

Procedimentos para Detecção e Classificação de Variações de Tensão de Curta Duração Utilizando a Transformada Wavelet Discreta

Caio M. S. Junqueira* Núbia S. D. Brito**
Benemar A. Souza***

* Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil (e-mail: caio.junqueira@ee.ufcg.edu.br)

** Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil (e-mail: nubia@dee.ufcg.edu.br)

*** Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil (e-mail: benemar@dee.ufcg.edu.br)

Abstract: Short Duration Voltage Variations (SDVV) are events that require special attention in Power Quality (PQ) area, due to its frequent occurrence. Their constant monitoring is essential to diagnose their causes and minimize their financial losses. Several methods of detecting and classifying SDVV were presented in the literature and among the most used ones, stand out the Root Mean Square (RMS) and the Discrete Wavelet Transform (DWT). In this work, these methods are compared and a new procedure is presented aiming to improve the characterization of the SDVV. The analysis is done considering the number of samples per cycle, the length of window, in addition to simultaneous events, being validated using real and simulated signals. The results indicated that the procedure is capable of detecting and classifying SDVV for the most diverse scenarios, allowing the information to be sent in a accurate manner to a decision making center.

Resumo: As Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) são eventos que merecem uma atenção especial na área de Qualidade de Energia Elétrica (QEE), devido à sua frequente ocorrência. Um monitoramento constante é essencial para diagnosticar suas causas e minimizar os prejuízos financeiros. Vários métodos para detectar e classificar VTCD foram apresentados na literatura e dentre os mais utilizados, destacam-se o Valor Eficaz (RMS) e a Transformada Wavelet Discreta (TWD). Neste artigo, esses métodos são comparados e um novo procedimento é apresentado com o objetivo de melhorar a caracterização de uma VTCD. A análise é feita considerando o número de amostras por ciclo, o tamanho da janela, além de eventos simultâneos, sendo validada utilizando sinais reais e simulados. Os resultados indicaram que o procedimento é capaz de detectar e classificar VTCD para os mais diversos cenários, permitindo que a informação seja enviada de forma precisa para os centros de tomada de decisão.

Keywords: Short Duration Voltage Variations; Power Quality; Root Mean Square; Discrete Wavelet Transform; Detection; Classification;

Palavras-chaves: Variações de Tensão de Curta Duração; Qualidade de Energia; Valor Eficaz; Transformada Wavelet Discreta; Detecção; Classificação.

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento na utilização de dispositivos eletrônicos sensíveis à variação de tensão e a exigência dos consumidores por uma melhor eficiência do sistema elétrico de potência, o conceito de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) tornou-se cada vez mais importante. Dentre as consequências que comprometem a QEE do sistema, as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) merecem uma atenção especial, porque elas formam a classe de eventos mais percebida pelos clientes (Mali et al., 2015). Por definição, as VTCD são variações no sinal de tensão transmitido por um curto período de tempo e são classificadas por sua intensidade e duração (ANEEL, 2018), de acordo com a Tab. 1.

Tabela 1. Classificação das VTCD

Intensidade		Duração	
Tensão (pu)	Classif.	Tempo	Classif.
inferior a 0,1	Interrupção	16,6 ms a 3 s	Momentâneo
0,1 a 0,9	Afundamento	3 s a 3 min	Temporário
superior a 1,1	Elevação		

As VTCD estão associadas a eventos de curtos-circuitos, energização de transformadores, partida de motores de potência elevada, energização e desenergização de grandes cargas. Embora possuam curta duração, elas podem causar sérios problemas aos consumidores (Bollen, 2000). A solução para estes problemas requer um monitoramento constante do sistema, com equipamentos capazes de detectar, classificar e informar a localização da sua causa, por meio

do processamento de dados advindos de medidores sincronizados para posterior análise. Neste contexto, o uso de ferramentas matemáticas, as quais levam em consideração as características presentes durante uma VTCD, pode vir a constituir uma ação importante para a tomada de decisão, com o objetivo de reduzir o tempo que o equipamento do consumidor está sob condições anormais, diretamente relacionadas ao tempo de vida do equipamento, a produção e as perdas financeiras (Dugan et al., 2004).

Para detectar e classificar VTCD, vários métodos vêm sendo propostos na literatura, por exemplo: o método do Valor Eficaz (RMS) (Mohan et al., 2014; Thakur and Singh, 2012; Zaro et al., 2012; Matz et al., 2007; Barros and Perez, 2006) e a Transformada Wavelet Discreta (TWD) (Zhang and Zhang, 2011; y. Zhu and Chen, 2006). Análise minuciosa na literatura revelou que a maioria dos estudos desconsideram a presença de transitórios durante a VTCD e a ocorrência de eventos consecutivos e evolucionários.

Este artigo insere-se nesse contexto e propõe um procedimento para detecção e classificação de VTCD. As principais contribuições estão na definição do número de amostras, tamanho da janela utilizada e a padronização da intensidade, duração e quantidade de eventos para os mais diversos cenários de VTCD. O artigo foi organizado do seguinte modo: a Seção 2 descreve os métodos de detecção e classificação de VTCD; a Seção 3, apresenta a caracterização de uma VTCD que acordo com os parâmetros que a definem; a Seção 4, descreve o procedimento de detecção e classificação; a Seção 5, apresenta os resultados e, finalmente, as conclusões são apresentadas na Seção 6.

2. MÉTODOS PARA DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE VTCD

Essa seção apresenta as definições de dois métodos para a detecção e classificação de VTCD: RMS e TWD. Três sinais (Fig. 1) foram utilizados inicialmente para apresentar as respostas de cada um dos métodos, as quais serão abordadas na Seção 3. Os sinais foram obtidos por registradores reais, têm uma frequência fundamental de 60 Hz, uma taxa de amostragem de 15360 Hz (256 amostras por ciclo) e estão disponíveis em Morgan (1999) (wave7.xls).

2.1 Valor Eficaz (RMS)

Em sistemas elétricos, as grandezas alternadas podem ser representadas por seu valor eficaz (RMS), sendo equivalente a uma intensidade contínua capaz de transferir a mesma potência a uma carga. Em termos de sinal de tensão, o valor RMS é calculado como:

$$V_{RMS}(k) = \sqrt{\frac{C}{N} \sum_{i=k-\frac{N}{C}+1}^k v_i^2}, \quad (1)$$

sendo: N , o número de amostras por ciclo; C , o tamanho da janela de cálculo do valor RMS; e v_i , a amostra i da tensão no domínio do tempo; e k , a amostra do valor RMS.

De acordo com a Eq. (1), algumas considerações podem ser aplicadas para o cálculo do valor RMS da tensão como uma resposta a cada ciclo ($k = N, 2N, 3N, \dots$) ou a cada

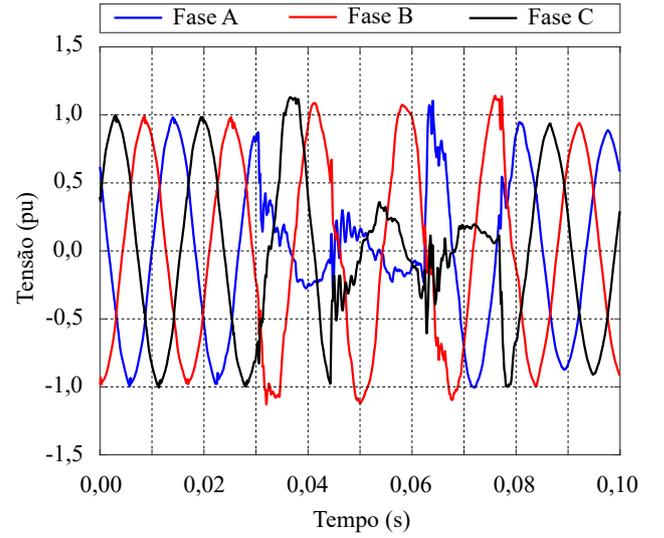


Figura 1. Sinais reais de VTCD.

meio ciclo ($k = \frac{N}{2}, N, \frac{3N}{2}, \dots$) ou, até mesmo, amostra por amostra ($k = 1, 2, 3, \dots$). Além disso, o tamanho da janela de cálculo pode ser de um ciclo ($C = 1$) ou reduzida até meio ciclo ($C = 2$), visto que para valores menores, oscilações com a frequência duas vezes maior que a do sinal original são produzidas (Bollen, 2000). Por fim, o número de amostras por ciclo (N) também pode ser modificado de acordo com a taxa de amostragem do conversor analógico/digital utilizado no medidor de QEE.

2.2 Transformada Wavelet Discreta (TWD)

A formulação matemática para a Transformada Wavelet foi introduzida inicialmente na sua versão contínua (TWC), na década de 1980. Após alguns refinamentos, a versão discreta (TWD) começou a ser utilizada em pesquisas, com destaque para o trabalho de I. Daubechies (1992). Em 1989, Mallat (1989) apresentou um algoritmo rápido e eficiente para o cálculo da TWD por meio da utilização de filtros passa-baixa e passa-alta. Matematicamente, os filtros são representados como:

$$c_j = \sum_n g(n - 2k)c_{j-1}(n) \quad e \quad (2)$$

$$d_j = \sum_n h(n - 2k)c_{j-1}(n), \quad (3)$$

sendo: c_j e d_j , os coeficientes de aproximação e detalhe da escala j , respectivamente; $g(k)$ e $h(k)$, os filtros passa-baixa e passa-alta, respectivamente; k , o número da amostra; n , o número total de amostras (Costa, 2010). Para o cálculo dos coeficientes na escala 1 (c_1 e d_1), é utilizado o valor de c_0 , o qual é exatamente o sinal original.

Dependendo da *wavelet*-mãe escolhida, o número de coeficientes $g(k)$ e $h(k)$ e os seus respectivos valores podem ser modificados. Neste artigo, utilizou-se a *wavelet*-mãe Daubechies 4 (db4) que tem se destacado na detecção e classificação de eventos transitórios (Costa, 2010; Santos, 2016) e possui 4 coeficientes para cada filtro.

A TWD representa um processo de filtragem, seguido de uma subamostragem por um fator de dois. Como resul-

tado, o número de amostras dos coeficientes de detalhe e de aproximação é igual à metade do número de amostras do sinal original. Além disso, os coeficientes de aproximação apresentam um espectro de frequência de 0 a $\frac{f_s}{4}$, enquanto que os coeficientes de detalhe possuem um espectro de $\frac{f_s}{4}$ a $\frac{f_s}{2}$, sendo f_s , a frequência de amostragem do sinal (Costa, 2010).

Por utilizar um processo de subamostragem, a DWT pode ser comprometida em algumas aplicações específicas. Para superar esta limitação, uma variável denominada TWD Redudante (TWDR), a qual não utiliza o processo de subamostragem, pode ser utilizada. A TWDR é uma transformada invariante no tempo e pode ser aplicada a qualquer número de amostras, enquanto que a TWD requer que o número de amostras seja uma potência de dois.

O processo de obtenção dos coeficientes de aproximação e detalhe da TWDR pode ser obtido em termos da primeira escala, a partir das Eqs. (2) e (3), na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} c_1(1) \\ c_1(2) \\ c_1(3) \\ c_1(4) \\ \vdots \\ c_1(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{g}(4) & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \hat{g}(3) & \hat{g}(4) & 0 & 0 & \dots \\ \hat{g}(2) & \hat{g}(3) & \hat{g}(4) & 0 & \dots \\ \hat{g}(1) & \hat{g}(2) & \hat{g}(3) & \hat{g}(4) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ x(4) \\ \vdots \\ x(k) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} d_1(1) \\ d_1(2) \\ d_1(3) \\ d_1(4) \\ \vdots \\ d_1(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{h}(4) & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \hat{h}(3) & \hat{h}(4) & 0 & 0 & \dots \\ \hat{h}(2) & \hat{h}(3) & \hat{h}(4) & 0 & \dots \\ \hat{h}(1) & \hat{h}(2) & \hat{h}(3) & \hat{h}(4) & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ x(3) \\ x(4) \\ \vdots \\ x(k) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

sendo: $\hat{g}(1) = -\hat{h}(4) = 0,341$; $\hat{g}(2) = \hat{h}(3) = 0,593$; $\hat{g}(3) = -\hat{h}(2) = 0,158$; $\hat{g}(4) = \hat{h}(1) = -0,091$.

Análise no estado da arte mostrou que os coeficientes de detalhe são utilizados na detecção de sinais de alta frequência. Entretanto, eles podem ser confundidos com ruídos normalmente encontrados no sistema elétrico. Com o objetivo de minimizar a influência dos ruídos, alguns autores (Costa, 2010; Santos, 2016) têm utilizado a energia dos coeficientes de detalhe. Ademais, a energia dos coeficientes de aproximação está diretamente relacionada à intensidade do sinal e pode ser utilizada na identificação de uma VTCD. Matematicamente, a energia dos coeficientes de aproximação (ξ_c) e detalhe (ξ_d) da primeira escala, são descritos a seguir.

$$\xi_c(k) = \frac{C}{N} \sum_{i=k-\frac{N}{C}+1}^k c_1^2(i), \quad (6)$$

$$\xi_d(k) = \frac{C}{N} \sum_{i=k-\frac{N}{C}+1}^k d_1^2(i), \quad (7)$$

sendo: C , N , k e i , os mesmos valores descritos no cálculo do valor RMS. Da mesma forma, a variação desses valores podem influenciar diretamente no cálculo da energia dos coeficientes de aproximação e detalhe, como será visto na próxima seção.

3. CARACTERIZAÇÃO DA VTCD

Na prática, as VTCD são caracterizadas por sua intensidade, duração e presença de componentes de alta frequência em instantes específicos. Durante o evento, o sinal de tensão apresenta um ou mais períodos transitórios até atingir uma tensão remanescente. No caso dos curtos-circuitos, por exemplo, os períodos transitórios estão relacionados ao início da falta e a sua extinção.

A intensidade calculada depende dos parâmetros da ferramenta matemática utilizada e pode ser dificultada para VTCD com durações próximas a um ciclo do sinal. Para durações maiores que um ciclo, os medidores de QEE registram o valor mínimo para os afundamentos ou interrupções e o valor máximo para elevações de tensão.

O cálculo da duração da VTCD consiste em avaliar o período no qual a tensão remanescente (intensidade) apresenta valores inferiores a 0,9 pu (afundamentos ou interrupções) e superiores a 1,1 pu (elevações). Como os medidores, em sua maioria, calculam um valor RMS para ciclo do sinal de tensão, o cálculo da duração pode apresentar erros consideráveis.

Visando análise da influência dos métodos RMS e TWDR no cálculo da intensidade e duração da VTCD, algumas características são discutidas a seguir: efeito no número de amostras por ciclo, efeito no tamanho da janela, análise de curtos-circuitos simultâneos (evolutivos e consecutivos).

3.1 Efeito no número de amostras por ciclo

Apresentam-se nas Figs. 2 e 3, o valor RMS e a energia dos coeficientes de aproximação da TWDR (ξ_c), respectivamente, da fase A do sinal da Fig. 1. As taxas de amostragem variam de 480 Hz (8 amostras/ciclo) a 15360 Hz (256 amostras/ciclo) com janela de 1 ciclo para o cálculo.

Dependendo do número de amostras por ciclo, os resultados de intensidade e duração encontrados nas Figs. 2 e 3 podem apresentar diferenças, sendo estas quase imperceptíveis para 64, 128 e 256 amostras por ciclo para os dois métodos.

Apresenta-se na Fig. 4, a energia dos coeficientes de detalhe da TWDR (ξ_d) do mesmo sinal. É possível perceber que ξ_d apresenta elevações nos valores nos períodos transitórios presentes em instantes específicos. Isso decorre da necessidade do uso de filtros de alta frequência para o seu cálculo. Dependendo da taxa de amostragem, ξ_d pode apresentar resultados diferentes, com destaque para uma taxa de 64 amostras por ciclo, na qual o filtro passa alta é sensibilizado para valores entre 960 Hz ($\frac{f_s}{4}$) e 1920 Hz ($\frac{f_s}{2}$).

Os medidores de QEE podem utilizar taxas de amostragem de 8 a 1024 amostras por ciclo, as quais são escolhidas conforme a necessidade. De acordo com os sinais das

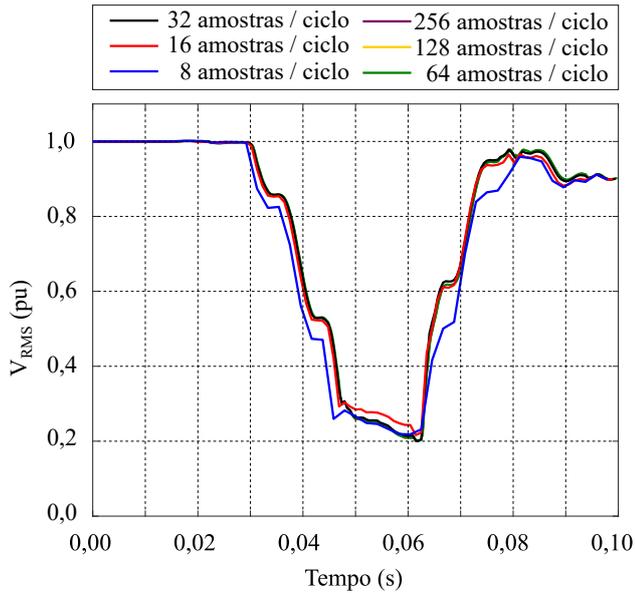


Figura 2. Valor RMS com a variação no número de amostras por ciclo.

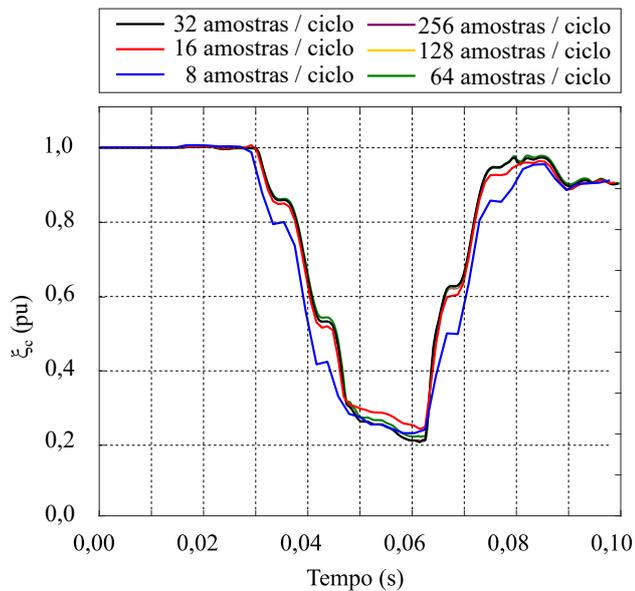


Figura 3. ξ_c com a variação no número de amostras por ciclo.

Figs. 3 e 4, é possível caracterizar a VTCD em termos de intensidade, duração e períodos transitórios com a utilização da TWDR para uma taxa de amostragem de 64 amostras por ciclo.

3.2 Efeito do tamanho da janela

O valor RMS e a ξ_c da TWDR da fase A da Fig. 1 para janela de um ciclo e de meio ciclo, calculadas amostra por amostra, são apresentados nas Figs. 5 e 6. Na Fig. 5 são apresentados também, os registros dos medidores de QEE, realizados uma vez a cada ciclo do sinal. Conforme se vê, tanto para o cálculo do valor RMS como para ξ_c , a duração e a intensidade podem variar de acordo com o tamanho da janela utilizada.

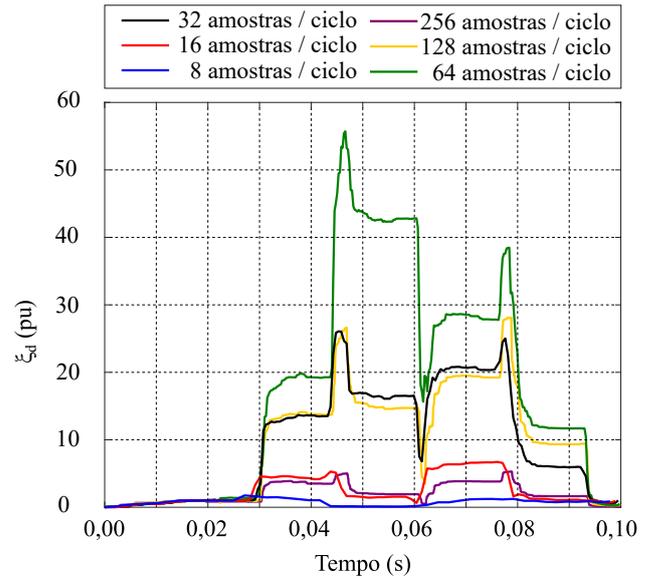


Figura 4. ξ_d com a variação no número de amostras por ciclo.

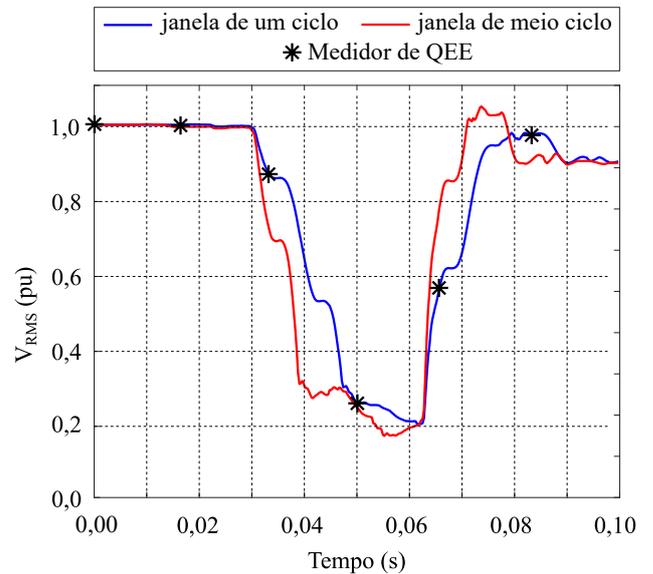


Figura 5. Valor RMS com a variação do tamanho da janela.

Outro fato observado foi que a duração do afundamento de tensão diminui com o aumento da janela, tanto para o valor RMS como para a ξ_c . Isso significa que a janela de meio ciclo é mais rápida em detectar o início e o fim de um evento e mais sensível à mudança no nível de tensão.

Apresenta-se na Fig. 7, a ξ_d da TWDR para o mesmo sinal, considerando janelas de cálculo de um ciclo e de meio ciclo. Observa-se que quanto menor a janela de cálculo, mais os períodos transitórios podem ser diferenciados. Os 4 períodos transitórios para a janela de meio ciclo, representam os transitórios decorrentes da falta na fase A (2), seguido da influência da falta na fase C (2) da Fig. 1.

Análise de vários medidores de QEE disponíveis no comércio revelou que eles utilizam o cálculo do valor RMS a cada ciclo do sinal, o que resulta em durações de múltiplos de ciclos do sinal e intensidade menores ou maiores que o

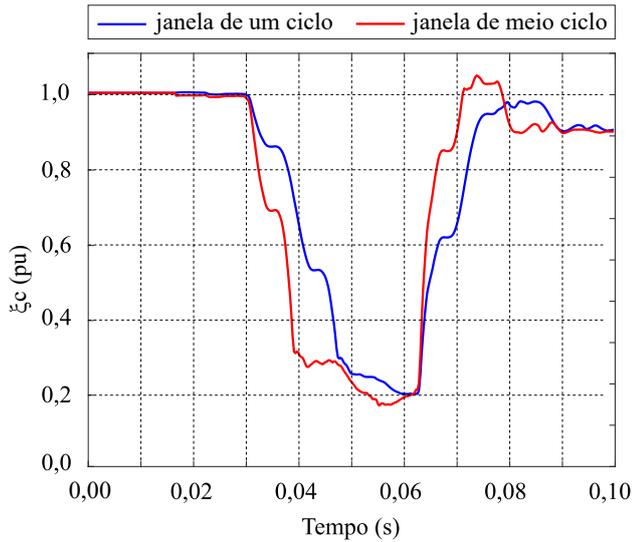


Figura 6. ξ_c com a variação do tamanho da janela.

seu valor exato. De acordo com as Figs. 6 e 7, é possível caracterizar as VTCD com mais precisão com os cálculos da ξ_c e da ξ_d com janela de meio ciclo do sinal, feita amostra por amostra.

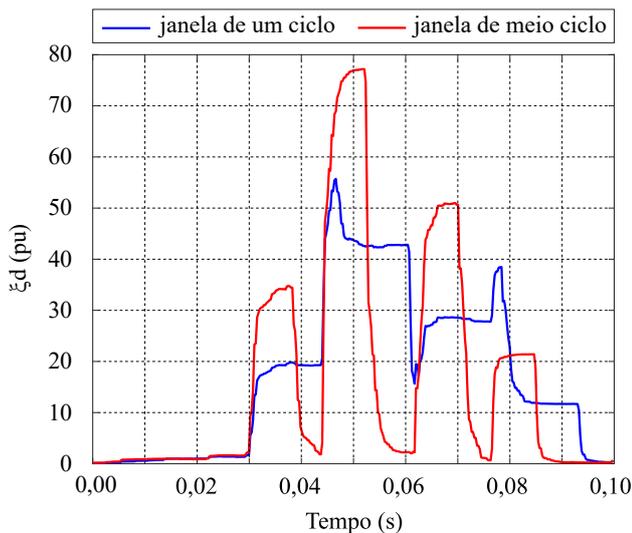


Figura 7. ξ_d com a variação do tamanho da janela.

3.3 Eventos evolutivos

Um evento evolutivo ocorre quando se inicia em umas das fases e evolui para uma ou duas fases do sistema. Para ilustrar, considere o evento mostrado na Fig. 1, o qual corresponde a uma falta evolutiva, iniciada na fase A, seguida da fase C. Apresentam-se nas Figs. 8 e 9, a ξ_c e a ξ_d , respectivamente, do sinal da Fig. 1, com uma taxa de 64 amostras por ciclo e janela de meio ciclo, calculada amostra por amostra.

De acordo com a Fig. 8, afundamentos de tensão são identificados nas fases A e C, enquanto que uma elevação de tensão é identificada na Fase B. As intensidades dos dois afundamentos são diferentes e variam antes de atingir o valor mínimo. Na fase C são identificados valores maiores que 1,1 pu antes de se caracterizar como afundamento

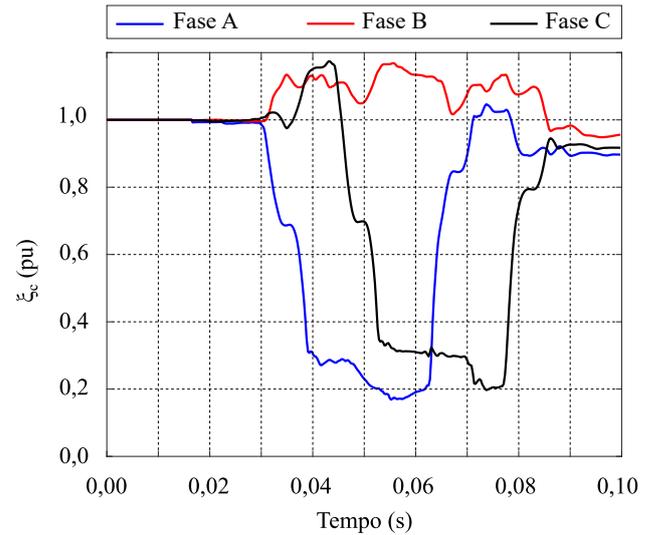


Figura 8. ξ_c para o evento evolutivo.

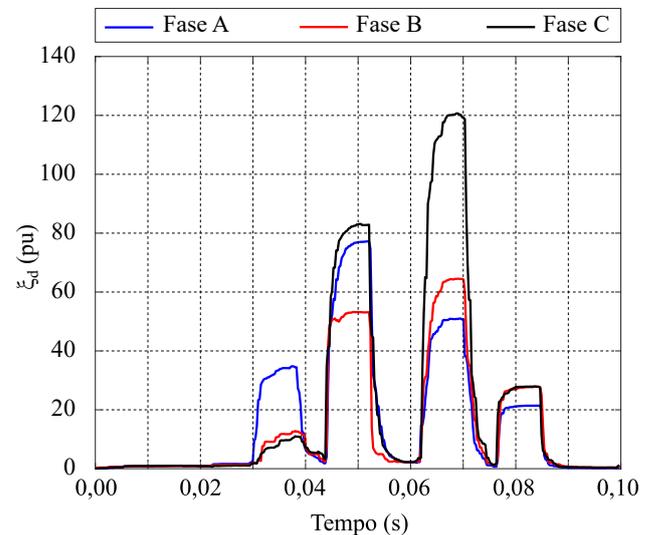


Figura 9. ξ_d para o evento evolutivo.

de tensão. A elevação de tensão na fase B apresenta oscilações ao longo da duração do evento. Na prática, os efeitos decorrentes desses eventos nos equipamentos são diferentes dos afundamentos e interrupções, sendo normalmente caracterizado como um evento distinto.

As informações do cálculo da ξ_d para as três fases são apresentadas na Fig. 9. Os períodos transitórios são sensibilizados em todas as fases, indicando os instantes iniciais e de extinção do problema. A duração máxima de uma VTCD, como apresentado na Tab. 1, é de 3 minutos. Durante esse período, vários períodos transitórios podem ser identificados e utilizados para descrever com mais detalhes o evento completo.

3.4 Eventos consecutivos

Os eventos consecutivos acontecem principalmente em decorrência da atuação de religadores com o objetivo de eliminar faltas temporárias. Apresenta-se na Fig. 10 uma falta consecutiva na fase A de um sinal simulado no MATLAB e suas ξ_c (Fig. 11) e ξ_d (Fig. 12).

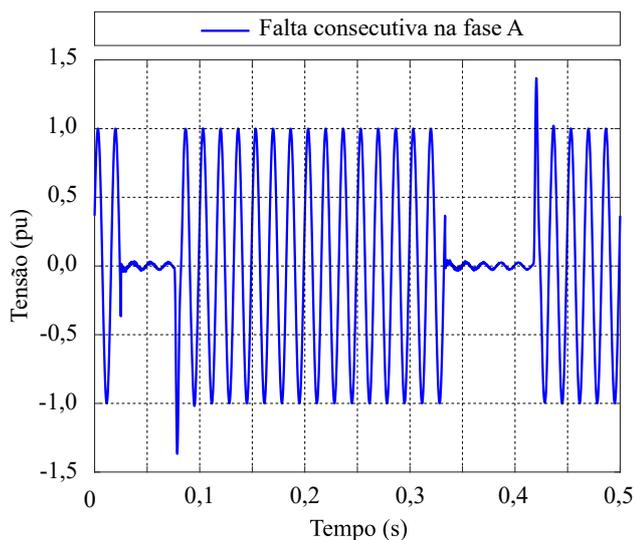


Figura 10. Falta consecutiva na fase A.

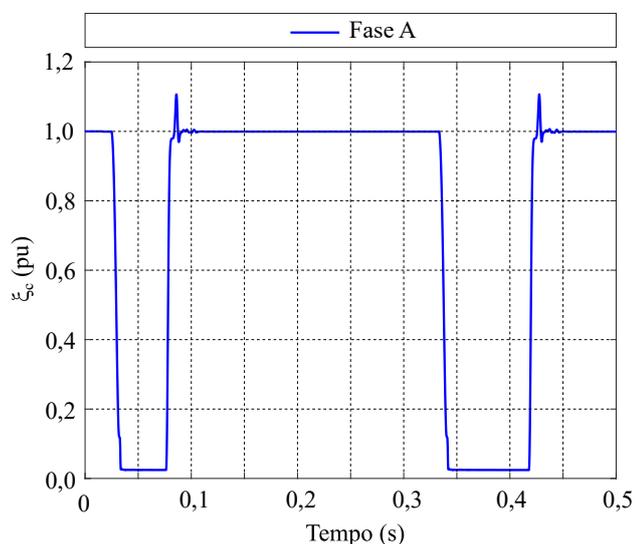


Figura 11. ξ_c para o evento consecutivo.

De acordo com a Fig. 11, a ξ_c apresenta redução nos valores de tensão em dois momentos distintos. Apesar disso, eles representam a característica de um mesmo problema, não podendo ser caracterizado como dois eventos diferentes. Além disso, a identificação dos períodos transitórios na Fig. 12, confirma que a ξ_d da TWDR pode identificar os períodos transitórios em uma mais um tipo de causa da VTCD.

4. PROCEDIMENTO DE DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE VTCD

Dependendo dos parâmetros utilizados e do tipo de ocorrência, diferentes entendimentos podem resultar em diferentes análises de VTCD nos sistemas elétricos. Como forma de padronizar os registros advindos de vários medidores, a ANEEL (2018) apresenta que, para um medidor instalado:

- as elevações de tensão são analisadas separadamente dos afundamentos de tensão e das interrupções;

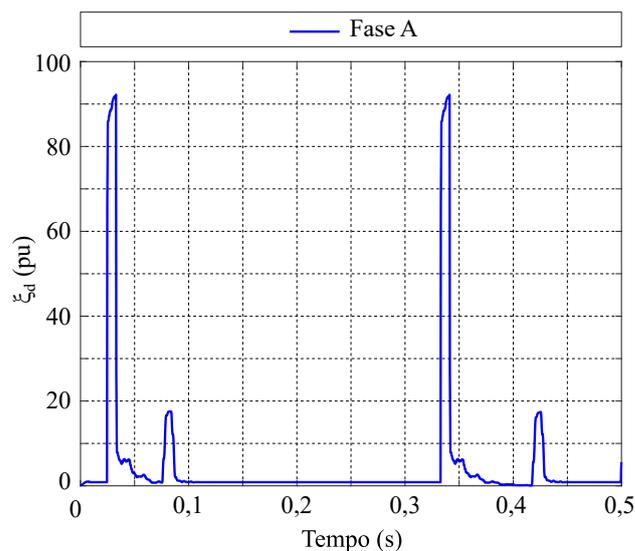


Figura 12. ξ_d para o evento consecutivo.

- eventos simultâneos de mesma classificação de intensidade, com duração menor ou igual a 3 minutos, constituem um único evento;
- a intensidade considerada é igual a menor de todas as fases para afundamentos e interrupções e a maior de todas as fases para elevações;
- a duração do evento ocorre entre o início da primeira e o final da última VTCD;

Para comparar os dois métodos de detecção e classificação de VTCD, este artigo apresenta um procedimento a ser embarcado em medidores de QEE, que utiliza a TWDR e considera a padronização na resposta da intensidade, duração e número de eventos.

O procedimento utiliza uma taxa de amostragem de 3840 Hz (64 amostras por ciclo), com janela de meio ciclo calculada amostra por amostra e considera a presença de transitório, frequente nas mais diversas causas de VTCD. Além disso, o sinal de tensão é continuamente monitorado para a correta caracterização em termos de intensidade e duração.

Inicialmente, a TWDR é utilizada para a extração dos coeficientes de aproximação (c_1) e detalhe (d_1) dos sinais de tensão das três fases. A energia dos coeficientes de detalhe para cada uma das fases (ξ_{dva} , ξ_{dvb} e ξ_{dvc}) é calculada para identificar o número de eventos, baseado nos períodos transitórios. Quando um conjunto de períodos transitórios é detectado em um período menor que 3 minutos, apenas um evento é registrado. Caso contrário, os últimos períodos transitórios já fazem parte de um novo evento.

Enquanto isso, a energia dos coeficientes de aproximação (ξ_{cva} , ξ_{cvb} e ξ_{cvc}) é utilizada para classificar os distúrbios de acordo com a intensidade e duração, de acordo com a Tab. 1. Afundamentos e interrupções são considerados eventos distintos das elevações de tensão. Além disso, a tensão mínima para afundamentos de tensão ou interrupções e a tensão máxima para elevações é considerada.

Ao final, o período mais longo de cada evento será considerado como sendo a duração. Apresenta-se na Fig. 13, o

fluxograma do procedimento de detecção e classificação da VTCD proposto neste artigo.

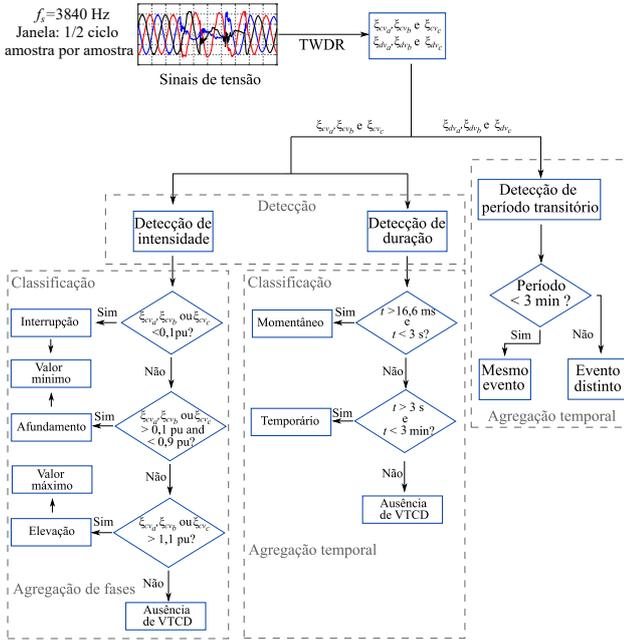


Figura 13. Fluxograma do procedimento proposto.

5. RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados obtidos com a utilização do procedimento e está dividida em três partes: VTCD analisada em uma fase isoladamente; falta evolutiva; e falta consecutiva. Uma análise comparativa é realizada de acordo com os seguintes valores:

- (1) Medidores de QEE: o cálculo do valor RMS com janela de um ciclo é realizado uma vez cada ciclo;
- (2) Referência internacional (IEEE, 2014): o cálculo do valor RMS com janela de 1 ciclo é realizado a cada meio ciclo do sinal;
- (3) RMS com janela de meio ciclo, calculado amostra por amostra.

5.1 VTCD analisada em uma fase isoladamente

O sinal da fase A da Fig. 1 foi utilizado para a VTCD analisada de forma isolada. Apresenta-se na Tab. 2, os resultados encontrados.

Tabela 2. Comparação entre os procedimentos para o sinal da fase A da Fig. 1

Procedimento	Intensidade (pu)	Duração (ms)	Períodos Transit.	Nº de eventos
(1)	0,260	16,66	-	-
(2)	0,216	33,33	-	-
(3)	0,171	68,75	-	-
Proposto	0,168	68,49	4	1

A partir dos resultados da Tab. 2, observou-se que dependendo do procedimento utilizado, o cálculo da intensidade e da duração podem apresentar valores diferentes. Além disso, o procedimento proposto neste artigo fornece informações sobre a quantidade de períodos transitórios

durante o evento, obtidos a partir da Fig. 7 e que, por apresentarem uma duração menor que 3 minutos entre os períodos transitórios extremos, caracteriza-se como um único evento.

A duração para o procedimento (1) é referente a um ciclo que o sinal esteve abaixo de 0,9 pu, enquanto que, para (2), a duração foi de 2 ciclos (33,33 ms). O procedimento (3) apresentou resultados semelhantes ao proposto devido ao tamanho da janela e ao cálculo de amostra por amostra ser realizados por ambos.

5.2 Análise de uma falta evolutiva

Os sinais das três fases da Fig. 1 foi utilizado para a análise do cálculo da intensidade e duração. Algumas considerações foram feitas:

- Em todos os procedimentos foram registradas às menores tensões para afundamentos e interrupções e as maiores para elevações de tensão;
- A duração total foi a máxima encontrada para cada um dos eventos.

Apresenta-se na Tab 3, os resultados obtidos.

Tabela 3. Comparação entre os procedimentos para os sinais da Fig. 1

Procedimento	Intensidade (pu)	Duração (ms)	Períodos Transit.	Nº de eventos
(1) AT	0,260	50,00	-	-
(1) ET	1,105	0,00	-	-
(2) AT	0,214	58,33	-	-
(2) ET	1,115	41,66	-	-
(3) AT	0,171	68,75	-	-
(3) ET	1,169	49,22	-	-
Prop. AT	0,168	68,49	4	1
Prop. ET	1,169	44,54	4	1

De acordo com a Tab. 3, percebe-se que, apesar do procedimento (1) ter identificado uma elevação de tensão, não houve outra amostra acima de 1,1 pu para identificar a duração. Apesar da fase C também apresentar um afundamento de tensão, o tempo definido do evento se deu pelo afundamento na fase A em todos os procedimentos, a qual iniciou antes e permaneceu até a última amostra do sinal (Fig. 1).

A intensidade registrada do afundamento de tensão foi referente ao da fase A que apresentou o menor resultado para todo o sinal amostrado. Os períodos transitórios, utilizados no procedimento proposto, foram semelhantes às três fases e registrados como fazendo parte de um mesmo evento para o afundamento de tensão e para a elevação de tensão.

5.3 Falta consecutiva

O sinal da fase A da Fig. 10 foi utilizado para a detecção e classificação da VTCD de uma falta consecutiva. Apresenta-se na Tab. 4, a resposta aos procedimentos analisados.

Apesar de apresentar dois afundamentos de tensão em tempos diferentes, o procedimento proposto classificou o

Tabela 4. Comparação entre os procedimentos para o sinal da fase A da Fig. 10

Procedimento	Intensidade (pu)	Duração (ms)	Períodos Transit.	Nº de eventos
(1)	0,244	383,33	-	-
(2)	0,244	391,66	-	-
(3)	0,243	394,28	-	-
Proposto	0,240	394,28	4	1

evento como sendo único. A energia dos coeficientes de detalhe foi responsável por identificar o início e o final de cada afundamento de tensão. O valor mínimo identificado foi o resultado referente a todo evento em análise.

Os resultados referentes aos procedimentos (1) e (2) apresentaram diferenças menores em relação ao proposto para eventos com duração maior. A utilização do método (3) mostrou que os resultados são semelhantes aos encontrados em todas as análises realizadas. Porém, o procedimento proposto apresenta a vantagem de identificar períodos transitórios e pode ser utilizado para a detecção de outros distúrbios, tornando o medidor de QEE o mais versátil possível.

6. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um procedimento para detecção e classificação de VTCD utilizando a TWDR. Uma comparação entre os procedimentos tradicionais com o valor RMS e a TWDR é apresentada, considerando o número de amostras por ciclo, o tamanho da janela e a detecção em eventos evolutivos e consecutivos.

O procedimento utiliza uma taxa de amostragem de 64 amostras por ciclo e uma janela de meio ciclo calculada a amostra por amostra. A energia dos coeficientes de aproximação da TWDR é utilizada para a detecção da intensidade e da duração do evento. A energia dos coeficientes de detalhe é utilizada para identificar a quantidade de períodos transitórios e de eventos presentes em determinado sinal.

Análise dos resultados obtidos mostrou que os procedimentos embarcados nos medidores de QEE, que registram um valor a cada ciclo do sinal, pode apresentar valores de duração e intensidade diferentes. Isso pode resultar em diagnósticos incorretos, principalmente quando a intensidade estiver próxima dos limiares de detecção ou quando a duração for próxima de um ciclo.

A utilização de uma janela de meio ciclo do valor RMS, calculada amostra por amostra, apresentou resultados para intensidade e duração semelhantes ao procedimento proposto. Este, porém, acrescenta informações de períodos transitórios e número de eventos, podendo ser utilizado no estudo de outros tipos de eventos nos sistemas elétricos.

Este trabalho teve como objetivo trazer melhorias aos procedimentos utilizados em medidores de QEE. Como contribuição, é apresentado um procedimento de detecção e classificação de VTCD de acordo com os padrões impostos pela ANEEL e pelo IEEE, utilizando um método (TWDR) com uma taxa de amostragem definida, diminuição da interferência de transitórios e identificação do número de eventos.

REFERÊNCIAS

- ANEEL (2018). Módulo 8 - qualidade de energia elétrica. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST*.
- Barros, J. and Perez, E. (2006). Limitations in the use of r.m.s. value in power quality analysis. In *2006 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, 2261–2264. doi:10.1109/IMTC.2006.328575.
- Bollen, M.H.J. (2000). Understanding power quality problems. In *Book*.
- Costa, F.B. (2010). Uma técnica de diagnóstico em tempo real de distúrbios transitórios baseada na transformada wavelet para uso em registradores digitais de perturbação. *Tese de Doutorado*.
- Dugan, R.C., McGranaghan, M.F., Santoso, S., and Beaty, H.W. (2004). *Electrical power systems quality*.
- I.Daubechies (1992). Ten lectures on wavelets. In *Philadelphia, USA: CBMS-NSF Regional Conference Series, SIAM*.
- IEEE (2014). Ieee guide for voltage sag indices. *IEEE P1564/D19*, 1–55.
- Mali, V.P., Chakrasali, R.L., and Aprameya, K.S. (2015). A technical investigation of voltage sag. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 4(10), 60–68.
- Mallat, S.G. (1989). A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11(7), 674–693. doi:10.1109/34.192463.
- Matz, V., Radil, T., Ramos, P., and Serra, A.C. (2007). Automated power quality monitoring system for on-line detection and classification of disturbances. In *2007 IEEE Instrumentation Measurement Technology Conference IMTC 2007*, 1–6. doi:10.1109/IMTC.2007.379104.
- Mohan, R.M., Basha, S.M., and Subramanyam, A. (2014). Comparison of voltage sag and swell detection algorithms in power system. *International Journal of Engineering Research and Development*, 10(8), 29–25.
- Morgan, R.L. (1999). Ieee power quality event characterization : fault related test wave form. available at <http://grouper.ieee.org/groups/1159/2/testwave.html>. In *Page*.
- Santos, W.C. (2016). Identificação de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição. *Tese de Doutorado*.
- Thakur, P. and Singh, A.K. (2012). A novel way to quantify the magnitude of voltage sag. In *Electrical Engineering*. doi:DOI10.1007/s00202-012-0268-0.
- y. Zhu, H. and Chen, S. (2006). A wavelet transform method for characterization of voltage variations. In *2006 International Conference on Power System Technology*. doi:10.1109/ICPST.2006.321959.
- Zaro, F.R., Abido, M.A., Ameenuddin, S., and Elamin, I.M. (2012). Characterization of short-duration voltage events. In *2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, 650–654. doi:10.1109/PECon.2012.6450294.
- Zhang, Y. and Zhang, H. (2011). Short duration voltage variation characterization through wavelet analysis. In *2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, 1–5. doi:10.1109/APPEEC.2011.5748454.