

SD-FANET: uma Arquitetura para Redes Aéreas Definidas por Software Aplicadas à Varredura de Área

Diego S. Pereira^{1,2}, Luís B. P. Nascimento², Vitor G. Santos², Daniel H. S. Fernandes², Pablo Alsina³

Abstract—Este trabalho apresenta uma arquitetura baseada em redes definidas por software (*Software-Defined Network - SDN*), intitulada SD-FANET, para gerenciar um sistema de múltiplos VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) utilizado na varredura de área de impacto de foguetes suborbitais. Tal aplicação está contida no projeto SPACEVANT, o qual está em andamento. Para idealização da arquitetura SD-FANET, além dos requisitos da aplicação de varredura de área e do projeto, foram tomadas como referência outras soluções disponíveis na literatura. Nesse sentido é feita uma comparação entre arquiteturas conforme características importantes para esse tipo de aplicação. Como resultado é apresentado o design da arquitetura, o qual é composto por um controlador SDN hierárquico distribuído capaz de implementar funções de gerenciamento de monitoramento, mobilidade, topologia, roteamento, QoS e eleição. As funções de todos os componentes são descritas, assim como todo o fluxo de mensagens.

I. INTRODUÇÃO

Aplicações envolvendo múltiplos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), ou apenas multi-VANT, têm como finalidade a utilização de uma frota de VANTs capazes de atuar de forma cooperativa para alcançar um objetivo comum [1]. Ações de exploração de áreas desconhecidas [2], fornecimento de serviços de cobertura para redes de telefonia [3], busca e resgate em regiões de difícil acesso [4], [5] e coleta de dados [6] são exemplos dessas aplicações.

Tendo em vista a necessidade de troca de informações entre as aeronaves que compõe o sistema multi-VANT, é preciso atribuir a capacidade de criação e organização de uma rede de comunicação ad hoc aérea (*Flying Ad hoc Network - FANET*) [7] a esses dispositivos. Tal característica, eximi a presença de uma infraestrutura de comunicação prévia, garantindo flexibilidade para o funcionamento do sistema multi-VANT, visto o comportamento dinâmico das aeronaves e da intermitência dos enlaces de comunicação sem fio.

Dentre algumas iniciativas brasileiras que envolvem pesquisas com FANET, o projeto SPACEVANT - Sistema Multi-VANT para Varredura e Coleta de Dados em Áreas de Missões Espaciais [8], ainda em andamento, tem apresentado resultados interessantes. O referido projeto tem como objetivo desenvolver um sistema multi-VANT para varredura de área de impacto de foguetes suborbitais lançados a partir do Centro de Lançamento da Barreira do Inferno, localizado em Parnamirim, RN.

¹professor no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN) diego.pereira@ifrn.edu.br

²alunos do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

³professor do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

O procedimento de varredura de área da provável região de impacto do foguete é uma etapa obrigatória da fase de pré-lançamento e, atualmente, é feito por uma aeronave tipo Bandeirante, que inclui mais custos operacionais e tempo para essa atividade.

Para o funcionamento adequado desse sistema, é necessário garantir a comunicação entre as aeronaves, em uma região de alto mar, e a estação base, na costa. Uma estratégia de varredura de área deve ser adotada para assegurar que a provável região de impacto seja verificada em sua totalidade de forma que as aeronaves mantenham conectividade durante todo o processo. O artigo de [9] apresenta duas estratégias e realiza uma comparação entre elas.

Uma arquitetura de rede é apresentada em [8]. As interfaces de comunicação utilizadas são módulos XBEE Pro 900HP S3B. Esses dispositivos fazem uso do padrão IEEE 802.15.4 e do protocolo de comunicação Zigbee. Os resultados mostraram que apesar do baixo *throughput*, essa tecnologia pode ser uma solução factível para FANET, embora ainda exista a necessidade de realizar mais testes para comprovar sua viabilidade no sistema real.

Contudo, esses componentes de hardware possuem requisitos limitantes para o funcionamento do sistema que, caso seja utilizada uma abordagem baseada em software, podem ser superados. Essa abordagem tem como base o conceito de Redes Definidas por Software (*Software-Defined Network - SDN*) [10]. SDN faz o desacoplamento dos planos de controle e de dados, permitindo a um controlador logicamente centralizado programar a rede, tornando os demais dispositivos comutadores que realizam o encaminhamento de dados a partir de uma tabela de fluxos mantida pelo próprio controlador.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é propor uma nova arquitetura baseada em redes definidas por software capaz de garantir a funcionalidade da rede de comunicação do sistema multi-VANT usado no projeto SPACEVANT. Métricas específicas para a aplicação em uso, tais como *throughput*, atraso, *jitter*, taxa de erro e eficiência energética serão utilizadas.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Dentre os trabalhos que envolvem pesquisas relacionadas a implantação de SDN em redes ad hoc aérea, três arquiteturas serão tomadas como referência para o desenvolvimento deste trabalho, são elas: a SD-UAVNET [11], VOEI [12] e SDN-based FASNET [13]. Tal escolha deve-se a proximidade entre os tipos de aplicação atribuída aos

TABLE I
COMPARAÇÃO ENTRE ARQUITETURAS DE REDES AÉREAS DEFINIDAS POR SOFTWARE.

Arquitetura	SD-UAVNet	VOEI	SDN-based FASNET	SD-FANET
Tecnologia	WiFi	WiFi	Não especificado	ZigBee
Camadas	4	4	3	4
Controlador	Centralizado	Centralizado	Distribuído	Distribuído
Roteamento	Sim	Sim	Sim	Sim
Mobilidade	Sim	Sim	Não	Sim
Eleição	Não se aplica	Não se aplica	Não	Sim
QoS	Não	Não	Sim	Sim

VANTs. A arquitetura SD-UAVNET facilita o gerenciamento da rede por meio de um controlador centralizado. É possível avaliar a posição ótima de um VANT *relay* para manter serviços de vigilância operacionais. O controlador considera as informações de contexto oriundas de um VANT global para otimizar os movimentos dos VANTs que compõe o sistema, tais como selecionar rotas para os fluxos dados de forma adequadas, além de evitar que ocorra colisão entre as aeronaves. O objetivo é garantir uma qualidade de vídeo satisfatória para o serviço.

De forma semelhante, a arquitetura VOEI apresenta um esquema cooperativo entre VANTs para aprimorar a transmissão de vídeo e a eficiência energética global do sistema. O objetivo principal é manter o vídeo com suporte QoE (*Quality of Experience*). As decisões são baseadas em um nó controlador centralizado capaz de selecionar rotas confiáveis e de aumentar a eficiência energética, bem como detectar o momento apropriado para a substituição de um VANT, garantindo assim um maior tempo de autonomia do sistema.

Por fim, a arquitetura SDN-based FASNET tem como base a clusterização de controladores, além de realizar um gerenciamento hierárquico. A arquitetura visa garantir requisitos de QoS (*Quality of Service*) específicos sensíveis a atrasos e confiabilidade. Para tal, pesos são atribuídos aos fluxos conforme sua sensibilidade ao atraso e, também, nível de prioridade.

Tendo como referência os requisitos da aplicação executada pelo projeto SPACEVANT, foi idealizada uma tabela de comparação entre as arquiteturas de referência citadas anteriormente e a arquitetura proposta, como disposta na Tabela I.

III. ARQUITETURA SD-FANET

Esta seção apresenta a arquitetura SD-FANET proposta para otimizar o desempenho do sistema multi-VANT na Varredura de Área (SMVA) desenvolvido no âmbito do projeto SPACEVANT.

A. Requisitos

Com base nas informações apresentadas, alguns requisitos devem ser considerados para a idealização da arquitetura SD-FANET:

- 1) Capacidade de flexibilizar a estratégia de roteamento;
- 2) Monitoramento da mobilidade das aeronaves e da topologia da rede;

- 3) Possibilidade de atuar com diferentes níveis de QoS;
- 4) Viabilizar escalabilidade da rede com maior controle;

B. Visão Geral

A utilização de SDN no sistema multi-VANT implica em um conjunto de ações necessárias para torná-la viável. Uma delas é que os enlaces de comunicação criados entre as aeronaves irão transportar mensagens de controle e de dados, ou seja, apesar do desacoplamento dos planos de controle e dados, essas mensagens circularão no mesmo enlace físico, resultando em uma abordagem de controlador *in-band*.

Diante disso, um critério de projeto é minimizar o envio de informações de controle, para, dessa forma, disponibilizar de forma mais eficiente o canal de comunicação para envio de dados. Uma situação prevista é o envio de imagens a qualquer instante de tempo da missão. Isso implica que a solução deve ter a capacidade de priorizar diferentes tipos de tráfego de dados, evitando assim latência excessiva ou uma condição de indisponibilidade do sistema.

Como exemplo da situação descrita anteriormente, a Figura 1 mostra o sistema multi-VANT durante uma missão na qual o VANT₂ detecta uma embarcação em área de acesso restrito. Observa-se que para a imagem ser entregue ao GCC-Controlador em terra, o VANT₂ deverá encaminhá-la através do VANT₁ ou VANT-Controlador. Essa etapa está vinculada a estratégia de roteamento adotada pelo controlador, contudo, independente da rota, é preciso priorizar esse envio durante todo o trajeto para obter o melhor desempenho.

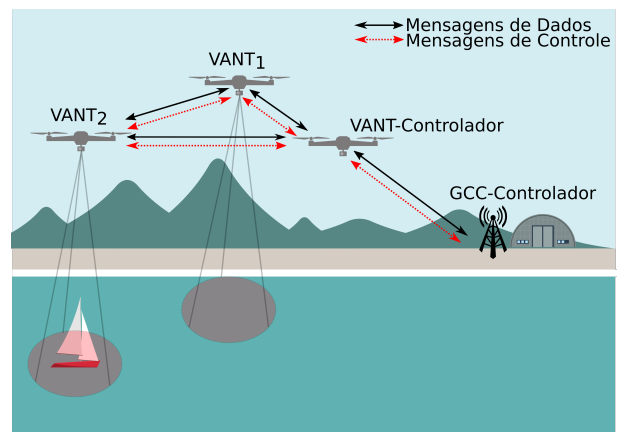


Fig. 1. Aplicação de varredura de área utilizando sistema multi-VANT com SDN.

A Figura 2 ilustra de forma simplificada a arquitetura proposta. Seus componentes são o GCC-Controlador, o VANT-Controlador e os demais VANTs que compõe a frota são chamados VANT-Roteador. A linha tracejada em vermelho representa as interações entre os componentes da rede através de mensagens de controle e a linha contínua preta as mensagens de dados. Uma das principais características da arquitetura é a presença de um nó intermediário (VANT-Controlador) entre o controlador em terra (GCC-Controlador) e os dispositivos do plano de dados (VANT-Roteador). Uma breve descrição desses componentes é feita a seguir.

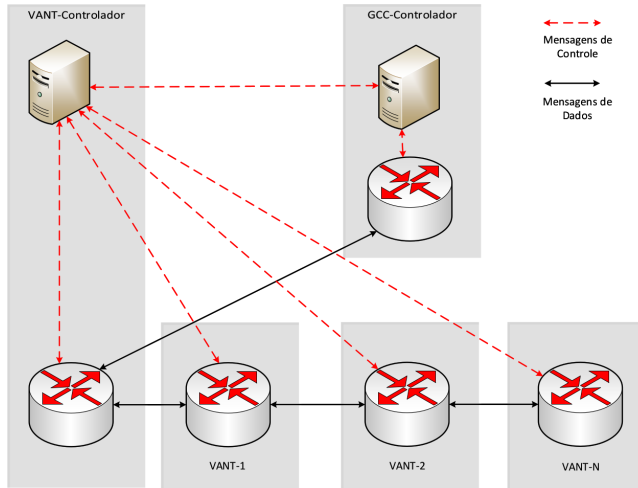


Fig. 2. Arquiteturas para Redes Aéreas Definidas por Software.

O GCC-controlador é o controlador da rede. Esse componente tem a visão global da topologia de rede, além de ser responsável por coordenar as ações de todos os demais controladores. O VANT-Controlador é um controlador local, logo possui uma visão restrita da rede que corresponde ao domínio no qual o VANT está inserido. Por fim, as demais aeronaves, VANTs-Roteadores, não compõe o plano de controle e serão tratadas nesse trabalho como comutadores capazes de interagir com um controlador e, através de consulta da sua tabela de fluxos, encaminhar dados.

C. Design do Controlador

A arquitetura proposta fará uso de um controlador SDN distribuído. Essa escolha deve-se, principalmente, a necessidade de escalabilidade e robustez. Para escalabilidade é preciso que o sistema tenha a capacidade de cobrir áreas maiores, necessitando de um número maior de aeronaves. Consequentemente, com o acréscimo de nós na rede, a demanda de requisições para o controlador também será acrescida, tornando-se um provável restrição. Para robustez, um único controlador SDN caracteriza-se como um ponto de falha que comprometeria o funcionamento do sistema, logo, ao empregar um abordagem distribuída o sistema poderá adotar mecanismos de tratamento de falha que o tornem mais robusto, caso um dos controladores venha a ficar indisponível.

Os próximos itens vão tratar das soluções adotadas para viabilizar a implementação do controlador distribuído. As definições estão relacionadas com a estratégia de comunicação entre os componentes do sistema, o método para troca de informações entre um GCC-Controlador e um VANT-Controlador, e como ocorrerá a criação e atualização das tabelas de fluxos dos VANTs-Roteadores.

1) *Comunicação Controlador-Comutador:* Será adotada uma abordagem mestre/escravo, na qual o VANT-Controlador terá como mestre o GCC-Controlador. Contudo, para melhor adequação a arquitetura proposta, é necessário que o VANT-Controlador também tenha permissão para escrita nas tabelas de fluxo, e não apenas leitura. Tal adaptação deve-se pela necessidade de rápidas tomadas de decisão e pela possibilidade de haver uma maior latência caso o VANT-Controlador precise consultar o GCC-Controlador. Outra consideração que deve ser feita é, em caso de falha no VANT-Controlador, o sistema deve ter a capacidade de atribuir essa função a outro VANT que pertença ao mesmo domínio. Para tal, um algoritmo de eleição deve ser utilizado.

2) *Gerenciamento para Visão da Rede:* Tendo em vista a abordagem distribuída, é preciso considerar que os controladores, VANT-Controlador e GCC-Controlador, precisam ter uma visão consistente da rede e, pelo menos um deles, tenha uma visão do estado global da topologia. Nesse sentido, a melhor arquitetura SDN para o controlador é o modelo hierárquico.

Nessa proposta o GCC-Controlador assumirá a função de controlador-raiz (*root-controller*) e terá que gerenciar os controladores locais, neste caso, um ou mais VANT-Controlador. Diante disso, caso diferentes frotas de VANTs necessitem trocar informações, será necessário consultar a GCC em terra, visto que um VANT-Controlador não terá informações de outros domínios, pois é responsável apenas por armazenar o estado da sua rede local. Considerando os fatores de escalabilidade e robustez do sistema, é possível replicar o GCC-Controlador para outra unidade física em terra, ou até mesmo para uma aeronave, evitando assim a existência de um único ponto de falha.

3) *Coordenação do Plano de Controle:* A abordagem distribuída exige uma estratégia para permitir aos controladores realizarem mudanças na topologia da rede, uma vez que essa estratégia orienta como as atividades do plano de controle serão coordenadas. Diante disso, essa arquitetura fará uso de uma solução baseada em liderança, na qual os controladores locais são liderados pelo controlador raiz. Tal condição garante que não ocorrerá inconsistência nas tabelas de fluxos e que o GCC-Controlador sempre terá uma visão global da rede atualizada. A Figura 3 sumariza as informações sobre o design do controlador proposto e exemplifica uma topologia com o GCC-Controlador coordenando dois domínios.

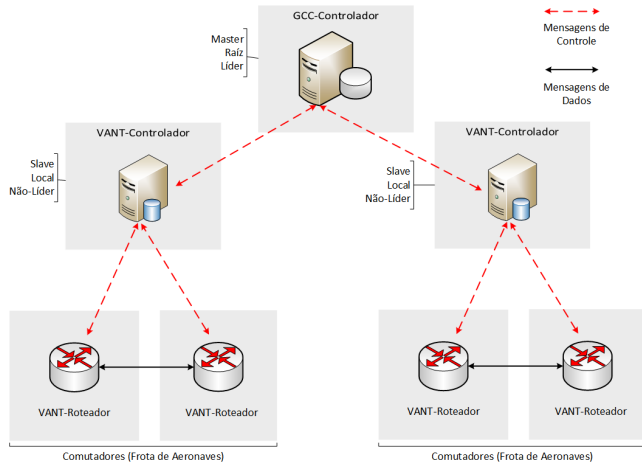


Fig. 3. Design do Controlador.

D. Arquitetura SD-FANET

A arquitetura SD-FANET está organizada em quatro planos: plano de encaminhamento, plano de controle, plano de aplicação e plano de gerenciamento. O plano de encaminhamento tem a função de despachar os fluxos conforme informações das tabelas de fluxo. Por sua vez, o plano de controle atua na manutenção das tabelas de fluxo e na comunicação entre os controladores. O plano de gerenciamento faz a interface da aplicação e seus módulos, com a plataforma SDN e seus controladores. Por fim, o plano de aplicação, desenvolvido especificamente para a aplicação de varredura de área, agrupa aplicações utilizadas pelo sistema de varredura de área. A Figura 4 apresenta as quatro camadas descritas anteriormente, onde GC refere-se ao GCC-Controlador, VC ao VANT-Controlador e VR ao VANT-Roteador.

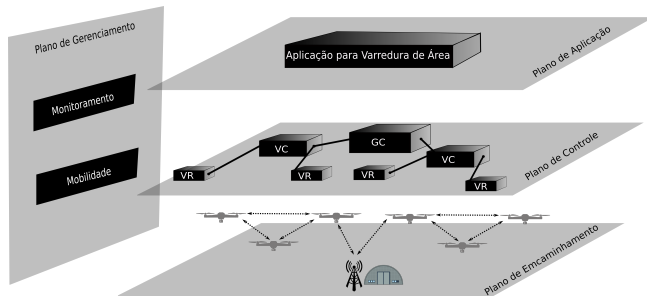


Fig. 4. Ilustração da arquitetura SD-FANET organizada em planos.

A Figura 5 apresenta uma visão detalhada da arquitetura SD-FANET descrita de maneira simplificada no início da seção. Para viabilizar a troca de mensagens de controle entre os VANT-Roteadores e o VANT-Controlador será utilizado o protocolo OpenFlow versão 1.5.1 [14] na interface *Southbound*. A API para programação dos módulos de gerenciamento e dos controladores ainda será definida.

Com o objetivo de contextualizar e exemplificar o funcionamento da arquitetura proposta, considerou-se que

TABLE II
PRINCIPAIS COMPONENTES DA ARQUITETURA DO SISTEMA E SUA FUNÇÃO.

Componente	Função
GCC-Controlador	Manter visão global da rede
	Coordenar VANT-Controlador
	Reposicionar VANT-Controlador
	Eleger VANT-Controlador
	Gerenciar mobilidade
	Criar política de QoS
VANT-Controlador	Manter visão local da rede
	Coordenar VANT-Roteador
	Monitorar VANT-Roteador
	Executar instruções recebidas do GCC-Controlador
	Atualizar tabelas de fluxo
VANT-Roteador	Aplicar política de QoS
	Encaminhar dados conforme tabela de fluxos

uma imagem foi capturada pela Aeronave de Origem e, após ser encaminhada por dois VANT-Roteadores, chega ao GCC em terra para avaliação do operador. A descrição e função dos componentes é feita a seguir.

O GCC-Controlador é responsável pelo gerenciamento do sistema, e, para tal, utiliza o Gerenciador Global e o Controlador Global. O Controlador Global faz a interface entre o GCC-Controlador e os demais VANT-Controladores, sincronizando a troca de dados entre os controladores e mantendo as informações da topologia global da rede atualizadas. Essa comunicação é realizada através de uma interface *East-West*. O Gerenciador Global compõe o plano de gerenciamento do sistema e é composto por módulos que o auxiliarão nas tomadas de decisão com base nas informações fornecidas pelo Controlador Global através da Interface *Northbound*. Entre os módulos estão o gerenciador de mobilidade, um gerenciador de políticas de QoS e um gerenciador de eleições para controladores locais.

O VANT-Controlador acompanha todas as informações dos VANT-Roteadores, como localização, velocidade, trajetória e energia. A coleta dessas informações é realizada de forma periódica através da interface *Southbound*. Além disso, também é responsável por enviar instruções para as aeronaves de forma a garantir conectividade entre elas, bem como manter suas tabelas de fluxo atualizadas. O VANT-Controlador faz a interface entre o GCC-Controlador e os VANT-Roteadores. Quando alguma tomada de decisão é realizada pelo GCC-Controlador, ele notifica o VANT-Controlador que deverá executá-la.

Um VANT-Roteador atua como dispositivo de encaminhamento (comutador). Ele tem a função de encaminhar os dados conforme as entradas da sua tabela de fluxo. Para encaminhamento da imagem, o destino final sempre será o GCC, conforme exemplo já apresentado.

Por fim, a Aeronave de Origem captura a imagem, codifica conforme a aplicação, escolhe a rota de acordo com informações da sua tabela de fluxo e envia para o GCC através do enlace de comunicação. De forma contrária, o GCC em terra (destino final) recebe os dados, decodifica e,

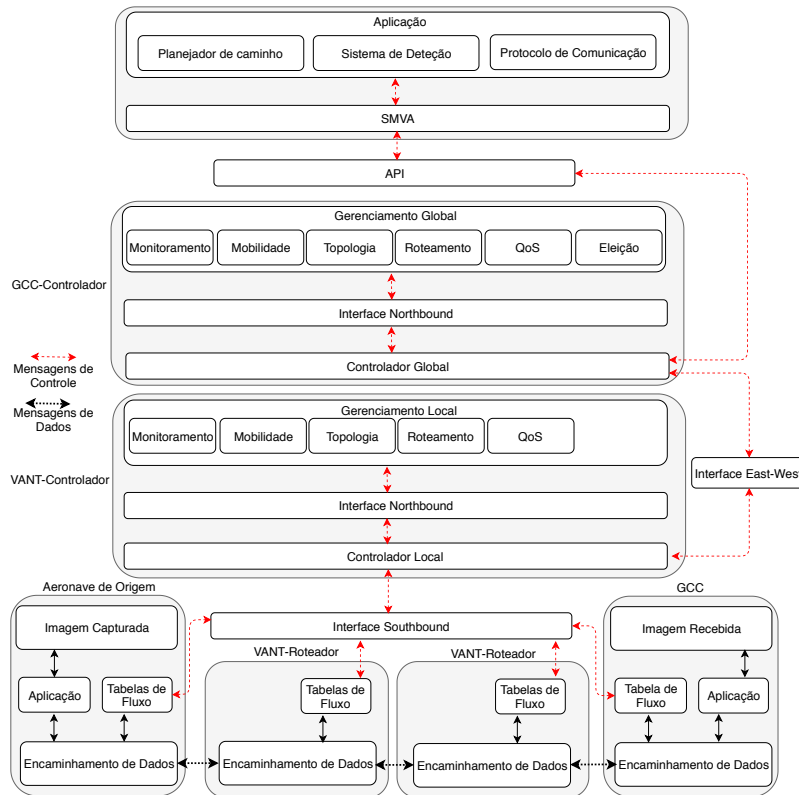


Fig. 5. Arquitetura do Sistema SD-FANET.

sob supervisão de um operador, confirma ou não a presença do objeto detectado. A Tabela II resume os principais componentes do sistema e suas funções. Em seguida, os módulos do plano de gerenciamento serão apresentados.

1) *Gerenciador de Monitoramento*: O Gerenciador de Monitoramento (GMon) é responsável por armazenar as informações que referem-se aos enlaces de comunicação, tais como: perda de pacotes, latência e desconexão. Esses dados são utilizados por outros módulos para tomadas de decisão. Por exemplo, o Gerenciador de Roteamento pode assumir que um enlace é inviável a partir de uma taxa específica de perda de pacotes.

Portanto, este módulo será responsável por armazenar as informações que podem ser utilizadas para extrair estatísticas da rede. Além disso, todos os dados que chegarem ao VANT-Controlador serão computados, independente de serem mensagens de controle ou de dados.

2) *Gerenciador de Mobilidade*: O Gerenciador de Mobilidade (GMob) tem a função de garantir que as aeronaves estejam executando o caminho planejado corretamente. Na etapa de preparação para execução de uma missão, um plano de voo é atribuído a cada aeronave e, para o sucesso da varredura de área, todas as aeronaves devem executá-lo com o menor erro possível. Em situações que uma aeronave não atenda esse requisito, o GMob deve atuar de forma reativa, informando a aeronave como retomar o plano de voo previamente estabelecido.

Conforme arquitetura apresentada nessa proposta, o

Gerenciador de Mobilidade é executado no controlador local (VANT-Controlador) e no controlador global (GCC-Controlador). A execução no controlador local é fundamental para reduzir o tempo de tomada de decisão, visto que o VANT-Controlador poderá enviar as instruções de correção de forma mais rápida. Em alguns casos, a visão local do VANT-Controlador pode não ser suficiente, então o GCC-Controlador deve ser consultado.

O processo de gerenciamento é executado através da coleta periódica de informações enviadas pelas aeronaves ao controlador local, este, por sua vez, realiza uma comparação dos itens enviados, tais como, localização, velocidade e energia remanescente, com os previstos no plano de voo. Só ocorrerá notificação de mudanças caso essa comparação esteja acima da margem de erro permitida. Dessa forma, o VANT-Controlador tem total conhecimento das informações dos VANTs. A periodicidade de envio das informações das aeronaves pode ser reduzida com adoção de um algoritmo de predição, isso acarretaria menor consumo de largura de banda com informações de controle. É importante ressaltar que o VANT-Controlador também necessita notificar o GCC-Controlador sobre a situação da frota de VANTs.

3) *Gerenciador de Topologia*: O Gerenciador de Topologia (GTop) armazenará a topologia da rede ao qual o controlador está associado. Tratando-se do VANT-Controlador, esse gerenciador contém a visão topológica da rede na qual VANT-Controlador tem domínio, enquanto para o GCC-Controlador, o GTop entrega a

visão global da rede.

4) *Gerenciador de Roteamento*: O desempenho do Gerenciador de Roteamento (GRot) está relacionado de forma estreita com o Gerenciador de Mobilidade, pois as tabelas de fluxo são criadas, inicialmente, tomando como verdadeiras as informações presentes no plano de voo. Ou seja, se uma aeronave não seguir a trajetória previamente estabelecida, o encaminhamento de dados será falho e o sistema não terá o desempenho esperado. Essa tabela de fluxo criada antes de iniciar a operação deve-se a redução de latência por busca de rotas sob demanda. Contudo, apenas o parâmetro número de saltos será tomado como métrica.

Opcionalmente, é possível fazer uso de uma abordagem multiobjetivo com método de soma ponderada conforme apresentado em [15]. Nesse caso, os custos associados às rotas levam em consideração diversas métricas, o que implica maior confiabilidade ao processo de roteamento.

5) *Gerenciador de Eleição*: Para uma arquitetura com controlador distribuído hierárquico é imprescindível lidar com o problema de eleição de líder. Para a arquitetura proposta, o VANT-Controlador não compõe a frota de VANTs que irá executar a varredura de área. Dessa forma, é evidente que as aeronaves possuem funções distintas dentro do sistema. Portanto, caso ocorra falha com VANT-Controlador é necessário uma alternativa para não interromper imediatamente a missão. Nesses casos, o Gerenciador de Eleição deve ser acionado.

A estratégia é pautada na substituição do VANT-Controlador por uma aeronave que compõe a frota, nesse caso, o VANT interrompe suas atividades relacionadas a varredura de área e assume a função de VANT-Controlador. Para tal, dois cenários são previstos: existência de comunicação com GCC-Controlador e ausência de comunicação com o GCC-Controlador.

No primeiro caso, a promoção a líder será feita pelo GCC-Controlador que tomará como métrica a distância do candidato para coordenada do VANT-Controlador e qualidade do enlace de comunicação com GCC-Controlador [16]. No segundo caso, onde não há conectividade com o GCC-Controlador, as aeronaves deveram executar o processo de eleição de forma autônoma.

6) *Gerenciador de QoS*: O Gerenciador de QoS tem a função de implantar políticas para obter prioridade de tráfego. O objetivo é reduzir a latência e aumentar a confiabilidade da transmissão da imagem com o objeto detectado, reduzindo assim o tempo de resposta do sistema. A partir das estatísticas extraídas de cada enlace de comunicação da topologia, é possível criar uma rota que permita melhor desempenho. Além disso, todo tráfego com destino ao GCC-Controlador deve ser priorizado, reduzindo assim o tempo de espera nas filas dos VANT-Roteadores.

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma arquitetura baseada em redes definidas por software, intitulada SD-FANET, para gerenciar um sistema de múltiplos VANTs utilizado na varredura de área de uma provável região de impacto de foguetes. Para

idealização da arquitetura SD-FANET, além dos requisitos da aplicação de varredura de área, foram tomadas como referência outras soluções disponíveis na literatura.

O design da arquitetura é composto por um controlador SDN hierárquico distribuído capaz de implementar funções de gerenciamento de monitoramento, mobilidade, topologia, roteamento, QoS e eleição. As próximas etapas dessa pesquisa serão a implementação dos módulos de gerenciamento e realização de teste no emulador Mininet-WiFi.

REFERENCES

- [1] Z. Fu, Y. Mao, D. He, J. Yu, and G. Xie, "Secure multi-uav collaborative task allocation," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 35 579–35 587, 2019.
- [2] Y. Tang, Y. Hu, J. Cui, F. Liao, M. Lao, F. Lin, and R. S. Teo, "Vision-aided multi-uav autonomous flocking in gps-denied environment," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 1, pp. 616–626, 2019.
- [3] C. H. Liu, X. Ma, X. Gao, and J. Tang, "Distributed energy-efficient multi-uav navigation for long-term communication coverage by deep reinforcement learning," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2019.
- [4] K. Miyano, R. Shinkuma, N. B. Mandayam, T. Sato, and E. Oki, "Utility based scheduling for multi-uav search systems in disaster-hit areas," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 26 810–26 820, 2019.
- [5] E. T. Alotaibi, S. S. AlQefari, and A. Koubaa, "Lsar: Multi-uav collaboration for search and rescue missions," *IEEE Access*, 2019.
- [6] H. Binol, E. Bulut, K. Akkaya, and I. Guvenc, "Time optimal multi-uav path planning for gathering its data from roadside units," in *2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. IEEE, 2019, pp. 1–5.
- [7] I. Bekmezci, I. Sen, and E. Erkalkan, "Flying ad hoc networks (fanet) test bed implementation," in *2015 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*. IEEE, 2015, pp. 665–668.
- [8] M. R. Silva, E. S. Souza, P. J. Alsina, H. Francisco, A. A. Medeiros, M. B. Nogueira, G. G. L. de Albuquerque, and J. B. Dantas, "Communication network architecture specification for multi-uav system applied to scanning rocket impact area first results," in *2017 Latin American Robotics Symposium (LARS) and 2017 Brazilian Symposium on Robotics (SBR)*. IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [9] M. R. Silva and F. Monteiro, "Análise comparativa de estratégias de varredura de área para um sistema de comunicação multi vants no monitoramento da área de impacto de foguetes sobre o mar," *IX Escola Potiguar de Computação e suas Aplicações (IX EPOCA 2016)*, vol. 9, pp. 157–166, 2016.
- [10] K.-T. Foerster, S. Schmid, and S. Vissicchio, "Survey of consistent software-defined network updates," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018.
- [11] Z. Zhao, P. Cumino, A. Souza, D. Rosário, T. Braun, E. Cerqueira, and M. Gerla, "Software-defined unmanned aerial vehicles networking for video dissemination services," *Ad Hoc Networks*, vol. 83, pp. 68–77, 2019.
- [12] P. Cumino, W. Lobato Junior, T. Tavares, H. Santos, D. Rosário, E. Cerqueira, L. Villas, and M. Gerla, "Cooperative uav scheme for enhancing video transmission and global network energy efficiency," *Sensors*, vol. 18, no. 12, p. 4155, 2018.
- [13] W. Qi, Q. Song, X. Kong, and L. Guo, "A traffic-differentiated routing algorithm in flying ad hoc sensor networks with sdn cluster controllers," *Journal of the Franklin Institute*, 2017.
- [14] ONF, "Openflow switch specification version 1.5.1 (protocol version 0x06)," *Open Networking Foundation*, 2015.
- [15] V. N. Medeiros, P. C. G. de Brito, B. Silvestre, and V. da CM Borges, "Rall: Routing-aware of path length, link quality and traffic load for wireless sensor networks," in *Proceedings of the Symposium on Applied Computing*. ACM, 2017, pp. 594–601.
- [16] G. Ishigaki, R. Gour, A. Yousefpour, N. Shinomiya, and J. P. Jue, "Cluster leader election problem for distributed controller placement in sdn," in *GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference*. IEEE, 2017, pp. 1–6.