

Desenvolvimento de um Sistema de Comando e Controle de Conceito Expandido com Detecção Sensorial Automática

Marcelo Silva de Souza, Mario Henrique Oliva Pereira Silva
Centro de Apoio a Sistemas Operativos (CASOP), Niterói/RJ – Brasil

Resumo – A evolução rápida e contínua das aplicações digitais, proporcionam soluções diversas relacionadas ao contexto de aplicações militares, cujo propósito fundamental é o incremento da consciência situacional no teatro de operações. Neste sentido, este trabalho se propõe a implementar técnicas de desenvolvimento de software modernos, para expandir o conceito de comando e controle utilizando uma aplicação WEB com uma arquitetura orientada a microsserviços. Para o desenvolvimento do software, buscou-se utilizar a biblioteca *react* para o desenvolvimento do *frontend* e *node JS* para o *backend*, ambas aplicadas em uma infraestrutura de rede distribuída. Além disso, uma ferramenta computacional de identificação e configuração automática de sensores foi implementada, aumentando a capacidade de integração com sistemas legados.

Palavras-Chave – Comando e Controle, microsserviços e aplicação WEB.

I. INTRODUÇÃO

Em um cenário de constante evolução tecnológica e melhoria das ferramentas de combate, a implementação de sistemas modernos, flexíveis e altamente integráveis se torna um objetivo a ser perseguido no desenvolvimento de soluções militares. Em relação ao conceito de comando e controle, define-se o comando como a autoridade que é exercida por uma entidade responsável pela direção, planejamento, controle e coordenação de operações militares e o controle a capacidade de exercer influência sobre as operações militares para que se alcance objetivos específicos [1].

Entretanto, ao expandir este conceito, intensificando e incrementando as possibilidades de setores correlatos, aumenta-se a sua abrangência. Um exemplo é aplicar a um sistema de C2 (comando e controle) ferramentas avançadas de comunicação, cibernética e computacionais. Com a inclusão destas três áreas, este referido sistema C2 é expandindo para o conceito C5. Neste contexto, à medida que novas aplicações são integradas, este conceito tende a aumentar, englobando áreas como Inteligência (I-*Intelligence*), Vigilância (S - *surveillance*), aquisição de alvos (TA - *Target Aquisition*) e reconhecimento (R - *Reconnaissance*) [2], acordo Fig. 1. Assim sendo, o acrônimo C5ISTAR, representa um sistema capaz de atuar em todas as áreas citadas anteriormente.

Contudo, a complexidade deste conceito ampliado, que depende da doutrina militar, requer soluções computacionais modernas, onde se faz necessária a utilização de tecnologias específicas para cada área. No setor de comunicações, por exemplo, a utilização de rádios definidos por software no cenário tático possibilita estabelecer uma estrutura de enlace

de dados com uma largura de banda eficiente e estável. Já no setor computacional, a utilização de serviços de identificação automática de sensores, contribui para uma rápida aquisição de dados, de forma flexível, que auxilia a tomada de decisão em um contexto de atividades operacionais [3].

Além disso, cabe destacar que a utilização de ferramentas computacionais somadas a uma aplicação WEB, utilizando-se, principalmente, de um padrão de projeto orientado a microsserviços, oferece várias vantagens tais como: modularidade aumentada, configuração flexível, manutenção facilitada e maior produtividade [4]. Esta característica permite uma capacidade de expansão do projeto à medida que uma integração sistêmica se torna exequível.

A seguir, a seção II apresenta uma base teórica que delimita o escopo deste trabalho, oferecendo uma análise detalhada dos conceitos relacionados à aplicação Web, com ênfase no padrão de microsserviços. Além disso, são discutidos aspectos importantes sobre a arquitetura de rede e a integração de sensores, fornecendo uma visão abrangente das tecnologias envolvidas. Já a seção III é dedicada à descrição do método aplicado na pesquisa, incluindo os procedimentos e técnicas utilizados. Na sequência, a seção IV demonstra os resultados obtidos na execução dos testes de campo, destacando o desempenho do sistema em operação. Por fim, a seção V oferece uma conclusão sobre os achados e contribuições deste trabalho.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Definição do escopo

De forma a delimitar a utilização de técnicas de desenvolvimento no conceito C5ISTAR, este trabalho se propõe a explorar as soluções nos ambientes de comando e controle, comunicações e computação (C4). Entretanto, as técnicas abordadas podem ser aplicadas nas outras áreas, desde que realizadas algumas modificações. Com isso, foi adotado que o conceito C4 serve como base comum para as demais áreas, uma vez que todas as outras são dependentes de um sistema baseado em comando e controle que necessita de uma estrutura de comunicação e uma capacidade computacional robusta, que garanta o requisito de disponibilidade do sistema.

Em termos de técnicas de desenvolvimento, este trabalho tem como objetivo explorar as vantagens de uma arquitetura em rede reprogramável em conjunto com uma aplicação WEB com um padrão de projeto orientado a microsserviços.

Além disso, foi explorada uma aplicação computacional capaz de integrar sensores de forma automática.

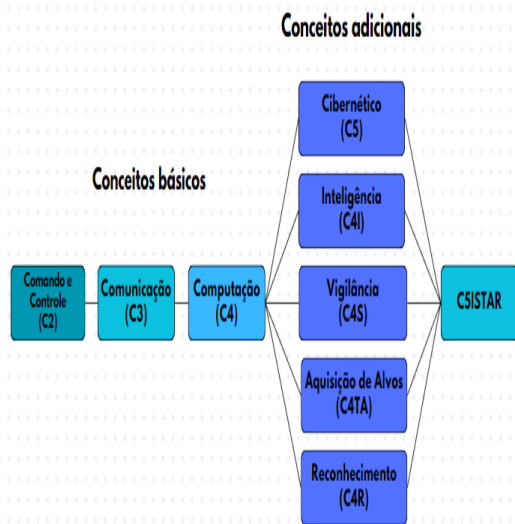


Fig. 1 . Conceito CSISTAR.

B. Aplicação WEB baseada em microsserviços

A arquitetura orientada a microsserviços é um estilo de desenvolvimento de software que organiza uma aplicação como um conjunto de serviços pequenos, independentes e especializados. Cada microsserviço é desenvolvido, implantado e escalado de forma independente, de acordo com a Fig. 2, geralmente utilizando tecnologias e linguagens de programação adequadas para suas necessidades específicas [5].

Esta arquitetura traz como vantagem a facilidade de extensão de serviços, pois, havendo uma interface de comunicação bem definida, novas funcionalidades inseridas não alteram as já existentes. As etapas de testes e implantação do software também são simplificadas, pois são executadas para cada serviço individualmente. Além disso, por ser uma arquitetura centralizada, as atualizações e manutenções são realizadas singularmente em um servidor.

Microsserviços são particularmente úteis em aplicações militares em ambientes táticos restritos, onde energia, velocidade de conexão, capacidade de processamento e espaço são limitados. Por isso, é necessário montar uma infraestrutura simplificada em campo, que executa os microsserviços necessários para operações locais. Essa infraestrutura, operando de forma independente, pode coletar, processar e armazenar dados críticos localmente, garantindo que as unidades militares tenham acesso às informações essenciais, mesmo em condições adversas.

A aplicação de microsserviços ainda pode ser estendido, devido a existência de vários servidores de processamento local que alimentam um servidor principal de comando e controle. Essa aplicação refere-se ao conceito de “raindrop-to-cloud”, onde, mesmo em ambientes difíceis, os dados processados localmente (raindrops) são eventualmente sincronizados com o servidor principal (cloud) quando a conexão for restabelecida [6].

Esse modelo permite que a força militar mantenha a operacionalidade e resiliência, já que os dados não dependem de uma conexão constante com a infraestrutura central. Em essência, os dados são inicialmente tratados e armazenados localmente, proporcionando continuidade operacional, para

posteriormente serem sincronizados, garantindo a integração e atualização das informações em um nível central.

Neste contexto, serviços essenciais que se aplicam ao conceito C4 são os de autenticação, cinemática/navegação e mensageria. A autenticação garante que o acesso aos dados sensíveis e aos sistemas seja restrito apenas a pessoal autorizado, evitando acessos não autorizados e garantindo a segurança das operações. Os serviços de cinemática e navegação são vitais para monitorar a posição e o movimento das forças em campo, permitindo uma tomada de decisão mais assertiva e informada. Ademais, são essenciais para reconstrução, análise e avaliação de exercícios militares. Já os serviços de mensageria asseguram a comunicação eficiente e confiável entre diferentes componentes do sistema, facilitando a troca de informações e a coordenação de ações em tempo real.

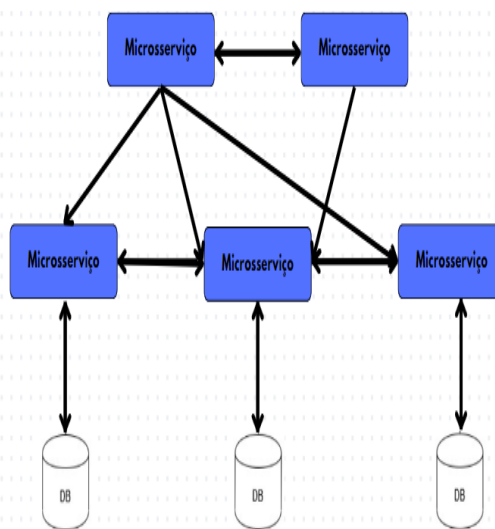


Fig. 2. Arquitetura orientada a microsserviços.

C. Arquitetura de rede reprogramável

A rigidez das arquiteturas de rede tradicionais, com planos de controle e dados fortemente acoplados, prejudica sua capacidade de se adaptar aos requisitos altamente dinâmicos [7]. Dessa forma, uma solução para este aspecto complexo é a utilização de rádios definidos por software para que uma rede flexível seja estabelecida. Dependendo das condições de enlace disponíveis ou até mesmo da largura de banda existente, a rede poderia ser reconfigurada, buscando uma melhor estabilidade e taxa de transmissão. Estas condições fornecem um ambiente propício ao cenário de comunicações em um teatro de operações. A arquitetura de rede pode ser concentrada em um meio que possua melhor capacidade de transmissão ou distribuída, caso os demais meios apresentem confiabilidade de enlace.

A Fig. 3 apresenta quatro meios navais, onde o navio ALFA se comunica com os navios CHARLIE e DELTA através do navio BRAVO, que possui uma melhor estabilidade para enviar dados a longas distâncias. Neste caso, os dados são concentrados no navio BRAVO, entretanto, ao se utilizar uma arquitetura programável, torna-se possível reconfigurar qual o meio naval concentrará o recebimento destes dados.

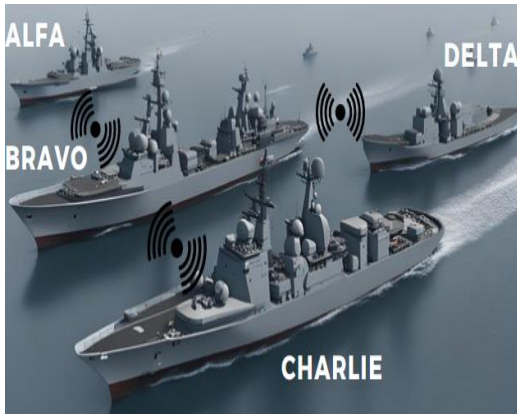


Fig. 3. Ilustração de um enlace flexível com rádios definidos por software [8].

D. Integração de sensores

Um dos maiores desafios em um sistema militar é realizar uma integração de sensores, em especial com sistemas antigos com protocolos já bem difundidos. Um deles é o protocolo NMEA (*National Marine Electronics Association*) que é amplamente utilizado na comunicação de dados entre dispositivos eletrônicos náuticos, como GPS, anemômetros, sonares, radares e outros instrumentos de navegação marítima [9]. Este protocolo permite que diferentes equipamentos troquem informações de maneira eficiente e padronizada, facilitando a integração e a interoperabilidade a bordo de embarcações, desde que sejam previamente configurados. Neste cenário, uma dificuldade significativa ocorre quando não se conhece a configuração deste protocolo e muitas vezes este processo é efetuado através de testes experimentais para averiguar características, tais como taxa de transmissão, paridade e outros parâmetros, até que os dados sejam reconhecidos pelo sistema a ser integrado.

III. METODOLOGIA

A. Características da aplicação

Primeiramente, para se utilizar soluções de softwares modernos, é necessário a avaliação de requisitos de hardware que atendam às especificações mínimas de desempenho [10]. Ao começar pela estrutura de rede, cada nó componente utiliza um rádio definido por software, com capacidade de transmissão de 5 Mbps que satisfaz a necessidade de disponibilizar acesso remoto, bem como compartilhamento de dados táticos. Partindo desta premissa, foi desenvolvido uma aplicação WEB utilizando o Node.JS no *backend* em conjunto com o banco de dados *postgres* e no *frontend*, o *framework React JS*. Como exemplo de fluxo de dados, pode-se citar o processo de autenticação, onde o um usuário acessa através do *login*. O *frontend* envia uma requisição *POST* para o *backend* com os dados de login do usuário. O *backend* recebe a requisição, verifica as credenciais no banco de dados e retorna uma resposta ao *frontend* (por exemplo, um *token* de autenticação, se o login for bem-sucedido). O *frontend* recebe a resposta do *backend* e atualiza a interface do usuário conforme necessário (por exemplo, redirecionando

para a página principal ou mostrando uma mensagem de erro).

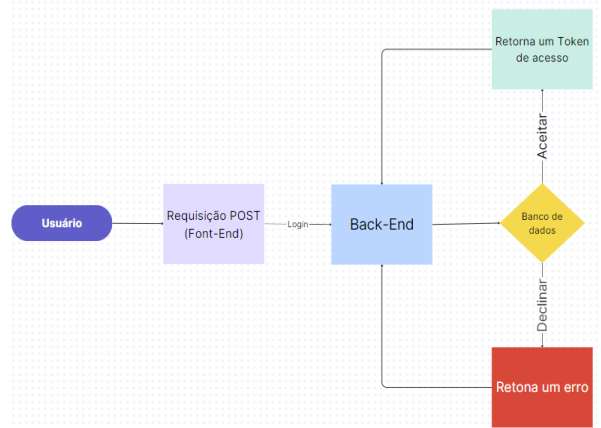


Fig. 4. Diagrama de autenticação.

Esta técnica de desenvolvimento, somada à infraestrutura de rede deve fornecer uma flexibilidade de acesso ao sistema de comando e controle. Um exemplo disso é um acesso de um meio operativo ao serviço presente em outro meio. Para simplificar este processo, utilizou-se a arquitetura orientada a microsserviços como padrão de projeto. Com isso, o meio que possui maior capacidade de transmissão de dados realizará o serviço de distribuição. Já um meio de menor capacidade efetuará serviços de registros históricos de navegação, que são pacotes de dados que não necessitam de processamento em tempo real. Assim, os microsserviços são distribuídos de acordo com a capacidade de cada meio.

Para atingir o conceito C4, a existência de um hardware robusto, com requisitos de alto desempenho se torna necessária. No entanto, a utilização da arquitetura de software implementada, somada à infraestrutura de rede disponível, permite dividir as funcionalidades computacionais entre os membros componentes da rede. Na Fig. 5 é possível observar um exemplo de aplicação com cinco elementos distribuídos em seus respectivos serviços. Fica evidente que, quanto maior o número de elementos na rede, mais distribuídas são as atividades computacionais. Neste sentido, uma força tarefa reduzida, necessita de *hardwares* com uma capacidade computacional de maior desempenho.

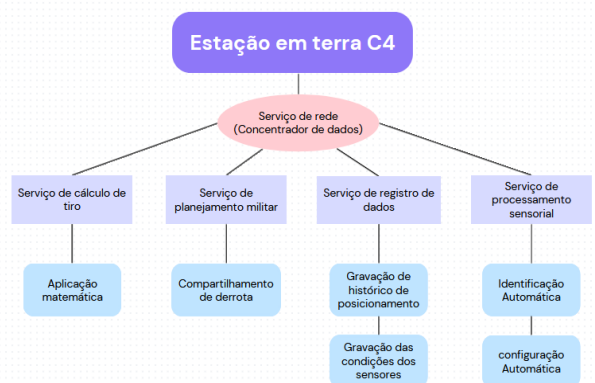


Fig. 5. Estrutura de microsserviços distribuída proposta.

B. Planejamento do cenário experimental

Com o objetivo de avaliar a aplicação e a arquitetura de rede, foi utilizado um meio operativo naval durante um exercício de tiro, a partir de canhões posicionados em terra. A missão do meio naval foi lançar boias em uma área marítima de tiro, realizar a vigilância da área interdita e monitorar as boias para o futuro recolhimento. A função destas boias é detectar a posição que o tiro, advindo do canhão em terra, irá atingir o mar e enviar esta informação ao navio.

Para este evento, o meio operativo deve se comunicar com a estação em terra por meio de um enlace rádio de alta capacidade. Foram pré-configuradas duas redes diferentes. A primeira, com uma conexão direta entre navio e estação de terra e a segunda com um terceiro nó na rede, capaz apenas de oferecer o suporte de comunicações. É ilustrado na

Fig. 66 o planejamento da atividade, onde o ponto 1 representa a posição do meio marítimo, o ponto 2 a estação de comando e controle em terra e o ponto 3 a estação auxiliar de monitoramento do exercício.

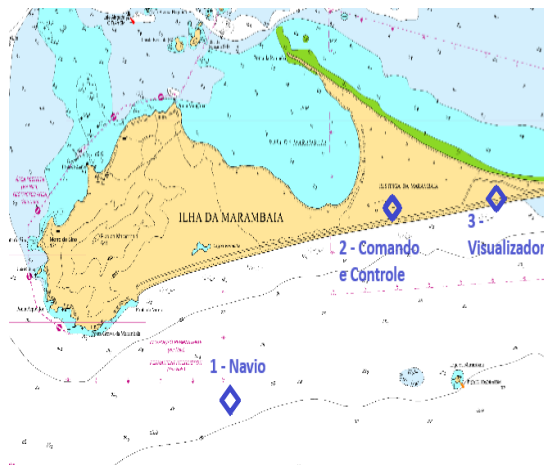


Fig. 6. Localização dos participantes da rede.

Devido à restrição de meios navais durante o teste, os micros serviços foram divididos em duas aplicações, uma em terra e outra no meio operativo naval. Os serviços presentes no navio são o registro de dados que incluem os contatos, bem como os dados de deslocamento do próprio meio, das boias e do impacto do tiro no mar (este ponto chamado de *splash*), além do processamento sensorial. Estes dados são compartilhados com a aplicação em terra, que são executados nas estações de trabalho com requisitos de *hardware* superiores, onde se realiza a coordenação do exercício, efetuando as correções do tiro, controle da área interdita, monitoramento das boias e envio de derrotas. Também nesta aplicação em terra, o serviço de gerenciamento da rede é executado, através do monitoramento do enlace, bem como o envio de mensagens táticas.

Após a etapa de avaliação de desempenho da primeira configuração da rede, o terceiro nó é acrescentado para que se possa avaliar a nova estrutura em termos de largura de banda. Este nó se apresenta apenas como um elemento passivo, capaz de acessar o sistema pelo navegador WEB.

Com o objetivo de implementar a detecção automática dos sensores presentes no meio operativo, a aplicação deve ser capaz de detectar o sinal AIS (*Automatic Identification System*), identificar o seu protocolo e se autoconfigurar, a fim

de se integrar ao sensor. Cabe destacar que o modelo do AIS, em questão, possui uma conexão serial. Logo, a aplicação deve ser capaz de tratar todos os aspectos inerentes ao protocolo de comunicação.

IV. RESULTADOS DE CAMPO

Em termos de estabelecimento de enlace, foi possível utilizar uma rede ponto a ponto entre o navio e a estação em terra. A latência sem a utilização da aplicação foi em média de 250 ms a 450 ms. Após iniciar a aplicação e o compartilhamento dos micros serviços, a rede se manteve estável e o fluxo de dados ocorreu de forma satisfatória. Ao adicionar o terceiro nó na rede foi possível acessar as aplicações de forma remota, onde este nó, elemento passivo, conseguiu visualizar toda a execução do exercício.

A avaliação do acesso remoto na estação em terra de comando e controle, foi positiva, uma vez que foi possível acessar toda a aplicação existente no meio naval e, com isso, a coordenação remota do exercício foi realizada com sucesso.

O processo de compartilhamento de dados entre os micros serviços, se mostrou eficiente através da seguinte dinâmica: O navio realizou a coleta de contatos, posicionamento das boias e *splash*. A estação em terra consumiu este serviço e os dados foram apresentados no *frontend* da aplicação. Assim, o coordenador do exercício efetuou as correções de tiro em tempo real, avaliando a posição do *splash*. Ao término do exercício, o recolhimento das boias foi realizado também sobre coordenação remota. Não se observou perda de dados que comprometesse o exercício. É demonstrado na

Fig.7 o primeiro evento de um disparo de canhão a uma distância de 4,79 MN. É possível observar que o *splash* foi bem distante do alvo. Essa informação foi repassada para linha de tiro com objetivo de efetuar as correções. Esta imagem foi a mesma visualizada pelo terceiro nó, também de forma remota.

Outro aspecto relevante, foi a presença de travamentos na visualização do terceiro nó, quando os serviços ficaram concentrados no *hardware* presente no navio. Após a distribuição dos serviços, a imagem da Fig.7 foi estabilizada.

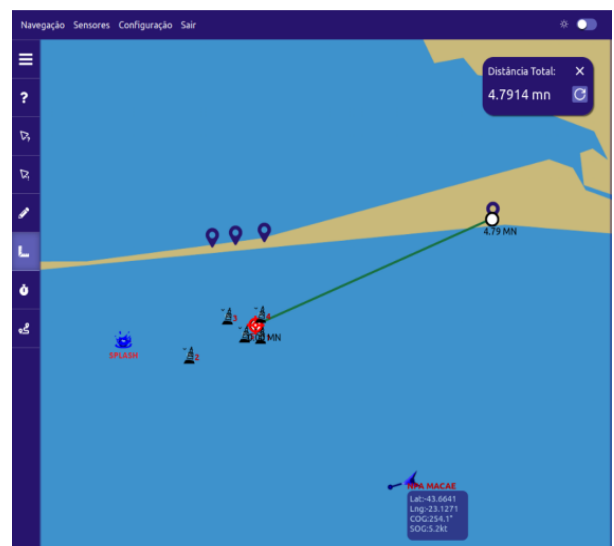


Fig.7. Imagem da aplicação acessada remotamente.

Já em relação à comunicação de dados entre estação de terra e navio, o envio de mensagens foi garantido devido à estabilidade do enlace de rede. A infraestrutura dos rádios somada com a solução de software de “chat” de mensagens táticas (

Fig. 8), também seguindo o modelo de microsserviços, corroboram o conceito C3 da aplicação através de uma implementação moderna. Com este resultado, cabe observar que, além do gerenciamento da rede e solução de infraestrutura, a este conceito também se aplica a solução de mensageria.

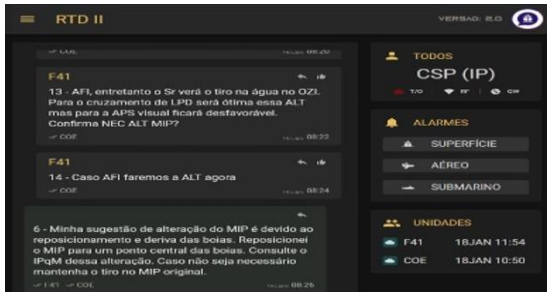


Fig. 8. Chat de mensagens táticas.

Por outro lado, os resultados da detecção automática de sensores, foram promissores já que a integração foi realizada de forma imediata. A aplicação foi capaz de detectar que os dados recebidos se tratavam de um sinal AIS com taxa de transmissão de 38400 bps. Este resultado foi devido ao banco de dados existente, previamente na aplicação com as informações do respectivo sensor. O serviço possui informações diversas sobre os sensores utilizados nos meios navais, de modo que, ao receber um dado, o sistema já classificou o protocolo e identificou os parâmetros de configuração.

A

Fig. 9 apresenta a leitura dos dados brutos, a identificação do sensor de navegação, que se trata do AIS, além da conexão UDP, que são os dados oriundos das boias. A indicação de cor verde representa uma integração automática satisfatória. Já uma vermelha, indica uma falha na integração. Além disso, observou-se uma configuração serial advinda de um radar, que pela indicação da cor amarela, se mostrou uma integração não confiável. Após uma avaliação detalhada, constatou-se que o radar em questão apresentava deficiências em relação à instalação, fato que indicou que esta aplicação também é capaz de informar possíveis falhas nos sensores a serem integrados.

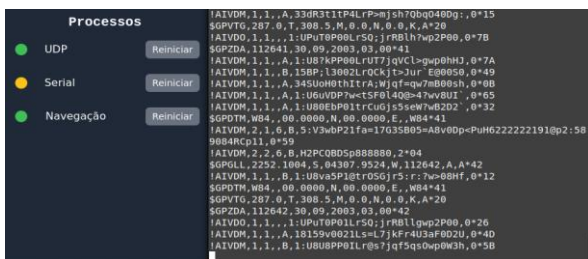


Fig. 9. Detecção e configuração automática dos sensores.

V. CONCLUSÃO

Após os resultados obtidos em campo, foi possível avaliar o desempenho de um sistema de aplicação WEB, voltado aos

conceitos de comando e controle expandido, durante um exercício militar. Os conceitos dependentes, abrangendo do C2 ao C4, foram explorados dentro de uma arquitetura orientada a microsserviços, que se mostraram eficientes dentro do propósito inicial. A estabilidade da rede se mostrou confiável através do acesso remoto, principalmente em relação à coordenação do exercício. Todas as ordens e avaliação dos resultados, como envio de novas derrotas, correção do cálculo de tiro e monitoramento da área, foram executados através da aplicação distribuída em serviços, tanto no meio operativo, quanto na estação de comando e controle.

A comutação de infraestrutura de rede não demonstrou uma mudança significativa ao ponto de priorizar uma configuração mais estável, já que em ambos os casos, os resultados foram semelhantes. Sugere-se um novo experimento com uma rede mais complexa com o objetivo de avaliar esta característica.

A arquitetura orientada a microsserviços apresentou resultados promissores em termos da aplicação prática de capacidades existentes em ambientes distintos, como meios navais e estações de terra.

A integração automática de sensores contribuiu para a flexibilidade e rapidez na área de integração de sistemas, principalmente em relação a sensores de tecnologias obsoletas, onde a configuração, muitas vezes, é de difícil acesso. Além disso, a aplicação foi capaz de identificar possíveis falhas nos sensores, fator não esperado inicialmente.

Assim sendo, o conceito de comando e controle expandido foi estabelecido devido a três fatores específicos: estabilidade da rede e sua largura de banda, capacidade computacional distribuída, devido a arquitetura orientada a microsserviços, e a flexibilidade de integração sensorial do sistema. Com esta base, o conceito C5ISTAR é alcançado, através de uma integração com os sistemas das áreas correlatas.

REFERÊNCIAS

- [1] Brimley, Shawn, et al. "C5ISR for the Future Battlefield: Lessons from History." Center for a New American Security, 2020.
- [2] Department of Defense of United States of America. (March 2022). Summary of the Joint All-Domain Command & Control (JADC2) Strategy.
- [3] Burrows, S. D. (2001). Automated Continuous Process Control. Wiley.
- [4] Auliya, R. S., Lee, Y. L., Chen, C. C., Liang, D., & Wang, W. J. (2024). Analysis and prediction of virtual machine boot time on virtualized computing environments. *Journal of Cloud Computing*, 13(80).
- [5] Maamar, Z., Lutfiyya, H., Sheng, Q. Z., & Srirama, S. N. (2020). Microservices architecture: An overview, challenges and trends. *Journal of Systems and Software*, 170, Article 110707.
- [6] J. van der Geest, C. van den Broek, H.J.M. Bastiaansen, and M.R. Schenk, "Enabling a Big Data and AI Infrastructure with a Data Centric and Microservice Approach: Challenges and Developments," in *Meeting Proceedings of the Specialists Meeting, STO-MP-IST-160-S4-4*, NATO, 2018.
- [7] Torres Vega, M. (2024). A Scalable Hierarchically Distributed Architecture for Next-Generation Applications. *Journal of Network and Systems Management*.
- [8] A. A. K. Khandoker, J. A. F. Gohar, "Software-Defined Radio: Concepts and Applications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1534-1555, 2017. doi: 10.1109/COMST.2017.2667879.
- [9] National Marine Electronics Association. (2020). NMEA 2000 Standard. National Marine Electronics Association.
- [10] Sommerville, I. (2015). *Software Engineering* (10th ed.). Pearson