www.revistaft.com.br

Revista FT | ISSN 1678-0817 | v. 30, n. 164, 2026 | DOI: 10.69849/njxsbv62

Detecção de eventos associados a descargas atmosféricas por processamento digital de sinais

Detection of events associated with atmospheric discharges using digital signal processing

Daniele Mendes Oliveira[1]; Peterson Melo dos Anjos Silva[2]; Saulo César Barroso da Silva[3]; Paulo Henrique Fernandes Lopes[4]; Gabriel Ferreira Neves[5]; José Felipe Braz Gonçalves[6]; Joyce Cristina de Oliveira Soares[7]; Marco Aurélio Tonocchi[8]; Silvana Julia da Silveira Diniz[9]

Resumo

Este estudo investiga a detecção de eventos associados a descargas atmosféricas por processamento digital de sinais, função complementar ao Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA), que não registra eletronicamente esses eventos. O trabalho avalia, por simulação computacional, três estratégias de detecção: limiar de amplitude, limiar de taxa de variação temporal e critério combinado. A metodologia utiliza simulação de Monte Carlo em Python, com 3.000 janelas de 1 ms geradas em 15 cenários que combinam três níveis de ruído, três faixas de intensidade e pulsos impulsivos isolados. O desempenho é medido por taxa de detecção, falsos positivos, tempo de resposta e curvas ROC. O limiar de amplitude alcança a maior taxa de detecção (100 %, 99,7 % e 71,7 % nos ruídos baixo, médio e alto), enquanto o critério combinado se aproxima do de taxa de variação e não reduz os falsos positivos causados por pulsos impulsivos.

[1] Centro Universitário Una – Campus Aimorés – Belo Horizonte – MG – Brasil.
[2] Centro Universitário Una – LIVE – Belo Horizonte – MG – Brasil.
[3] Centro Universitário Una – Campus Aimorés – Belo Horizonte – MG – Brasil.
[4] Centro Universitário Una – LIVE – Belo Horizonte – MG – Brasil.
[5] Centro Universitário Una – Campus Karaíba – Uberlandia – MG – Brasil.
[6] Centro Universitário Una – LIVE – Belo Horizonte – MG – Brasil.
[7] Centro Universitário Una – Campus Aimorés – Belo Horizonte – MG – Brasil.
[8] Centro Universitário Una – Campus Karaíba – Uberlandia – MG – Brasil.
[9] Orientadora

A duração do sinal separa descargas de pulsos e, em um critério de persistência, elimina esses falsos positivos ao custo de cerca de 20 μs de latência, embora essa separação dependa da modelagem dos pulsos. Os resultados indicam o desempenho relativo das estratégias e carecem de validação com sinais reais.

Palavras-Chave

Descargas atmosféricas, Processamento digital de sinais, Detecção de eventos, Simulação computacional, SPDA.

Abstract

This study investigates the detection of events associated with lightning strikes through digital signal processing, a function that complements the Lightning Protection System (LPS), which does not electronically record these events. The study evaluates, through computer simulation, three detection strategies: amplitude threshold, temporal variation rate threshold, and a combined criterion. The methodology employs Monte Carlo simulation in Python, with 3,000 1-ms windows generated across 15 scenarios that combine three noise levels, three intensity ranges, and isolated impulse pulses. Performance is measured by detection rate, false positives, response time, and ROC curves. The amplitude threshold achieves the highest detection rate (100%, 99.7%, and 71.7% for low, medium, and high noise levels, respectively), while the combined criterion approaches that of the rate-of-change threshold and does not reduce the false positives caused by impulse pulses. Signal duration distinguishes discharges from pulses and, using a persistence criterion, eliminates these false positives at the cost of approximately 20 μs of latency, although this distinction depends on the modeling of the pulses. The results indicate the relative performance of the strategies and require validation with real signals.

Keywords

Atmospheric discharges, Digital signal processing, Event detection, Computer simulation, SPDA.

1. Introdução

As descargas atmosféricas são fenômenos relevantes para a Engenharia Elétrica, pois, além dos danos causados pela incidência direta, geram perturbações eletromagnéticas capazes de afetar

instalações e equipamentos (RAKOV; UMAN, 2003; MEREDITH; EARLES; OTERO, 2012; YEUNG et al., 2025).

Os Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA), cujos requisitos são estabelecidos pela série ABNT NBR 5419 (ABNT, 2026), protegem as estruturas por meio da interceptação, condução e dispersão segura das correntes de descarga, mas não realizam o monitoramento e o registro eletrônico desses eventos, função que pode ser desempenhada por sistemas complementares de aquisição e processamento de sinais (ZENG et al., 2016).

A relevância desse registro ficou evidente na interrupção de energia de 10 de novembro de 2009, quando o Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) analisou registros da rede BrasilDat para avaliar a ocorrência de descargas nas proximidades do sistema Itaipu e da subestação de Itaberá (INPE, 2009). Esse tipo de registro, contudo, provém de redes de detecção de grande área, o que motiva avaliar métodos aplicáveis a sinais adquiridos localmente.

O processamento digital de sinais permite identificar eventos a partir de características como a amplitude e a taxa de variação temporal, e tem sido empregado na caracterização e na discriminação de descargas atmosféricas (MEHRANZAMIR et al., 2018; DAI et al., 2022). São menos frequentes, porém, as comparações diretas de critérios simples de limiar, isolados e combinados, sob níveis de ruído controlados e na presença de pulsos impulsivos que podem ser confundidos com descargas. Como a avaliação em condições reais é limitada pela dificuldade de obter registros representativos e controlados, a simulação computacional, apoiada em modelos matemáticos da corrente de descarga (RAJIČIĆ; TODOROVSKI, 2018), permite experimentos reproduzíveis com diferentes sinais e níveis de ruído. Parte-se da hipótese de que a combinação dos critérios de amplitude e de taxa de variação reduz os falsos positivos em relação a cada critério isolado, ao custo de possíveis perdas de detecção.

Diante disso, o objetivo geral deste estudo é avaliar, por simulação computacional, o desempenho de três estratégias de detecção de eventos associados a descargas atmosféricas, baseadas em amplitude, em taxa de variação temporal e na combinação desses critérios, sob diferentes condições de ruído, considerando a taxa de detecção, os falsos positivos, o tempo de resposta e a curva ROC. Os objetivos específicos são: (a) revisar a fundamentação teórica sobre descargas atmosféricas, SPDA, efeitos eletromagnéticos e processamento digital de sinais; (b) modelar sinais sintéticos representativos de eventos associados a descargas atmosféricas, de

diferentes condições de ruído e de pulsos impulsivos isolados; (c) implementar estratégias de detecção baseadas em amplitude, em taxa de variação do sinal e na combinação desses parâmetros; (d) avaliar o desempenho das estratégias em diferentes níveis de ruído, segundo as métricas adotadas; (e) investigar a duração do sinal como critério complementar para distinguir descargas de pulsos impulsivos, e verificar a classificação por intensidade e o registro dos eventos detectados; (f) comparar os resultados e identificar a estratégia mais robusta na detecção dos eventos simulados.

A avaliação é inteiramente computacional, sem sensor físico, de modo que os resultados indicam o desempenho relativo das estratégias, e não a sensibilidade de um sistema real. O trabalho também não altera as funções do SPDA: avalia apenas uma camada complementar de detecção e registro

2. Revisão da Literatura

2.1 Descargas atmosféricas

As descargas atmosféricas são fenômenos elétricos naturais associados à neutralização de cargas na atmosfera, podendo ocorrer entre nuvens, no interior de uma nuvem ou entre nuvem e solo. As descargas nuvem-solo são as mais relevantes para a Engenharia Elétrica, pelos efeitos que produzem sobre estruturas, sistemas elétricos e equipamentos eletrônicos (RAKOV; UMAN, 2003; COORAY, 2015). Suas correntes têm comportamento transitório, com variações rápidas de amplitude, e podem ser representadas de forma simplificada por modelos de dupla exponencial, que reproduzem a elevação e o decaimento da corrente (RAJIČIĆ; TODOROVSKI, 2018). Essas características transitórias fundamentam as estratégias de detecção investigadas neste trabalho.

2.2 Efeitos eletromagnéticos das descargas atmosféricas

A rápida variação das correntes produz campos elétricos e magnéticos variáveis no tempo, capazes de induzir tensões e correntes transitórias em condutores e equipamentos, conforme as características da descarga, a distância, a geometria e os mecanismos de acoplamento (RAKOV; UMAN, 2003; MEREDITH; EARLES; OTERO, 2012). A ABNT NBR 5419-1 trata esses efeitos como impulso eletromagnético de descarga atmosférica (LEMP – *Lightning Electromagnetic*

Impulse) (ABNT, 2026), e ensaios experimentais confirmam respostas transitórias em condutores associadas a ele (YEUNG et al., 2025). Os efeitos eletromagnéticos sustentam, assim, o uso de sinais transitórios como representação dos eventos de interesse.

2.3 Sistemas de proteção contra descargas atmosféricas

O SPDA reduz os riscos às estruturas por meio da captação, condução e dispersão seguras das correntes de descarga (ABNT, 2026; ZENG et al., 2016). Contudo, não contempla a aquisição, o monitoramento e o registro eletrônico dos eventos, funções que cabem a sistemas complementares de aquisição e processamento de sinais. Este estudo não propõe substituir ou modificar o SPDA, mas avaliar estratégias computacionais de detecção de eventos associados a descargas atmosféricas.

2.4 Aquisição e processamento digital de sinais

A aquisição envolve sensoriamento, condicionamento e conversão analógico-digital, com sensores de campo elétrico, sensores magnéticos ou medidores de corrente, como as bobinas de Rogowski (XIAO et al., 2024). Digitalizado, o sinal pode ser analisado no tempo (amplitude, duração e taxa de variação) e na frequência, por exemplo pela Transformada de Fourier (OPPENHEIM; SCHAFER, 2010). Pelo teorema de Nyquist-Shannon, a frequência de amostragem deve superar o dobro da maior frequência do sinal, a fim de evitar *aliasing* (OPPENHEIM; SCHAFER, 2010). Na literatura, Mehranzamir et al. (2018) empregaram *wavelets* para discriminar descargas nuvem-solo, e Dai et al. (2022) aplicaram métodos de transformação a sinais de campo elétrico de descargas.

2.5 Ruído e estratégias de detecção

O ruído pode apresentar características semelhantes às dos eventos de interesse, de modo que o desempenho de um detector varia com as condições de perturbação. O sinal observado é representado pela soma do sinal do evento e do ruído:

$$x[n] = s[n] + w[n] \quad (1)$$

em que x[n] é o sinal observado, s[n] o sinal associado ao evento e w[n] o ruído. A relação sinal-ruído (SNR) de pico, em decibéis, é dada por:

$$SNR = 20\left(\frac{A}{\sigma}\right) \tag{2}$$

em que A é a amplitude de pico do evento e σ o desvio-padrão do ruído. A detecção pode ser formulada como decisão entre as hipóteses H_0 (ausência do evento) e H_1 (presença do evento) (KAY, 1998).

Três estratégias são consideradas. Na detecção por amplitude, declara-se o evento quando o sinal ultrapassa um limiar. Ela é simples, mas picos de ruído acima do limiar geram falsos positivos. Na detecção por taxa de variação, utiliza-se a derivada do sinal,

$$\frac{dV(t)}{dt} \tag{3}$$

aproximada em tempo discreto por:

$$d[n] \approx \frac{x[n] - x[n-1]}{T_s} \tag{4}$$

em que T_s é o período de amostragem. Como componentes de alta frequência do ruído também têm taxa de variação elevada, esse critério isolado pode produzir falsos positivos. Na detecção combinada, exigem-se os dois critérios. Isso aumenta a seletividade, mas pode impedir a identificação de eventos que não os satisfaçam simultaneamente; seu desempenho deve, portanto, ser determinado experimentalmente.

2.6 Métricas de desempenho

As decisões são classificadas em verdadeiros positivos (VP), falsos positivos (FP), verdadeiros negativos (VN) e falsos negativos (FN), das quais derivam a taxa de detecção, a taxa de falso alarme, a precisão e a medida F1:

$$Taxa\ de\ detecção = \frac{VP}{VP + FN} \tag{5}$$

$$Taxa\ de\ falso\ alarme = \frac{FP}{FP + VN} \tag{6}$$

A variação do limiar permite construir curvas ROC (*Receiver Operating Characteristic*), cuja área (AUC) resume o desempenho do método para todos os limiares (FAWCETT, 2006). Avalia-se ainda o tempo de resposta (latência), isto é, o intervalo entre o início do evento e a decisão do sistema.

2.7 Modelagem de sinais sintéticos

Sinais sintéticos permitem experimentos controlados e reproduzíveis, úteis quando não há registros reais suficientes ou controláveis. Rajičić e Todorovski (2018) propõem, para a corrente de retorno, uma função composta pela diferença de dois termos exponenciais, alternativa à função de Heidler da IEC 62305-1 e mais próxima de formas de onda medidas:

$$i(t) = I_m \cdot a \cdot \left\{ exp\ exp\ \left[-b^{n-1} \left(\frac{nt}{\tau} + b \right) \right] - exp\ exp\ \left[- \left(\frac{t}{\tau} + b \right)^n \right] \right\} \qquad (7)$$

em que I_m é a amplitude de pico da corrente e a, b, τ e n são parâmetros de forma da frente de onda. Trata-se de uma simplificação: propagação tridimensional, geometria da instalação, distância, características do sensor e mecanismos de acoplamento não são representados. Os sinais sintéticos devem ser entendidos, portanto, como representações controladas e simplificadas das características de interesse, que permitem comparar as estratégias de detecção em condições reproduzíveis.

Portanto, este referencial teórico estabelece a base para avaliar estratégias de detecção de descargas atmosféricas como complemento ao SPDA. O sinal é modelado como a soma de um evento e de ruído, e a detecção é tratada como uma decisão entre hipóteses, na qual se comparam limiares de amplitude, de taxa de variação e a combinação de ambos. A avaliação é experimental, com sinais sintéticos de dupla exponencial e métricas como taxa de detecção, taxa de falso alarme, F1, curva ROC e latência. Reconhece-se, porém, que o modelo é uma simplificação do fenômeno real, e por isso os resultados devem ser interpretados como desempenho relativo entre as estratégias. A metodologia a seguir detalha como essa avaliação foi conduzida.

3. Metodologia

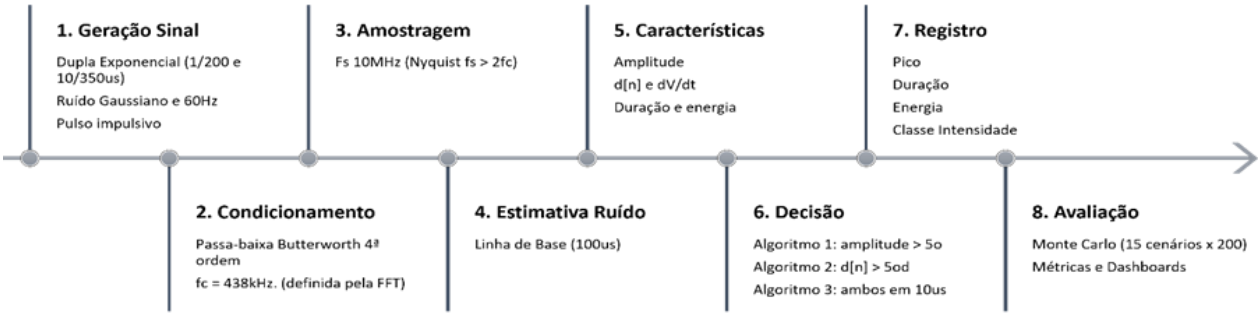
3.1 Tipo de pesquisa

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de natureza experimental, conduzida integralmente por meio de simulação computacional. A abordagem é quantitativa: o desempenho de três algoritmos de detecção é avaliado por métricas numéricas (taxa de detecção, taxa de falsos positivos e tempo de resposta), obtidas por simulação de Monte Carlo (METROPOLIS; ULAM, 1949) sobre sinais sintéticos com parâmetros controlados.

3.2 Ferramentas e ambiente de simulação

As etapas do estudo estão sintetizadas no fluxograma da Figura 1 e são detalhadas nas seções seguintes. Todas as etapas foram modeladas em Python, divididos em dois scripts, o primeiro destinado à simulação, detecção e avaliação e o segundo dedicado à apresentação dos resultados por meio de dashboards.

Figura 1 - Fluxograma da metodologia



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

As simulações foram desenvolvidas em linguagem de programação Python, com o auxílio das bibliotecas NumPy, para operações vetoriais e Transformada Rápida de Fourier (HARRIS et al., 2020); SciPy, para projeto e aplicação de filtros digitais e ajuste numérico de parâmetros (VIRTANEN et al., 2020); pandas, para organização dos resultados (McKINNEY, 2010); e Matplotlib, para os gráficos e o painel de visualização (HUNTER, 2007). A escolha por um ambiente de simulação, em vez de hardware físico, decorre da delimitação apresentada na Seção 1: o objetivo é avaliar a lógica de aquisição, processamento, detecção e classificação do sinal, etapa

que independe de um sensor físico. Para garantir a reprodutibilidade, os números aleatórios foram gerados a partir de uma semente fixa, de modo que a mesma execução produz os mesmos resultados.

3.3 Modelagem dos sinais

3.3.1 Forma de onda do evento

Para a modelagem da forma de onda, realizou-se a decomposição e a aproximação matemática da Equação (7). Inicialmente, considera-se o primeiro termo (cauda):

$$exp\ exp\left[-b^{n-1}\left(\frac{nt}{\tau}+b\right)\right] = exp\ exp\left(-b^{n}\right)\cdot exp\ exp\left(-\frac{nb^{n-1}t}{\tau}\right) \tag{8}$$

Realizando a mudança de variável:

$$\frac{n\cdot b^{n-1}}{\tau} = \alpha \tag{9}$$

O primeiro termo pode ser reescrito como:

$$exp\ exp\left(-b^{n}\right)\cdot exp\ exp\left(-\alpha t\right) \tag{10}$$

Dessa forma, obtém-se uma exponencial simples, equivalente à utilizada na formulação clássica de Bruce e Golde (1941). O segundo termo (frente), representado por:

$$exp\ exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}+b\right)^{n}\right] \tag{11}$$

não corresponde a uma exponencial simples em função do tempo (t), uma vez que a variável temporal está elevada à potência (n). Para facilitar sua linearização, o expoente pode ser reescrito a partir de (b^n), conforme:

$$exp\ exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}+b\right)^{n}\right] = e^{-b^{n}}\cdot exp\ exp\left[-\left(\left(\frac{t}{\tau}+b\right)^{n}-b^{n}\right)\right] \tag{12}$$

Após a manipulação dos dois termos, busca-se aproximar a expressão pela forma clássica, substituindo o expoente do segundo termo por uma função linear do tempo, com inclinação superior à do primeiro termo:

$$\left(\frac{t}{\tau}+b\right)^{n}-b^{n}\approx\beta\cdot t,\qquad \beta>\alpha \tag{13}$$

Essa aproximação transforma o segundo termo (frente) em uma função exponencial linear em relação ao tempo, permitindo representar a expressão em uma forma equivalente à estrutura clássica da função dupla exponencial, conforme apresentado nas Equações (14) e (15).

$$s(t)=A\cdot k\cdot\left(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t}\right),\quad t\geq 0 \tag{14}$$

$$k=\frac{1}{e^{-\alpha t_m}-e^{-\beta t_m}},\ t_m=\frac{lnln\,(\beta/\alpha)}{\beta-\alpha} \tag{15}$$

Em que A é a amplitude de pico, α e β (β > α) são as constantes associadas, respectivamente, à cauda e à frente da onda, k é o fator de normalização que faz o valor máximo de s(t) ser igual a A, e t_m é o instante do pico.

Foram adotadas as formas de onda 1/200 μs e 10/350 μs da ABNT NBR 5419-1 (ABNT, 2026), cujos tempos de frente (1 μs e 10 μs) e de cauda (200 μs e 350 μs) estão dentro das faixas típicas descritas na literatura (BERGER; ANDERSON; KRÖNINGER, 1975). Os parâmetros α e β de cada forma foram determinados por ajuste numérico (mínimos quadrados), de modo que o tempo de frente, $T_1 = 1{,}25\cdot (t_{90} - t_{10})$, e o tempo até o meio valor, T_2, medido a partir da origem virtual, reproduzissem os valores nominais. Os parâmetros obtidos estão na Tabela 1. Em cada repetição, a forma de onda foi sorteada com igual probabilidade entre as duas.

Tabela 1. Parâmetros da dupla exponencial

Forma da onda (µs)	α (s^{-1})	β (s^{-1})	k	di/dt máx. para 30 kA (kA/µs)
1/200	$3{,}517 \times 10^3$	$2{,}674 \times 10^6$	1,010	81
10/350	$2{,}127 \times 10^3$	$2{,}461 \times 10^5$	1,051	7,7

Fonte: Elaborada pelos Autores (2026)

Ressalta-se que, na dupla exponencial clássica, a taxa de variação máxima ocorre em t = 0, característica não observada em correntes medidas (GAMEROTA et al., 2012). Essa simplificação tende a favorecer o critério baseado em taxa de variação e é considerada na discussão dos resultados.

3.3.2 Grandeza simulada e normalização

O sistema proposto não mede a corrente de descarga diretamente, mas a tensão ou o campo induzido por acoplamento eletromagnético (Seção 2.2). Considerou-se que, na região de campo distante, o campo elétrico irradiado é proporcional à corrente na base do canal (UMAN; McLAIN, 1969; RAKOV; UMAN, 2003). Assim, os sinais foram expressos em sistema por unidade (pu), proporcionais à corrente de pico, adotando-se 1 pu ≡ 30 kA, valor típico de referência. A amplitude do evento foi, portanto, A = Ip / 30 kA. Desse modo, o sinal observado x[n] representa a tensão de saída do sensor, proporcional à corrente e expressa em pu, e a taxa de variação d[n] corresponde à variação dessa tensão normalizada no tempo (pu/s), razão pela qual se mantém a notação dV/dt. Os resultados comparam o desempenho relativo dos algoritmos e não a sensibilidade absoluta de um sensor real, que depende do transdutor e da topologia de acoplamento, aspecto indicado como trabalho futuro.

3.3.3 Intensidade dos eventos

A corrente de pico foi dividida em três faixas de intensidade, dentro do intervalo de 10 kA a 200 kA: evento fraco (10 a 20 kA), moderado (20 a 60 kA) e intenso (60 a 200 kA). Em cada repetição, a corrente foi sorteada com distribuição log-uniforme dentro da faixa do cenário, o que distribui os valores de forma equilibrada ao longo das ordens de grandeza.

3.3.4 Ruído e perturbações

O sinal observado foi modelado conforme a Equação (1), $x[n] = s[n] + w[n]$. A componente de ruído $w[n]$ foi formada por:

a) ruído gaussiano branco, com desvio-padrão σ definido na entrada do detector em três níveis: baixo ($\sigma = 0{,}02$ pu), médio ($\sigma = 0{,}08$ pu) e alto ($\sigma = 0{,}25$ pu);

b) oscilação de baixa frequência de 60 Hz, com amplitude de 0,02 pu e fase aleatória, representando a variação natural do ambiente eletromagnético.

Para avaliar a ocorrência de falsos positivos, foram geradas também perturbações impulsivas isoladas, não associadas a descargas, modeladas como pulsos gaussianos de largura entre 50 e 300 ns, amplitude entre 0,33 e 6,67 pu (equivalente à faixa de 10 a 200 kA), polaridade e instante de ocorrência aleatórios.

Cada observação corresponde a uma janela de aquisição de 1 ms. Nas janelas com evento, o início do transitório (t_0) foi sorteado entre 150 e 300 µs; os primeiros 100 µs de toda janela (pré-trigger) não contêm evento e foram usados para estimar o nível de ruído. A relação sinal-ruído de cada janela foi calculada pela Equação (2). Com base nessa composição, foram definidas três classes de janela: condição normal (somente ruído), evento (descarga mais ruído, hipótese H_1) e ruído impulsivo isolado (perturbação mais ruído, hipótese H_0).

3.4 Arquitetura do sistema simulado

O sistema simulado reproduz, em software, a cadeia de aquisição e processamento descrita na Seção 2.4, nas seguintes etapas:

a) geração do sinal: o sinal foi gerado com taxa de 100 MHz, de modo a representar de

forma quase contínua a saída do sensor antes da digitalização.

b) condicionamento: aplicou-se um filtro passa-baixas Butterworth de 4ª ordem, causal, simulando a filtragem analógica anterior ao conversor.

A frequência de corte foi definida pela relação entre largura de banda e tempo de subida da forma de onda mais rápida (1/200 µs), cujo tempo de subida é tr = T_1/1,25 = 0,8 µs:

$$f_c = \frac{0{,}35}{t_r} \approx 438\ kHz \tag{16}$$

A Transformada Rápida de Fourier do sinal confirmou que apenas 0,016 % da energia da forma 1/200 µs está acima de fc (Figura 2).

c) amostragem: o sinal condicionado foi amostrado a fs = 10 MHz (T_s = 100 ns), valor cerca de 23 vezes maior que fc, atendendo ao critério de Nyquist (fs > 2 fc). Nessa taxa, o filtro atenua em 85 dB as componentes em fs /2, tornando desprezível o aliasing.

d) estimativa do ruído: em cada janela, a linha de base (mediana do pré-trigger) foi subtraída do sinal, e o desvio-padrão do ruído foi estimado de forma robusta pelo desvio absoluto mediano (MAD) (ROUSSEEUW; CROUX, 1993):

$$\hat{\sigma} = 1{,}4826 \cdot (|x[n] - (x[n])\ |) \tag{17}$$

calculado no pré-trigger tanto para o sinal x[n] ($\hat{\sigma}$) quanto para a taxa de variação d[n] da Equação (4) ($\hat{\sigma}$d).

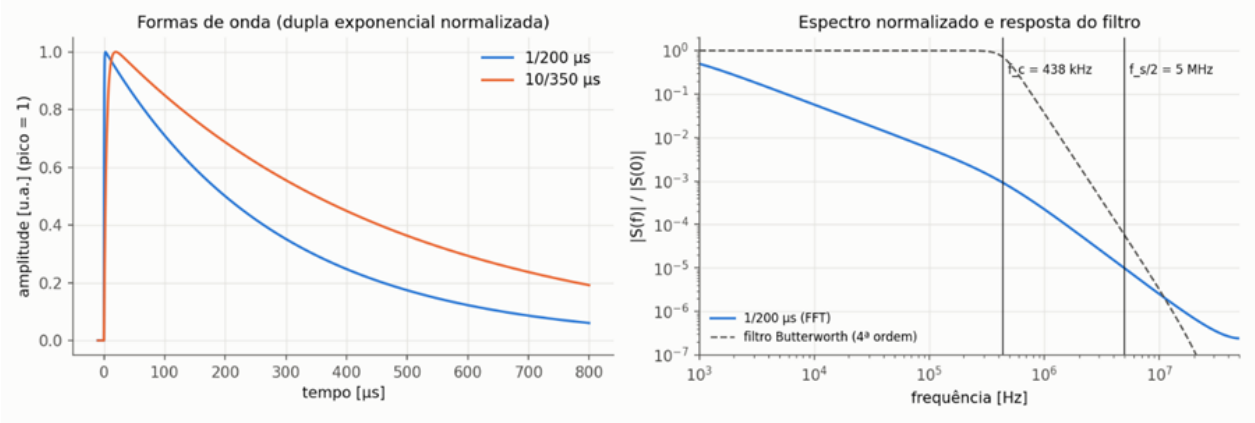
e) extração de características: amplitude |x[n]| e taxa de variação d[n] foram calculadas em todas as amostras. Após cada detecção, foram extraídas: amplitude de pico, nos 500 µs seguintes à decisão; duração, como o intervalo contínuo em que |x[n]| permanece acima de 50 % do pico; e energia, E = Ts · Σ x^2[n], no mesmo intervalo de 500 µs.

f) Decisão: aplicação dos três algoritmos descritos na Seção 3.5.

g) Registro do evento: para cada detecção foram armazenados, a amplitude de pico (em pu

e em corrente estimada, I_{est} = 30 kA × A), a duração, a energia e a classe de intensidade atribuída: fraca (I_{est} < 20 kA), moderada (20 a 60 kA) ou intensa (> 60 kA).

Figura 2. Formas de onda adotadas, espectro (FFT) e resposta do filtro



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.5 Algoritmos de detecção implementados

Foram implementados três algoritmos, descritos conceitualmente na Seção 2.5. Em todos, a busca começa após o pré-trigger, e a decisão corresponde à primeira amostra que atende ao critério.

Algoritmo 1 – Limiar de amplitude: um evento é declarado quando, $|x[n]| > k \cdot \hat{\sigma}$, com k = 5. Para ruído gaussiano, a probabilidade de uma amostra exceder 5σ é de aproximadamente 5,7 × 10^{-7}, o que justifica estatisticamente o limiar (KAY, 1998).

Algoritmo 2 – Taxa de variação (dV/dt): um evento é declarado quando, $|d[n]| > k \cdot \hat{\sigma}_d$, com k = 5 em que d[n] é dado pela Equação (4) e $\hat{\sigma}_d$ é o desvio-padrão de d[n] estimado pela Equação (17).

Algoritmo 3 – Critério combinado: um evento é declarado quando as condições dos Algoritmos 1 ($|x[n]| > k \cdot \hat{\sigma}$) e 2 ($|d[n]| > k \cdot \hat{\sigma}_d$) são satisfeitas em amostras separadas por no máximo W = 10 µs, valor igual ao maior tempo de frente considerado. O instante de decisão é o da última condição satisfeita.

Como análise complementar, avaliou-se uma variante do Algoritmo 3 que exige,

adicionalmente, que o sinal permaneça acima do limiar em pelo menos metade das amostras dos 20 µs seguintes à decisão. O critério baseia-se na diferença de duração entre os eventos, cuja cauda se estende por centenas de microssegundos, e as perturbações impulsivas, com duração inferior a 1 µs.

3.6 Cenários de teste

Foram definidos 15 cenários: nove com evento, combinando os três níveis de ruído (baixo, médio e alto) com as três intensidades (fraco, moderado e intenso); e seis sem evento, combinando os três níveis de ruído com duas condições (somente ruído e ruído com perturbação impulsiva isolada). Cada cenário foi executado 200 vezes, com sorteio independente da forma de onda, da corrente de pico, do instante do evento, do ruído e dos parâmetros da perturbação, totalizando 3.000 janelas. Com 200 repetições, a incerteza de cada taxa estimada, $\pm 1{,}96 \cdot \sqrt{[p(1-p)/N]}$, não ultrapassa ± 6,9 pontos percentuais (intervalo de confiança de 95 %). Os parâmetros da simulação estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros da simulação

Parâmetro	Valor
Taxa de geração do sinal	100 MHz
Filtro de condicionamento	Butterworth passa-baixas, 4ª ordem
Taxa de amostragem	10 MHz (T_s = 100 ns)
Duração da janela / pré-trigger	1 ms / 100 µs
Início do evento (t_0)	150 a 300 µs
Formas de onda	1/200 µs e 10/350 µs
Intensidades	10–20 kA; 20–60 kA; 60–200 kA
Ruído (σ)	0,02; 0,08; 0,25 pu
Limiar	$5\hat{\sigma}$ (amplitude) e $5\hat{\sigma}_d$ (taxa de variação)
Janela do critério combinado	10 µs

Fonte: Elaborada pelos Autores (2026)

3.7 Métricas de avaliação

O desempenho de cada algoritmo foi avaliado por três métricas:

Taxa de detecção, Equação (5): em uma janela com evento, a decisão foi considerada verdadeiro positivo quando ocorreu entre t_0 – 1 µs e t_0 + 50 µs; caso contrário, falso negativo;

Taxa de falsos positivos, Equação (6): em uma janela sem evento, qualquer decisão após o pré-trigger foi considerada falso positivo. A taxa refere-se a janelas de 1 ms;

Tempo de resposta: intervalo entre o início do transitório e a decisão do algoritmo, calculado para os verdadeiros positivos,

$$\Delta t = tdet - t_0 \tag{18}$$

e apresentado pela mediana e pelo percentil 90. O valor inclui o atraso introduzido pelo filtro de condicionamento.

Complementarmente, para os eventos detectados, verificou-se o acerto da classificação de intensidade, comparando a classe atribuída à classe real do cenário.

Para cada nível de ruído, reunindo as janelas com evento das três intensidades (600) e as janelas sem evento (400), calcularam-se ainda a precisão e a medida F1 no limiar de operação.

Como a precisão depende da proporção entre janelas com e sem evento, que na simulação é definida pelos autores, ela foi também recalculada para uma proporção de operação de 10 janelas sem evento para cada janela com evento, por Precisão = TD / (TD + 10 · TFP), em que TD e TFP são as taxas de detecção e de falsos positivos.

Por fim, para avaliar os algoritmos independentemente do limiar escolhido, foram construídas curvas ROC (FAWCETT, 2006). Para isso, registrou-se em cada janela o maior valor normalizado de cada critério após o pré-trigger ($|x[n]|/\hat{\sigma}$, $|d[n]|/\hat{\sigma}_d$) e, no critério combinado, o menor dos dois dentro da janela de 10 µs), região de mesmo tamanho (900 µs) nas janelas com e sem evento. Variando-se o limiar k, obtiveram-se os pares de taxa de falsos positivos e taxa de detecção; a área sob a curva (AUC) foi calculada pela estatística de Mann-Whitney (HANLEY; McNEIL, 1982). Na curva ROC, uma janela com evento é considerada detectada quando o critério

é atendido em qualquer ponto da região, sem exigir a localização temporal usada na taxa de detecção.

3.8 Registro de eventos e dashboard

Para representar a operação contínua do sistema, foi simulada uma sessão de monitoramento com 150 janelas consecutivas, uma por minuto, no nível de ruído médio. Em cada janela foi sorteada uma condição: evento (30 %), ruído impulsivo isolado (15 %) ou condição normal (55 %). Cada janela foi processada pelos três algoritmos, e as detecções foram armazenadas em um registro com horário, amplitude de pico, corrente estimada, duração, energia e classe de intensidade.

A partir desse registro, foi desenvolvido um painel de visualização (dashboard) em Python e HTML, gerado a cada execução para o algoritmo selecionado, que exibe: status atual (normal ou evento), número de eventos detectados, horário do último evento, amplitude máxima registrada, duração e classificação do último evento, linha do tempo dos eventos, forma de onda do último evento e tabela dos últimos registros. O painel apresenta também a conferência entre os eventos registrados e a situação real de cada janela. O dashboard não interfere na lógica de detecção, servindo apenas como camada de apresentação dos resultados

4. Resultados e Discussão

A amostra sintética analisada foi formada por 3.000 janelas de aquisição de 1 ms, geradas por simulação de Monte Carlo a partir dos 15 cenários da Seção 3.6, com 200 repetições cada. Desse total, 1.800 janelas continham uma descarga (três níveis de ruído combinados com três faixas de intensidade) e 1.200 não continham descarga (somente ruído ou ruído com um pulso impulsivo isolado). Em cada repetição, a forma de onda, a corrente de pico, o instante do evento, o ruído e o pulso foram sorteados de forma independente. Esse corte foi escolhido para cobrir desde situações fáceis até situações difíceis: a SNR de pico mediana, calculada pela Equação (2) com a amplitude do evento e o desvio-padrão nominal do ruído de cada cenário (relação definida no modelo de simulação, e não medida em campo), variou de 45,8 dB, quando o evento é muito maior que o ruído (evento intenso com ruído baixo), até 5,6 dB, quando o evento é apenas cerca de duas vezes

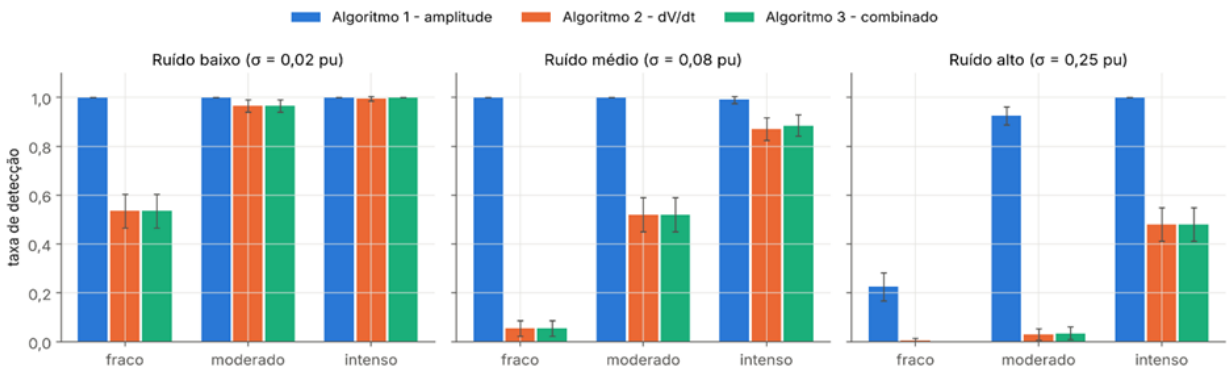
maior que o ruído (evento fraco com ruído alto). Além disso, uma sessão de monitoramento com 150 janelas (37 com descarga, 27 com pulso impulsivo e 86 em condição normal) foi usada para avaliar o registro dos eventos.

As perguntas que orientaram a análise foram: (I) qual estratégia detecta mais eventos; (II) com que frequência cada estratégia gera alarmes falsos; (III) quão rápido cada estratégia responde; (IV) se o desempenho depende do limiar escolhido; (V) se a duração do sinal ajuda a separar descargas de perturbações; e (VI) se o sistema classifica e registra corretamente os eventos.

4.1 Taxa de detecção

O estudo demonstrou que o limiar de amplitude (Algoritmo 1) foi a estratégia que mais detectou eventos. Ele identificou ao menos 99 % das descargas em todos os cenários com ruído baixo e médio. Somente com ruído alto houve perda relevante, e apenas para os eventos mais fracos: a taxa foi de 100 % para eventos intensos, 92,5 % para moderados e 22,5 % para fracos (Figura 3).

Figura 3 - Taxa de detecção por nível de ruído e intensidade do evento



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Os resultados apontam que o critério de taxa de variação (Algoritmo 2) perde eventos rapidamente à medida que o ruído aumenta ou a intensidade diminui. Com ruído baixo, ele detectou 53,5 % dos eventos fracos e mais de 96 % dos moderados e intensos. Com ruído médio, essas taxas caíram para 5,5 %, 52,0 % e 87,0 %, e com ruído alto, para 0,5 %, 3,0 % e 48,0 %. O critério combinado (Algoritmo 3) obteve praticamente os mesmos valores do Algoritmo 2, com diferença

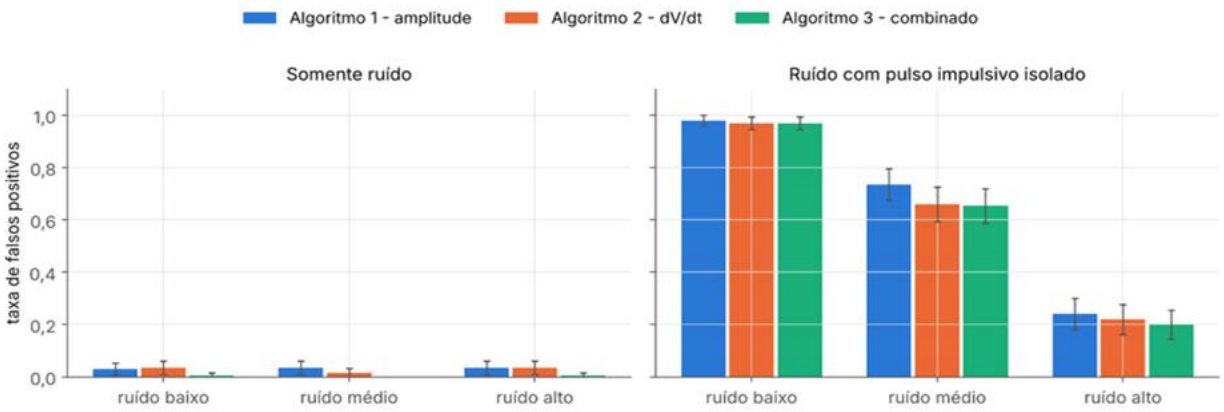
máxima de 1,5 ponto percentual. Houve proximidade dos resultados, pois a derivada amplifica mais o ruído do que o sinal, aumentando a exigência dos critérios da taxa de variação. Nos eventos detectados o escore de amplitude foi, em mediana, 2,3 vezes maior que o de taxa de variação. Desta forma, a condição de amplitude atua como confirmação, quase sempre satisfeita quanto a taxa de variação ultrapassa o limiar. As diferenças entre os dois algoritmos decorrem de casos isolados: em um evento fraco, a amplitude não atingiu o limiar dentro da janela de ±10 µs, e em cinco eventos o Algoritmo 2 foi acionado por um pico de ruído anterior ao evento, que o Algoritmo 3 desconsiderou por não apresentar amplitude suficiente, prosseguindo até a ultrapassagem associada ao evento.

A forma de onda ajuda a entender esse comportamento. O Algoritmo 2 detectou 64,6 % dos eventos com frente rápida (1/200 µs) e apenas 33,3 % dos eventos com frente lenta (10/350 µs), enquanto o Algoritmo 1 teve desempenho semelhante para as duas formas (89,0 % e 92,0 %). Como a forma 10/350 µs sobe cerca de dez vezes mais devagar (Tabela 1), sua taxa de variação fica, com mais frequência, abaixo do limiar.

4.2 Falsos positivos

Nos resultados, a resposta depende do tipo de perturbação. Quando a janela continha somente ruído, os alarmes falsos foram raros: de 1,5 % a 3,5 % nos Algoritmos 1 e 2 e no máximo 0,5 % no Algoritmo 3. Quando a janela continha um pulso impulsivo, porém, os três algoritmos confundiram o pulso com uma descarga na maioria dos casos: de 97 % a 98 % com ruído baixo, de 65,5 % a 73,5 % com ruído médio e de 20 % a 24 % com ruído alto (Figura 4). Os dois grupos de janelas sem evento são, portanto, analisados separadamente nesta figura; na Tabela 3 (Seção 4.4), eles aparecem agregados.

Figura 4 - Taxa de falsos positivos nas janelas sem evento



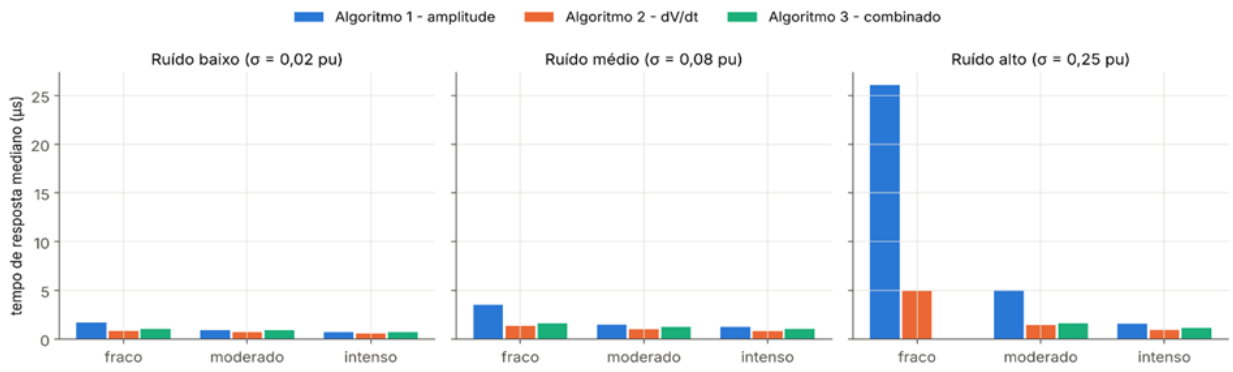
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A queda dos alarmes falsos com o aumento do ruído pode parecer contraditória, mas tem uma explicação simples. O limiar é proporcional ao nível de ruído estimado: quanto maior o ruído, mais alto o limiar. Assim, com ruído alto, uma parte maior dos pulsos impulsivos, já atenuados pelo filtro, fica abaixo do limiar. Não se trata, portanto, de melhor desempenho, e sim de um limiar mais alto.

4.3 Tempo de resposta

As três estratégias responderam em poucos microssegundos na maior parte dos cenários (Figura 5). A mais rápida foi a de taxa de variação, com tempos medianos entre 0,54 µs e 1,43 µs; a exceção é o evento fraco com ruído alto (4,95 µs), valor obtido de uma única detecção em 200 repetições e, portanto, pouco representativo. Responder rápido, contudo, não significa detectar bem: nesse cenário, o Algoritmo 2 praticamente não detectou eventos. O critério combinado ficou logo atrás, entre 0,73 µs e 1,63 µs. O limiar de amplitude respondeu entre 0,73 µs e 1,71 µs com ruído baixo, mas ficou mais lento com ruído alto: 5,0 µs para eventos moderados e 26,1 µs para eventos fracos. Todos os valores incluem o atraso do filtro de condicionamento; barras ausentes indicam cenários sem detecção.

Figura 5 - Tempo de resposta mediano por nível de ruído e intensidade do evento



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A diferença decorre do que cada critério observa. A taxa de variação reage logo no início da frente de onda, quando o sinal sobe mais rapidamente. A amplitude precisa esperar que o sinal fique acima do limiar, o que demora mais quando o evento é pouco maior que o ruído. Mesmo no pior caso, porém, a resposta ocorreu em menos de 30 µs, tempo bem menor que a duração do próprio evento.

4.4 Desempenho independente do limiar

Para responder a essa pergunta, foram usadas a curva ROC, que mostra o comportamento de cada estratégia para todos os limiares possíveis, e a área sob essa curva (AUC). Uma AUC igual a 1 indica separação perfeita entre janelas com e sem evento, e uma AUC igual a 0,5 equivale a uma escolha ao acaso. A Tabela 3 reúne essas métricas por nível de ruído, junto com as obtidas no limiar de operação (5σ).

Tabela 3 - Métricas por nível de ruído e algoritmo

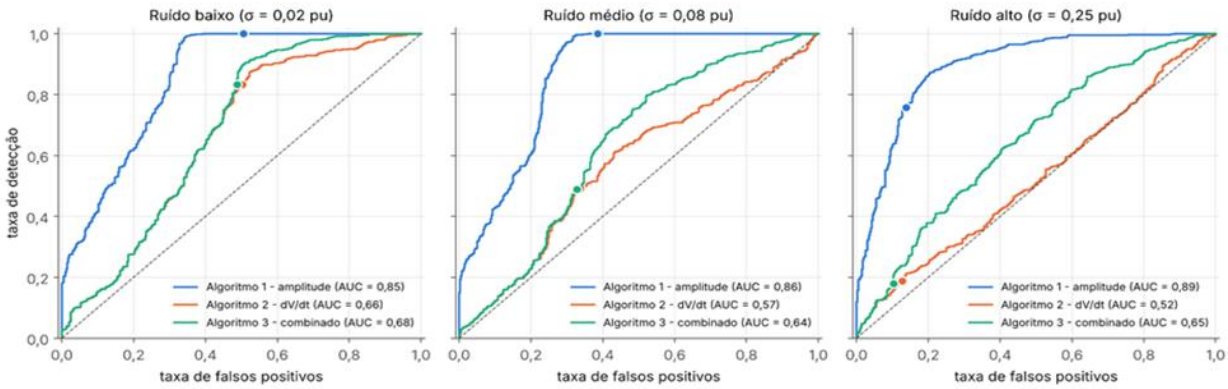
Ruído	Algoritmo	Taxa de detecção	Taxa de falsos positivos	Precisão	F1	Precisão (10:1)	AUC
baixo	1 - amplitude	1,000	0,505	0,748	0,856	0,165	0,853
baixo	2 - dV/dt	0,832	0,502	0,713	0,768	0,142	0,665
baixo	3 - combinado	0,833	0,488	0,719	0,772	0,146	0,682
médio	1 - amplitude	0,997	0,385	0,795	0,885	0,206	0,865
médio	2 - dV/dt	0,482	0,338	0,682	0,564	0,125	0,573
médio	3 - combinado	0,487	0,328	0,690	0,571	0,129	0,636
alto	1 - amplitude	0,717	0,138	0,887	0,793	0,343	0,894
alto	2 - dV/dt	0,172	0,128	0,669	0,273	0,119	0,523
alto	3 - combinado	0,172	0,103	0,715	0,277	0,144	0,647

Nota: As janelas sem evento incluem as condições de somente ruído e de ruído com pulso impulsivo (200 de cada por nível de ruído); a taxa de falsos positivos e a precisão agregam os dois grupos, apresentados separadamente na Figura 4. Precisão (10:1) calculada para 10 janelas sem evento por janela com evento. Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

Os resultados mostram que a ordem entre as estratégias não depende do limiar. O limiar de amplitude teve a maior AUC nos três níveis de ruído (0,85 a 0,89), seguido do critério combinado (0,64 a 0,68) e do critério de taxa de variação (0,52 a 0,67). Com ruído alto, a taxa de variação praticamente não distinguiu janelas com e sem evento (AUC = 0,52). No limiar de operação de 5σ, o F1, que resume detecção e precisão em um único número, mostra a mesma ordem; diferentemente da AUC, porém, ele avalia apenas esse limiar e depende da proporção entre janelas

com e sem evento (Figura 6).

Figura 6. Curvas ROC por nível de ruído (ponto = limiar de operação de 5σ)



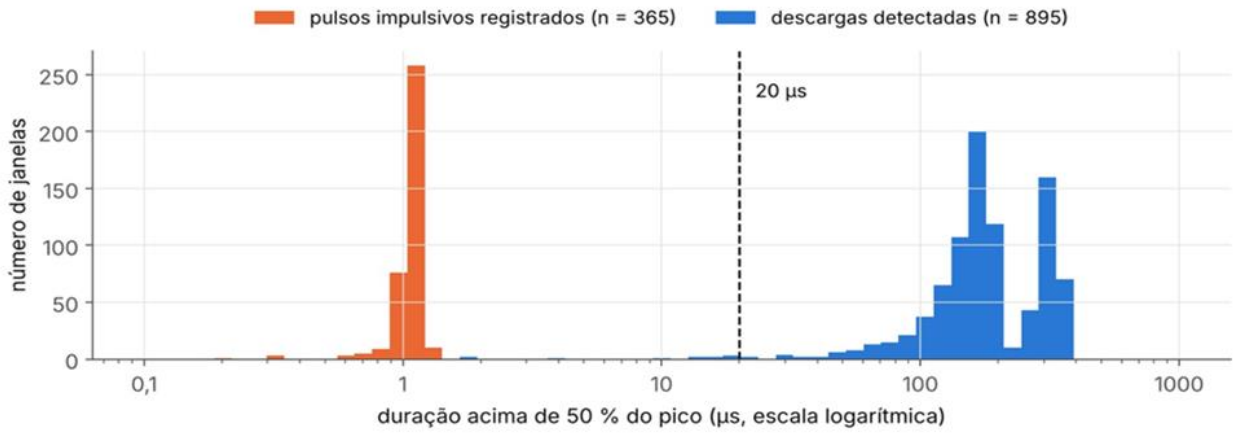
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Dois pontos merecem atenção na leitura da Figura 6 e da Tabela 3. Primeiro, nenhuma curva alcança taxa de detecção alta com poucos falsos positivos; como o ruído puro quase não gerou alarmes, esse limite vem dos pulsos impulsivos. Segundo a precisão depende da proporção entre janelas com e sem evento. Na simulação, essa proporção foi de 3 para 2; em uma situação mais próxima da real, com 10 janelas sem evento para cada descarga, a precisão cai para valores entre 0,12 e 0,34, ou seja, a maior parte dos alarmes seria falsa.

4.5 Duração como critério de discriminação

Os resultados demonstraram que a duração do sinal foi uma característica relevante para a diferenciação entre descargas atmosféricas e pulsos impulsivos. Considerando o intervalo em que o sinal permanece acima de 50% de seu valor de pico, observou-se uma duração aproximada de 176 µs para as descargas detectadas, enquanto os pulsos impulsivos apresentaram duração máxima de 1,3 µs (Figura 7). Dessa forma, as distribuições apresentaram uma separação significativa, evidenciando o potencial da duração como critério complementar de discriminação entre os eventos.

Figura 7 - Duração dos registros do Algoritmo 3: descargas e pulsos impulsivos



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Com base nessa diferença, foi testada a variante do Algoritmo 3 com critério de persistência, que exige ao menos 50 % das amostras acima do limiar de amplitude nos 20 µs seguintes à decisão (Seção 3.5). A Tabela 4 mostra o efeito: os alarmes falsos por pulsos impulsivos caíram para zero nos três níveis de ruído, e a taxa de detecção não mudou. O custo foi um acréscimo de cerca de 20 µs no tempo de resposta, que corresponde intervalo necessário para verificar a persistência. Ressalta-se que esse critério difere da duração apresentada na Figura 7, medida como o tempo acima de 50 % do pico.

Tabela 4 - Algoritmo 3 com e sem critério de persistência (20 µs)

Ruído	Taxa de detecção (sem / com persistência)	Falsos positivos por pulso impulsivo (sem / com)	Tempo de resposta mediano, µs (sem / com)
baixo	0,833 / 0,833	0,970 / 0,000	0,9 / 20,8
médio	0,487 / 0,487	0,655 / 0,000	1,2 / 21,1
alto	0,172 / 0,170	0,200 / 0,000	1,2 / 21,1

Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

4.6 Classificação e registro dos eventos

Para eventos intensos, sim: todos os eventos intensos detectados foram classificados

corretamente, em qualquer nível de ruído. A classificação piora para eventos de menor intensidade. Com o Algoritmo 1, o acerto para eventos moderados foi de 97 % com ruído baixo, 90,5 % com ruído médio e 62,2 % com ruído alto; para eventos fracos, caiu de 91,5 % para 52,5 % e 0 %. O motivo é que o pico medido soma o evento e o ruído. Quando o evento é fraco, essa soma faz a corrente estimada parecer maior, e o evento é classificado na faixa de intensidade acima da real.

A Figura 8 mostra o painel gerado para a sessão de monitoramento com o Algoritmo 3. Das 150 janelas, foram registrados 25 eventos: 13 descargas (10 intensas e 3 moderadas) e 12 pulsos impulsivos. Nenhuma janela em condição normal gerou registro. Na mesma sessão, o Algoritmo 1 registrou as 37 descargas e também os mesmos 12 pulsos.

Figura 8 - Painel de monitoramento da sessão simulada (Algoritmo 3)



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O painel mostra, de forma prática, o que as métricas indicaram: os registros de pulsos impulsivos aparecem com duração de cerca de 1 µs, enquanto os de descargas ultrapassam 100 µs. No cenário simulado, essa informação pode auxiliar o operador a identificar registros suspeitos; sua eficácia, contudo, depende de validação com sinais reais.

5. Conclusão (ou Considerações Finais)

Este estudo avaliou, por simulação de Monte Carlo, três estratégias de detecção de eventos associados a descargas atmosféricas em sinais sintéticos sob diferentes níveis de ruído: limiar de amplitude, limiar de taxa de variação e critério combinado.

O limiar de amplitude apresentou a maior taxa de detecção, com 100 %, 99,7 % e 71,7 % nos ruídos baixo, médio e alto, e a maior AUC (0,85 a 0,89). O desempenho caiu apenas para eventos fracos em ruído alto, cuja detecção chegou a 22,5 %. A taxa de variação perdeu eventos rapidamente com o aumento do ruído e com a redução da intensidade, sobretudo nas ondas de frente lenta (10/350 μs), e o critério combinado teve resultado praticamente igual ao dela, com diferença máxima de 1,5 ponto percentual. Quanto à hipótese inicial, ela foi confirmada apenas em parte: a combinação reduziu os alarmes falsos em janelas só com ruído (no máximo 0,5 %), mas não diante de pulsos impulsivos, e custou detecção. Nesse sentido, a amplitude foi a estratégia mais robusta nas condições simuladas.

Os três algoritmos confundiram pulsos impulsivos isolados com descargas, em 97 % a 98 % dos casos com ruído baixo. A queda desse índice com o aumento do ruído decorre do limiar mais alto, e não de melhor seletividade. A duração do sinal acima de 50 % do pico separou os dois tipos de evento, com cerca de 176 μs para as descargas e no máximo 1,3 μs para os pulsos. A variante com critério de persistência eliminou os falsos positivos por pulsos nos três níveis de ruído, mantendo a taxa de detecção do algoritmo combinado, ao custo de cerca de 20 μs de latência. Contudo, essa taxa já era baixa (de 83 % a 17 %, conforme o ruído), e a separação por duração é favorecida pela modelagem, pois os pulsos foram gerados com largura de 50 a 300 ns, muito menor que a das descargas. O resultado indica o potencial do critério, mas precisa de validação com perturbações mais variadas e sinais reais.

A classificação por intensidade foi correta para os eventos intensos, porém se degradou para eventos moderados e fracos com o ruído, pois este altera a estimativa do pico. Na sessão simulada de monitoramento, o algoritmo combinado registrou 13 das 37 descargas, e o de amplitude registrou todas, ambos com os mesmos 12 pulsos, o que mostra a diferença entre sensibilidade e seletividade.

Os resultados são limitados por sinais sintéticos e por um modelo simplificado, sem sensor físico, e indicam desempenho relativo, não a eficácia de um sistema real. Como trabalhos futuros, recomendam-se a validação com registros reais, a aplicação do critério de persistência ao algoritmo de amplitude, que não foi testada, a estimação adaptativa do ruído, a combinação de amplitude,

taxa de variação e duração e comparação com outros modelos matemáticos de formas de ondas, tais como as equações de Heidler ou de Rajičić e Todorovski.

Conclui-se que, nas condições simuladas, o limiar de amplitude é o mais sensível, mas pouco seletivo, e que a incorporação da duração é um caminho promissor para reduzir falsos positivos, sendo a escolha da estratégia dependente do equilíbrio desejado entre sensibilidade, seletividade e tempo de resposta.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5419-1:2026**: proteção contra descargas atmosféricas – Parte 1: princípios gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2026.

BERGER, K.; ANDERSON, R. B.; KRÖNINGER, H. Parameters of lightning flashes. **Electra**, Paris, n. 41, p. 23–37, jul. 1975.

BRUCE, C. E. R.; GOLDE, R. H. The lightning discharge. **Journal of the Institution of Electrical Engineers – Part II: Power Engineering**, London, v. 88, n. 6, p. 487–505, dez. 1941. DOI: https://doi.org/10.1049/ji-2.1941.0065.

COORAY, V. **An introduction to lightning**. Dordrecht: Springer, 2015. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-017-8938-7.

DAI, B. et al. Application of a modified empirical wavelet transform method in VLF/LF lightning electric field signals. **Remote Sensing**, Basel, v. 14, n. 6, p. 1308, mar. 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/rs14061308.

FAWCETT, T. An introduction to ROC analysis. **Pattern Recognition Letters**, Amsterdam, v. 27, n. 8, p. 861–874, jun. 2006. DOI: https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010.

GAMEROTA, W. R. et al. Current waveforms for lightning simulation. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, New York, v. 54, n. 4, p. 880–888, ago. 2012.

HANLEY, J. A.; McNEIL, B. J. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. **Radiology**, Oak Brook, v. 143, n. 1, p. 29–36, abr. 1982. DOI: https://doi.org/10.1148/radiology.143.1.7063747.

HARRIS, C. R. et al. Array programming with NumPy. **Nature**, London, v. 585, p. 357–362, set. 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2.

HUNTER, J. D. Matplotlib: a 2D graphics environment. **Computing in Science & Engineering**, Los Alamitos, v. 9, n. 3, p. 90–95, maio/jun. 2007. DOI: https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Grupo de Eletricidade Atmosférica. **Incidência de descargas atmosféricas associadas à interrupção de suprimento de energia elétrica ocorrida no dia 10/11/2009 na região do sistema Itaipu**: relatório preparado pelo ELAT a pedido do Ministério Público. São José dos Campos: INPE, 2009.

KAY, S. M. **Fundamentals of statistical signal processing**: detection theory. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998. v. 2.

McKINNEY, W. Data structures for statistical computing in Python. *In*: PYTHON IN SCIENCE CONFERENCE, 9., 2010, Austin. **Proceedings** [...]. Austin: SciPy, 2010. p. 56–61.

McLAIN, D. K.; UMAN, M. A. Exact expression and moment approximation for the electric field intensity of the lightning return stroke. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 76, n. 9, p. 2101–2105, mar. 1971. DOI: https://doi.org/10.1029/JC076i009p02101.

MEHRANZAMIR, K. et al. Discriminating cloud to ground lightning flashes based on wavelet analysis of electric field signals. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Oxford, v. 181, pt. B, p. 127–140, dez. 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.11.005.

MEREDITH, S. L.; EARLES, S. K.; OTERO, C. E. Electric fields induced by a modified double exponential current waveform. **Journal of Electrostatics**, Amsterdam, v. 70, n. 1, p. 152–156, fev. 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.elstat.2011.12.002.

METROPOLIS, N.; ULAM, S. The Monte Carlo method. **Journal of the American Statistical Association**, Washington, v. 44, n. 247, p. 335–341, set. 1949.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Discrete-time signal processing**. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010.

RAJIČIĆ, D.; TODOROVSKI, M. A double-exponential lightning current function suitable for use of different sets of input data. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 33, n. 4, p. 2053–2055, ago. 2018. DOI: https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2711268.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning**: physics and effects. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

ROUSSEEUW, P. J.; CROUX, C. Alternatives to the median absolute deviation. **Journal of the American Statistical Association**, Alexandria, v. 88, n. 424, p. 1273–1283, dez. 1993.

UMAN, M. A.; McLAIN, D. K. Magnetic field of lightning return stroke. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 74, n. 28, p. 6899–6910, dez. 1969. DOI: https://doi.org/10.1029/JC074i028p06899.

VIRTANEN, P. et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. **Nature Methods**, New York, v. 17, p. 261–272, mar. 2020.

XIAO, Y. et al. Lightning current measurement method using Rogowski coil based on integral circuit with low-frequency attenuation feedback. **Sensors**, Basel, v. 24, n. 15, p. 4980, ago. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/s24154980.

YEUNG, C. et al. Transient induced response on cables by lightning electromagnetic pulse with different experimental conditions. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v. 238, p. 111031, jan. 2025.

ZENG, R. et al. Survey of recent progress on lightning and lightning protection research. **High Voltage**, Stevenage, v. 1, n. 1, p. 2–10, abr. 2016. DOI: https://doi.org/10.1049/hve.2016.0004.