

# Caracterização Experimental da Contagem de Escuro de Detectores de Fótons Únicos Baseados em APDs Operando em Modo Free-Running

I. K. A. Silva<sup>1</sup>, J. R. Silva<sup>2</sup> e R. V. Ramos<sup>3</sup>

**Resumo** — Neste trabalho, apresentamos a caracterização experimental da distribuição de probabilidade de contagens de escuro em detectores de fótons únicos, baseados em APDs, operando em modo free-running. A função densidade de probabilidade exponencial foi adotada como modelo e um experimento utilizando o detector ID230-FR, ID Quantique, operando no modo free-running, foi realizado para determinar o parâmetro que caracteriza a distribuição adotada. Os resultados obtidos são coerentes com o esperado quando temperatura e eficiência de detecção são variados.

**Palavras-Chave** — Detectores de fótons únicos, fotodiodos de avalanche, contagens de escuro.

**Abstract** — The present work shows the experimental characterization of the probability density function of dark counts of an APD-based single-photon detector working in the free-running regime. The exponential probability density function was chosen as model for the dark count PDF and an experiment using the detector ID230-FR, ID Quantique, working in the free-running mode, was performed in order to determine the parameter that characterizes the exponential PDF. The results obtained are in good agreement with the expected behavior when temperature and quantum efficiency are changed.

**Keywords** — Single-photon detector, avalanche photodiodes, dark counts.

## I. INTRODUÇÃO

A detecção de fótons individuais é uma tarefa fundamental em tecnologias quânticas como protocolos de comunicação quântica (distribuição quântica de chaves (QKD), teleportação, comunicação quântica segura direta, dentre outros), computação quântica fotônica e metrologia quântica [1]-[4]. Dentre os dispositivos sensíveis utilizados para esse propósito, destacam-se as válvulas fotomultiplicadoras, os fotodiodos de Avalanche (APDs) e os detectores de fótons baseados em nanofios supercondutores (SNSPDs) [5]. As válvulas fotomultiplicadoras foram os primeiros dispositivos utilizados na detecção de fótons únicos. Entretanto, para operações nas janelas de comunicações ópticas (800nm, 1310nm e 1550nm), foram substituídas pelos detectores baseados em APDs, os SPADs, com melhor eficiência e menor tamanho [5]. Em situações mais críticas nas quais uma alta eficiência de detecção é requerida, os detectores SNSPD são preferidos por possuírem eficiência acima de 80%, muito melhor que os 25% alcançados

pelos SPADs [5]-[6]. Entretanto, os SNSPD operam em temperaturas criogênicas o que torna sua utilização mais complexa. Por outro lado, os SPADs são mais baratos, possuem um tempo de vida alto e são resfriados por Peltiers, que são construídos com semicondutores, e são facilmente operados [7].

Nesta direção, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar experimentalmente a função densidade de probabilidade de ocorrência de uma avalanche de escuro quando o SPAD opera no modo free-running, contribuindo com a compreensão dos mecanismos estatísticos que regem a ocorrência de eventos de escuro em SPADs. Ao fornecer dados experimentais detalhados, o estudo auxilia na construção de modelos mais precisos para a análise do desempenho desses dispositivos, o que pode ser aplicado em futuras investigações em detecção de fótons únicos.

Este trabalho está dividido da seguinte forma: na Seção II é feita uma descrição básica do comportamento de um SPAD operando nos modos engatilhado e free-running; Na Seção III, os resultados experimentais são apresentados. Por fim as conclusões são descritas na Seção IV.

## II. DETECTORES DE FÓTONS ÚNICOS COM APD

O circuito básico para um SPAD é mostrado na Fig. 1. O objetivo do circuito é gerar um sinal de tensão alto o suficiente para ser medido quando um único fóton é absorvido pelo semiconductor do APD.

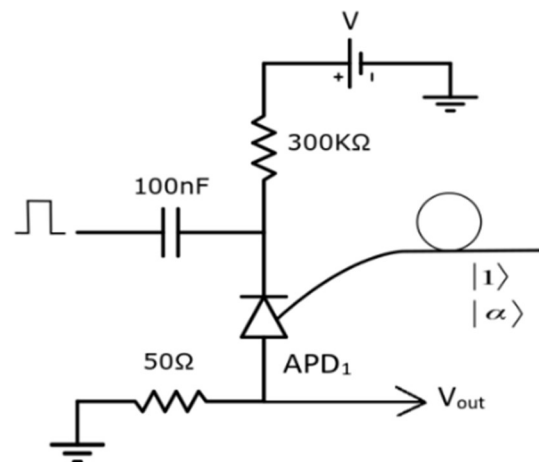


Fig. 1. Circuito básico de um SPAD.

Ianna Karollayne Alencar da Silva<sup>1</sup>, e-mail: ianna.alencar@alu.ufc.br; Jonathan Rodrigues da Silva<sup>2</sup>, email: jonathan.rodrigues@aluno.uece.br; e Rubens Viana Ramos<sup>3</sup>, e-mail: rubens.ramos@ufc.br. Todos do Departamento de Engenharia de Teleinformática, UFC, Fortaleza-Ce. Este trabalho foi parcialmente financiado por CAPES, CNPq (304188/2025-5) e pelo projeto Desenvolvimento e Inovação em Comunicações Quânticas (422316/2023-7).

A ocorrência de uma avalanche devido à absorção de um fóton só é possível quando a condição  $V_{APD} > V_B$  for satisfeita, sendo  $V_{APD}$  a tensão sobre os terminais do APD e  $V_B$  a tensão de ruptura do APD, isto é, o menor valor de tensão que deve ser aplicado nos terminais do APD para que uma avalanche seja iniciada e sustentada. Esta forma de operação é chamada modo Geiger [8]-[10]. Entretanto, uma vez iniciada a avalanche, ela deve ser logo extinta para que o alto valor de corrente não danifique o APD.

Como pode ser percebido na Fig. 1, além da fonte de tensão contínua  $V$ , há também uma fonte de pulsos com amplitude  $V_g$ . Esses pulsos são chamados pulsos de gatilho. O circuito da Fig. 1 é chamado de circuito de extinção engatilhada, uma vez que vez que a fonte de pulsos liga e desliga o APD: 1) nos períodos de baixa do sinal de gatilho  $V_{APD} = V < V_B$  e uma avalanche não pode ser disparada; 2) nos períodos de alta do sinal de gatilho  $V_{APD} = V + V_g > V_B$  e a chegada de um fóton pode disparar uma avalanche [9].

Os principais parâmetros do detector de fótons únicos são a eficiência quântica (a probabilidade de um fóton ser absorvido e produzir uma avalanche), a probabilidade de contagem de escuro (a probabilidade de uma avalanche ser disparada sem a absorção de um fóton) e a probabilidade de contagem pós-pulso (quando portadores aprisionados durante uma avalanche são responsáveis por disparar outra avalanche em um tempo futuro) [1],[8],[9]. Todos esses parâmetros são dependentes da tensão sobre os terminais do APD e da temperatura. A contagem pós-pulso também depende do intervalo de tempo entre duas habilitações do APD, ou seja, no caso da Fig. 1, da frequência dos pulsos de gatilho. No caso de detectores operando no modo engatilhado mostrado na Fig. 1, a medição experimental da probabilidade de contagem de escuro é bem simples. Basicamente a probabilidade de contagem de escuro é dada por:

$$P_D = \frac{Nt_g}{T}. \quad (1)$$

Na eq. (1),  $T$  é o tempo de duração do experimento,  $t_g$  é o período dos pulsos de gatilho e  $N$  é o número de avalanches medido durante o tempo de execução do experimento.

Outra forma de operação dos SPADs, chamada free-running, é obtida fazendo-se  $V > V_B$ . Neste caso, não há pulsos de gatilho e o APD está sempre habilitado a disparar uma avalanche quando um fóton for absorvido. A extinção da avalanche pode ocorrer passivamente através do resistor de 300 k $\Omega$  mostrado na Fig. 1 ou pode-se incluir um circuito eletrônico que sente o surgimento da corrente de avalanche e aciona um outro circuito que força a diminuição da tensão sobre o APD [10]-[11]. Este esquema é chamado de circuito de extinção ativa. O modo free-running tem como vantagem não precisar de um esquema de sincronização entre as chegadas dos pulsos elétrico e óptico no APD. Isso é importante em situações em que o tempo de chega do fóton não é determinístico. Por outro lado, o modo de operação free-running é mais ruidoso pois contagens de escuro podem acontecer a qualquer momento. Além disso, para evitar a contagem pós-pulso, após uma avalanche a tensão sobre o APD é reduzida para um valor menor que  $V_B$  durante um intervalo de tempo  $t_m$ , chamado de tempo morto. Durante este período nenhuma avalanche pode

ocorrer [2]-[3]. A Fig. 2 abaixo demonstra o processo de início e fim de avalanche, pulso formatado na saída do detector e tempo morto.

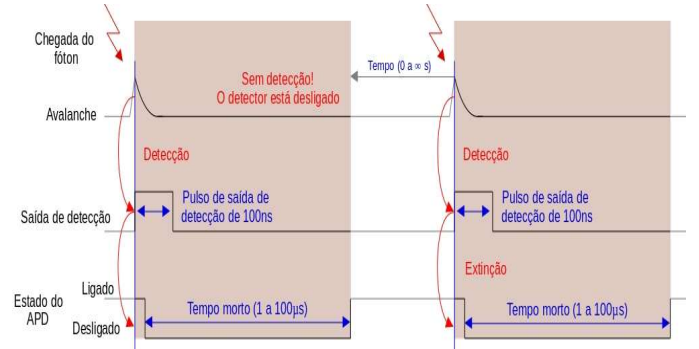


Fig. 2 – Demonstração do tempo morto após uma detecção.

Quando o detector está operando em modo free-running, a determinação experimental da probabilidade de contagem de escuro não pode mais ser feita usando a eq. (1), pois não há sinal de gatilho. Neste caso, a probabilidade de ocorrência de avalanches por outros efeitos que não a absorção de um fóton deve ser modelada por uma função densidade de probabilidade contínua (FDP). Assumimos aqui que essa FDP é do tipo exponencial, dada por

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2)$$

sendo  $\lambda^{-1}$  a taxa média de contagens, a variável a ser determinada experimentalmente.

### III. DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA TAXA MÉDIA DE CONTAGENS DE ESCURO

Usando a eq. (2), tem-se que a probabilidade de haver uma avalanche após o APD estar habilitado por um tempo  $t$  é dado por:

$$P_D(t) = \int_0^t \lambda e^{-\lambda \tau} d\tau \quad (3)$$

Portanto, a probabilidade de não ocorrer um evento até o tempo  $t$  é:

$$P(t) = 1 - P_D(t) = 1 - \int_0^t \lambda e^{-\lambda \tau} d\tau. \quad (4)$$

Usando a eq. (4), pode-se determinar o tempo médio de espera entre eventos:

$$\langle t \rangle = \int_0^{\infty} t \left( 1 - \int_0^t \lambda e^{-\lambda \tau} d\tau \right) dt = \frac{1}{\lambda^2} \quad (5)$$

Para determinar experimentalmente  $\langle t \rangle$ , levamos em consideração que, após um tempo de espera há sempre uma contagem. Desta forma, o número de contagens medidas é igual ao número de intervalos de espera que ocorrem durante o período de medição. Considerando o número de contagens com correção do tempo morto, o tempo médio de espera entre eventos medido experimentalmente é dado por:

$$\langle t \rangle = \frac{T - N \cdot \tau_m}{N}. \quad (6)$$

Na eq. (6)  $T$  é a janela temporal (s),  $N$  é o número de contagens medido e  $\tau_m$  é o tempo morto do detector ( $\mu s$ ). Usando as eqs. (5) e (6) obtém-se para o seguinte valor para a taxa de contagens de escuro:

$$\lambda = \sqrt{\frac{N}{T - N \cdot \tau_{morte}}} \quad (7)$$

O estudo experimental foi conduzido com o detector ID230-FR, mostrado na Fig. 3, operando em modo Free-Running, sob temperaturas de  $-50^\circ C$ ,  $-70^\circ C$  e  $-90^\circ C$ , enquanto a eficiência de detecção variou entre os valores de 10%, 15%, 20% e 25% [12]. Para todas as temperaturas e eficiência de detecção avaliadas, o número de aquisições (1001 aquisições), janela temporal de contagem (10 segundos) e tempo morto do detector (50  $\mu s$ ), foram mantidos constantes. Essa estratégia foi adotada com objetivo de garantir a reprodutibilidade dos dados e permitir uma análise estatística robusta das flutuações associadas à taxa de contagens de escuro.



Fig. 3. Detector ID230-FR [12].

Os resultados obtidos de  $\lambda$  ( $s^{-1}$ ) estão presente na Tabela 1, assim com as curvas de  $\lambda$  ( $s^{-1}$ ) em diferentes temperaturas e eficiência de detecção são mostradas na Fig. 4.

TABELA I

Resultados experimentais de  $\lambda$  em diferentes eficiências de detecção nas temperaturas de  $-50^\circ C$ ,  $-70^\circ C$  e  $-90^\circ C$ .

Temperatura	Eficiência (%)	N	Desvio padrão	$\langle t \rangle$ (ms)	$\lambda$ ( $s^{-1}$ )
$-50^\circ C$	10	1013,0	34,2	10,0	$10,1 \pm 0,2$
	15	1812,4	47,7	5,0	$13,5 \pm 0,2$
	20	3126,0	60,2	3,0	$17,8 \pm 0,2$
	25	5286,1	76,9	2,0	$23,3 \pm 0,2$
$-70^\circ C$	10	253,2	18,0	39,0	$5,0 \pm 0,2$
	15	447,0	22,9	22,0	$6,7 \pm 0,2$
	20	724,2	28,3	14,0	$8,5 \pm 0,2$
	25	1145,1	34,9	9,0	$10,7 \pm 0,2$
$-90^\circ C$	10	68,7	10,9	145,0	$2,6 \pm 0,2$
	15	123,1	18,1	81,0	$3,5 \pm 0,3$
	20	157,5	33,6	63,0	$4,0 \pm 0,4$
	25	198,4	16,2	50,0	$4,5 \pm 0,2$

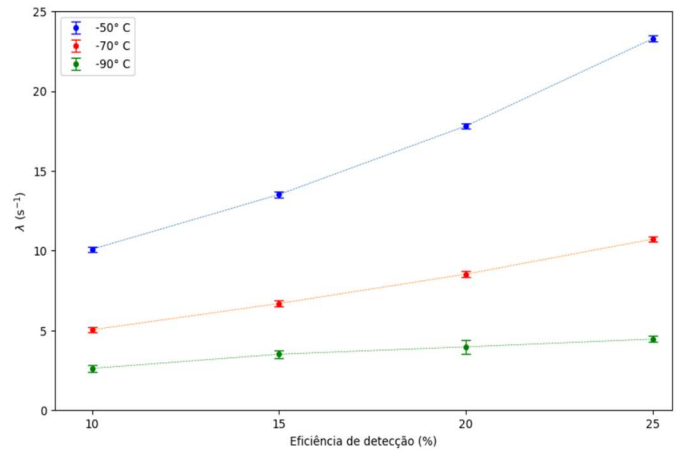


Fig. 4. Curva de  $\lambda$  em função de diferentes temperaturas e eficiência de detecção.

A partir dos resultados presentes na Tabela 1 e Figura 4 pode-se observar que o valor de  $\lambda$  crescente tanto com a temperatura quanto com a eficiência quântica. Um comportamento similar à  $P_D$  medida com o APD operando em modo engatilhado. Um maior valor  $\lambda$  corresponde a um menor valor do tempo de espera para uma contagem ocorrer. Desta forma, para um intervalo de tempo  $T$  fixo, mais contagens acontecem quando  $\lambda$  cresce. Este comportamento é compatível com o esperado pois um detector mais eficiente detecta tanto mais fótons incidente quanto mais eventos de contagens de escuro, pois sua sensibilidade em geral está aumentada pelo aumento da tensão sobre os terminais do APD.

#### IV. CONCLUSÕES

A caracterização da função densidade de probabilidade de contagem de escuro que modela o SPAD operando em modo free-running permite a correta caracterização das contagens de escuro. Esse conhecimento tem implicações diretas em aplicações de detecção de fótons únicos, especialmente quando o ruído precisa ser minimizado. O conhecimento do perfil temporal da resposta do detector permite ajustar a janela de coincidência, melhorar a relação sinal/ruído e otimizar algoritmos de rejeição de contagens espúrias. Além disso, os resultados reforçam a relevância dos SPADs como alternativa acessível e de operação simplificada frente a detectores mais complexos, contribuindo para o avanço de pesquisas em comunicação quântica, metrologia e caracterização de emissores de fótons únicos.

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pelas agências CNPq (304188/2025-5) e CAPES (001), bem como pelo projeto de pesquisa Desenvolvimento e Inovação em Comunicação Quântica (422316/2023-7) do CNPq.

#### REFERÊNCIAS

- [1] W. Wu *et al.*, “Free-Running Single-Photon Detection via GHz Gated InGaAs/InP APD for High Time Resolution and Count Rate up to 500 Mcount/s”, *Micromachines*, vol. 14, n° 2, Art. n° 2, fev. 2023, doi: 10.3390/mi14020437.
- [2] Q. Xu *et al.*, “Compact free-running InGaAs/InP single-photon detector with 40% detection efficiency and 2.3 kcps dark count rate”, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 30, n° 1: Single-Photon Technologies, p. 1–7, jan. 2024, doi: 10.1109/JSTQE.2023.3328870.
- [3] N. Menkart, J. D. Hart, T. E. Murphy, e R. Roy, “Dark Current and Single Photon Detection by 1550nm Avalanche Photodiodes: Dead Time Corrected Probability Distributions and Entropy Rates”, *Opt. Express*, vol. 30, n° 22, p. 39431, out. 2022, doi: 10.1364/OE.466330.
- [4] Y. Dong *et al.*, “Large-photosensitive-area InGaAs(P) near-infrared single-photon detector with a low dark-count rate at 203 K”, *Cell Rep. Phys. Sci.*, vol. 6, n° 2, p. 102446, fev. 2025, doi: 10.1016/j.xcrp.2025.102446.
- [5] S. Ceccarelli, M. Ghioni, and I. Rech, “Recent Advances and Future Perspectives of Single-Photon Avalanche Diodes for Quantum Photonics Applications”, *Adv. Quantum Technol.*, vol. 4, no. 7, p. 2000102, 2021. doi: 10.1002/qute.202000102.
- [6] A. Tosi *et al.*, “Single-photon avalanche diodes dynamic range and linear response enhancement by conditional probability correction”, *Opt. Express*, vol. 32, no. 6, pp. 9872–9886, 2024. doi: 10.1364/OE.518364.
- [7] Z. Liu, L. Zhang, Y. Yang, Y. Xie, and J. Chen, “Junction-Optimized SPAD With 50.6% Peak PDP and 0.64 cps/ $\mu\text{m}^2$  DCR for High-Performance Photon Detection”, *arXiv preprint*, arXiv:2406.09176, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2406.09176>.
- [8] J. Liu *et al.*, “Exploiting the single-photon detection performance of InGaAs negative-feedback avalanche diode with fast active quenching”, *Optics Express*, vol. 29, no. 7, pp. 10150–10162, 2021. doi: 10.1364/OE.418972.
- [9] X. Sun *et al.*, “Comparative Analysis of Free-Running and Gating Imaging Modes of SPAD Sensors”, *Photonics*, vol. 11, no. 8, art. 721, 2024. (inclui visão geral de **PQC (passive)** e **AQC (active)**) doi: 10.3390/photonics11080721.
- [10] Zheng *et al.*, “Dynamic-quenching of a single-photon avalanche diode”, *Nature Communications*, vol. 13, art. 1483, 2022. (conceitos e trade-offs de **passive vs active** quenching) doi: 10.1038/s41467-022-29195-7.
- [11] M. López *et al.*, “A study to develop a robust method for measuring the detection efficiency of free-running InGaAs/InP single-photon detectors”, *EPJ Quantum Technology*, vol. 7, art. 14, 2020. doi: 10.1140/epjqt/s40507-020-00089-1.
- [12] ID Quantique, *ID230 Infrared Single-Photon Detector*, **ID Quantique SA**, Geneva, Switzerland, brochure/specifications document, ver. as of August 2023 [Online]. Available: <https://www.idquantique.com/quantum-detection-systems/products/id230/> (Acessado em: 5-Ago-2025).