

MODELAGEM PROBABILÍSTICA DO RUÍDO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

ÉRICA MANGUEIRA LIMA* CAIO MARCO DOS SANTOS JUNQUEIRA* RODRIGO DE ALMEIDA COELHO† NÚBIA SILVA DANTAS BRITO‡ BENEMAR ALENCAR DE SOUZA‡

**Doutorando(a) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPgEE/UFCG*

†*Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPgEE/UFCG*

‡*Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Campina Grande
Av. Aprígio Veloso, 882, Bairro Universitário
Campina Grande, Paraíba, Brasil*

{erica.lima, caio.junqueira, rodrigo.almeida}@ee.ufcg.edu.br,
{nubia,benemar}@dee.ufcg.edu.br

Abstract— A study on the characteristics of the noise present in electrical distribution systems is presented in this work. Since noise is considered a stochastic problem, a probabilistic approach was adopted so that its modeling is performed through probability distributions and validated by the Kolmogorov-Smirnov adhesion test. In the study, real oscillographic records of medium and low voltage are used, to which a high-pass digital filter is applied for noise extraction. Obtained results corroborate with literature in the use of the Gaussian model for noises in generic power systems and prove that this convention can be adopted for distribution systems. Additionally, parameters are provided for the generation of simulated Gaussian noise. The coefficient of determination (R^2) is used for validation and the results indicate that the proposed noise model can be used in the construction of more realistic databases.

Keywords— Noise, Distribution Systems, Probability Distributions, Filtering, Probabilistic Analysis.

Resumo— Um estudo sobre as características do ruído presente em sistemas de distribuição de energia elétrica é apresentado neste trabalho. Uma vez que o ruído é considerado um processo estocástico, uma abordagem probabilística foi adotada, de modo que sua modelagem é realizada por meio de distribuições de probabilidade e validada pelo teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov. No estudo, são utilizados registros oscilográficos reais de média e baixa tensão, aos quais foram aplicados um filtro digital passa-altas para extração do ruído. Os resultados obtidos corroboram a literatura no uso do modelo gaussiano para os ruídos em sistemas de potência genéricos e comprovam que esta convenção pode ser adotada para os sistemas de distribuição. Adicionalmente, são fornecidos parâmetros para geração do ruído gaussiano simulado. O coeficiente de determinação (R^2) é utilizado para validação, e os resultados indicam que o modelo de ruído proposto pode ser utilizado na construção de bases de dados mais realistas.

Palavras-chave— Ruído, Sistemas de Distribuição, Distribuições de Probabilidade, Filtragem, Análise Probabilística.

1 Introdução

O ruído elétrico integra a classe de distúrbios que deterioram a Qualidade da Energia Elétrica (QEE), a qual pode ser designada como sendo uma medida que expressa quão bem a energia elétrica está sendo transmitida aos consumidores.

A palavra ‘ruído’ origina-se do latim *rugitus* (rugido), enquanto que o termo ‘ruído elétrico’ descreve o fenômeno da interferência no sistema elétrico de potência (SEP) causada por emissão eletromagnética ou por transmissões de rádio frequência provenientes de equipamentos tais como: equipamentos eletrônicos de potência, retificadores a estado sólido, fontes chaveadas, circuitos de controle, aterramento inadequado, etc. (Arruda, 2003).

Na prática, os ruídos elétricos estão presentes continuamente nos sinais de tensão e corrente reais e, como consequência, podem interferir na operação de equipamentos, de sistemas e, em particular, no desempenho de métodos de diagnóstico

de distúrbios (Costa, 2010). Via de regra, tais métodos são desenvolvidos baseando-se em modelos e utilizando bases de dados simuladas, as quais para serem mais realísticas deveriam contemplar a presença do ruído elétrico.

Segundo Wen et al. (2017), o ruído presente nos sinais provenientes dos sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE) é um ruído branco, aditivo e com distribuição normal (gaussiano). Os autores adotaram esse modelo porque consideraram que as características aleatórias dos transdutores de entrada e dos circuitos de aquisição durante o processo de medição podem ser modeladas como um ruído branco aditivo. Nessa mesma linha, Kuhar et al. (2017) adicionaram um ruído branco gaussiano com média zero às medições de um estudo de propagação do ruído no processo de estimação de estados de SDEE. Os autores demonstraram que o ruído propagado durante o processo de estimação afetou a escolha dos locais de instalação dos equipamentos de medição, e consequentemente a observabilidade do sistema. A aná-

lise do estado da arte mostrou que o ruído gaussiano é predominante, entretanto, não se encontrou comprovação matemática consistente dessa escolha, principalmente para os SDEE.

A exceção observada foi o trabalho de Costa (2010), que procurou justificar o uso desse modelo para sinais reais provenientes dos sistemas de transmissão. No trabalho, o autor conclui que, efetivamente, o ruído presente nesses sinais tem distribuição normal, como também fornece os parâmetros necessários para modelá-lo.

Isto posto, apresenta-se neste trabalho um estudo do ruído inerente aos sinais reais provenientes dos SDEE, o qual teve como objetivos: i) analisar minuciosamente as características desse distúrbio; ii) identificar o modelo mais adequado para descrever o ruído; iii) formalizar matematicamente o modelo; iv) prover parâmetros (média e desvio padrão) para modelagem do ruído, baseados em registros advindos dos sistemas de média e baixa tensão.

Este artigo está dividido em sete seções, incluindo esta introdutória. Sendo as demais: uma breve fundamentação teórica sobre o ruído; a metodologia utilizada para o estudo; o processo para obtenção dos sinais reais; o método de extração do ruído; a modelagem do ruído; e as conclusões.

2 Ruído em Sistemas de Potência

Sucintamente, ruído é um sinal indesejável que surge superposto às correntes e às tensões dos SEP, tendo como característica principal um espectro de banda larga e conteúdo abaixo de 200 kHz. Segundo Dugan et al. (2003), no contexto da QEE, ruído é qualquer distorção do sinal que não possa ser classificada como harmônicos ou transitórios.

Dentre os diversos tipos de ruídos presentes nos SEP, um dos mais estudados é o ruído térmico, relacionado com o aquecimento dos condutores elétricos. No contexto da QEE, o ruído possui uma larga faixa espectral, amplitude típica menor que 1% da componente fundamental e está presente no sinal em todo o tempo (Arruda, 2003). Este tipo de ruído apresenta densidade espectral de potência constante, caracterizando o chamado 'ruído branco'. A análise desses sinais se baseia, usualmente, em modelos idealizados, considerando-o um sinal aleatório com intensidade igual em diferentes frequências (Haykin, 2008).

No âmbito de processamento de sinais, o ruído é considerado um processo estocástico, ou seja, tem um aspecto aleatório que o impede de ser perfeitamente reconstruído com base no seu histórico. No entanto, a amplitude ou fase desses sinais podem ser previstas a partir de uma probabilidade ou distribuição de probabilidade específica, considerando alguns fatores conhecidos (Garcia, 2008).

Usualmente, os ruídos podem ser considerados processos estocásticos estacionários no sentido amplo ou, do inglês, WSS (*wide-sense stationary*), isto é, sua média $E[X_t]$ não depende do tempo e sua função de correlação $E[X_{t_1}, X_{t_2}]$ depende apenas de $\tau = t_1 - t_2$ (Gubner, 2006). Além disso, o ruído é um sinal ergódico na média, ou seja, suas probabilidades estatísticas podem ser deduzidas a partir da análise de um único processo estocástico.

Essas duas hipóteses, a ergodicidade na média e a estacionaridade no sentido amplo, possibilitam a modelagem do ruído a partir de distribuições de probabilidade.

Outro aspecto importante a ser considerado no estudo dos ruídos é a relação sinal-ruído ou, do inglês SNR (*signal to noise ratio*). Essa relação compara o nível do sinal com o nível do ruído a ele sobreposto, relacionando suas amplitudes de acordo com (1), na qual $A_{S(t)}$ é a amplitude do sinal e $A_{N(t)}$ a amplitude do ruído.

$$SNR_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{S(t)}}{A_{N(t)}} \right). \quad (1)$$

3 Metodologia

Para extração e análise estatística do ruído foram utilizados sinais reais e apenas um registro de cada tipo (tensão, corrente), considerando que, usualmente, este tipo de ruído é um processo estocástico ergódico na média, estacionário no sentido amplo e com média zero (Garcia, 2008), ou seja, suas probabilidades estatísticas podem ser deduzidas a partir da análise de um único processo estocástico. Dessa forma, se várias medidas de tensão ou corrente em instantes de tempo diferentes são obtidas, essas medidas serão variáveis independentes e o ruído que corrompe cada uma delas deverá ter a mesma distribuição de probabilidade (Garcia, 2008).

O objetivo final foi identificar qual a distribuição de probabilidade que melhor descreve o ruído presente em um SDEE. Para isso, aplicou-se a metodologia apresentada resumidamente abaixo, exibida na Figura 1 e detalhada nas próximas seções.

1. Escolha do registro oscilográfico sem a presença de distúrbios;
2. Identificação dos principais componentes harmônicos;
3. Extração da componente fundamental e harmônicas;
4. Avaliação do sinal restante, ou seja, do ruído, a partir de um histograma de amplitudes;
5. Escolha da distribuição de probabilidade que melhor descreve o ruído, aplicando-se:
 - (a) Inspeção visual a partir da função densidade de probabilidade (FDP).
 - (b) Teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov).

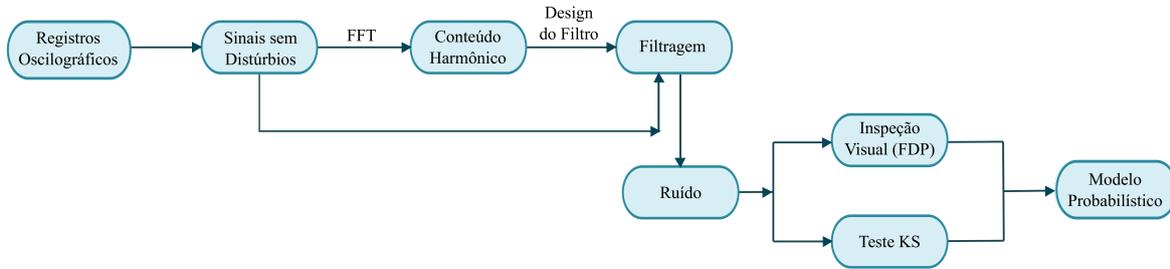


Figura 1: Etapas para identificação e modelagem do ruído.

4 Obtenção dos Sinais Elétricos

A obtenção dos sinais de teste foi executada em duas etapas, conforme descritas a seguir.

4.1 Sinais provenientes de ensaios

Os sinais desse conjunto foram registros oscilográficos de tensão e corrente provenientes de uma base de dados construída em um experimento real (Santos et al., 2010), em um alimentador de distribuição de 13,8 kV (rede de média tensão) pertencente a uma concessionária local. O experimento teve como objetivo realizar ensaios de campo de faltas de alta impedância (FAI). Os registros foram coletados por um registrador digital de perturbação (RDP), com frequência de amostragem de 15360 Hz e instalado no ponto de falta.

Devido à configuração dos RDP, calibrados para gravar todo o experimento, os registros oscilográficos têm duração de vários segundos e compreendem os instantes pré e pós-falta. Dessa forma, foi possível considerar apenas a porção pré-falta de cada sinal, o que corresponde ao regime normal de operação (regime permanente).

Segundo Costa (2010), mesmo em regime permanente, as tensões e correntes não são puramente senoidais, sendo compostas da componente fundamental, harmônicos e ruído. Na Figura 2 nota-se que o espectro do sinal contém, principalmente, o terceiro, o quinto e o sétimo harmônico. A componente fundamental não foi exibida a fim de facilitar a visualização dos harmônicos, uma vez que esses tem valores muito pequenos quando comparados com a componente de 60 Hz.

4.2 Sinais provenientes de um qualímetro

Os sinais desse conjunto foram provenientes de um medidor Nexus 1500+[®], o qual é utilizado em concessionárias de energia, visando monitoramento da qualidade do produto e do serviço prestado. Esse equipamento apresenta um monitoramento em tempo real e análises que podem identificar eventos que ocorrem com frequência nos sistemas elétricos. Ele utiliza dois softwares: i) *Communicator EXT*, responsável pela comunicação entre o qualímetro e o computador; ii) *Meter-Manager EXT*, programa principal que realiza os

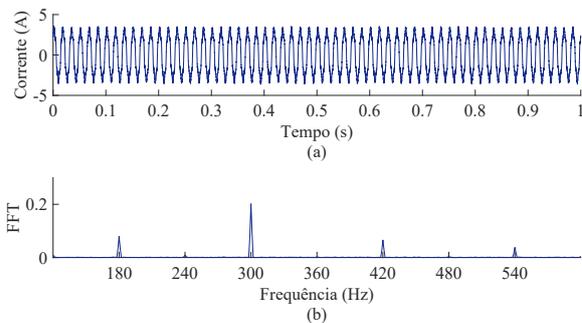


Figura 2: (a) Registro oscilográfico de corrente; (b) Conteúdo harmônico.

cálculos, modifica as funções de alerta, escolhe os períodos de monitoramento, salva os sinais desejados, entre outros.

O experimento foi realizado no quatro de distribuição de energia elétrica durante o funcionamento normal da Laboratório de Sistemas de Potência (LSP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e monitorou-se os sinais de tensão e corrente uma taxa de amostragem de 61.440 Hz (1.024 amostras por ciclo).

Também neste caso, os registros oscilográficos obtidos não são puramente senoidais, com a presença de harmônicos, em especial o terceiro, o quinto e o sétimo, como apresentado na tensão da Figura 3.

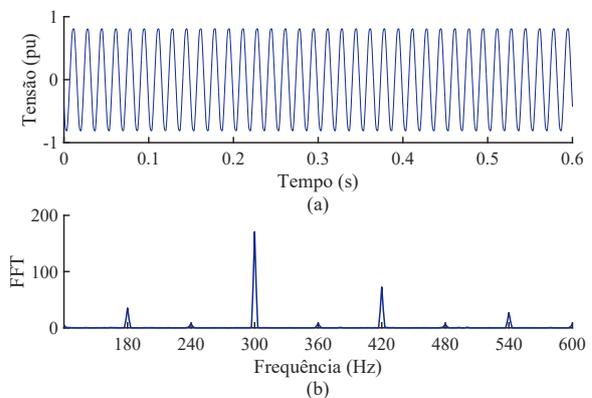


Figura 3: (a) Registro oscilográfico de tensão (220 Vrms); (b) Conteúdo harmônico.

5 Extração do ruído

No contexto dos SEP, quando comparado à componente fundamental (60Hz), o ruído é um distúrbio de alta frequência. Segundo Sandru et al. (2016), os filtros são capazes de realizar operações em um sinal, modificando o seu conteúdo, de modo que apenas algumas componentes do espectro de frequência sejam mantidas. Como o objetivo foi analisar apenas o ruído, aplicou-se aos sinais um filtro digital passa-altas IIR (sigla derivada do *infinite impulse response*). Esse filtro, além de apresentar uma resposta seletiva no domínio da frequência e um tempo de processamento menor do que os filtros FIR (*finite impulse response*), também pode ser obtido por meio de uma conversão das especificações de um filtro analógico.

Ao final, selecionou-se um filtro Butterworth, cuja principal característica é uma resposta em frequência tão plana quanto possível em sua banda de passagem, sem apresentar ondulações (Fadlollah et al., 2017). A resposta em frequência desse filtro é apresentada na Figura 4, e como se vê, ele é completamente plano na banda de passagem.

O filtro foi projetado com auxílio de um software comercial, e considerou-se: i) frequência de corte (f_c) 1800 Hz, ou seja, bem maior que a frequência fundamental, visando filtrar possíveis harmônicos inerentes ao SDEE; ii) ordem 10, visando obter uma transição melhor entre a banda de rejeição e a de passagem.

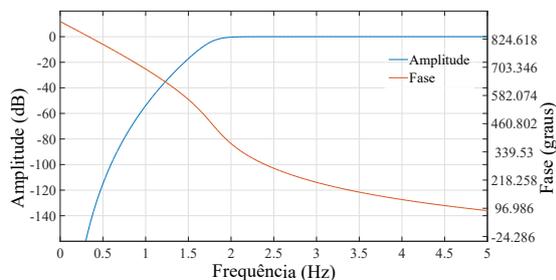


Figura 4: Resposta de amplitude e fase do filtro Butterworth.

A aplicação do filtro aos quatro sinais selecionados resultou nos gráficos mostrados na Figura 5, que representam os respectivos ruídos. Constatou-se que o ruído do sinal no local de fornecimento ao consumidor, ou seja, o sinal do LSP, possui amplitude menor que os demais, isto é, apresenta maior relação sinal ruído (SNR), conforme mostrado na Tabela 1. Dentre os diversos fatores que tornam os sinais para o consumidor mais "limpos", destaca-se a presença dos transformadores $Y - \Delta$, nos quais o lado Δ comporta-se como um filtro de harmônicos de sequência zero (3° , 6° , 9° ...).

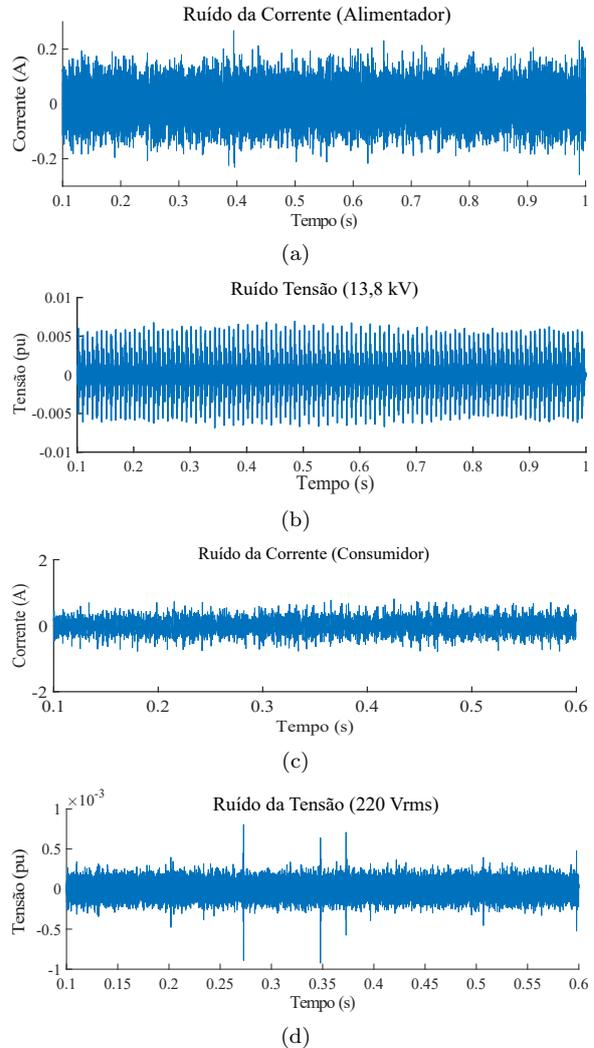


Figura 5: Ruído no sinais de (a) corrente e (b) tensão no alimentador e (c) corrente e (d) tensão do consumidor.

6 Processo de Modelagem do Ruído

Após o estudo das características do ruído, o próximo passo consistiu em aplicar o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, ou teste KS. Este é um teste não-paramétrico que tem como objetivo verificar se uma série de variáveis aleatórias (ou processo estocástico) tem determinada distribuição teórica, ou seja, averigua se uma amostra pode ser considerada proveniente de uma população com determinada distribuição de probabilidade. Baseia-se na maior diferença vertical entre uma distribuição hipotética e uma empírica (Razali et al., 2011):

$$D = \max_x |F^*(x) - F_n(x)|, \quad (2)$$

sendo: F^* , a distribuição hipotética e F_n , a distribuição empírica obtida a partir do histograma dos dados.

Basicamente, este é um teste da hipótese

Tabela 1: Valores de SNR para os sinais analisados

Tipo de sinal	Amplitude do sinal	Amplitude do ruído	SNR (dB)
$V_{(alimentador)}$	0,8208 pu	0,0132 pu	35,8976
$I_{(alimentador)}$	76,9819 A	0,2676 A	49,1781
$V_{(qualímetro)}$	0,8091 pu	$7,0817 \cdot 10^{-4}$ pu	61,1568
$I_{(qualímetro)}$	20,21 A	0,6984 A	29,229

nula¹. No caso do teste KS, verifica-se o valor-p, definido como a probabilidade de se observar um valor da estatística de teste maior ou igual ao encontrado sob a hipótese nula (Ferreira and Patino, 2015). Na prática, se o valor-p for menor que 0,05, então a probabilidade de que os dados correspondam a determinada distribuição é muito pequena ($h = 1$).

Inicialmente, a análise se concentrou nos sinais de corrente e tensão do alimentador de 13,8 kV, cujos histogramas das amplitudes dos ruídos para a corrente e tensão são apresentados, em cinza, nas Figuras 6 (a) e (b), respectivamente. Resumidamente, um histograma indica a quantidade de vezes que cada valor de amplitude ocorre durante o período de tempo analisado. Conforme esperado, ambos são aproximadamente simétricos em torno do zero, ou seja, o valor do ruído tem a mesma probabilidade de assumir valores positivos ou negativos (Garcia, 2008).

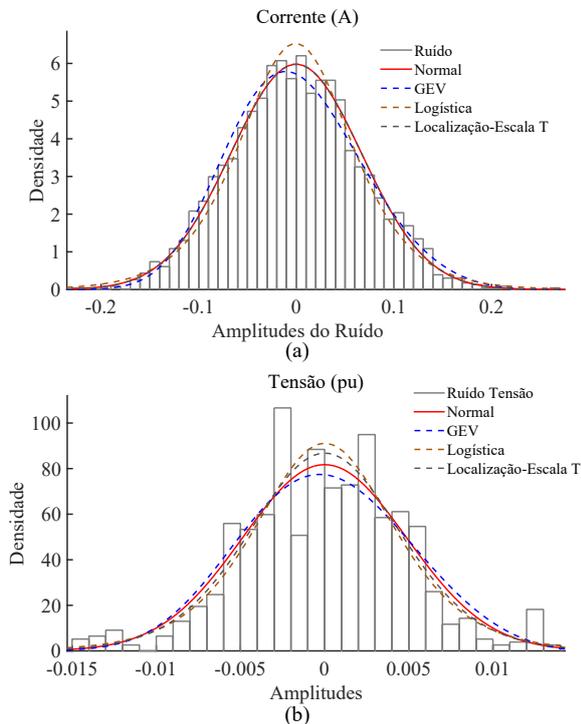


Figura 6: Função distribuição de probabilidade para o ruído na (a) corrente e (b) tensão do alimentador.

Em seguida, aplicou-se o teste KS para to-

¹A hipótese nula é verdadeira ($h = 0$) se os dados seguem a distribuição especificada, caso contrário, $h = 1$.

das as distribuições de probabilidade que permitissem dados tanto positivos quanto negativos, sendo elas: kernel normal, normal, valores extremos (EV), valores extremos generalizados (GEV), logística e localização-escala T. Por questão de legibilidade, apenas as distribuições que passaram no teste estão apresentadas na Figura 6.

Os resultados estão apresentados na Tabela 2, na qual observa-se:

- A hipótese nula não foi satisfeita para a distribuição EV, ou seja, o valor-p foi menor que 5%;
- Apesar dos bons resultados obtidos, a distribuição kernel foi desconsiderada, pois se trata de uma estimativa de densidade não-paramétrica, ou seja, utiliza diretamente os dados para estimação e por isso se adapta mais facilmente que as demais. No entanto, para atender um dos objetivos deste trabalho, que é a construção de bases de dados simulados, as distribuições calculadas a partir de parâmetros são mais adequadas, pois podem ser aplicadas futuramente sem a necessidade de dados reais;
- A distribuição que apresentou o maior valor-p foi a normal ou gaussiana.

Em razão destas premissas, a distribuição normal foi a que melhor atendeu aos requisitos da aplicação. Matematicamente, a FDP de uma variável aleatória ou processo estocástico com distribuição normal é dada por (Garcia, 2008):

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3)$$

na qual m é a média, σ o desvio padrão, e σ^2 a variância. Portanto, os únicos parâmetros requeridos são a média e o desvio padrão. Segundo Garcia (2008), em geral, a distribuição normal está centralizada aproximadamente em $x = m$ e tem largura proporcional a σ .

Todo o procedimento foi aplicado aos sinais do qualímetro, que representam a tensão e corrente entregue ao consumidor. O histograma do ruído em conjunto com as distribuições de probabilidade que passaram no teste e os resultados do teste KS estão apresentados nas Figuras 7 (a) e (b) e Tabela 2, respectivamente. A estimativa de densidade Kernel foi desconsiderada conforme já apresentado. Os resultados mostraram que:

Tabela 2: Resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov (Valor-p)

Tipo de Sinal		Valor-p Distribuições					
		Kernel	Normal	EV	GEV	Logística	Localização-Escala T
Média Tensão (13.8 kV)	Tensão	0,8540	0,6768	0,0001	0,1908	0,1305	0,2982
	Corrente	0,8811	0,9184	0,0000	0,2654	0,3526	0,9176
Baixa Tensão (220 Vrms)	Tensão	0,9571	0,7602	0,0000	0,0000	0,0703	0,6651
	Corrente	0,9307	0,6298	0,0108	0,4338	0,2691	0,5408

- A distribuição EV não passou no teste para ambos sinais, sendo descartada.
- A distribuição normal apresentou o maior valor-p, portanto, a que melhor se justou aos dados. Isto mostra que, apesar do sinal de tensão do consumidor possuir menos ruído que o sinal do alimentador, o ruído pode ser modelado da mesma forma, mudando apenas a relação sinal-ruído.

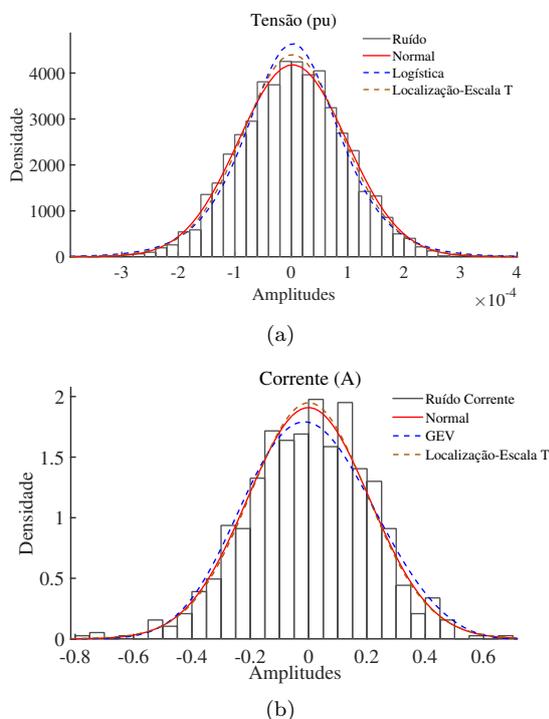


Figura 7: Funções de distribuição de probabilidade para o ruído na (a) tensão e (b) corrente do consumidor.

Ao final, chegou-se aos resultados apresentados na Tabela 3, na qual estão discriminados os valores dos parâmetros do modelo do ruído para sinais de baixa e média tensão. De posse desses valores, é possível construir uma base de dados de sinais elétricos bastante realista. Como se trata de um processo estocástico, o que se deseja é que os ruídos simulados mantenham a distribuição de probabilidade e não que sejam idênticos.

A validação dos modelos propostos para os sinais de média e baixa tensão foi feita a partir do

coeficiente de determinação R^2 , o qual é comumente utilizado para análise do ajustamento de um modelo estatístico em relação a um conjunto de dados (Dowdy et al., 2011). Esse coeficiente é definido por:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST}, \quad (4)$$

no qual,

$$SSR = \sum_{m=1}^n (s_r[m] - \bar{s})^2, \quad (5)$$

$$SSE = \sum_{m=1}^n (s[m] - s_r[m])^2, \quad (6)$$

$$SST = \sum_{m=1}^n (s[m] - \bar{s})^2, \quad (7)$$

em que: SSR é a soma dos erros quadráticos do sinal simulado em relação à média do sinal real; SSE representa a soma dos erros quadráticos entre o sinal real e o sinal simulado; SST é a soma dos erros quadráticos entre o sinal real e seu valor médio, n é o número de amostras do sinal; e \bar{s} é o valor médio do sinal real.

O valor de R^2 varia entre 0 e 1: quanto mais próximo de 1, melhor o nível de exatidão, ao passo que um coeficiente próximo de zero indica que a simulação possui baixa exatidão.

O coeficiente de determinação foi calculado para a comparação entre 24 sinais reais e simulados, dentre tensões e correntes em média e baixa tensão, respeitando os devidos parâmetros da Tabela 3. Os resultados para cada teste estão apresentados na Figura 8. O eixo das abcissas representa cada um dos testes realizados e o eixo das ordenadas o valor de R^2 . Nota-se que os valores para este coeficiente foram consideravelmente altos em todos os casos, variando de 0,9874 a 0,999. Portanto, o modelo probabilístico e os parâmetros propostos auxiliam, de fato, na geração de sinais simulados muito semelhantes aos reais. Por fim, embora os medidores utilizados neste estudo apresentem uma boa precisão, é importante salientar que o modelo proposto inclui também o ruído térmico inerente à qualquer medição.

Tabela 3: Parâmetros para geração do ruído com distribuição normal.

	Tipo de Sinal	Média m	Variância σ^2
Média Tensão (13.8 kV)	Tensão	$-7,16418 \times 10^{-7}$	$2,38195 \times 10^{-5}$
	Corrente	-0,000153435	0,00445182
Baixa Tensão (220 Vrms)	Tensão	$2,50683 \times 10^{-6}$	$9,11059 \times 10^{-9}$
	Corrente	-0,000525652	0,04370000

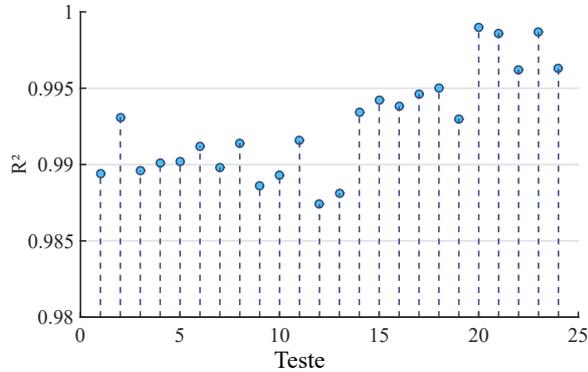


Figura 8: Valores do coeficiente de determinação R^2 para os 24 testes realizados.

7 Conclusões

Este trabalho buscou formalizar o uso da distribuição normal - ou gaussiana - para representação do ruído em sistemas de distribuição de energia elétrica. Registros oscilográficos reais foram utilizados para extração, análise e modelagem do ruído. O teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov foi adotado e por meio da avaliação do valor-p, corroborou-se com os trabalhos que usam a distribuição gaussiana para representar o ruído elétrico, descrevendo-o bem tanto em sinais de média quanto de baixa tensão.

Adicionalmente, foram fornecidos parâmetros (média e desvio padrão) para simulação futura desses ruídos. Apresentou-se também os valores da relação sinal-ruído (SNR) encontrados para esses sinais, variando de 30 a 60 dB, aproximadamente. A validação do modelo proposto foi feita a partir da comparação entre sinais reais e simulados com os parâmetros fornecidos, utilizando como critério o coeficiente de determinação R^2 . O resultados mostraram que, para todos os sinais testados, o R^2 está bem próximo de 1, portanto, sinais simulados utilizando o modelo de ruído apresentado são muito similares aos sinais reais. Sendo assim, a principal contribuição deste estudo é nortear a construção de bases de dados cada vez mais realísticas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

(CNPq), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Coordenação de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da UFCG (COPELE).

Referências

- Arruda, E. F. d. (2003). *Análise de distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica utilizando a transformada wavelet*, PhD thesis, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brazil.
- 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*, PhD thesis, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brazil.
- Dowdy, S., Wearden, S. and Chilko, D. (2011). *Statistics for research*, Vol. 512, John Wiley & Sons.
- Dugan, R. C., McGranaghan, M. F. and Beaty, H. W. (2003). *Electrical power systems quality*, New York, NY: McGraw-Hill, | c2003, 2nd edition.
- Fadlollah, I., Mechaqrane, A. and Ahaitouf, A. (2017). Butterworth low pass filter design using evolutionary algorithm, *Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS), 2017 International Conference on*, IEEE, pp. 1–6.
- Ferreira, J. C. and Patino, C. M. (2015). O que realmente significa o valor-p?, *Jornal Brasileiro de Pneumologia* **41**(5): 485–485.
- Garcia, A. L. (2008). *Probability, statistics, and random processes for electrical engineering*, Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.
- Gubner, J. A. (2006). *Probability and random processes for electrical and computer engineers*, Cambridge University Press.
- Haykin, S. (2008). *Communication systems*, John Wiley & Sons.

- Kuhar, U., Kosec, G. and Švigelj, A. (2017). Measurement noise propagation in distribution-system state estimation, *Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), 2017 40th International Convention on*, IEEE, pp. 1049–1054.
- Razali, N. M., Wah, Y. B. et al. (2011). Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests, *Journal of statistical modeling and analytics* **2**(1): 21–33.
- Sandru, F.-D., Nanu, S., Silea, I. and Miclea, R.-C. (2016). Kalman and butterworth filtering for gnss/ins data, *Electronics and Telecommunications (ISETC), 2016 12th IEEE International Symposium on*, IEEE, pp. 257–260.
- Santos, W., Costa, F., Silva, J., Lira, G., Souza, B., Brito, N. and Junior, M. P. (2010). Automatic building of a simulated high impedance fault database, *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), 2010 IEEE/PES*, IEEE, pp. 550–554.
- Wen, H., Zhang, J., Yao, W. and Tang, L. (2017). Fft-based amplitude estimation of power distribution systems signal distorted by harmonics and noise, *IEEE Transactions on Industrial Informatics* .