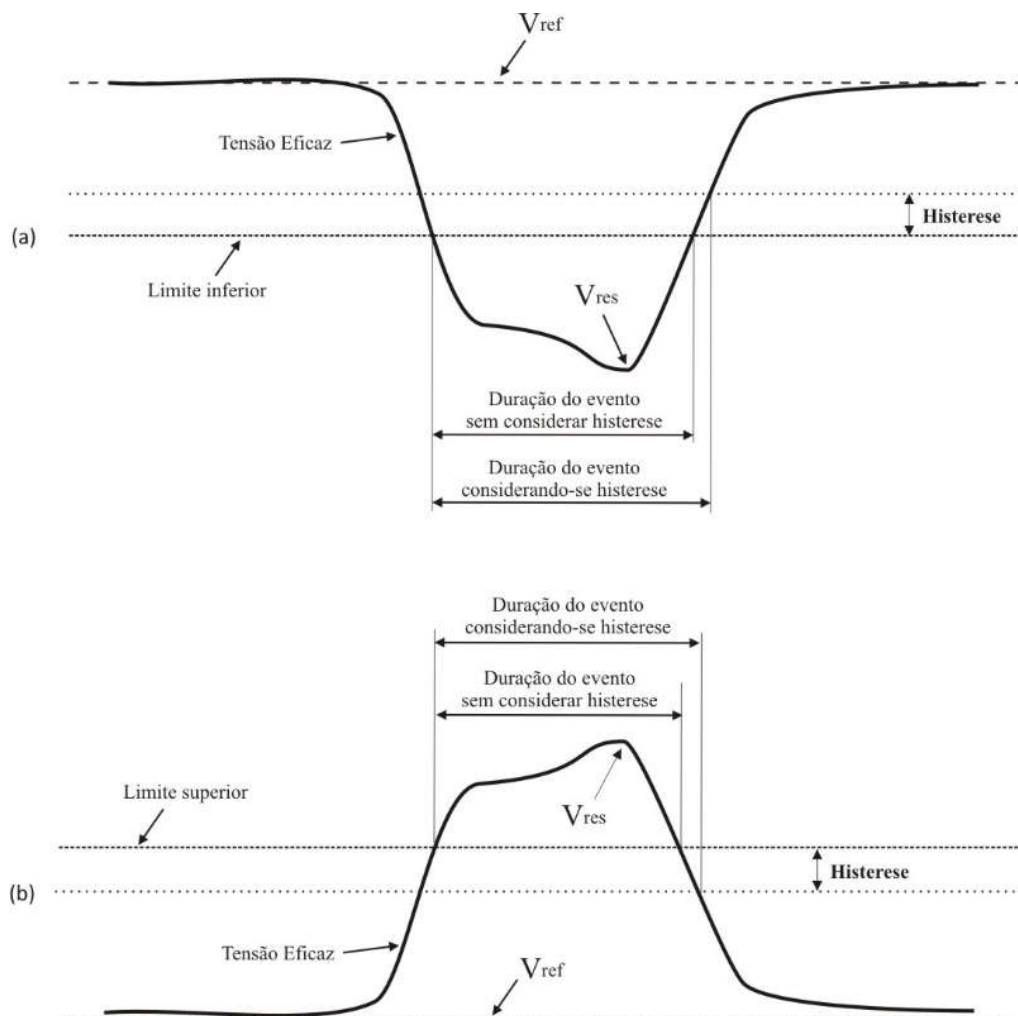


Figura 3 – Caracterização de eventos de VTCD com e sem a consideração de histerese em:
(a) eventos de afundamento momentâneo de tensão e (b) eventos de elevação momentânea de tensão.

3) Agregação de eventos de VTCD

A quantificação dos índices de severidade dos pontos de monitoração, associados com a ocorrência de VTCDs (a exemplo do Fator de Impacto), nem sempre pode ser realizada pela simples caracterização de eventos individuais. Em termos práticos, diferentes interpretações podem ser obtidas visando a caracterização de um determinado evento individual. Nesse sentido, o presente tópico apresenta os fundamentos básicos, assim como exemplos de aplicação nos quais diferentes registros de VTCD devem ser agregados antes de se proceder o cálculo do Fator de Impacto (FI).

O PRODIST estabelece que eventos simultâneos e/ou consecutivos, registrados em um determinado ponto de monitoração, devem ser agregados de forma a caracterizar um único evento de VTCD. Dessa forma, o indicador FI somente deverá ser quantificado após concluídas todas as agregações pertinentes. Nesse sentido, o PRODIST estabelece duas formas específicas de agregação de eventos individuais, a saber: agregação de fases e agregação temporal.

3.1) Agregação de fases

A agregação de fases estabelece que, para um determinado ponto de monitoração, uma VTCD deve ser caracterizada a partir da agregação da amplitude e da duração dos eventos individuais registrados em cada fase ou canal de medição. Dessa forma, eventos simultâneos são primeiramente agregados compondo um mesmo evento no ponto de monitoração. Para esse tipo de agregação são definidos os seguintes critérios:

- **Agregação de fases pelo critério da união de fases:** quando o sistema de monitoração possuir múltiplos canais de registro como, por exemplo, três canais de tensão para medição de barramentos trifásicos, a amplitude do evento agregado será definida pela tensão residual da fase com maior desvio em relação à tensão de referência. O instante de início do evento agregado será o instante no qual a primeira das fases ultrapassa o limite estabelecido. O instante final do evento agregado será o instante no qual a última das fases volta a transpor o mesmo limite, acrescido da histerese. A duração do evento agregado, portanto, será a diferença entre esses dois instantes, conforme ilustrado na Figura 4.
- **Agregação de fases pelo critério dos parâmetros críticos:** considerando-se eventos simultâneos associados a pontos de monitoração com registro trifásico, a duração do evento agregado será definida como sendo a máxima duração entre todos os eventos registrados. Ao mesmo tempo, a amplitude do evento agregado será igual a amplitude do evento que mais se distanciou da tensão de referência. A Figura 5 ilustra a aplicação do critério dos parâmetros críticos.
- **Agregação de fases pelo critério da fase crítica:** considerando-se eventos simultâneos associados a pontos de monitoração com registro trifásico, considera-se que a magnitude do evento agregado seja aquela associada à fase que mais se distanciou da tensão de referência, sendo que a duração desse mesmo evento individual será a duração do evento agregado. A Figura 6 ilustra a aplicação desse critério.

A agregação de fases pelo critério da união de fases deve ser preferencialmente utilizada, conforme sugestão dos pesquisadores da UFU. No entanto, conforme definido pelo PRODIST, o critério dos parâmetros críticos, assim como o critério da fase crítica, podem ser utilizados como formas alternativas.

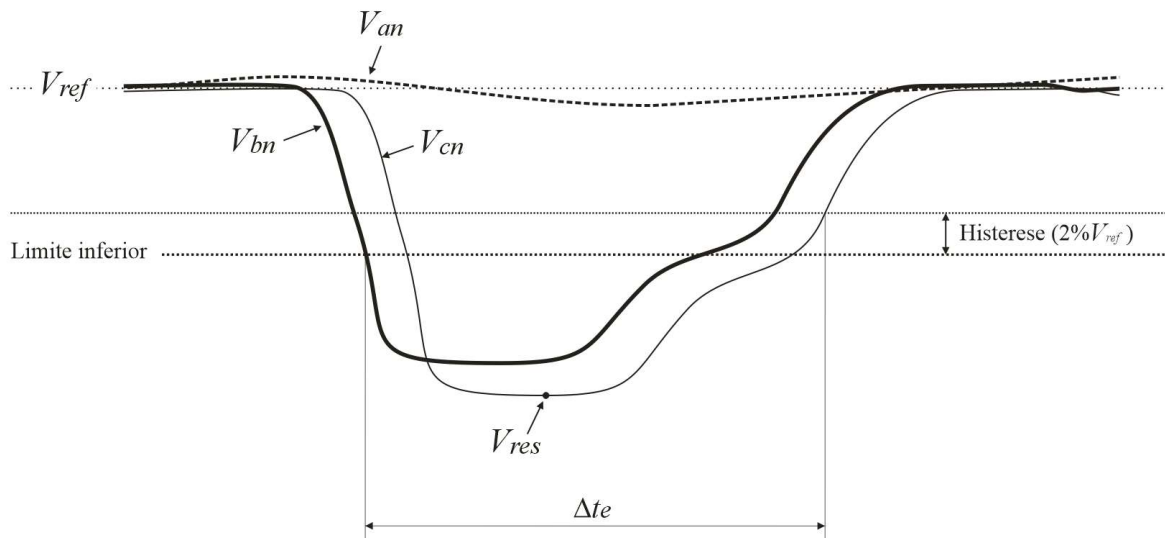


Figura 4 – Exemplo de aplicação do critério da união de fases.

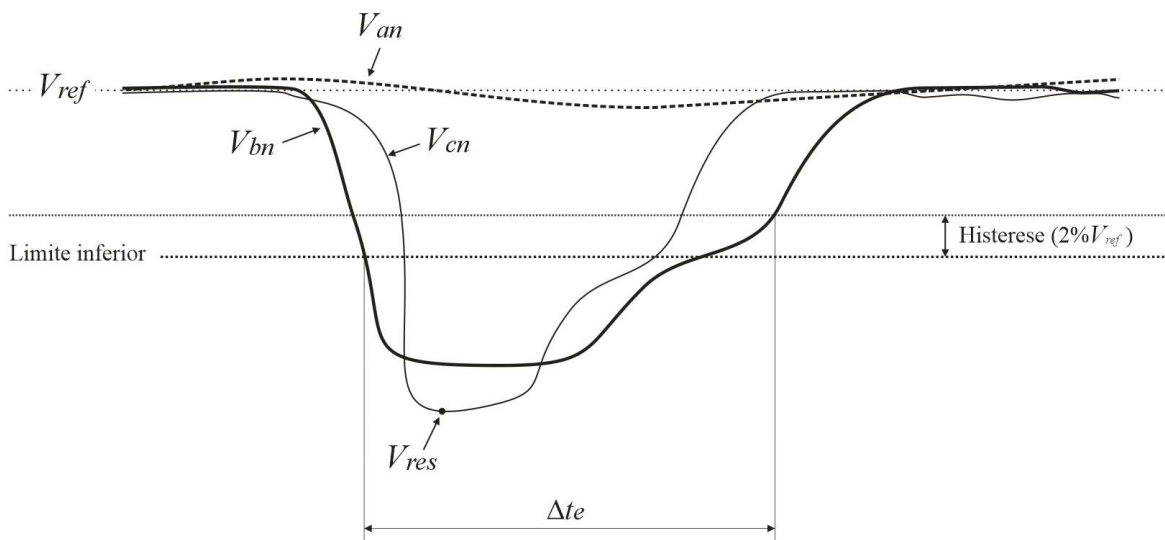


Figura 5 – Exemplo de aplicação do critério dos parâmetros críticos.

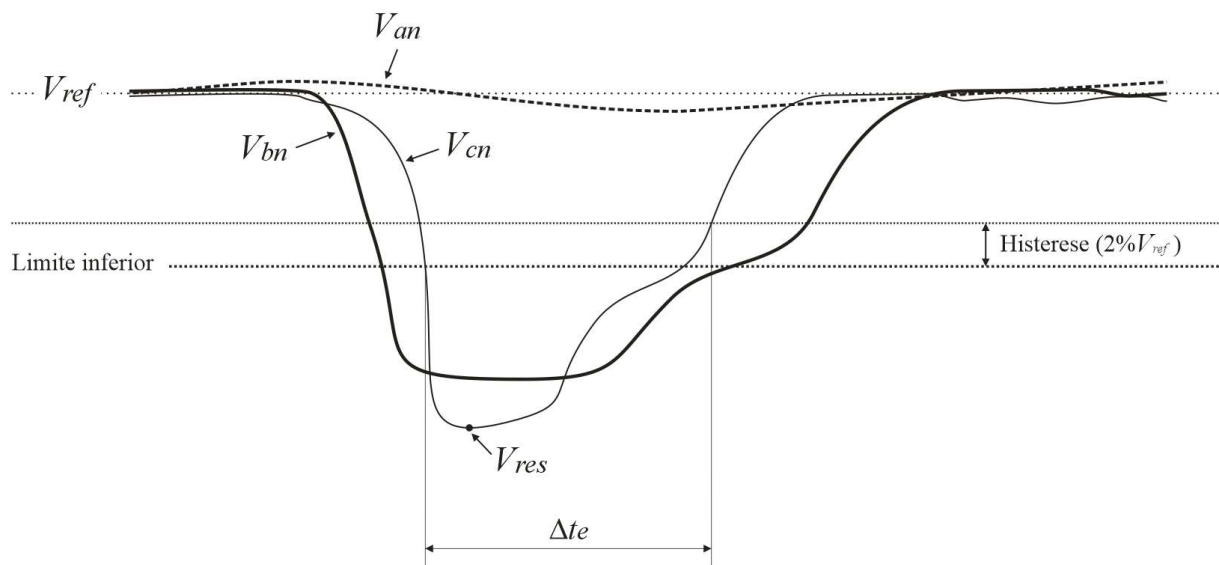


Figura 6 – Exemplo de aplicação do critério da fase crítica.

O PRODIST estabelece ainda que elevações e afundamentos de tensão de curta duração devem compor eventos separados. A Figura 7 ilustra essa situação, considerando-se o critério da união de fases.

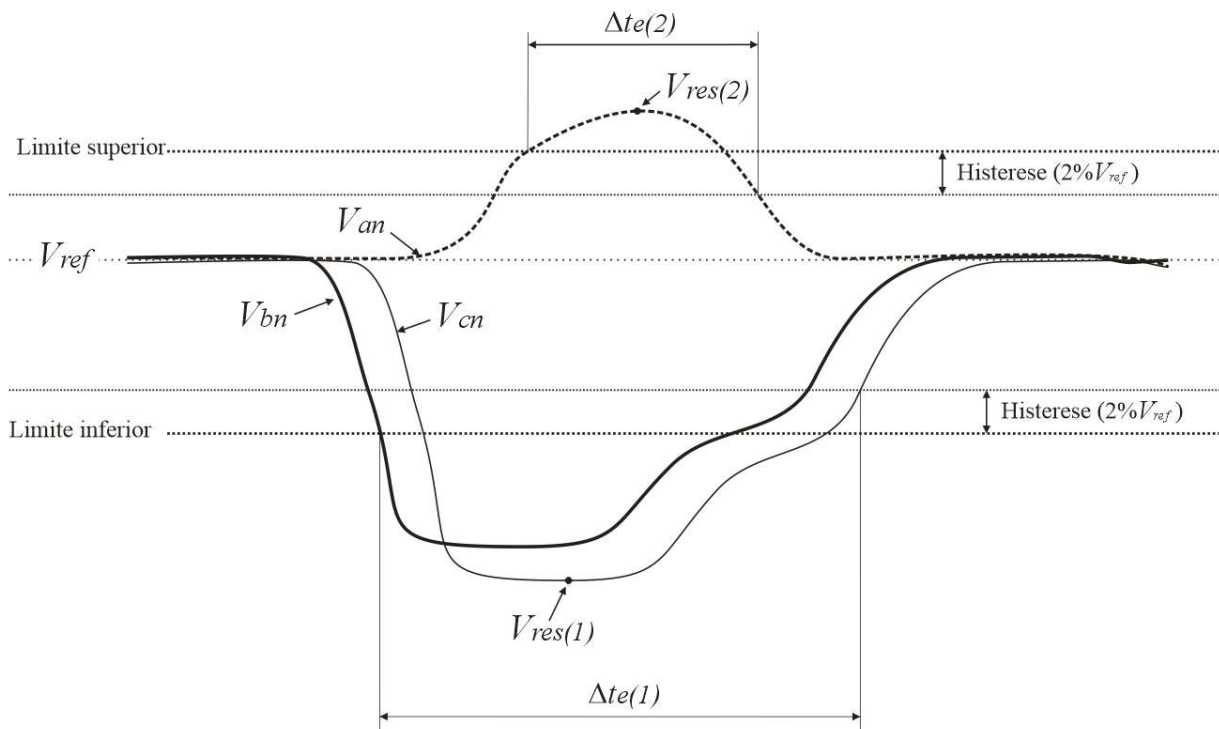


Figura 7 – Eventos simultâneos envolvendo elevação e afundamento de tensão de curta duração.

3.2) Agregação temporal

A agregação temporal considera que eventos consecutivos, em um período de 3 (três) minutos, para um mesmo ponto de monitoração, sejam agregados compondo um único evento de VTCD. Os eventos consecutivos associados a religamentos automáticos na rede de distribuição são exemplos típicos de situações nas quais deve ser utilizado esse tipo de agregação.

A agregação temporal, conforme referência [2], deverá ser aplicada considerando-se os parâmetros críticos dos eventos consecutivos registrados. Assim, a duração do evento agregado será definida como sendo a máxima duração entre todos os eventos registrados. Ao mesmo tempo, a amplitude do evento agregado será igual a amplitude do evento que mais se distanciou da tensão de referência. A Figura 8 ilustra a aplicação de um exemplo de agregação temporal com base nos parâmetros críticos (maior duração e maior amplitude). Ressalta-se que a agregação temporal deve ser realizada após as devidas agregações de fase para eventos simultâneos.

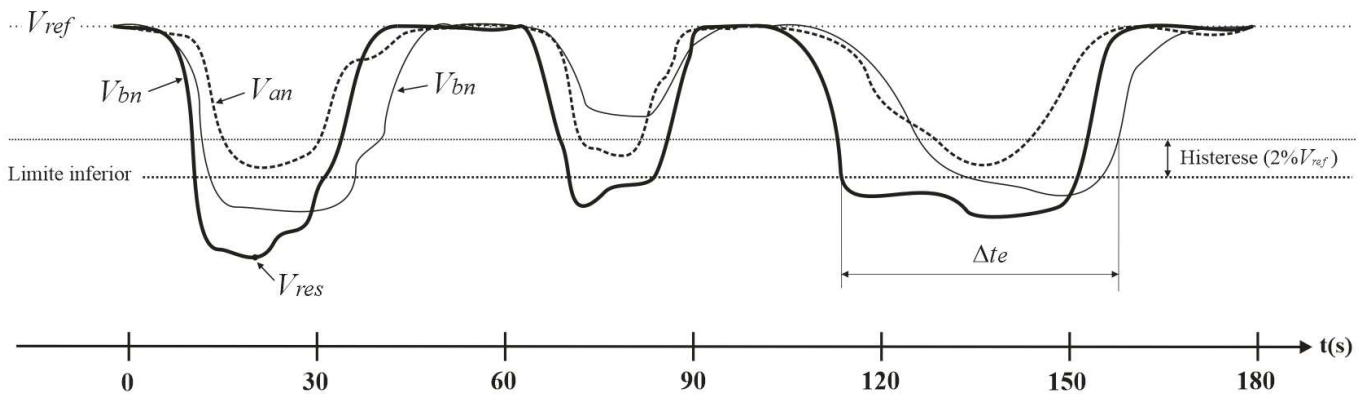


Figura 8 – Exemplo de aplicação da agregação temporal para eventos consecutivos.

De forma a se evitar qualquer subjetividade na agregação de uma determinada sequência de eventos consecutivos, ainda que os mesmos estejam associados a uma mesma falha na rede elétrica, sugere-se que quando um dos eventos consecutivos for coincidente com o instante final da janela de agregação de 3 minutos, ou estiver no limiar desse instante, sejam adotados os critérios indicados nas Figuras 9 e 10.

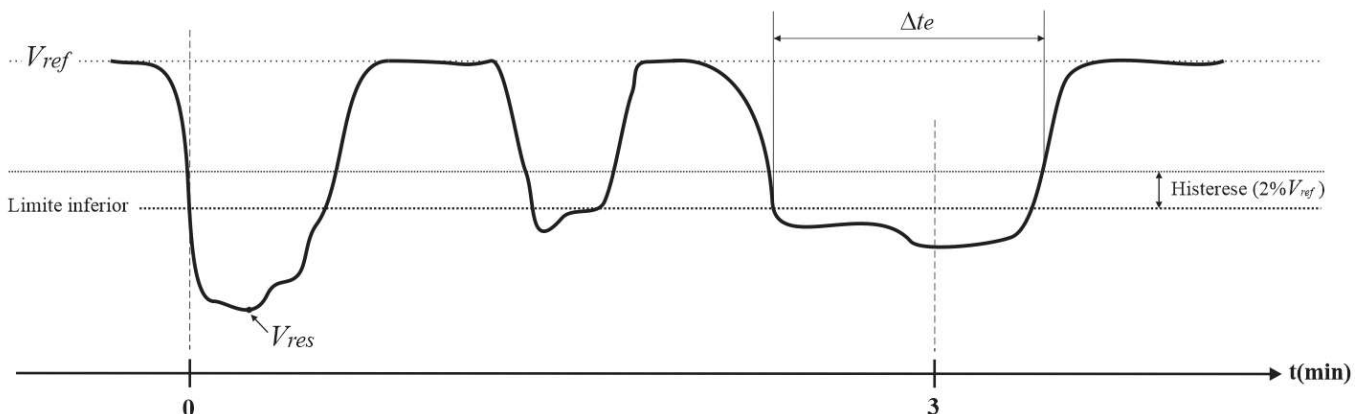


Figura 9 – Exemplo de aplicação da agregação temporal quando um dos eventos consecutivos coincide com o instante final da janela de agregação de 3 minutos.

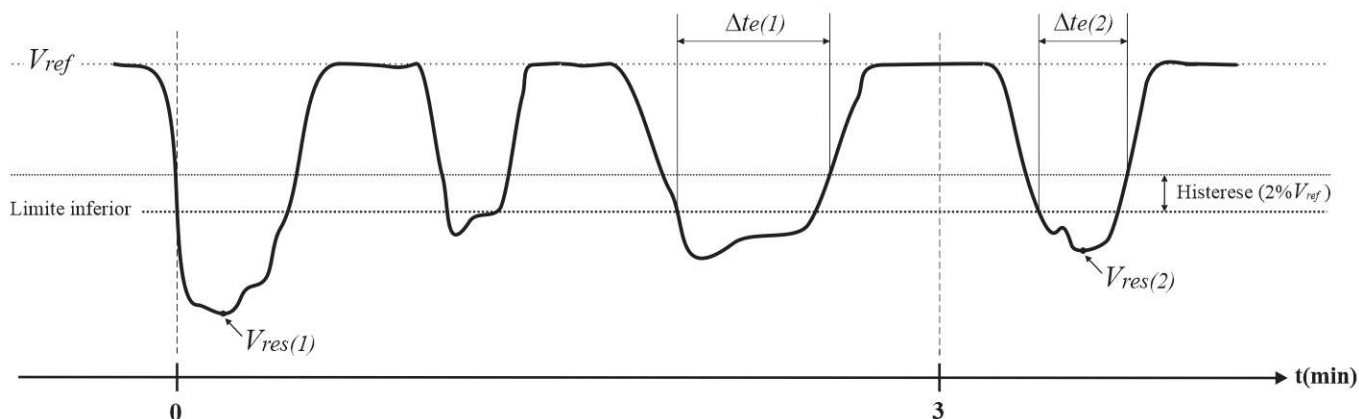


Figura 10 – Exemplo de aplicação da agregação temporal quando a sequência de eventos ultrapassa o período de agregação de 3 minutos.

No caso da Figura 9, o fim da janela de agregação de 3 minutos coincide com a janela de duração do último evento da sequência. Nesse caso, esse último evento deverá ser considerado para efeito de agregação temporal da sequência de eventos, ainda que o tempo total decorrido entre o instante inicial do primeiro evento e o instante final do último evento da sequência ultrapasse a janela de 3 minutos. Nesse caso, portanto, o resultado da agregação consistirá em um único evento agregado. Por outro lado, a Figura 10 sugere que quando um dos eventos consecutivos se iniciar após o instante final da janela de agregação de 3 minutos, deverão ser computados dois eventos agregados distintos.

Por fim, a referência [2] apresenta uma outra forma de agregação temporal, a qual considera que a duração do evento agregado é igual a soma das durações de todos os eventos, desde que o tempo decorrido entre os eventos consecutivos seja muito curto (< 1 segundo). Todavia, essa situação não está prevista no PRODIST e não deve ser considerada.

4) Referências Bibliográficas

- [1] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Procedimentos de Distribuição**. Módulo 8, Qualidade da Energia Elétrica. Revisão 8. 2016.
- [2] IEEE PES. **IEEE Guide for Voltage Sag Indices**. IEEE Std 1564 -2014.
- [3] IEC – International Electrotechnical Commission. **Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4.30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods**. IEC 61000-4-30. Edition 2.0, 2008-10.

APÊNDICE A

EXEMPLO DE APLICAÇÃO – AGREGAÇÃO DE EVENTOS

A Tabela A.1 apresenta o registro de vários eventos individuais, obtidos para um determinado ponto de monitoração, em um período de 30 dias consecutivos, culminando num total de 33 eventos.

Tabela A.1 – Registro de eventos individuais de VTCD em um determinado ponto de monitoração.

Sequência	Data	Instante inicial (t_i)	Instante final (t_f)	Duração (Δt_e)	Amplitude ($V_e\%$)	Tipo	Fase	Evento Agregado			
								Duração (Δt_e)	Amplitude ($V_e\%$)	Fase(s)	Tipo
1	05/11/2016	15:27:16,723	15:27:17,686	00:00:00,963	80%	AMT	A	00:00:01,117	75%	ABC	AMT
2	05/11/2016	15:27:16,800	15:27:17,840	00:00:01,040	75%	AMT	B				
3	05/11/2016	15:27:17,010	15:27:17,654	00:00:00,644	85%	AMT	C				
4	10/11/2016	18:12:24,450	18:12:28,655	00:00:04,205	81%	ATT	B	00:00:04,205	81%	B	ATT
5	12/11/2016	21:45:16,356	21:45:16,879	00:00:00,523	85%	AMT	B	00:00:00,565	78%	BC	AMT
6	12/11/2016	21:45:16,425	21:45:16,921	00:00:00,496	78%	AMT	C				
7	12/11/2016	21:45:16,567	21:45:16,995	00:00:00,428	112%	EMT	A	00:00:00,428	112%	A	EMT
8	24/11/2016	15:56:23,367	15:56:24,231	00:00:00,864	68%	AMT	A	00:00:00,920	65%	ABC	AMT
9	24/11/2016	15:56:23,367	15:56:24,231	00:00:00,864	65%	AMT	B				
10	24/11/2016	15:56:23,367	15:56:24,231	00:00:00,864	67%	AMT	C				
11	24/11/2016	15:57:02,234	15:57:03,154	00:00:00,920	72%	AMT	A				
12	24/11/2016	15:57:02,234	15:57:03,154	00:00:00,920	71%	AMT	B				
13	24/11/2016	15:57:02,234	15:57:03,154	00:00:00,920	73%	AMT	C				
14	26/11/2016	12:14:45,786	12:14:45,824	00:00:00,038	54%	AMT	A	00:00:00,109	54%	AB	AMT
15	26/11/2016	12:14:45,818	12:14:45,895	00:00:00,077	60%	AMT	B				
16	26/11/2016	14:43:56,126	14:43:56,765	00:00:00,639	86%	AMT	C	00:00:00,705	86%	CA	AMT
17	26/11/2016	14:43:56,997	14:43:57,702	00:00:00,705	88%	AMT	A				
18	27/11/2016	17:34:56,345	17:34:56,879	00:00:00,534	89%	AMT	A	00:00:00,836	42%	ABC	AMT
19	27/11/2016	17:34:56,345	17:34:56,879	00:00:00,534	87%	AMT	B				
20	27/11/2016	17:34:56,345	17:34:56,879	00:00:00,534	42%	AMT	C				
21	27/11/2016	17:36:06,121	17:36:06,675	00:00:00,554	87%	AMT	A				
22	27/11/2016	17:36:06,121	17:36:06,675	00:00:00,554	86%	AMT	B				
23	27/11/2016	17:36:06,121	17:36:06,675	00:00:00,554	45%	AMT	C				
24	27/11/2016	17:37:46,340	17:37:47,002	00:00:00,662	88%	AMT	A				
25	27/11/2016	17:37:46,342	17:37:47,176	00:00:00,834	89%	AMT	B				
26	27/11/2016	17:37:46,348	17:37:46,994	00:00:00,646	47%	AMT	C				
27	28/11/2016	12:24:45,678	12:24:46,276	00:00:00,598	78%	AMT	A	00:00:01,580	78%	AB	AMT
28	28/11/2016	12:26:06,723	12:26:07,856	00:00:01,133	81%	AMT	A				
29	28/11/2016	12:27:44,456	12:27:46,036	00:00:01,580	86%	AMT	B				
30	30/11/2016	19:12:23,345	19:12:23,423	00:00:00,078	45%	AMT	A	00:00:00,595	35%	AC	AMT
31	30/11/2016	19:13:54,624	19:13:54,809	00:00:00,185	35%	AMT	A				
32	30/11/2016	19:14:59,748	19:15:00,343	00:00:00,595	65%	AMT	C				
33	30/11/2016	19:15:23,983	19:15:24,718	00:00:00,735	71%	AMT	C	00:00:00,735	71%	C	AMT

Como pode ser observado na Tabela A.1, os 33 eventos individuais, após as devidas agregações, resultaram em um total de apenas 11 eventos agregados a serem efetivamente contabilizados. De forma complementar, tem-se ainda que:

- (1) As agregações de fases foram realizadas com base no **critério da união de fases**.
- (2) Os eventos individuais 16 e 17 são consecutivos (e não simultâneos), de forma que foram considerados os critérios de agregação temporal para caracterização do evento agregado representativo dos mesmos.
- (3) A agregação dos eventos 18 a 26 foi realizada considerando-se inicialmente a agregação de fases para os conjuntos de eventos 18-20, 21-23 e 24-26. Com base nos resultados dessas agregações de fase, procedeu-se à agregação temporal dos três eventos resultantes, conforme mostrado no exemplo da Figura 8.
- (4) A agregação dos eventos 27-29 foi realizada conforme mostrado no exemplo da Figura 9.
- (5) A agregação dos eventos 30-33 foi realizada conforme mostrado no exemplo da Figura 10.

APÊNDICE B

EXEMPLO DE APLICAÇÃO – CÁLCULO DO FATOR DE IMPACTO

A Tabela B.1 apresenta um resumo dos eventos registrados após as agregações efetuadas no Apêndice A.

Tabela B.1 – Resumo dos eventos agregados.

Evento	Duração			Amplitude	Fases	Tipo
	hh:mm:ss,000	ms	Ciclos			
1	00:00:01,117	1117,0	67,0	75%	ABC	AMT
2	00:00:04,205	4205,0	252,3	81%	B	ATT
3	00:00:00,565	565,0	33,9	78%	BC	AMT
4	00:00:00,428	428,0	25,7	112%	A	EMT
5	00:00:00,920	920,0	55,2	65%	ABC	AMT
6	00:00:00,109	109,0	6,5	54%	AB	AMT
7	00:00:00,705	705,0	42,3	86%	CA	AMT
8	00:00:00,836	836,0	50,2	42%	ABC	AMT
9	00:00:01,580	1580,0	94,8	78%	AB	AMT
10	00:00:00,595	595,0	35,7	35%	AC	AMT
11	00:00:00,735	735,0	44,1	71%	C	AMT

Na sequência, considerando-se os eventos agregados indicados na Tabela B.1, aloca-se a quantidade de eventos registrados em cada região de sensibilidade definida no módulo 8 do PRODIST, conforme mostrado nas Tabelas B.2 e B.3.

Tabela B.2 – Estratificação dos eventos em função da duração e amplitude.

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							
(1,10 - 1,15]			1				
(0,85 - 0,90]				1			
(0,80 - 0,85]						1	
(0,70 - 0,80]			1	1	2		
(0,60 - 0,70]				1			
(0,50 - 0,60]		1					
(0,40 - 0,50]				1			
(0,30 - 0,40]			1				
(0,20 - 0,30]							
(0,10 - 0,20]							
< 0,10							

Tabela B.3 – Estratificação dos eventos por região de sensibilidade.

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	H (1)			I (0)									
(1,10 - 1,15]													
(0,85 - 0,90]	A (1)			G (4)									
(0,80 - 0,85]													
(0,70 - 0,80]	B (0)	D (2)		F (2)									
(0,60 - 0,70]													
(0,50 - 0,60]	C (0)												
(0,40 - 0,50]													
(0,30 - 0,40]	E (1)												
(0,20 - 0,30]													
(0,10 - 0,20]													
< 0,10													

Na sequência, o cálculo do Fator de Impacto é realizado utilizando-se a equação (B.1), considerando-se os fatores de ponderação, assim como o FI_{BASE} , indicados na Tabela B.4.

$$FI = \frac{\sum_{i=A}^I (f_{ei} \times f_{pi})}{FI_{BASE}} \quad (B1)$$

Tabela B.4 – Fatores de ponderação e Fator de Impacto Base de acordo com a tensão nominal.

Região de Sensibilidade	Fator de Ponderação (fp)	Fator de Impacto Base (FI_{BASE})	
		1,0 kV < Vn < 69 kV	69 kV ≤ Vn < 230 kV
A	0,00	2,13	1,42
B	0,04		
C	0,07		
D	0,15		
E	0,25		
F	0,36		
G	0,07		
H	0,02		
I	0,04		

Considerando-se que o ponto de monitoração refere-se ao ponto de entrega de uma unidade consumidora atendida em média tensão, tem-se que $FI_{BASE} = 2,13$. Assim, tem-se:

$$FI = \frac{(1 \times 0,00) + (0 \times 0,04) + (0 \times 0,07) + (2 \times 0,15) + (1 \times 0,25) + (2 \times 0,36) + (4 \times 0,07) + (1 \times 0,02) + (0 \times 0,04)}{2,13}$$

Resultando, finalmente:

$$FI = 0,737 \text{ pu}$$