

Dispositivo de Teste em Solo para o Desenvolvimento de Sensor Contador de Disparo de Metralhadora

Abner Vinicius de Andrade¹ e Rômulo Vinícius Vera²

¹Embraer S.A., Gavião Peixoto/SP - Brasil

²Embraer S.A., Gavião Peixoto/SP - Brasil

Resumo— Este artigo apresenta os desafios e benefícios associados ao desenvolvimento de um dispositivo de teste para suportar uma campanha de ensaios em solo para a seleção de um sensor indutivo de proximidade, a ser usado como um contador de disparos de um sistema de metralhadoras de uma plataforma aeronáutica militar. O dispositivo reproduz a frequência de disparo e a forma de onda teórica da metralhadora de forma a testar os sensores em condições similares ao disparo real. O dispositivo foi capaz de reduzir o número de sensores candidatos em 66% para uma validação final numa campanha de ensaios em voo, sendo os mesmos sensores aprovados em solo também aprovados em voo.

Palavras-Chave— Dispositivo de Teste em Solo, Metralhadora, Sensor Contador de Disparos.

I. INTRODUÇÃO

As aeronaves militares de caça são historicamente equipadas com um sistema de artilharia, composto por metralhadoras (mais baixo calibre) ou canhões (mais alto calibre), para suportar missões de ataque ar-solo e ar-ar [1]. O sistema é alimentado com a munição apropriada e, em geral, é acionado eletricamente de forma remota pelo tripulante.

O sistema abordado por este artigo é composto por duas metralhadoras .50" que dispõem de um sensor indutivo de proximidade, o qual detecta a movimentação dos componentes internos da metralhadora durante disparos, gerando assim, para a aeronave, a função de contagem dos disparos efetuados. Isto é traduzido para a tripulação nos *displays* da aeronave como uma informação da quantidade remanescente de munição disponível para disparo, considerando que o sistema foi informado previamente da quantidade inicial de munição. A Fig. 1 [2] ilustra a topologia típica deste tipo de sensor, em geral composto por um circuito oscilador acoplado a um indutor que gera um campo eletromagnético, que por sua vez induz correntes parasitas no material ferromagnético que se aproxima da face do sensor. O resultado é uma perda de energia e, consequentemente, uma amplitude de tensão menor no oscilador. Um circuito *Schmitt trigger* detecta esta variação na amplitude da tensão e gera um sinal que aciona um circuito amplificador, que transita então pelos estados *ON* e *OFF* [3].

O presente artigo aborda um caso de especificação de um novo sensor para um sistema de metralhadoras de uma aeronave de caça, que precisaria ser primeiramente testado e validado em um cenário de emprego, com disparos reais. A princípio, doze sensores candidatos foram selecionados de diferentes fabricantes, com especificações diversas. Para reduzir

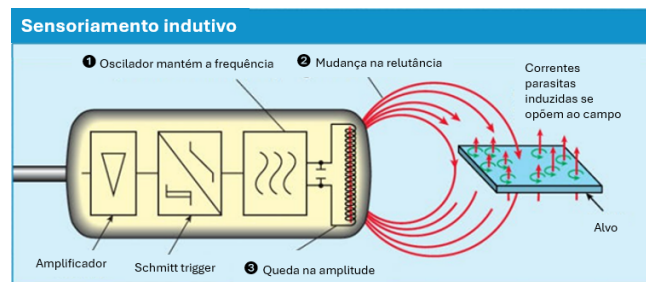


Fig. 1: Topologia típica de um sensor indutivo de proximidade.

os altos custos associados com uma campanha de testes com disparos reais, viu-se a necessidade de uma metodologia de testes em solo com representatividade suficiente para realizar uma primeira filtragem dos sensores.

Nota de confidencialidade: Informações e dados adicionais relacionados ao presente estudo, que não foram publicados neste artigo, são de propriedade exclusiva da organização responsável pela pesquisa. Por se tratarem de dados confidenciais e estratégicos, seu acesso externo está restrito e sujeito à autorização formal da referida instituição.

II. METODOLOGIA

A. Seleção de Sensores

Alguns dos principais parâmetros elétricos que definem um sensor indutivo de proximidade são [3]:

- Diâmetro (D);
- Tensão de operação (V);
- Distância de sensoriamento (R) - máxima distância entre a face ativa do sensor e o alvo dentro da qual o alvo é detectado pelo sensor;
- Frequência de chaveamento (f); e
- Tipo de saída - parâmetro associado ao tipo de transistor de estado sólido, que pode ser:
 - NPN (*Negative-Positive-Negative*) ou PNP (*Positive-Negative-Positive*); e
 - NC (*Normally Closed*) ou NO (*Normally Open*).

A combinação entre os diferentes tipos de saída (NPN ou PNP, NC ou NO) determina a forma de onda de saída do sensor (transição do nível ALTO para o nível BAIXO, ou vice-versa, quando o alvo é detectado pelo sensor).

Para uma ampla amostragem de sensores, foram escolhidos modelos distintos, de fabricantes diferentes e com especificações diversas quanto aos parâmetros de funcionamento, conforme Tabela I.

TABELA I: SENSORES SELECIONADOS PARA OS TESTES

Fab.	Sensor	D	R	V	f	Saída
A	A1	8 mm	2 mm	6-36VDC	5 kHz	NPN NO
	B1	8 mm	3 mm	10-30VDC	2 kHz	PNP NC
	B2	8 mm	3 mm	10-30VDC	2 kHz	PNP NO
B	B3	8 mm	3 mm	10-30VDC	2 kHz	NPN NC
	B4	8 mm	3 mm	10-30VDC	2 kHz	NPN NO
	B5	8 mm	2 mm	10-30VDC	2 kHz	PNP NC
	B6	8 mm	1 mm	10-30VDC	2 kHz	PNP NC
C	C1	8 mm	2 mm	5-30VDC	2.5 kHz	PNP NO
	C2	8 mm	2 mm	5-30VDC	2.5 kHz	NPN NO
	C3	8 mm	2 mm	5-30VDC	2.5 kHz	PNP NC
D	D1	8 mm	1.5 mm	10-30VDC	3 kHz	PNP NO
	D2	8 mm	1.5 mm	10-30VDC	3 kHz	NPN NO

B. Dispositivo de Teste

Um dispositivo específico de teste foi desenvolvido para simular a taxa de disparos para os sensores sem a necessidade de disparar as metralhadoras [4]. O objetivo deste dispositivo foi estimular os sensores de uma forma similar ao mecanismo interno da metralhadora, de forma que o sensor reproduza a forma de onda teórica de saída de uma rajada real.

A forma de onda teórica da Fig. 2 [5] foi usada como referência para a construção do dispositivo, que representa a forma de onda de saída ideal do sensor quando submetido à taxa máxima de disparos da metralhadora, sendo esta obtida a partir de ensaios de tiro em túnel balístico com instrumentação, prática padrão de teste para caracterização deste tipo de armamento e sua munição [6]. A forma de onda real de saída do sensor é mostrada na Fig. 3 [5].

A forma de onda teórica da Fig. 2 apresenta dois pulsos distintos com larguras diferentes devido aos diferentes níveis de energia associados aos movimentos de ida e retorno da culatra da metralhadora. Para fins de simplificação da construção do dispositivo, decidiu-se implementar uma única largura de pulso, sendo esta a mais curta (1.2 ms) por ser a que exige resposta mais rápida do sensor.

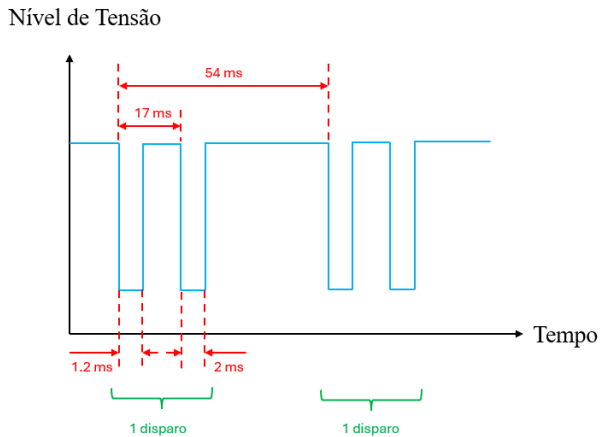


Fig. 2: Forma de onda de saída teórica do sensor.

O dispositivo consiste em um par de pás alimentadas por um motor elétrico, cada pá contendo um par de alvos (conforme ilustrado na Fig. 4) para simular os movimentos do mecanismo interno da metralhadora perante o sensor de proximidade. As pás e o motor são montados num invólucro metálico de proteção, sendo o arranjo final do dispositivo mostrado na Fig. 5, com sensores para teste montados na estrutura e conectados eletricamente a um circuito de aquisição

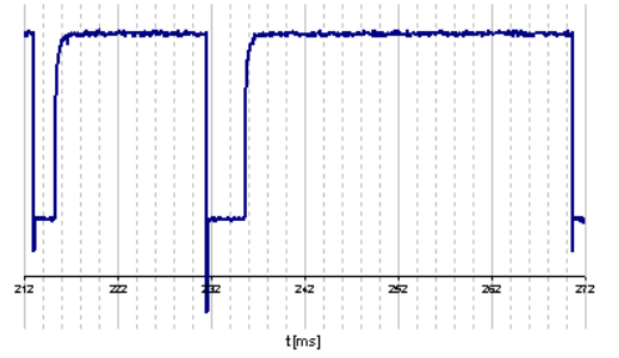


Fig. 3: Forma de onda de saída real do sensor.

de dados.

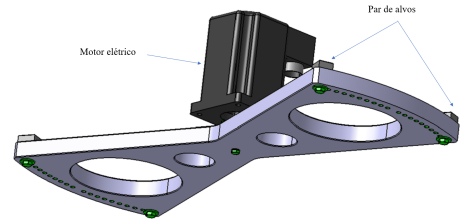


Fig. 4: Alvos instalados nas pás.



Fig. 5: Dispositivo de testes finalizado.

Para reproduzir a forma de onda teórica da Fig. 2, foram definidos os principais parâmetros para o dispositivo de testes, conforme ilustrados na Fig. 6.

Decidiu-se testar os sensores na máxima taxa de disparo da metralhadora FR (em disparos por minuto), portanto, a rotação nominal do dispositivo foi definida como:

$$\omega = \frac{FR}{2}. \quad (1)$$

A partir disto, considerando a largura PW do menor pulso da forma de onda teórica, o intervalo de tempo entre os pulsos do mesmo disparo Δt e o tamanho l dos alvos, os demais parâmetros foram calculados conforme abaixo:

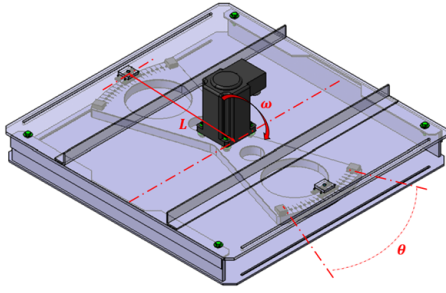


Fig. 6: Principais parâmetros do dispositivo de teste.

$$\theta = \omega \times \Delta t; \quad (2)$$

$$L = \frac{l}{\omega \times PW}, \quad (3)$$

sendo θ o ângulo de espaçamento entre alvos adjacentes e L a distância entre os alvos e o eixo de rotação do motor.

C. Escopo de Ensaios

Para a qualificação completa do sensor indutivo de proximidade para o uso como contador de tiros no sistema de metralhadoras, o escopo de ensaios apresentado na Fig. 7 foi definido. Os sensores aprovados em todas as etapas de ensaios foram posteriormente sujeitos à análise de documentação técnica para seleção do sensor final.

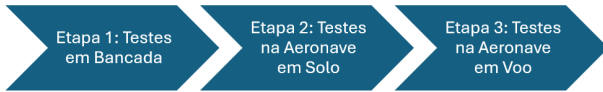


Fig. 7: Escopo de testes para qualificação do sensor.

III. RESULTADOS

A. Validação do Dispositivo de Teste

A validação do dispositivo de teste foi realizada com um sensor de referência [5], sendo o dispositivo validado a partir da comparação dos intervalos de tempo da forma de onda obtida empiricamente com a forma de onda teórica da Fig. 2. Para obter uma forma de onda mais precisa para calcular com precisão os intervalos de tempo, uma taxa de aquisição de 51.2 kHz foi utilizada. As formas de onda de validação do dispositivo são mostradas nas Fig. 8 a 10 [7].

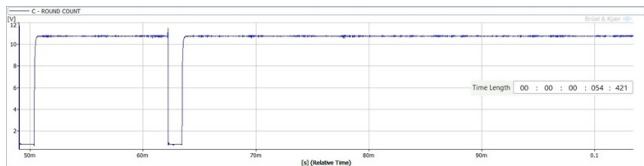


Fig. 8: Período da forma de onda de um disparo (54 ms).

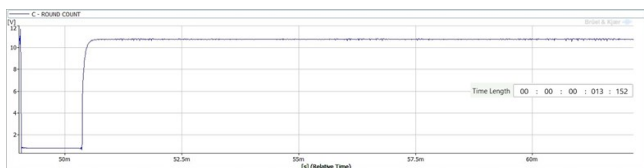


Fig. 9: Intervalo de tempo entre pulsos do mesmo disparo (13 ms).

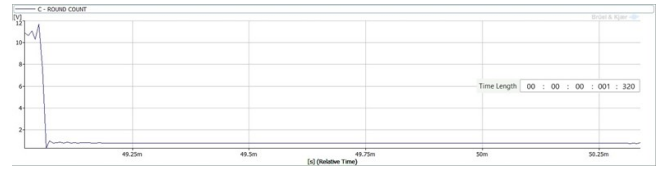


Fig. 10: Largura de pulso (1.3 ms).

B. Testes em Bancada

Nos testes em bancada com os sensores candidatos, a forma de onda de dois disparos na frequência de disparo foi usada como referência. A taxa de aquisição de dados para esta etapa foi configurada em 3.2 kHz. Os resultados de dois sensores candidatos são apresentados nas Fig. 11 e 12, conforme abaixo:

- 1) Sensor A1: exemplo de sensor que passou nos testes em bancada;
- 2) Sensor B1: exemplo de sensor que não passou nos testes em bancada.

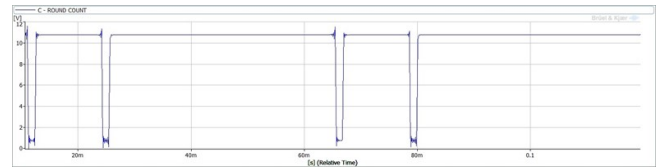


Fig. 11: Forma de onda do Sensor A1.

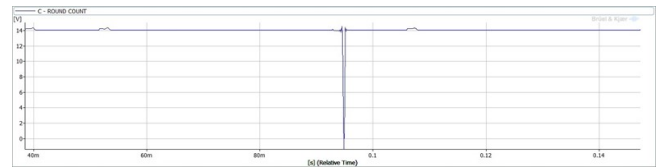


Fig. 12: Forma de onda do Sensor B1.

É possível observar os pares de pulsos bem distintos na forma de onda do Sensor A1, indicando a detecção de dois disparos efetivos, enquanto que na forma de onda do Sensor B1 os pulsos foram incompletos, o que por sua vez compromete a informação correta de decontagem da quantidade remanescente de munição disponível.

C. Testes na Aeronave em Solo

O dispositivo foi usado também em testes em solo conectado à aeronave de forma a avaliar a integração do circuito dos sensores indutivos de proximidade com o circuito elétrico da aeronave. Os testes consistiram na simulação de uma sequência de rajadas com diferentes intervalos de tempo, conforme abaixo:

- Rajada #1: 3s;
- Rajada #2: 1s;
- Rajada #3: 5s;
- Rajada #4: 2s; e
- Rajada #5: 2s.

Os intervalos de tempo foram escolhidos arbitrariamente, porém considerando os seguintes critérios:

- intervalos de tempo curtos, representativos do tempo de engajamento de alvos pela aeronave;

- a soma total dos disparos simulados nas 5 rajadas seria próxima da capacidade máxima da aeronave (250 disparos).

Parte dos resultados de dois sensores candidatos são apresentados nas Fig. 13 a 16, conforme abaixo:

- 1) Sensor A1: exemplo de sensor que passou nos testes na aeronave;
- 2) Sensor B1: exemplo de sensor que não passou nos testes na aeronave.

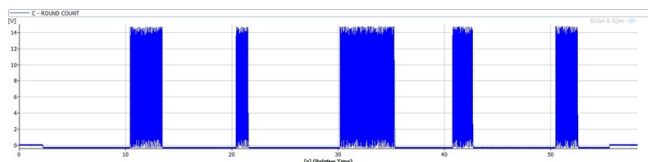


Fig. 13: Forma de onda do Sensor A1 (5 rajadas).

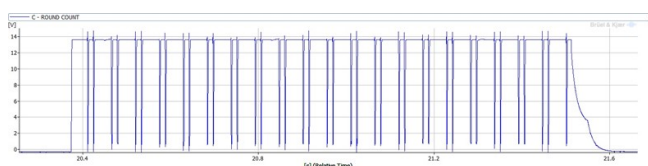


Fig. 14: Forma de onda do Sensor A1 (Rajada #2).

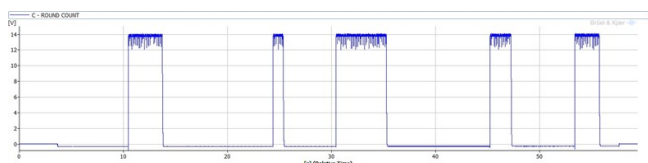


Fig. 15: Forma de onda do Sensor B1 (5 rajadas).

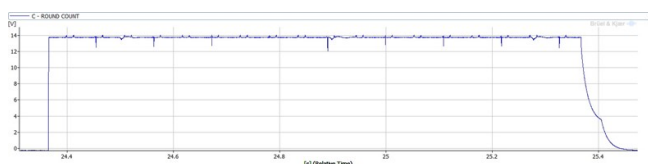


Fig. 16: Forma de onda do Sensor B1 (Rajada #2).

É possível observar os pares de pulsos bem distintos nos gráficos do Sensor A1, indicando o sensoriamento efetivo dos disparos, enquanto que nos gráficos do sensor B1 os pulsos foram comprometidos, não havendo o sensoriamento efetivo dos disparos.

D. Testes na Aeronave em Voo

A validação final do dispositivo ocorreu na campanha posterior de ensaios em voo com disparos reais. Nos ensaios em voo as formas de onda de saída dos sensores não foram capturadas para análise, mas foi feita a avaliação da contagem dos disparos nos *displays* da aeronave a partir de rajadas com quantidades pré-definidas de disparos. Para tanto, as munições reais foram montadas no cinto com munições inertes separando cada rajada, conforme ilustrado na Fig. 17, que eram despejadas utilizando-se o mecanismo de rearme da aeronave ao fim de cada rajada [8].

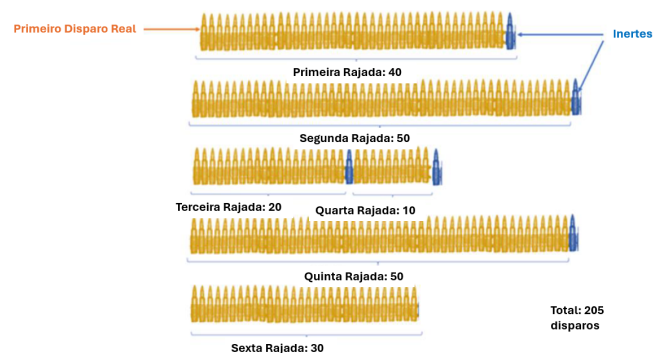


Fig. 17: Montagem do cinto com tamanhos definidos de rajadas.

Os tamanhos das rajadas foram escolhidos arbitrariamente, porém considerando os mesmos critérios dos testes em solo:

- rajadas curtas, representativas do tempo de engajamento de alvos pela aeronave;
- a soma total dos disparos (205 munições) próxima da capacidade máxima da aeronave (250 munições).

O resultado esperado para os sensores testados foi a contagem exata de disparos em cada rajada, conforme apresentado na Tabela II [9].

TABELA II: RESULTADOS DOS ENSAIOS EM VOO

Evento	Cont. Esperada	Cont. A1	Cont. C1	Cont. D1	Cont. D2
Inicial	250*	250	250	250	250
1ª Rajada	210	210	210	210	210
1º Rearme	209	209	209	209	209
2ª Rajada	159	159	159	159	159
2º Rearme	158	158	158	158	158
3ª Rajada	138	138	138	138	138
3º Rearme	137	137	137	137	137
4ª Rajada	127	127	127	127	127
4º Rearme	126	126	126	126	126
5ª Rajada	76	76	76	76	76
5º Rearme	75	75	75	75	75
6ª Rajada	45	45	45	45	45

*A quantidade inicial de 250 foi configurada no *display* aeronave num valor maior que a quantidade real de 205 munições efetivamente instaladas para evitar que a contagem chegasse em zero no *display*, podendo assim afetar o ensaio.

Verificou-se então que os sensores aprovados no ensaio em solo com o dispositivo tiveram também comportamento satisfatório no ensaio em voo, conforme mostrado na Tabela III.

TABELA III: RESUMO DOS TESTES REALIZADOS

Fabricante	Sensor	Etapas 1	Etapas 2	Etapas 3
A	A1	✓	✓	✓
	B1	✗	✗	-
	B2	✗	✗	-
B	B3	✗	✗	-
	B4	✗	✗	-
	B5	✓	✗	-
C	B6	✓	✗	-
	C1	✓	✓	✓
	C2	✗	✗	-
D	C3	✓	✗	-
	D1	✓	✓	✓
	D2	✓	✓	✓

IV. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos para a validação do dispositivo, os intervalos de tempo da forma de onda teórica da Fig. 2 e das medições das Fig. 8 a 10 são comparados na Tabela IV.

TABELA IV: COMPARAÇÃO DAS FORMAS DE ONDA

Grandeza	Valor Teórico	Valor Medido
Período	54 ms	54 ms
Tempo entre pulsos	17 ms	13 ms*
Largura do pulso #1	1.2 ms	1.3 ms**
Largura do pulso #2	2 ms	

*O valor medido representa um cenário pior que o teórico (menos tempo para o sensor estabilizar após a remoção do primeiro pulso), portanto é considerado aceitável.

**A diferença de 0.1 ms foi considerada aceitável, visto que os sensores estabilizam dentro de um intervalo inferior a 1.2 ms após a aplicação do pulso.

Desta forma, conclui-se que o dispositivo reproduz uma forma de onda aceitável, sendo representativo da operação real da metralhadora.

A partir da análise dos resultados dos ensaios, é possível verificar que o dispositivo foi capaz de filtrar o espaço amostral inicial de 12 sensores para somente 4 (redução de 66%), sendo os sensores aprovados na campanha em solo também aprovados na campanha em voo; portanto, o dispositivo construído se mostra eficaz na validação funcional de sensores indutivos de proximidade para aplicação de contagem de disparos de metralhadora. Futuros usos do dispositivo para novos desenvolvimentos de mesma natureza deverão levar em consideração as características da nova plataforma e do seu sistema de artilharia.

Sugere-se a realização de estudos futuros voltados à investigação do impacto dos parâmetros construtivos dos sensores nos resultados obtidos. Especificamente, pesquisas adicionais podem explorar mais a fundo os parâmetros da Tab. I, com o objetivo de avaliar a correlação destes com os resultados de sucesso ou falha dos sensores da Tab. III.

REFERÊNCIAS

- [1] J. W. R. Taylor and J. F. Guilmartin, "Military Aircraft," <https://www.britannica.com/technology/military-aircraft/World-War-I>, 2025, [Online; accessed 14-April-2025].
- [2] T. A. Kinney, "An Overview of Proximity Sensors," <https://www.machinedesign.com/automation-iiot/sensors/article/21831577/baumer-electric-types-of-proximity-sensors-from-inductive-to-ultrasonic>, 2024, [Online; accessed 14-April-2025].
- [3] R. C. Fuentes, "Apostila de Automação Industrial," Universidade Federal de Santa Maria - Colégio Técnico Industrial de Santa Maria - Curso de Eletrotécnica, 2005.
- [4] A. V. de Andrade, "Inductive Proximity Sensors Ground Test Proposal," 314WAP020, 2023.
- [5] M. E. Magalhães, "Nota Técnica - Contador de Tiros da Metralhadora," GPT-DOC-007/03, 2003.
- [6] R. J. Arnold and J. B. Knight, "Weapon Delivery Analysis and Ballistic Flight Testing," AGARD: Advisory Group for Aerospace Research and Development, 1992.
- [7] R. V. Vera and A. V. de Andrade, "Inductive Proximity Sensors Ground Test Results," 314WAR034, 2023.
- [8] A. V. de Andrade, "Inductive Proximity Sensors Flight Test Proposal," 314WAP023, 2023.
- [9] —, "M3P Machine Gun Rounds Counter - Flight Test Results," 314WAR036, 2024.