



Mens Agitat 19 (2024) 22-30

ISSN 1809-4791

22

Plataforma de Controle de Disparo para Operações de Foguetes Acadêmicos

João Carlos Monteiro Prado^{1*}, Daniel Brogini de Assis¹, Silas Camargo de Matos¹, Heidi Korzenowski¹, George Santos Marinho², Paulo Gilberto de Paula Toro^{2,3}

¹Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP). Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo (FEAU). Av. Shishima Hifumi, 2911 –Urbanova. CEP 12.244-390 – São José dos Campos (SP), Brasil. **E-mails:** jcaerospaceeng@gmail.com, brogini.d@gmail.com, silas@univap, heidi.korzenowski@gmail.com

²Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Escola de Ciências e Tecnologia (ECT). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial (PPGEA). Av. Senador Salgado Filho, 3000 - Campus Universitário, Lagoa Nova. CEP 59.078-970 – Natal (RN), Brasil. **E-mails:** george.marinho@ufrn.br, toro11pt@gmail.com

³Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais (PG-CTE). Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 – Vila das Acácias CEP 12.228-900–São José dos Campos (SP), Brasil. **E-mail:** toro11pt@gmail.com²

Resumo

A prática de pesquisa e desenvolvimento de pequenos foguetes experimentais, seja no âmbito amador ou estudantil, é comumente chamada de foguetemodelismo. Esta atividade no Brasil é orientada por algumas normas e regulamentos. Porém, não há documentos que congregue todas as normas existentes e desconectadas, de modo a facilitar seu conhecimento. Muitas equipes não possuem ciência nem adotam práticas seguras em termos operacionais. Neste trabalho teve-se por finalidade criar um sistema eficiente, tanto na parte informacional e tática, reunindo um conjunto de doutrinas, hardwares e procedimentos capazes de garantir barreiras, físicas ou não, as quais buscam reduzir os riscos ofertados no manuseio e operações nas atividades de ensaios e lançamentos de minifoguetes. Para desenvolvimento do projeto foi realizada pesquisa bibliográfica baseada em protocolos de segurança visando a aplicabilidade da doutrina de Comando e Controle (C2) das forças armadas. Dentro da abrangência de um Sistema de Comando e Controle (SC2), o projeto focou na área de controle, aplicando à engenharia de sistemas, para estabelecer um sistema de controle de disparo eficiente e que garanta a segurança dos operadores e o exercício do comando e controle pela liderança da operação de lançamento. Buscou-se disponibilizar um sistema que envolve o emprego de elementos móveis, em forma de maletas, de fácil manuseio e transporte. O produto final, representado pelo segmento do SC2, é um Sistema de Controle de Disparo composto pelos equipamentos necessários e pessoal treinado, de maneira a garantir o controle das operações e segurança eficiente no disparo de foguetes.

Palavras-chave: Comando e Controle, Ignição, Sistema, Lançamento, Foguetes

Abstract

The practice of research and development of small experimental rockets, whether in the amateur or student environment, is commonly called model rocketry. This activity in Brazil is guided by some rules and regulations. However, there is no document that brings together all existing and disconnected rules in order to facilitate their knowledge. Many teams are not aware of nor adopt safe practices in operational terms. The purpose of this work is to create an efficient system, both in terms of information and tactics, which brings together a set of doctrines, hardware and procedures capable of guaranteeing barriers, physical or not, which seek to reduce the risks offered in handling and operations in the activities of testing and launching mini rockets. For the construction of the project, a bibliographic research was carried out based on security protocols aiming at the applicability of the Command and Control (C2) doctrine of the armed forces. Within the scope of a Command and Control System (SC2), the project focused on the control area, using systems engineering to create an efficient fire control system that guarantees the safety of operators and the exercise of command and control by the leadership of the launch. The culmination is a system that involves the use of mobile elements, in the form of suitcases, easy to handle and transport. The final product presented by the SC2 segment is a Fire Control System composed of the necessary equipment and trained personnel, in order to guarantee the control of operations and efficient safety in the firing of rockets.

Keywords: Command and Control, Ignition, System, Release, Rockets

1. INTRODUÇÃO

Desde 2018, a UNIVAP (Universidade do Vale do Paraíba) executa projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) de pequenos foguetes experimentais em seu Laboratório de Jato Propulsão (LJP).

A Agência Espacial Brasileira (AEB), autarquia ligada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), apoia a prática do foguetemodélismo experimental em universidades [1]. A AEB também realiza eventos e amostras, além de apoiar atividades similares desenvolvidas por outras entidades no Brasil, tais como o Festival Brasileiro de Minifoguetes, organizado pela BAR (Brazilian Association of Rocketry), e a Latin American Space Challenge (LASC), segunda maior competição de foguetes experimentais do mundo.

A atividade de foguetemodélismo no Brasil, não possui um regulamento específico. Porém, segue algumas normas internas das próprias instituições participantes, normas recomendadas por agências governamentais ou associações de fomento da prática e regras estabelecidas pela autoridade aeronáutica ou pelas forças armadas. Alguns exemplos são as normas publicadas pela BAR [2].

É evidente, portanto, a necessidade de se avaliar protocolos de segurança, ou a falta deles, no âmbito das atividades relacionadas ao foguetemodélismo, sobretudo dentro das universidades do país.

No LJP / UNIVAP, desenvolve-se uma série de procedimentos visando a implementação de um Sistema de Gerenciamento da Segurança Operacional (SGSO), voltado a atividades de P&D, geralmente indoor, ou seja, no interior de laboratórios e oficinas. Ao mesmo tempo, o SGSO estende-se às atividades outdoor, ou seja, testes e lançamentos realizados em campo. Em termos de segurança, não há como definir quais atividades, indoor ou outdoor, necessitam mais atenção do SGSO, pois, do ponto de vista da garantia da saúde ocupacional dos operadores, paralela à garantia da integridade das instalações e sistemas empregados, a segurança e a taxa zero de acidentes ou incidentes é a meta maior, independentemente do local, das condições e das

circunstâncias dos trabalhos realizados. Embora essa seja uma realidade, do ponto de vista da gestão de riscos, estando em conformidade com a Norma ISO 45.001 [3], pode-se classificar as atividades outdoor como mais sensíveis, uma vez que práticas como ensaios em solo e lançamentos envolvem elementos perigosos, cuja combinação com exposição de pessoal resultam em riscos.

A partir da pesquisa de protocolos de segurança e da experiência da liderança do laboratório na indústria e em outras organizações, civis e militares, idealizou-se estudar a aplicabilidade da doutrina de Comando e Controle (C2) das forças armadas para estabelecer uma série de protocolos e sistemas que, quando combinados, proporcione barreiras garantidoras da segurança durante as atividades de ensaios e lançamentos, de forma a atender a demanda criada.

O Ministério da Defesa do Brasil [4] definiu o Comando e Controle (C2) como a ciência e arte que aborda o funcionamento de uma cadeia de comando, ou seja, o exercício do comando por uma autoridade sob as diferentes unidades, enviando ordens e dessas recebendo informações para que utilize seu poder decisório e emita novas ordens. Nesta concepção, o comando e controle envolve, basicamente, três componentes: a autoridade, apoiada por uma organização, da qual partem as decisões que consolidam o exercício do comando e para onde fluem as informações necessárias ao controle; a sistemática do processo decisório que permite a elaboração de ordens, constitui o fluxo de informações e garante meios para o cumprimento pleno das ordens; e a estrutura, incluindo pessoal, equipamento, doutrina e tecnologia necessários para que a autoridade possa acompanhar o desenvolvimento das operações.

O Sistema de Comando e Controle (SC2) é a agregação de tecnologias e procedimentos que apoiam a materialização das ações de Comando e Controle, ou seja, é o conjunto de instalações, equipamentos, comunicações, doutrina, procedimentos e pessoal essenciais para que o comandante planeje, dirija e controle as ações de sua organização visando atingir uma determinada finalidade [4].

Em ordem de adicionar barreiras físicas de proteção, em conjunto ao protocolo a ser seguido, objetivou-se criar métodos para mitigar os riscos inerentes às operações de testes e lançamentos, visando proporcionar maior segurança e efetividade operacional, reduzindo a possibilidade de falhas humanas ou eletrônicas. Desta forma definiram-se módulos que garantissem a segurança nos testes de motores e lançamentos dos foguetes e que deveriam ser compostos de elementos móveis, em forma de maletas, de fácil manuseio e transporte. Esses equipamentos permitem o acionamento dos motores de foguetes, além de receber os dados de telemetria dos veículos durante o voo e possibilitam a comunicação entre os líderes e os operadores a eles subordinados.

Para análise da viabilidade de desenvolvimento de um sistema dedicado à avaliação da segurança e funcionamento de um Sistema de Comando e Controle (SC2) aplicável às equipes de foguetemodélismo em atividade em universidades brasileiras, adotou-se o fluxograma de trabalho apresentado na Figura 1.

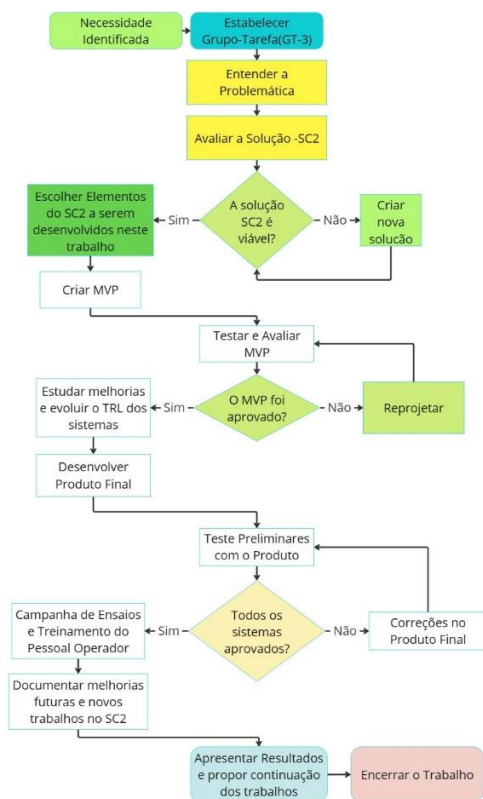


Figura 1. Fluxograma de Trabalho - Sistema SC2.

A utilização de dispositivos elétricos (“squibs”) para iniciar a queima da carga de ignição do propelente dos motores foguetes requer uma corrente elétrica, fornecidas por bateria, com tensão especificada pelo fabricante, bastando haver contato entre bateria-cabos-squibs para ocorrer a ignição. Esse método de acionamento não oferece barreiras de segurança contra um acionamento acidental, nem presta confiabilidade às conexões.

De forma a estabelecer um sistema seguro e eficiente de controle do disparo do foguete foi desenvolvido uma

Plataforma de Controle de Lançamento (PC), concebida na forma de uma maleta botoeira, onde são reunidas: uma fonte de energia; uma chave geral; um botão de disparo; botões de checklist e conectores para os cabos que levarão a energia da fonte até os squibs. Podem ser incorporados itens adicionais, como display da tensão atual da bateria, LEDs indicadores e demais periféricos, como monitor de vídeo, entre outros.

No presente trabalho, teve-se por objetivo apresentar uma Plataforma de Controle de Disparo para materialização de ações de Comando e Controle (C2), no âmbito das operações de lançamento de engenhos balísticos, visando a efetividade dos processos e o aumento da segurança operacional por meio do acréscimo de barreiras físicas, doutrinas e procedimentos. Para concepção do projeto, considerou-se a importância de se dispor de um Sistema de Comando e Controle (SC2) dotado de equipamentos (*hardware*) que inter-relacionam infraestruturas, protocolos, doutrinas, comunicações e módulo de aquisição de dados, para ser acoplado a um Sistema de Comando e Controle (SC2).

2. FUNDAMENTAÇÃO

De acordo com o Ministério da Defesa do Brasil [4], foguete é um engenho autopropulsado, cuja propulsão é causada pela ejeção de gases em expansão, gerado na câmara de combustão por propelentes, contidos no corpo do próprio aparelho, independentemente da admissão de substâncias externas para ocorrer a combustão, cuja trajetória balística não é controlada após o lançamento, ou seja, é não-guiado. [4]

Foguetes experimentais são engenhos autopropulsados de pequeno e médio porte, que podem ser desenvolvidos em universidades, escolas e outras organizações, com o objetivo de testar, qualificar e apresentar as tecnologias desenvolvidas por meio de metodologias empíricas [5].

De acordo com Palmerio [6], independentemente do porte, foguete é um projeto multidisciplinar que reúne áreas do conhecimento tão diversas como: Física, química, aerodinâmica, transferência de calor, tecnologia de materiais, engenharia de estruturas, processos de fabricação, eletrônica, dinâmica e controle de voo, propulsão, pirotecnia e trajetografia.

De acordo com a BAR [7], classificam-se minifoguetes em função do impulso total e do apogeu, como foguetemodé (motor-foguete comercial) ou experimental (motor-foguete produzido pela própria equipe).

Definem-se: *apogeu* como a altitude acima do nível do mar (AGL, Above Ground Level) atingida pelo foguete, e *impulso total* um parâmetro de medida da potência do sistema propulsivo do motor foguete, expresso em N.s (Newtons-segundo). Quanto maior for impulso total, mais potente será o dispositivo. A BAR utiliza classificação idêntica à adotada pela NAR (National Association of Rocketry) e pela FAR (Friends of Amateur Rocketry), entidades norte-americanas.

Foguetemodelos (FM) são veículos que habitualmente atingem apogeu de cerca de 300 de altitude, sendo geralmente fabricados e comercializados na forma de kits de montagem, didáticos ou para hobby. Comumente, utilizam-se materiais alternativos, como: papel-cartão, madeira de baixa densidade (balsa), plásticos e isopor, podendo-se utilizar materiais mais

avançados, como fibra de vidro ou de carbono, além dos semicondutores do sistema de eletrônica embarcada [5].

Foguetes experimentais, normalmente, são desenvolvidos por universitários, recebendo a denominação de foguete acadêmico, e atingem apogeu máximo de 12 km [7]. Em geral, todos os componentes do motor foguete, desde materiais estruturais de fibra de vidro ou de carbono, ligas de alumínio e correlatos), aerodinâmica, eletrônica embarcada e sistema de recuperação (paraquedas) são desenvolvidos, manufaturados e operados pelos próprios projetistas. O sistema propulsivo, por ser de fabricação própria, é classificado pela Associação Brasileira de Minifoguetes em níveis de 1 à 3, subdivididos em classes de A a O (apresentando 40.960 N.s de impulso total) [8].

Na Figura 2 apresenta-se o esquema de um minifoguete acadêmico típico, em geral construído de materiais de fácil aquisição e baixo custo, ou de materiais compostos, como fibra de vidro e fibra de carbono, podendo ser equipado com motores foguetes de propulsão sólida (propelente sólido homogêneo), híbrida (propelentes parte na forma sólida e parte na forma líquida ou gasosa) ou líquida. O sistema de recuperação é responsável por trazer a carga útil (eletrônica embarcada para altimetria e acionamento de eventos, como a ejeção controlada dos paraquedas) de volta ao solo em velocidade compatível à segurança e manutenção da integridade estrutural por meio de dispositivos geradores de arrasto aerodinâmico, como paraquedas. Foguetes (de sondagem) suborbitais podem carregar cargas-pagas, como sondas ou experimentos que. Foguetes orbitais, em geral, transportam satélites.

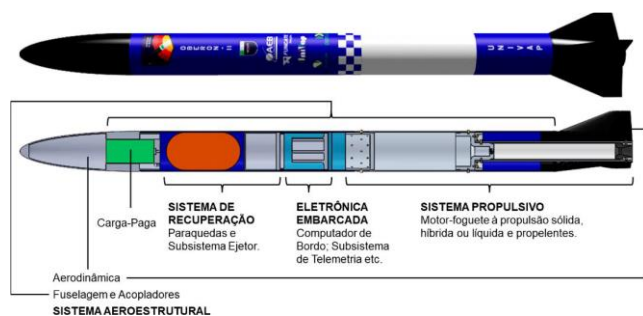


Figura 2. Esquema de um minifoguete acadêmico típico.

Os foguetes com capacidade para atingir grande apogeu realizam trajetória balística, sendo classificados como suborbitais, i.e., foguetes que não atingem a velocidade orbital (da ordem de 8.000 m/s). Portanto, não entram em órbita. O principal objetivo dos foguetes suborbitais, conhecidos como foguetes de sondagem, é atingir por instantes condição de microgravidade, possibilitando a realização de experimentos científicos.

Foguetes orbitais são os que atingem velocidade orbital em altitude acima de 100 km e completam ao menos uma órbita inteira ao redor da Terra. O Brasil opera dois centros de lançamentos de veículos espaciais: Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI), localizado em Parnamirim – RN, e o Centro Espacial de Alcântara (CEA), em Alcântara – MA [9].

O foguetemodelismo é uma atividade extracurricular presente em universidades de vários países, e é prática amadora em diversas agremiações, sendo mais difundida nos EUA, onde existem associações como a NAR (National Association of Rocketry) e a FAR (Friends of Amateur Rocketry). No estado do Novo México (EUA), onde localiza-se o espaço porto da empresa Virgin Galactic, realiza-se anualmente o maior evento de foguetemodelismo do mundo: a Spaceport America Cup (SAC). Durante a SAC, ocorre o Intercollegiate Rocket Engineering Competition (IREC), a maior competição de engenharia de foguetes inter-universidades, congregando universidades de todos os continentes para disputar diversas categorias.

Em Portugal ocorre anualmente a European Rocketry Challenge (EuRoc), proporcionando às equipes europeias uma experiência próxima à encontrada na SAC.

Um estudo realizado por membros do Grupo de Desenvolvimento Aeroespacial (GDAe) da Universidade Federal do Ceará (UFC), em 2020 [10], sobre equipes de minifoguetes do Brasil, revelou que a grande maioria desenvolve minifoguetes à propulsão sólida. Trata-se de tecnologia mais simples e barata, porém, menos eficiente em termos de engenharia e, principalmente, menos seguros [10].

3. NORMAS E BOAS PRÁTICAS

O Brasil não possui regulamentação específica sobre operação de foguetes. São aplicadas diversas normas extraídas de vários órgãos, que elaboram critérios, recomendações e limites para os segmentos da atividade de foguetemodelismo.

Em 1999, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) publicou o Regulamento Brasileiro de Homologação Aeronáutica (RBHA) 101, semelhante ao regulamento *14 CFR Subpart F, Part 101 da Federal Aviation Administration* (FAA) dos EUA, que estabelece definições, limitações e requisitos para operação de foguetes não tripulados no espaço aéreo do respectivo domínio territorial.

Similarmente ao que a FAA (*Federal Aviation Administration*) dos EUA explicita no regulamento *14 CFR Subpart F, Part 101*, a autoridade aeronáutica brasileira possui o RBHA 101. Elaborado sob os auspícios do extinto DAC – Departamento de Aviação Civil, hoje ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil, o RBHA 101 é uma publicação de 1999. Tanto o RBHA (Regulamento Brasileiro de Homologação Aeronáutica) 101 quanto seu congênere americano estabelecem definições, limitações e requisitos para operação de foguetes não tripulados no espaço aéreo nacional.

Importante enfatizar que o uso de espaço aéreo para lançamento de minifoguete está condicionado à autorização da Força Aérea Brasileira sempre que o aparelho possa atingir altura maior que 305 m em zona urbana, ou maior que 152 m em zona rural.

O uso de produtos químicos para fabricação de propelentes, desde a aquisição de componentes, produção, comercialização e armazenamento, é fiscalizado pelo Exército Brasileiro, por meio da Diretoria de Fiscalização de Produtos Controlados (DFPC) e do Comando Logístico (COLOG) [8].

A AEB [1] possui um manual de boas práticas e a BAR [2] possui normas específicas a respeito de segurança em lançamentos, que, quando seguidas, são ferramentas que tornam o risco inerente ao foguetemodelismo mitigável e a prática mais segura. Ainda, competições, treinamentos e palestras são organizados pela BAR e pela Latin American Space Challenge (LASC). Finalmente, a AEB instituiu o Programa E2T para apoiar financeiramente a prática em universidades.

Motta [11] publicou, em 2004, o manual “Segurança no Manuseio de Foguete”, no qual apresenta diversos procedimentos para garantir a segurança nas operações com foguetes, baseados nos procedimentos realizados no Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI) no decorrer das operações do Projeto Poeira. Um dos procedimentos descritos trata do uso de tarjetas com cores de identificação pessoal do nível de conhecimento do plano de segurança e acesso às áreas de risco.

4. SISTEMA DE CONTROLE DE DISPARO

Inicialmente, foi desenvolvido o protótipo, baseado no Produto Mínimo Viável, idealizado para possibilitar, no mínimo, o cumprimento de uma missão e atendimento de uma demanda, possuindo apenas as funções necessárias para demonstrar a tecnologia que será entregue pelo produto final.

4.1. Plataforma de Controle de Disparo (PCD)

O Sistema de Controle de Disparo foi projetado para aumentar a segurança nas operações com foguetes, sendo composto por baterias, interface botoeira, linha de fogo e iniciador. Nas figuras 3 e 4 observam-se, respectivamente, o desenho e a imagem da Plataforma de Controle de Disparo (PCD), desenvolvida para estabelecer um procedimento seguro e eficiente da operação de lançamento.

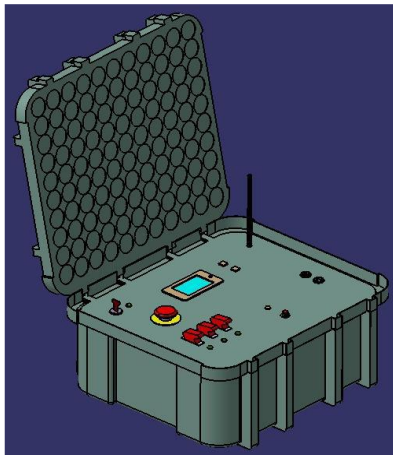


Figura 3. Maleta PCD idealizada pelos autores.

A PCD é composta por uma maleta plástica retangular, com tamanho médio, contendo em seu interior: barreiras físicas contra disparo acidental (1 chave de girar, tipo Pacri, responsável por ligar o circuito, deixando-o pronto para armar, até a completa evacuação da área de lançamento e 1 chave tipo alavanca, usada para armar o circuito para o

disparo); uma linha de fogo, com 50 m de cabo de cobre, de duas vias e com seção de diâmetro 1,5 mm; e 1 bateria de 12V, 7Ah, selada, modelo UP1270SEG.

4.1.1. Sistemas de Ignição de Foguetes

Foi desenvolvido um sistema de controle de disparo, destinado a proporcionar segurança à operação de ignição do propelente do foguete, de forma a prevenir a ocorrência de disparo acidental, evitando, por exemplo, o acionamento não intencionalmente do botão de disparo e o lançamento não previsto do foguete, ou que falhas técnicas (e.g., corrente elétrica parasita) resultem no acionamento do iniciador. Portanto, devem existir barreiras de segurança. No projeto do sistema de ignição, foram consideradas as condições seguintes: 1) a linha de fogo nunca deve ser conectada à interface antes da evacuação da área de lançamento; 2) os disjuntores físicos devem ser colocados entre a bateria e a linha de fogo de modo que impeçam a passagem de corrente. A colocação de disjuntores cumpre uma doutrina militar no manuseio de foguetes: Checar, Armar e Disparar.

4.1.2. Linha de Fogo e Iniciador

A resistência elétrica do circuito do Sistema de Controle de Disparo está nos cabos e no iniciador. Foi realizada uma série de experimentos para assegurar qual seria a tensão e a corrente mínimas necessárias para acionar o iniciador. Dessa forma, foi possível identificar os valores de tensão e correntes mínimas que devem ser observadas na fonte (bateria) para assegurar que o iniciador irá deflagrar sem chance de falha.

Nos testes, constatou-se que a corrente mínima de fogo do iniciador squib foi $\sim 0,48$ A e a tensão mínima necessária ~ 2 V. Esses valores variam muito devido a qualidade de fabricação dos dispositivos fornecidos pelos fabricantes. Portanto, visando-se aumentar a segurança em relação à confiabilidade e considerando-se o custo-benefício, definiu-se que a bateria responsável pelo acionamento do iniciador deve ter as especificações seguintes: tensão de 12V e carga com capacidade de 7Ah, proporcionando uma corrente de descarga de 2,10 A. A bateria tem a função de alimentar o circuito e demais dispositivos agregados a maleta, como o medidor multi-funções.

Finalmente, foi incorporada à PCD (Figura 4) um voltímetro portátil, para aferição da tensão durante a operação de Minifoguetes. Em junho de 2022, a PCD foi utilizada durante o VII Festival Brasileiro de Minifoguetes, realizado na UNIVAP, em São José dos Campos – SP, sendo responsável pelo lançamento de 21 foguetes, tendo operado durante 8 horas sem falhas.



Figura 4. Maleta PCD desenvolvida pelos autores.

4.2. Produto final da Plataforma de Controle de Disparo

Após a validação da PCD, realizada em junho de 2022, no VII Festival Brasileiro de Minifoguetes, foi aplicado o ciclo PDCA (Plan, Do, Check, Act). Trata-se de uma sequência de procedimentos, a saber: planejamento (fase de projeto); execução (fase de execução do projeto); monitoramento e checagem, por meio da execução de testes para validação e acompanhamento (fase de monitoramento e controle do projeto); e, por fim, análise de resultados e adoção de ações corretivas ou passagem à fase subsequente do projeto, incrementando-o até encerrar (Figura 5).



Figura 5. Ciclo PDCA, adaptada pelos autores.

Após a validação da PCD, executou-se o PDCA e incrementou-se o sistema com todas as funções além das primordiais, sendo adotadas as seguintes modificações:

- Aumentar o comprimento da linha de fogo para 120 m;
- Adicionar na interface (maleta) um visor, o qual mostra a tensão da bateria, corrente e afins;
- Adicionar mais duas chaves alavancas (tipo caça), a fim de garantir que o sistema só seja armado após 3 checklists;
- Adicionar um botão de emergência que desarma todo o sistema;
- Adicionar uma sirene (sinal sonoro) e um giroflex (sinal visual) ao sistema, de forma a garantir que todos no interior da Área de Operações tenham

ciência dos procedimentos que estão em vigor e assegurem a consciência situacional dentro do escopo do Sistema de Gerenciamento da Segurança Operacional (SGSO). Portanto, para garantir o acionamento do giroflex e da sirene, adicionou-se outra bateria, com mesma especificação do protótipo da PCD (Figura 4).

4.2.1. Linha de Fogo e Iniciador

Para evitar o superaquecimento da bateria, inseriu-se um capacitor de 220 μF no circuito, entre a bateria e as chaves de segurança, de forma que o iniciador (squib) opere corretamente (Figura 6).

No produto final, a linha de fogo é composta por um cabo elétrico PP, de duas vias, com seção transversal com 1,5 mm^2 , dividido em três seções: uma principal e duas intermediárias.

A seção principal, com 100 m de comprimento, situa-se entre a interface da botoeira e o iniciador (squib); a intermediária conecta a seção principal à botoeira por meio um cabo com 10 m de comprimento, dotado de conectores tipo Mike LS-3002 que se acoplam à interface. Na outra extremidade, a seção principal conecta-se ao iniciador (squib) por outro cabo intermediário, com 10 m de comprimento. A seção principal, com 100 m de comprimento, está acomodada em um carrinho dotado de um rolo para facilitar o transporte e armazenamento.



Figura 6. Linha de Fogo e Botão do Iniciador.

4.2.2. Barreiras de Segurança

Foi instalada uma chave geral seletora de segurança, liga / desliga, para acionamento do sistema de alimentação elétrica da maleta. A chave geral está localizada na parte superior, à esquerda do painel de controle, facilitando a visualização e funcionalidade do sistema (Figura 7).

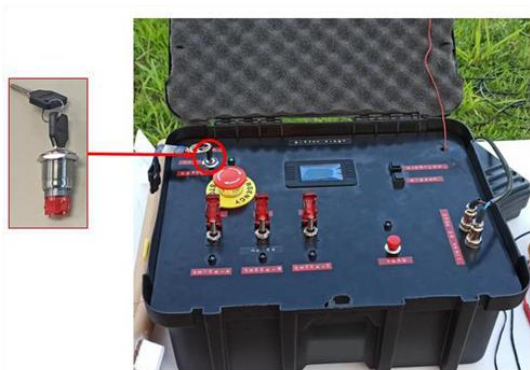


Figura 7. Chave geral de segurança do circuito.

Além da chave geral de acionamento do circuito (Figura 7), o sistema conta com três chaves alavancas de duas posições para armar o sistema (Figura 8). Cada chave contém a sinalização com LED's verde e vermelho, sendo que o primeiro, indica que a chave está carregada e pode ser armada, ou seja, iniciar o checklist, e o segundo serve como indicador de que a verificação foi realizada com sucesso. Dessa forma, cada chave pode ser configurada de modo a atender a um checklist durante a operação, antes de se efetuar o disparo.

Na montagem do circuito, foram usados três módulos relés opto-acoplador de dois canais e tensão de entrada 5 VDC e saída com capacidade para até 250 VAC e 10 A de corrente em seus contatos. Os relés funcionam como chave e, assim, auxiliam na comutação da sinalização e operam em baixo nível, ou seja, podem operar grandes cargas com baixa corrente, garantindo uma segurança maior, uma vez que os circuitos de entrada e saída ficam isolados, evitando curto-circuito ou sobrecorrente. Normalmente, ao se ligar a chave geral, o LED já fica aceso, nas chaves de verificação. Porém, ao manuseá-las, a corrente atravessa os terminais do relé e, assim, o LED verde apaga e o vermelho acende.

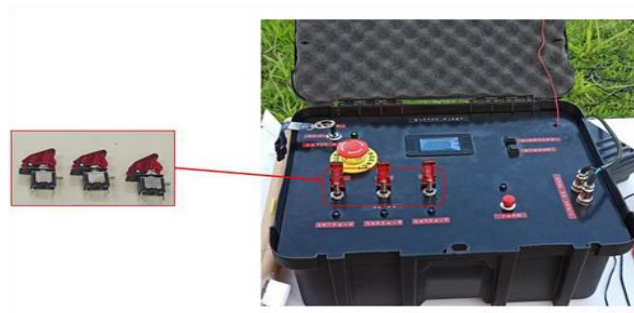


Figura 8. Chave alavancas para checklist.

Há também um botão de emergência, tipo soco (Figura 9), o qual desabilita todo o sistema ao se pressionar o botão vermelho, em casos de condições de perigo iminente ou emergência de fato. Em condições normais, basta inverter o sentido do botão, conforme as setas indicativas para cancelar a condição de risco.



Figura 9. Chave de Emergência tipo soco.

A sirene e o giroflex foram acomodados no interior da maleta Plataforma de Controle de Disparo (PCD) e são acionadas por meio de botões na Interface Botoeira (Figura 10) em distâncias de mais de 150 m em campo aberto.



Figura 10. Interface Botoeira e a Maleta contendo sirene e o giroflex e a eletrônica.





Figura 11. Módulo relé e o circuito dedicado ao acionamento remoto da sirene e giroflex.



Figura 12. Módulo Display Multifunções.

Para acionamento da sirene e do giroflex foi desenvolvido com módulos receptor e transceptores NRF24L01 para Arduino, que operam na frequência de 2,4 GHz. Ao se pressionar o botão, um sinal é enviado ao Arduino, que processa os dados, conforme adequada programação associada ao circuito eletrônico, e envia um sinal ao transmissor. O sinal enviado chega ao receptor, localizado em outra maleta, onde se encontram instalados os sistemas sonoro e visual. Assim, o sinal é processado por outro Arduino, que envia a informação às portas de entrada do módulo relé, onde cada canal é responsável por uma saída, sendo respectivamente o giroflex e a sirene (Figura 11).

Finalmente, um display foi instalado, com uma resistência interna, proporcionando diversas informações para análise de disparo, em tempo real, como: a tensão da bateria e corrente consumida pela maleta. A cada disparo, o display informa a autonomia da bateria e a carga restante, dados essenciais para que o próximo disparo seja efetuado sem falhas.

Adicionalmente, possui parâmetros de medição de 0 a 200 V e corrente de 0 a 10 A. O display possui, ainda, um botão na parte frontal, utilizado para configurações e ajustes (Figura 12).

5. TESTES FINAIS DO SISTEMA DE CONTROLE DE DISPARO

Após a montagem do produto final, iniciou-se uma série de testes e avaliações da parte elétrica para identificação de falhas. Identificou-se que o LED vermelho da chave alavanca permanecia aceso em conjunto com o LED verde ao ligar a

maleta. Então, foi invertida a ligação da chave, na tentativa de buscar um possível mau contato ou erro de ligação. O problema foi sanado após uma rápida pesquisa na datasheet de alguns componentes, sendo identificado o transistor NPNC945 (P331), que possibilitou a divisão de tensão sobre a chave, resolvendo o problema em questão. Alguns testes simulados, realizados em local fechado, e testes reais, realizados em campo aberto permitiram identificar alguns pontos a melhorar, como a interferência no sistema de comunicação remota da sirene e giroflex ao se pressionar o botão com trava (ou selo) do giroflex, e no botão da sirene. Foi proposta a utilização de um circuito comercial do acionador remoto “Gerbs”, com alto custo-benefício. Porém, foram refeitos os pontos de solda e troca de ambos os botões por outros mais resistentes, solucionando o contratempo.

6. CONCLUSÃO

Desenvolvido de acordo com a proposta inicial, o Sistema de Controle de Disparo, composto por baterias, interface botoeira, linha de fogo e iniciador resultou em um dispositivo para aumentar a segurança nas operações de lançamento de foguetes acadêmicos.

A Plataforma de Controle de Disparo, composta por uma maleta plástica retangular média, contendo no interior barreiras físicas contra disparo acidental mostrou-se adequada aos objetivos propostos.

O protótipo da Plataforma de Controle de Disparo foi utilizado, em junho de 2022, no VII Festival Brasileiro de Minifoguetes, realizado na UNIVAP, operando por oitos

horas ininterruptas sem falhas durante os lançamentos de 21 foguetes.

No produto final da Plataforma de Controle de Disparo foram instaladas diversas chaves, otimizando a operação de lançamento de foguetes acadêmicos: i) chave geral seletora de segurança para acionamento da operação; ii) três chaves de duas posições para armar / desarmar o sistema, contendo sinalização com LED's verde, indicando que o checklist pode ser iniciado, e vermelho, indicando que a verificação foi concluída com sucesso; iii) um botão de emergência tipo soco, possibilitando desabilitar todo o sistema, em casos de condições de perigo iminente ou emergência de fato; iv) uma sirene (sinal sonoro) e um giroflex (sinal visual) para garantir que pessoas no interior da Área de Operações tenham ciência dos procedimentos em vigor; v) um display de informações em tempo real sobre: Tensão da bateria, corrente consumida pela maleta, autonomia da bateria e carga restante, disponível para o próximo disparo possa ser efetuado sem falhas.

Finalmente, avaliando os resultados obtidos após os testes do produto final e contrastando-os com os requisitos estabelecidos, verificou-se que o projeto atendeu às expectativas, os requisitos foram alcançados, inclusive com o pré-protótipo atuando em uma competição de minifoguetes e atendendo os procedimentos e treinamentos.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. O presente trabalho foi realizado com apoio do Programa de Cooperação Acadêmica em Defesa Nacional (PROCAD-DEFESA) processo nº 88881.387753/2019-01 (Projeto Desenvolvimentos Nacionais em Propulsão Hipersônica Aspirada com foco no Acesso ao Espaço e Defesa); e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FNDCT; e do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações – MCTI processo nº 405558/2022-8 (Projeto Aero-Termo-Estrutural de um Demonstrador da Combustão Supersônica). Ainda, os autores agradecem à Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP) pela infraestrutura disponibilizada do Laboratório de Jato Propulsão (LJP) e pelo apoio para a realização do desenvolvimento da Plataforma de Controle de Disparo e a validação no VII Festival Brasileiro de Minifoguetes. Finalmente, os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) pela pelo apoio para a realização das discussões e possível aplicação na pesquisa em propulsão hipersônica aspirada.

REFERÊNCIAS

[1] AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA. AEB, 2022. Disponível em:

<https://www.gov.br/aeb/pt-br/>

[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MINIFOGUETES. BAR. Disponível em:

<https://abmf.bar.org.br/documentos/normas-tecnicas>

[3] ISO. Norma ISO 45.001 O que é ISO 45001? Disponível em:

<https://certificacaoiso.com.br/iso-45001/>

[4] MINISTÉRIO DA DEFESA DO BRASIL. Glossário das Forças Armadas - MD35-G-01. pg. 67, 120 e 256. Disponível em:

<https://www.gov.br/defesa/pt-br/arquivos/legislacao/emcfa/publicacoes/doutrina/md35-G-01-glossario-das-forcas-armadas-5-ed-2015-com-alteracoes.pdf>

[5] GUSTAVO CIRELLI, M. V. Plano de Execução do VII Festival Brasileiro de Minifoguetes. BAR. São José dos Campos. 2022.

[6] PALMERIO, A. F. Introdução à Tecnologia de Foguetes. 2. ed. São José dos Campos: SindCT, 2017. pg. 156

[7] MINIFOGUETES E FOGUETEMODELISMO. BAR. Disponível em:

<https://abmf.bar.org.br/minifoguetes>

[8] NORMA BAR-2/2020: NOMENCLATURA BÁSICA DE FOGUETEMODELISMO. Disponível em:

<https://bar.org.br/SistemaBAR/Publicados/Biblioteca-da-BAR/Normas-BAR/Norma%20BAR-2-2020%20-%20Nomenclatura%20B%c3%a1sica%20de%20Foguetemodelismo.pdf> pg.2 e 5

[9] VACONCELOS, Y. Foguetes Suborbitais. FAPESP. [S.l.], p. 6.

[10] GDAE - GRUPO DE DESENVOLVIMENTO AEROESPACIAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Uma visão do foguetemodelismo no Brasil. Disponível em:

<https://brazilianspace.blogspot.com/2020/08/uma-visao-do-foguetemodelismo-no-brasil.html#gsc.tab=0>

[11] MOTTA, A. G. Segurança no Manuseio de Foguete. INPE. São José dos Campos, p. 127. 2004.