

# Breve Revisão sobre Missões de Formação em Voo de Veículos Espaciais

Alan Pitthan Couto<sup>1</sup>, Willer Gomes dos Santos<sup>2</sup> e Josué Cardoso dos Santos<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago - Chile

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos/SP - Brasil

**Resumo**—Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica de alguns dos principais temas referentes a Formações em Voo (FV) de veículos espaciais. São apresentados os diferentes tipos de modelos de dinâmica relativa utilizados para a simulação de FV's, em conjunto com as metodologias de coordenação e topologias de formação comumente utilizadas além de diferentes tipos de sistemas de controle. Por fim, foi realizada a identificação de 29 missões FV de pequenos satélites existentes entre o período de 2015 até hoje.

**Palavras-Chave**—Formação em Voo, Pequenos Satélites, Revisão Bibliográfica.

## I. INTRODUÇÃO

Sistemas Espaciais Distribuídos (SED) são definidos conforme as diretrizes do Centro de Voo Espacial Goddard (GSFC) da NASA como um tipo de sistema que inclui múltiplos veículos espaciais, sendo uma infraestrutura cooperativa para medição científica, aquisição de dados, processamento, análises e distribuição de informações [1]. O conceito geral de SED pode ser ainda particionado em categorias distintas de acordo com o grau de coordenação e distribuição física entre os veículos espaciais. Baixos níveis de coordenação englobam as categorias de *swarm* ("enxame") e constelações, onde, na última, os satélites são distribuídos globalmente. De forma dissimilar, um exemplo de sistema com coordenação precisa e local acontece durante procedimentos de *rendezvous* e *docking*. Por fim, formações em voo (*formation flying*), FV, são uma classe de SED apresentado de intermediários a altos níveis de coordenação relativa e com os satélites tipicamente distribuídas regionalmente. As características descritas para cada SED são sumarizadas na Figura 1

Descrevendo FV's de forma mais aprofundada, uma definição proposta pelo GSFC as caracteriza como um tipo de sistema distribuído com o rastreamento e controle da posição e atitude relativas entre os satélites. Outras contribuições de [1] e [2] especificam FV's como um conjunto de veículos espaciais onde há o acoplamento entre os estados dinâmicos relativos por uma lei de controle em comum e onde, pelo menos, um dos satélites rastreia e utiliza os parâmetros de estado relativo com outro membro da formação para o processamento da lei de controle.

A utilização de missões de FV possui diversas vantagens, como: (1) aumento de redundância e confiabilidade na missão, (2) redução de custos de lançamento e manutenção, e (3) promove maior flexibilidade na missão [2]. Neste contexto, os pequenos satélites - dentre as classes de nanosatélites (1 - 10 kg), picosatélites (0.1 - 1 kg) e femtosatélites (< 0.1 kg),

COUTO, A. P., alanpitthan981@gmail.com; SANTOS, W.G., willer@ita.br; CARDOSO DOS SANTOS, J., josuesantosunesp@gmail.com.

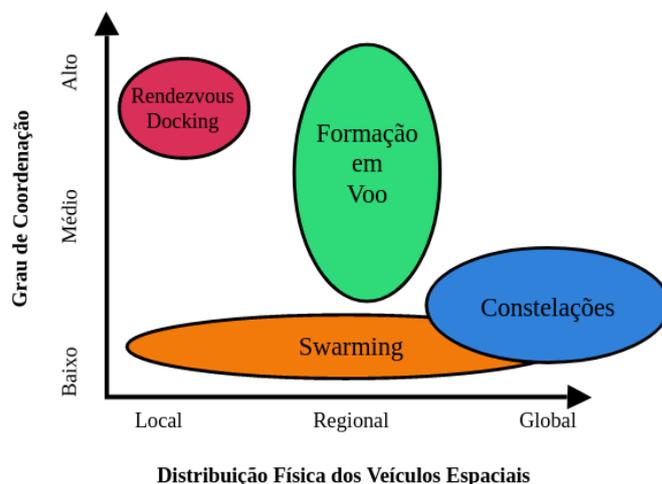


Fig. 1

DIAGRAMA DAS CATEGORIAS DE SED.

representam escolhas viáveis para missões de FV. O estado da arte em componentes eletrônicos miniaturizados permite a utilização de uma vasta gama de sensores, subsistemas, instrumentações e cargas úteis nestas plataformas. Para ilustrar esse fenômeno, [3] apresenta uma revisão de 39 missões SED com pequenos satélites.

Entretanto, apesar das vantagens citadas, há uma troca de compromissos associados ao emprego de FV's. Principalmente, relacionadas a maior complexidade deste tipo de sistema. Alguns desafios inerentes ao projeto e operação de formações em voo podem ser identificados como: implementação de navegação relativa de alta precisão [4]; sistemas de comunicação distribuída [5]; detecção de falhas [6]; design de formação [7]; otimização e controle de trajetória [8]; e sincronização de atitude relativa [9].

Quanto as potenciais aplicações de FV's, estas variam desde missões em órbita planetária quanto ao espaço profundo [10]. Alguns exemplos de aplicações incluem o mapeamento do campo magnético [11], estudos da magnetosfera [12], interferometria, serviços em órbita, astronomia espacial [10], radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar - SAR*) [13], dentre outros.

Por fim, as características citadas para esta classe de SED proporcionam um extenso campo de pesquisa para a exploração de novas aplicações e contribuições para a área. O presente trabalho busca efetuar uma revisão bibliográfica e discussão dos principais tópicos relacionados a FV's. Na

Seção II é feita uma revisão dos métodos de coordenação e topologias de formação mais comuns em missões de FV, além dos modelos matemáticos que descrevem o movimento relativo entre satélites, categorizados de acordo com as hipóteses de formulação. Na Seção III é apresentada a revisão de diferentes métodos de implementação do sistema de controle em missões de FV. Por fim, a Seção IV constitui a contribuição original deste trabalho referente a identificação de missões de FV de pequenos satélites concebidas entre o período de 2015 a 2021, suas características e a discussão das tendências observadas do conjunto de missões.

## II. MOVIMENTO RELATIVO DE VEÍCULOS ESPACIAIS

A caracterização do movimento relativo entre satélites de uma FV parte do método de coordenação e topologias utilizados para a formação, e do modelo dinâmico utilizado para a modelagem do sistema. Para a revisão destes tópicos são também apresentadas a terminologia e abreviações originais conforme descrito na literatura internacional.

### A. Métodos de Coordenação

A técnica de coordenação adotada em missões de FV corresponde ao modo no qual é estruturado o fluxo de informações entre os membros da formação. Em suma, o modo como isso é orquestrado impacta diretamente as características gerais da FV, ao mesmo passo que deve ser acompanhado pelo design de uma arquitetura de controle adequada. Para manter uma topologia de formação desejada com precisão, considerando a dinâmica orbital e de atitude relativas sobre o efeito de perturbações e demais incertezas, o fator chave resume-se em solucionar um problema de controle cooperativo [14].

Os métodos de coordenação listados por [1] são:

- 1) **Rastreo de Órbita:** Do inglês, *Orbit Tracking*. Cada satélite na formação controla o erro de sua própria posição orbital. Vantajoso na questão de reduzir a complexidade do controle da formação ao reduzir a cooperação entre satélites. Porém, espera-se necessitar de mais manobras (e um consumo de combustível maior) para correções individuais.
- 2) **Líder/Seguidor:** Do inglês, *Leader/Follower*. designa-se uma hierarquia entre os satélites da FV, onde o líder efetua suas próprias correções orbitais enquanto os demais satélites *seguidores* corrigem seus estados relativos ao líder. Dessa forma, permitindo aos satélites seguidores acompanhar a dinâmica orbital natural do líder, a qual é corrigida periodicamente, enquanto efetuam um controle automático de seus estados relativos. A desvantagem é haver um desbalanceamento no gasto de combustível consumido individualmente pelos seguidores, em quantidade maior do que aquela consumida pelo líder.
- 3) **Estrutura Virtual:** os satélites da FV são ajustados em relação a um ponto virtual da topologia. Comparativamente a abordagem líder/seguidor, há a minimização do erro de estado da FV o qual é atribuído a todos os integrantes da formação. Ainda, há o melhor balanceamento do gasto de combustível. Entretanto, este método requer um modelo de inter-comunicação coordenado entre os

satélites, onde todos devem obter os estados relativos em relação aos demais.

- 4) **Swarming:** consiste na implementação de leis de controle meta-heurísticas simples para coordenar uma grande quantidade de satélites em FV utilizando apenas informações locais. Em suma, cada satélite recebe informações locais de seus vizinhos mais próximos, a fim de evitar colisões e para manter a coesão do grupo. O fluxo de comunicações limitado proporciona uma boa escalabilidade da arquitetura de coordenação sem aumentar demasiadamente os custos de processamento e a complexidade para um grande número de satélites. Em contrapartida, não há um balanceamento adequado dos custos de combustível e usualmente não apresentam provisões para garantir a eliminação de colisões.

O trabalho de [14] apresenta diferentes arquiteturas de coordenação líder/seguidor, podendo ser adotados de modo centralizado, com um único líder (coordenação líder seguidor simples); ou descentralizado, com hierarquia distribuída (múltiplos líderes e seguidores) ou formação distribuída (sem nenhum líder, mas com retroalimentação dos estados relativos). Uma comparação entre as técnicas de coordenação é apresentada na Tabela I.

TABELA I  
COMPARAÇÃO ENTRE ARQUITETURAS DE COORDENAÇÃO LÍDER/SEGUIDOR [14]

	Prós	Contras
Formação Centralizada	Boa superioridade global	Pouca confiabilidade e escalabilidade
Hierarquia Distribuída	Alta confiabilidade e escalabilidade Baixo tráfego de comunicação	Utiliza informações locais
Formação Distribuída	Boa flexibilidade de formação	Baixa confiabilidade

### B. Topologias de Formação

A topologia remete a distribuição física dos satélites da FV ao redor do ponto de referência local adotado, onde é definido o sistema vertical-local, vertical-horizontal (LVLH). Por exemplo, para uma FV centralizada simples, a origem do sistema é definida sobre o centro de massa do satélite líder e o estudo do movimento relativo é feito a partir desta referência [1]. Típicas topologias de formação empregadas são listadas abaixo [15]:

- 1) **Colar de Pérolas (SOB):** do inglês, *String-of-Beads*. Todos os satélites da formação são inseridos em uma mesma órbita, somente defasados em função do parâmetro de anomalia verdadeira entre cada um. É a topologia mais simplificada e também a que provém o menor custo de manutenção orbital em termos de incremento de velocidade  $\Delta V$ . Em contrapartida, praticamente não possui nenhum tipo de diversidade geométrica.
- 2) **Oscilador Não-Coplanar (NCO):** do inglês, *Non-Coplanar Oscillator*. Obtida a partir de um arranjo coplanar, porém efetuando uma alteração diferencial na inclinação ( $i$ ) ou na longitude do nodo ascendente ( $\Omega$ ) em um dos satélites, de modo que este apresente uma componente relativa *cross-track* (fora do plano) de magnitude periódica. Utilizando modificações em  $\Omega$  é possível definir orbitas  $J_2$ -invariantes [16] onde não há

separação relativa pronunciada devido ao termo  $J_2$  de achatamento terrestre.

- 3) *Órbita Circular Projetada (PCO)*: do inglês, *Projected Circular Orbit*. Os satélites da formação são colocados em órbitas similares, porém com variações diferenciais em seus respectivos conjuntos de elementos orbitais em relação à órbita do líder. O movimento relativo resultante gera uma órbita fechada ao redor da origem e uma projeção circular no plano y-z do sistema LVLH - solução particular das equações de *Hill-Clohessy-Wiltshire* para o movimento relativo comensurável [1]. O design dos ângulos de fase ( $\alpha$ ) entre os satélites e a distância relativa ( $\rho$ ) ao centro da formação permite uma grande diversidade de geometrias possíveis. Por fim, este tipo de topologia vêm sendo estudado na literatura devido a potenciais aplicações em FV's, como sensoriamento remoto [1] e geolocalização [15].
- 4) *Movimento de Circum-navegação Natural (NCM)*: do inglês, *Natural Motion Circumnavigation*. Similar a topologia PCO, entretanto não necessariamente gera a mesma projeção, onde o movimento relativo é descrito ao redor de um líder virtual.

Como visto, a concepção de cada topologia é feita pelo design dos parâmetros orbitais dos satélites. Para o caso das formações PCO, a escolha dos elementos orbitais diferenciais para atender requisitos de  $\alpha$  e  $\rho$  são apresentados nos trabalhos de [17] e [18], em conjunto com estratégias de manobras ótimas para o estabelecimento e reconfiguração de formações PCO. Por sua vez, o tópico da mitigação de perturbações em FV's é amplamente percorrido em [1], como metodologias para a redução dos gastos de combustível na manutenção de formações, utilizando os próprios efeitos ambientais em prol da missão.

### C. Modelos Dinâmicos Orbitais

O primeiro modelo de dinâmica relativa consiste nas equações de *Hill-Clohessy-Wiltshire* (HCW) [19], obtidas em 1878 e largamente empregadas em meados de 1960 para a modelagem de operações de *rendezvous* [1]. Este conjunto de equações, entretanto, é derivado de uma série de hipóteses limitadoras [20], [21]: órbita de referência circular ( $e = 0$ ); baixos ângulos de inclinação; curta separação de *baseline* entre veículos relativamente a distância radial ( $\rho/r \ll 1$ ); desconsidera efeitos não keplerianos, principalmente, a influência de  $J_2$ . Este termo origina-se da expansão em série dos termos zonais do potencial gravitacional terrestre devido a não homogeneidade da distribuição de massa do planeta, onde  $J_2$  possui a maior magnitude em relação aos demais. Deste modo, a ênfase em sua utilização na modelagem da dinâmica orbital. Por fim, os erros a longo prazo advindos da utilização das equações de HCW em formações em voo as inviabilizam para este tipo de aplicação [21] ou outras análises que necessitam de maior fidedignidade. Entretanto, uma série de outros modelos foram desenvolvidos ao longo dos anos para suprir tais limitações.

Os trabalhos de [22] e [23] permitem estender a aplicabilidade dos modelos até  $e \approx 0,7$ . A adição de efeitos não lineares de segunda e terceira ordens em [24], [25] e [26] permitem obter melhores aproximações para grandes separações entre satélites. A inclusão de elementos orbitais

diferenciais em [27] e, alternativamente, a implementação das Equações Variacionais de Gauss (GVE) em [28], [21] e [29] nas equações de dinâmica permitem considerar os efeitos citados, bem como perturbações de  $J_2$ . Já em [30], há a modificação da solução de HCW que inclui os efeitos de  $J_2$ , somente.

Finalmente, todos os trabalhos descritos são devidamente apresentados nas Tabelas II e III conforme a não inclusão e a capacidade de capturar a influência de  $J_2$ , respectivamente.

TABELA II  
CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS DE DINÂMICA RELATIVA PARA FV'S [20]

	$e = 0$ sem $J_2$	$0 < e < 1$ sem $J_2$
Dinâmica Linearizada	Hill [19]	Lawden [22] Inalhan [23]
Longa separação de baseline	Karlgaard [24] Mitchell [25] Alfriend [27]	Battin [28] Alfriend [26]

TABELA III  
CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS DE DINÂMICA RELATIVA PARA FV'S COM INFLUÊNCIA DE  $J_2$  [20]

	$e = 0$ com $J_2$	$0 < e < 1$ com $J_2$
Dinâmica Linearizada	Schweighart [30]	
Longa separação de baseline	Gim [21]	Gim [21] Breger [29]

### III. SISTEMAS DE CONTROLE DE FV'S

As duas principais tarefas do sistema de controle em uma FV são respectivamente: (1) a manutenção estável da formação (*formation keeping*) cumprindo os requisitos de precisão e (2) manobras de formação (*formation maneuver*), para guiar e executar ações de controle de reconfiguração da FV [2].

Devido as tarefas inerentes de uma FV, a presença de um sistema de controle é mandatório, enquanto também implica em maior grau de complexidade em seu design, devido ao processamento e troca de informações entre os satélites da FV, e a proximidade de operação. Ainda, devido a este segundo fator, é esperado a presença de um sistema autônomo de guiamento, que em outras aplicações de sistemas espaciais seria classificado como um controle automático [31]. Deve-se enfatizar que a eficiência do sistema de controle possui um grande impacto no desempenho da missão. Por exemplo, para aplicações como sensoriamento SAR e astronomia espacial, os erros de posição relativa não devem superar a escala de milímetros [14].

Os mais comuns dispositivos de atuação são propulsores químicos, capazes de suprir requisitos de  $\Delta V$  de modo ágil. Entretanto, a vida útil das missões e suas potencialidades acabam sendo limitadas pela quantidade de combustível disponível no sistema. Logo, outros meios de atuação também são empregados visando a economia de combustível. Como exemplo, é possível citar a exploração da força de arrasto diferencial resultante por variações da área de seção transversal dos satélites [32], [33].

Em suma, existem diversas abordagens para implementação do sistema de controle em FV's. Algumas das principais

abordagens são revisadas em [1]. Já o trabalho descrito em [14] realiza uma extensa revisão bibliográfica do estado da arte em sistemas de controle em FV's. A Tabela IV apresenta as principais abordagens de controle comumente empregadas.

TABELA IV  
METODOLOGIAS DE CONTROLE EMPREGADAS EM FV'S

Abordagens de Controle	Refs.
Matriz de Transição de Estados	[34], [28]
Impulsiva/Heurística	[28], [35]
Controle Linear Contínuo	[36], [37], [38]
Controle Não-Linear	[18], [39], [40]
Modelo de Controle Preditivo	[41], [42], [20]

#### IV. REVISÃO DE MISSÕES DE FV DE PEQUENOS SATÉLITES

Nesta seção, são apresentados os resultados de uma revisão de missões de formação em voo envolvendo pequenos satélites, especificamente do período de 2015 até o presente ano (2021), compreendendo tanto missões já lançadas ou em desenvolvimento. Trabalhos similares encontrados na bibliografia incluem: [3], apresentando 39 missões de SED com pequenos satélites existentes em 2015; [43], com uma coletânea de missões de formações em voo existentes até 2017 (porém, sem um foco específico em pequenos satélites).

Por fim, utilizando os dados levantados por [3], [43] e acesso ao banco de dados virtual de missões de Nanosatélites [44], foi realizada a identificação e o catálogo de 29 missões de FV de pequenos satélites, listadas na Tabela VI. Ainda, são apresentados os seguintes dados referentes a cada missão: data de lançamento ou previsão (*To Be Defined* - TBD); massa ou tamanho referentes a unidades modulares da classe de CubeSats; número de satélites ( $N_s$ ) de cada FV; Origem, de acordo com a organização que lidera o desenvolvimento de cada missão- Universidade (U), Instituto (I), Agência Espacial (SA), Instituições sem fins lucrativos (NP), Militar (M), Companhia (C); Escopo, objetivo principal listado para cada missão: Demonstrador Tecnológico (TD), Ciências Espaciais (SC) e Ciências Terrestres (ES).

Pelos dados apresentados na Tabela VI é possível visualizar que majoritariamente as missões de FV são desenvolvidas por universidades - com um total de 17 missões, seguido pelas agências espaciais (4 missões), entidades militares ou órgãos de defesa (3 missões), institutos e organizações sem fins lucrativos (2 missões, cada) e setor comercial aeroespacial (1 missão). Com exceção de uma missão, todas as demais empregam satélites padrão CubeSat. A quantidade de unidades 1U para os nanosatélites destas missões não é constante, entretanto, há uma maior tendência para utilização de configurações 6U e 3U, como é sumarizado no gráfico da Figura 2.

A quantidade de satélites designadas para as FV's, Figura 3, em grande maioria permanecem sob configuração mínima de 2 satélites (como nota, as missões de FV listadas com  $N_s =$

1 correspondem a aplicações onde nanosatélites são empregados para operações de proximidade com veículos maiores). Tais fatores, aliado ao fato de que a maior parte das missões possuem como escopo principal de demonstração tecnológica, indica que as aplicações de FV's atualmente ainda não são totalmente dominadas no setor espacial. Entretanto, os esforços no sentido de desenvolvimento tecnológico e qualificação são evidentes, sendo impulsionados, em sua maioria, pelo meio acadêmico por meio das plataformas CubeSats.

TABELA VI  
MISSÕES DE FV DE PEQUENOS SATÉLITES EXISTENTES ENTRE 2015 E 2021

Missão	Data Lanç.	Dims.	$N_s$	Origem	Escopo
FIREBIRD-2	31/01/2015	1.5U	2	U	SC
KJSY 1	19/09/2015	< 1U	2	U	TD
TW-1A/B	19/09/2015	3U	3	I	TD
AeroCube-7A OCS	08/10/2015	1.5U	2	SA	TD
CANYVAL-X RANGE	01/12/2018 03/12/2018	1U-2U 1.5U	2	U	TD
Seeker 1	17/04/2019	3U	1	SA	TD
AeroCube-10 NetSat	17/04/2019 28/09/2020	1.5U 3U	2 4	NP U	TD TD
V-R3x	24/01/2021	1U	3	U	TD
SAMSON PAN	22/03/2021 03/06/2021	6U 3U	3 2	U U	TD TD
CIRCE	TBD (2021)	6U	2	M	SC
BEESAT-14/15 (NanoFF 1-2)	TBD (2021)	2U	2	U	ES
Starling 1	TBD (2021)	6U	4	SA	TD
CPD A/B	TBD (2021)	3U	2	C	TD
Pony Express 2-3	TBD (2022)	12U	2	M	TD
RACE 1 / 2 BROS	TBD (2022) TBD (2022)	6U 6U	2 2	SA M	TD TD
SERPENT OSC	TBD (2022) TBD (2024)	6U 6U	2 1	U U	TD SC
SULIS	TBD (2025)	12U	6	U	SC
ITASAT-2	TBD (2026)	12U	3	U	TD
MAGNARO TOM	TBD TBD	1U 1U	2 3	U U	TD ES
Buccaneer Flight	TBD	3U	6	U	TD
FALCON	TBD	6U	2	U	TD
IPERDRONE SNIPE	TBD TBD	8U 6U	1 4	NP I	TD SC

Dentre as missões revisadas, destaca-se a existência da missão ITASAT-2 [45], a primeira missão brasileira de formação em voo, que possui, entre seus três principais objetivos de missão: estudos em geolocalização, análise *in-situ* da formação de bolhas de plasma na ionosfera e a demonstração tecnológica de uma FV com três CubeSats 12U. A utilização de uma formação em voo possibilita novas capacidades para a missão, notadamente uma maior resolução temporal dos dados científicos, possibilitando análises mais precisas do processo de formação e desenvolvimento das bolhas de plasma.

Sob parte do território brasileiro há a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) [46] onde as linhas do campo magnético terrestre possuem as menores intensidades do planeta. Devido a esse fenômeno, satélites que passam pela região sofrem uma maior exposição a radiação cósmica, o qual é nociva para o funcionamento dos componentes eletrônicos embarcadas. Ainda, a formação das bolhas de plasma também é intensificada na região, que por sua vez gera a cintilação de sinais enviados do solo ao espaço, prejudicando o estabeleci-

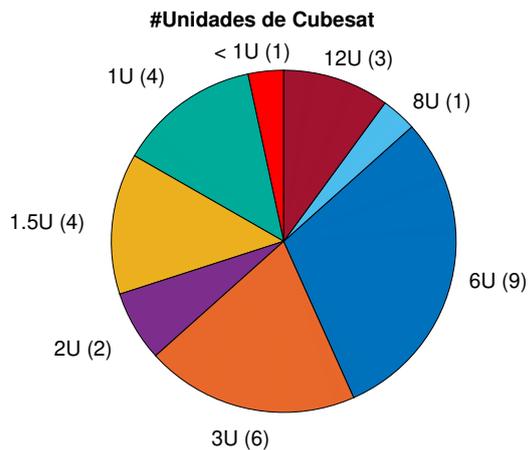


Fig. 2

GRÁFICO DE MISSÕES DE FV EM FUNÇÃO DO DIMENSIONAMENTO DA PLATAFORMA CUBESAT.

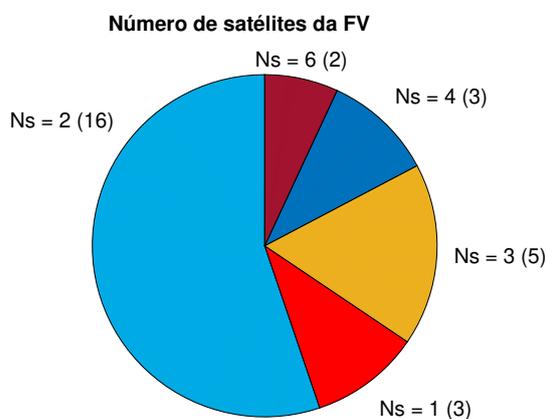


Fig. 3

GRÁFICO DA QUANTIDADE DE MISSÕES DE FV EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE SATÉLITES EM FORMAÇÃO.

mento de telecomunicações.

É imprescindível investigar a natureza da AMAS e seus efeitos no clima espacial, por seus impactos nos setores de Defesa e Civil bem como a degradação no funcionamento de equipamentos em órbita. Para ilustrar sua relevância, outras missões de nanosatélites brasileiros, como o NANOSATC-BR1, NANOSATC-BR2 [47][48] e SPORT [49] também foram desenvolvidos com o enfoque em estudos científicos relacionados ao clima espacial.

## V. CONCLUSÃO

Este trabalho realizou uma revisão dos principais tópicos relacionados a formações de voo e uma atualização da literatura sobre missões de FV de pequenos satélites pelo período dos últimos 6 anos, com a identificação de 29 missões. Destas, 20 não foram mencionadas em trabalhos de revisão anteriores. Missões de FV possuem grande flexibilidade para uma vasta

gama de aplicações. Apesar de haver um período de tempo considerável com estudos sendo desenvolvidos na área - o primeira utilização de uma FV data do ano de 1977 [14], ainda não há um domínio pleno deste tipo de SED, em parte, pelo alto grau de sofisticação necessário para efetuar o controle e a cooperação coordenada entre os satélites. Neste sentido, as características inerentes às plataformas CubeSats vêm sendo exploradas para a concepção de novas missões de FV visando evoluir o domínio tecnológico e expandir os horizontes neste setor.

Por fim, os autores esperam que este trabalho possa contribuir para futuros avanços no setor espacial brasileiro bem como dar continuidade a novos trabalhos relacionados ao tema de FV.

## VI. AGRADECIMENTOS

APC agradece a orientação fornecida ao longo do trabalho e os aprendizados gerados. WGS e JCS agradecem o apoio do ITA e da CAPES por meio da Bolsa Jovem Talento com Experiência Internacional CAPES-Print (contrato nº 88887 583120 / 2020-00). JCS agradece a Deus por todas as oportunidades oferecidas durante o desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- [1] K. Alfriend, S. R. Vadali, P. Gurfil, J. How, and L. Breger, *Spacecraft Formation Flying: Dynamics, control and navigation*, 1st ed., ser. Elsevier Astrodynamics. Butterworth-Heinemann, 2009.
- [2] E. K. P. a. Danwei Wang, Baolin Wu, *Satellite Formation Flying: Relative Dynamics, Formation Design, Fuel Optimal Maneuvers and Formation Maintenance*, 1st ed., ser. Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering 87. Springer Singapore, 2017.
- [3] S. Bandyopadhyay, G. Subramanian, R. Foust, D. Morgan, S.-J. Chung, and F. Hadaegh, "A review of impending small satellite formation flying missions," *53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2015.
- [4] O. Montenbruck, M. Wermuth, and R. Kahle, "Gps based relative navigation for the tandem-x mission - first flight results," *NAVIGATION*, vol. 58, no. 4, pp. 293–304, 2011.
- [5] R. Smith and F. Hadaegh, "Distributed estimation, communication and control for deep space formations," *Iet Control Theory and Applications*, vol. 1, pp. 445–451, 2007.
- [6] D. Lee, K. D. Kumar, and M. Sinha, "Fault detection and recovery of spacecraft formation flying using nonlinear observer and reconfigurable controller," *Acta Astronautica*, vol. 97, pp. 58–72, 2014.
- [7] C. Roscoe, S. Vadali, K. Alfriend, and U. Desai, "Satellite formation design in orbits of high eccentricity with performance constraints specified over a region of interest: Mms phase ii," *Acta Astronautica*, vol. 82, pp. 16–24, 2013.
- [8] B. Wu, G. Xu, and X. Cao, "Relative dynamics and control for satellite formation: Accommodating j2 perturbation," *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 29, no. 4, 2016.
- [9] B. Wu, D. Wang, and E. Poh, "Decentralized sliding-mode control for spacecraft attitude synchronization under actuator failures," *Acta Astronautica*, vol. 105, p. 333–343, 2014.
- [10] E. Dekens, S. Engelen, and R. Noomen, "A satellite swarm for radio astronomy," *Acta Astronautica*, vol. 102, pp. 321–331, 2014.
- [11] B. Tapley, S. Bettadpur, M. Watkins, and C. Reigber, "The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results," *Geophysical Research Letters*, vol. 31, 2004.
- [12] S. Fuselier, W. Lewis, C. Schiff, R. Ergun, J. Burch, S. Petrinc, and K. Trattner, "Magnetospheric multiscale science mission profile and operations," *Space Science Reviews*, vol. 199, 2014.
- [13] S. Buckreuss, U. Steinbrecher, and B. Schättler, "The terrasar-x mission status," in *2015 IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, 2015, pp. 357–361.
- [14] G.-P. Liu and S. Zhang, "A survey on formation control of small satellites," *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, pp. 440–457, 2018.
- [15] D. CaJacob, N. McCarthy, T. O'Shea, and R. McGwier, "Geolocation of rf emitters with a formation-flying cluster of three microsatellites," *30th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, 2016.
- [16] H. Schaub and K. Alfriend, "J2 invariant relative orbits for spacecraft formations," *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, vol. 79, pp. 77–95, 2001.

- [17] S. S. Vaddi, K. T. Alfriend, S. R. Vadali, and P. Sengupta, "Formation establishment and reconfiguration using impulsive control," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 28, no. 2, pp. 262–268, 2005.
- [18] P. Sengupta and S. R. Vadali, "Satellite orbit transfer and formation reconfiguration via an attitude control analogy," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 28, no. 6, pp. 1200–1209, 2005.
- [19] G. W. Hill, "Researches in the lunar theory," *American Journal of Mathematics*, vol. 1, pp. 5–26, 129–147, 24–260, 1878. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/2369430>
- [20] L. Breger, G. Inalhan, M. Tillerson, and J. P. How, "8 - cooperative spacecraft formation flying: Model predictive control with open- and closed-loop robustness," in *Modern Astrodynamics*, ser. Elsevier Astrodynamics Series, P. Gurfil, Ed. Butterworth-Heinemann, 2006, vol. 1, pp. 237–277.
- [21] D.-W. Gim and K. Alfriend, "State transition matrix of relative motion for the perturbed noncircular reference orbit," *Journal of Guidance Control and Dynamics*, vol. 26, pp. 956–971, 2003.
- [22] D. Lawden, *Optimal Trajectories for Space Navigation*, ser. Butterworths mathematical texts. Butterworths, 1963.
- [23] G. Inalhan, M. Tillerson, and J. P. How, "Relative dynamics and control of spacecraft formations in eccentric orbits," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 25, no. 1, pp. 48–59, 2002.
- [24] C. D. Karlgaard, "Second-order relative motion equations," *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, vol. 26, no. 1, 2001.
- [25] J. W. Mitchell and D. Richardson, "A third-order analytical solution for relative motion with a circular reference orbit," *Journal of The Astronautical Sciences*, vol. 51, pp. 1–12, 2002.
- [26] K. T. Alfriend and H. Yan, "Evaluation and comparison of relative motion theories," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 28, no. 2, pp. 254–261, 2005.
- [27] S. S. Vaddi, S. R. Vadali, and K. T. Alfriend, "Formation flying: Accommodating nonlinearity and eccentricity perturbations," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 26, no. 2, pp. 214–223, 2003.
- [28] R. Battin, "An introduction to the mathematics and methods of astrodynamics," 1987.
- [29] L. Breger and J. How, "J2-modified gve-based mpc for formation flying spacecraft," *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 2012.
- [30] S. Schweighart, "Development and analysis of a high fidelity linearized J2 model for satellite formation flying," *AIAA Space 2001 Conference and Exposition*, 2001.
- [31] C. Sabol, R. Burns, and C. A. McLaughlin, "Satellite formation flying design and evolution," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 38, no. 2, pp. 270–278, 2001.
- [32] S. Varma and K. D. Kumar, "Multiple satellite formation flying using differential aerodynamic drag," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 49, no. 2, pp. 325–336, 2012.
- [33] D. Ivanov, M. Kushniruk, and M. Ovchinnikov, "Study of satellite formation flying control using differential lift and drag," *Acta Astronautica*, vol. 152, pp. 88–100, 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S009457651830540X>
- [34] F. Bauer, J. Bristow, D. Folta, K. Hartman, D. Quinn, J. How, F. Bauer, J. Bristow, D. Folta, K. Hartman, D. Quinn, and J. How, *Satellite formation flying using an innovative autonomous control system (AutoCon) environment*, 1997. [Online]. Available: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.1997-3821>
- [35] H. Schaub and K. T. Alfriend, "Impulsive feedback control to establish specific mean orbit elements of spacecraft formations," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 24, no. 4, pp. 739–745, 2001.
- [36] V. Kapila, A. G. Sparks, J. M. Buffington, and Q. Yan, "Spacecraft formation flying: Dynamics and control," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 23, no. 3, pp. 561–564, 2000.
- [37] R. Vassar and R. Sherwood, "Formationkeeping for a pair of satellites in a circular orbit," *Journal of Guidance Control and Dynamics*, vol. 8, pp. 235–242, 1985.
- [38] T. Kormos, P. Palmer, and M. Sweeting, "Series of satellite encounters to solve autonomous formation assembly problem," *Journal of the British Interplanetary Society*, vol. 56, pp. 290–298, 09 2003.
- [39] H. Schaub and J. Junkins, *Analytical Mechanics of Space Systems*, ser. AIAA education series. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003, no. v. 1. [Online]. Available: <https://books.google.com.br/books?id=OPpQAAAAMAAJ>
- [40] P. Gurfil, "Control-theoretic analysis of low-thrust orbital transfer using orbital elements," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 26, no. 6, pp. 979–983, 2003.
- [41] M. Tillerson, G. Inalhan, and J. How, "Co-ordination and control of distributed spacecraft systems using convex optimization techniques," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 12, pp. 207–242, 2002.
- [42] M. Tillerson and J. How, "Advanced guidance algorithms for spacecraft formation-keeping," *Proceedings of the 2002 American Control Conference (IEEE Cat. No.CH37301)*, vol. 4, pp. 2830–2835 vol.4, 2002.
- [43] G. Di Mauro, M. Lawn, and R. Bevilacqua, "Survey on guidance navigation and control requirements for spacecraft formation-flying missions," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 41, no. 3, pp. 581–602, 2018.
- [44] Nanosats Database. (2021). [Online]. Available: <https://www.nanosats.eu/>
- [45] W. G. Santos, L. E. V. L. Costa, L. H. S. Sato, C. S. Cerqueira, and P. K. Albuquerque, "Itasat2: The first nanosatellite formation flying brazilian mission," *10th International Workshop on Satellite Constellations Formation Flying, IAF*, 2019.
- [46] J. Heitzler, "The future of the south atlantic anomaly and implications for radiation damage in space," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 64, no. 16, pp. 1701–1708, 2002, space Weather Effects on Technological Systems. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682602001207>
- [47] N. Schuch, R. Marques, O. Durão, M. Rockenbach, O. Mendes, M. Mattiello-Francisco, A. Legg, A. da Silva, F. Pedroso, and E. Burger, "The present future of the brazilian inpe-ufsm nanosat-br, cubesats development program," *Annales Geophysicae Discussions*, pp. 1–16, 05 2019.
- [48] J. V. Bageston, N. J. Schuch, O. Durão, P. Muralikrishana, J. Mendes, O., M. Rockenbach, S. Savio, S. Domingos, F. Mattiello-Francisco, J. B. Martins, A. P. Legg, A. L. da Silva, E. E. Bürger, R. P. Marques, and J. Moro, "The NANOSATC-BR1 and NANOSATC-BR2: scientific payloads and data," in *AGU Fall Meeting Abstracts*, vol. 2019, Dec. 2019, pp. SA44A–16.
- [49] J. Spann, C. Swenson, O. Durão, L. Loures, R. Heelis, R. Bishop, G. Le, M. Abdu, L. Krause, C. Denardini, and E. Fonseca, "The scintillation prediction observations research task (sport) mission," *European Geosciences Union General Assembly*, vol. 18, 2016.