

F-35 como Função Produção O-Ring versus Guerra em Mosaico

Matemáticas Simples

JÖRG SCHIMMELPFENNIG, PhD

Introdução

Em 28 de janeiro de 1986, o ônibus espacial Challenger se partiu a 7 segundos após seu lançamento, ceifando a vida de todos os sete astronautas a bordo. A Comissão Presidencial sobre o acidente do Challenger, conhecida como Relatório da Comissão Rogers, identificou a falha dos anéis de vedação de borracha nas juntas de um dos propulsores como a causa do acidente: “A falha específica foi a destruição da vedação que destina-se a evitar que gases quentes vazem através da junta durante a queima do propelente do motor do foguete.”¹ O tanque externo foi destruído, levando ao colapso do orbitador.

Tragicamente, a possibilidade de uma falha do anel de vedação já era conhecida há algum tempo, mas não foi devidamente comunicada. Embora a causa original do desastre tenha sido um projeto defeituoso, a causa imediata - anéis de vedação (*O-ring*) defeituosos que custam apenas alguns dólares - emprestou seu nome à ideia de Michael Kremer de uma função produção *O-ring*.² Em contraste com a visão clássica do *output* como uma função determinística de alguns *inputs*, a produção é vista como constituída de uma ampla gama de subsistemas independentes, todos sujeitos a falhas; o sucesso ocorre apenas se nenhum dos subsistemas falhar.

O primeiro exemplo de uma aplicação possível na área da Defesa foi a sugestão de interpretar as operações da cabine de comando de um porta-aviões como uma função produção *O-Ring*.³ Ou seja, a menos que tudo se encaixe, pode ocorrer uma falha catastrófica como o acidente do *USS Forrestal* em 29 de julho de 1967 infelizmente demonstrou. Um exemplo de sequência semelhante a um *O-Ring*, embora com outro nome, é fornecido no livro *Naval Operations Analysis*. Nele o autor afirma que para um submarino ter sucesso em destruir um submarino inimigo, ele teria primeiro que detectá-lo, então identificá-lo como o alvo correto, elaborar um plano de tiro, lançar o (s) torpedo (s), assegurar que pelo menos um torpedo faça contato com o alvo, não se deixar enganar por nenhuma armadilha, e seu detonador deve em algum momento disparar a ogiva.⁴ Esta sequência ilustra como todos os outros tipos de cadeia de destruição do alvo também podem ser

interpretados como uma função produção *O-ring*, desde a ideia geral de um ciclo OODA (**observar-orientar-decidir-agir**) até o uso de um ataque de drone para matar um terrorista individual.⁵ Também vale para cada sistema de arma individual, seja um avião de perseguição da Segunda Guerra Mundial, como o P-40 Warhawk; um tanque de guerra M1 Abrams; ou por último, mas não menos importante, o F-35 Lightning II.

F-35: O Estado da Arte da Função Produção *O-ring*

Considerado o caça mais avançado que existe, o F-35 não apenas exibe extrema capacidade de manobra e letalidade, mas é uma plataforma que incorpora todos os subsistemas necessários para conduzir um ataque contra alvos inimigos de superfície e aéreos. Ainda assim, é uma função produção *O-ring*. Seguindo o paradigma OODA, um piloto incapaz de observar ou orientar seria incapaz de decidir, muito menos agir. Portanto, se qualquer um dos subsistemas de um F-35 for incapacitado - seja cineticamente, por meio de um ataque cibernético ou apenas por interferência - toda a plataforma se torna basicamente inútil. A matemática por trás da função produção *O-ring* elucida o dilema.

O cenário assume que há quatro tarefas ou subsistemas necessários para completar com sucesso uma missão - como “observar”, “orientar”, “decidir” e “agir”. As probabilidades dessas tarefas serem cumpridas com sucesso são denotadas por p_1 , p_2 , p_3 e p_4 , respectivamente. A probabilidade de sucesso da missão, assumindo independência estocástica, é dada por $p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4$ e a probabilidade de falha da missão por $1 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4$. Para dar um exemplo numérico, mesmo se cada subsistema tiver 90 por cento de chance de fazer exatamente o que deve fazer, a probabilidade de sucesso da missão é $(0.9)^4 = 0.6561$; isto é, a missão falhará em mais de um a cada três casos. Se a taxa de sucesso do subsistema for aumentada para 95%, a probabilidade de falha cairia para $1 - (0.95)^4 = 0.1855$, mas a missão iria ainda falhar em quase um a cada cinco casos. No entanto, estaríamos enganados ao supor que aumentar a confiabilidade de um subsistema é uma maneira fácil de aliviar o problema. *Prima facie*, (à primeira vista) aumentando a confiabilidade de todos os subsistemas em 5% para aumentar a total probabilidade de sucesso em cerca de 24% - de 0,6561 a 0,8145 - parece uma boa ideia. O custo de aumentar a confiabilidade de qualquer subsistema é exponencial. Custaria menos aumentar sua probabilidade de sucesso de, digamos, 70% para 80% do que aumentá-la de 80% para 90%. E o custo adicional se torna cada vez mais proibitivo quanto mais perto se chega de 100%. Em termos da teoria da função produção *O-Ring* e denotando as funções de custo por, $C_i(p_i)$, isso é lido como $C_i' > 0$ e $C_i'' > 0$. Para ilustrar o efeito usando a forma funcional mais simples para uma função de custo compatível com $C_i(p_i) = 1 / (1 - p_i)$, se a confiabilidade de um subsistema fosse

aumentada de 70% para 80%, o custo aumentaria 50%. Aumentar a confiabilidade de 70% para 90% triplicaria o custo. Finalmente, deve ser supérfluo apontar que uma probabilidade de sucesso igual a um é impossível de se alcançar. Assim como o homem não é perfeito, não existem tecnologias disponíveis que nunca falhem.

Da superioridade dos EUA (não apenas aérea) ao antiacesso/negação de área

Ao longo da história e até a Segunda Guerra Mundial, as guerras sempre foram um jogo de números. No início da Guerra do Pacífico, o Zero era o avião de combate mais avançado. O Japão não tinha o suficiente deles, no entanto. Em contraste com seus colegas americanos, os pilotos japoneses tinham experiência em combate, mas, novamente, eram poucos. O *German Tiger* foi considerado o melhor tanque de sua época, muito superior ao americano *Sherman*. Felizmente para os Aliados, porém, havia muito mais *Shermans* do que *Tigres*.

Tudo isso está de acordo com os modelos de guerra (tática). Bradley Fiske em 1905 e Frederick Lanchester em 1916 sugeriram que, no combate naval e no combate aéreo respectivamente, dobrar a quantidade de uma força deveria ser mais importante do que dobrar sua qualidade.⁶

No entanto, desde o final da Segunda Guerra Mundial e durante as décadas da Guerra Fria, o quadro mudou à medida que os EUA colocavam uma distância cada vez maior nos avanços da tecnologia de armas em relação a seus rivais Rússia e China. O motivo simples era a economia. Assim como uma economia controlada pelo governo não poderia competir com uma economia de mercado livre, tão pouco poderia sua base industrial de defesa fazer o mesmo. A superioridade numérica russa não ajudou. A maior taxa de abate dos sistemas de armas dos EUA teria bastado para deter as forças russas. Os submarinos russos podiam ser rastreados onde quer que fossem, mas não vice-versa, e os comandantes russos sabiam disso. O bombardeio de precisão durante a Guerra do Vietnã viu o advento da capacidade “uma bomba, um alvo”. A superioridade aérea dos Estados Unidos atingiu seu apogeu durante a Operação Tempestade no Deserto. Os caças-bombardeiros *stealth* americanos podiam entrar no espaço aéreo iraquiano à vontade e, como observou o General David Deptula em 2001, “A Guerra do Golfo começou com mais alvos no plano de ataque de um dia do que o número total de alvos atingidos por toda a 8ª Força Aérea nos anos de 1942 e 1943 - mais ataques aéreos a alvos separados em 24 horas do que nunca na história da guerra.”⁷

A imagem mudou com o 11 de setembro e as guerras que se seguiram no Afeganistão e no Iraque por três razões. Em primeiro lugar, as plataformas de combate aéreo de ponta não eram mais consideradas necessárias para as operações

de contrainsurgência. Em segundo lugar, o custo de lutar em duas guerras ao mesmo tempo fez recuar outras despesas, levando a uma redução no número de F-22 e F-35. Terceiro, supôs-se implicitamente que o espaço aéreo continuaria incontestado. No entanto, tendo tido amplas oportunidades de estudar o modo de guerra americano ao longo das décadas em que as forças dos EUA reinaram supremas, a Rússia e a China - cientes de que permaneceriam incapazes de igualar os desenvolvimentos tecnológicos e os gastos militares dos EUA - escolheram um caminho totalmente diferente. Em vez de tentar recuperar o atraso, eles mudaram o jogo embarcando em respostas e estratégias doutrinárias que tornariam a superioridade das forças dos EUA inútil. Os dois países simplesmente impediriam o acesso a áreas em disputa, como o Mar Báltico ou o Mar da China Meridional, respectivamente, e/ou negaram a capacidade de ação dos EUA nessas áreas (ie., *Anti Access/Area Denial A2/AD*). Em particular, por negação de área, as operações dos EUA na área respectiva seriam impedidas ou desaceleradas na melhor das hipóteses, bloqueando efetivamente as forças americanas de perseguir o princípio fundamental da guerra tática que é, como sua Marinha coloca, “Atire efetivamente primeiro!”⁸ Qualquer tentativa de entrar no campo de batalha contestado seria recebida por uma resistência feroz e relativamente de baixo custo. O preço de um míssil antinavio chinês DF-26 “matador de porta-aviões” é uma fração de qualquer um de seus alvos pretendidos, o que tornaria as perdas americanas insustentáveis.

As perspectivas são sombrias. Jogos de guerra continuam provando que as forças chinesas, embarcando no que Jeffrey Engstrom chama de estratégia de “confronto de sistema” e conduzindo “guerra de destruição de sistema”, venceriam até mesmo os sistemas de armas mais avançados como o F-35.⁹ Os elementos básicos da “destruição do sistema” são atacar as articulações, ou nós, interrompendo o fluxo do adversário; redes de alvos e links de dados (isolando assim suas forças); mirar nos ativos de alto valor de um adversário desativando seus elementos essenciais (como *Command and Control*, *Intelligence*, *Surveillance and Reconnaissance* - C2, ISR e outros subsistemas essenciais); desabilitar a infraestrutura operacional de um adversário; e desacelerar as cadeias de destruição (*kill chains*) de um adversário. Citando o relatório final da Comissão Nacional de Estratégia de Defesa:

Se os Estados Unidos tivessem que lutar contra a Rússia em uma contingência do Báltico ou contra a China em uma guerra por Taiwan... , Os americanos poderiam enfrentar uma derrota militar decisiva. Essas duas nações possuem capacidades de ataque de precisão, defesas aéreas integradas, mísseis de cruzeiro e balísticos, ciber-guerra avançada e capacidades antissatélite, forças aéreas e navais significativas e armas nucleares - um conjunto de capacidades avançadas até então possuídas apenas pelos Estados Unidos. Os militares dos EUA enfrentariam desafios assustadores para estabelecer a superioridade aérea ou controle do mar e retomar o

território perdido no início de um conflito. Contra um inimigo equipado com capacidades avançadas de antiacesso / negação de área, o desgaste de bens de capital dos EUA - navios, aviões, tanques - pode ser enorme. O prolongado e deliberado acúmulo de força avassaladora no teatro, que tradicionalmente tem sido a marca registrada da guerra expedicionária americana, seria muito mais difícil e custoso se fosse possível. Falando francamente, os militares dos EUA podem perder a próxima guerra estado contra estado que se travar.¹⁰

Cortar o número de plataformas dos EUA - sejam elas B2, F-22 ou F-35 - certamente não ajudou; nem o fato de serem funções produção *O-ring*.

Guerra em Mosaico

“Guerra em Mosaico” é uma ideia da *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA).¹¹ Com as publicações do estudo de pesquisa do Mitchell Institute de autoria do General David Deptula e Heather Penney¹² e uma versão abreviada na *Revista da Força Aérea*,¹³ a ideia entrou nas principais discussões militares.

A ideia básica da guerra em mosaico é incrivelmente direta e intuitivamente impressionante. Se seu adversário for atrás de seus sistemas - “guerra de destruição de sistema” - simplesmente desagregue seus sistemas! Em vez de colocar todos os ovos (subsistemas ou nós) na mesma cesta, ou seja, a bordo de uma única plataforma como o F-35 (função de produção de *O-ring*), use pequenas plataformas hospedando nós desagregados. Se, por exemplo, sua força original consistir em quatro F-35, opte por quatro pequenas plataformas hospedando apenas um nó em cada cadeia de destruição. Se o caso for observação, opte por quatro pequenas plataformas que hospedam apenas um nó da cadeia de destruição. E assim por diante. E certifique-se de que cada pequena plataforma pode se comunicar de forma independente com todas as outras plataformas. Se apenas uma pequena plataforma fosse desativada não haveria nenhum dano, pois as três plataformas restantes hospedando o mesmo subsistema ou nó assumiriam o controle. Em contraste, desabilitar um subsistema ou nó do F-35 tornaria a aeronave ineficaz. Se cada F-35 levasse apenas um golpe, não haveria mais nenhuma cadeia de destruição. Por outro lado, tornar inoperável uma rede de cadeia de destruição desagregada exigiria a desativação não apenas de quatro plataformas pequenas, mas de quatro plataformas idênticas (ou seja, todas aquelas que hospedam o mesmo nó). Embora o efeito desta estratégia seja óbvio, a probabilidade de sucesso da missão deve aumentar com a guerra em mosaico mas não sua magnitude.

Alguma Matemática da Guerra em Mosaico

Para ilustrar a extensão dos benefícios esperados ao mudar para a guerra em mosaico, considere uma cadeia de destruição do F-35 consistindo de k nós (usando

a imagem de ciclo OODA, k seria igual a quatro) e tendo uma formação de n navios. Suponha que para a missão ser bem-sucedida, seria suficiente se apenas um navio passasse e fizesse a destruição. Então, usando a mesma notação da seção do F-35, a probabilidade de um F-35 individual passar seria $p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_k$ e a probabilidade de falhar ou ter que abortar, correspondentemente, $1 - p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_k$. Com a independência estocástica, o cenário mais provável, a probabilidade de todos os n navios falharem seria $(1 - p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_k)^n$. Portanto, a probabilidade de completar com sucesso uma missão ao usar n F-35 (ou seja, ter pelo menos um navio sobrevivendo para entregar o abate) é

$$(1) \text{ probabilidade (sucesso|F-35s)} = 1 - (1 - p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_k)^n.$$

Alternativamente, suponha que em vez de ter todos os k nós hospedados por uma plataforma (F-35), k pequenas subplataformas são usadas para cada F-35, cada uma das quais sendo responsável por apenas um dos k nós. Então, qualquer um dos k nós ficaria comprometido apenas se todas as suas respectivas n subplataformas fossem destruídas ou tornadas ineficazes por outros meios. Para isolar o efeito da guerra em mosaico, todos p_1 até p_k são considerados inalterados (provavelmente pelo menos algumas dessas probabilidades aumentariam, já que as subplataformas deveriam ser mais difíceis de serem detectadas por serem menores, algumas subplataformas também poderiam estar não tripuladas, aumentando sua manobrabilidade). Então, como a probabilidade do nó i falhar é igual a $(1 - p_i)^n$, a probabilidade do nó i sobreviver é $1 - (1 - p_i)^n$, e a probabilidade de todos os nós sobreviverem e do sucesso na missão, portanto, é

$$(2) \text{ probabilidade (sucesso|guerra em mosaico)} = (1 - (1 - p_1)^n) \cdot (1 - (1 - p_2)^n) \cdot \dots \cdot (1 - (1 - p_k)^n).$$

A diferença entre (2) e (1) aumenta as chances de sucesso da missão devido à mudança para a guerra em mosaico.

Para ver a magnitude da influência da Guerra em Mosaico, suponha que todos p_i sejam idênticos, doravante denotado por $p := p_1 = p_2 = \dots = p_k$.¹⁴ Então (1) e (2), respectivamente, podem ser simplificados para

$$(1a) \text{ probabilidade (sucesso|F-35s)} = 1 - (1 - p^k)^n \text{ e (2) torna-se}$$

$$(2a) \text{ probabilidade (sucesso|guerra em mosaico)} = (1 - (1 - p)^n)^k.$$

Esta fórmula permite avaliar o resultado de diferentes cenários por meio de uma simples calculadora de bolso.

É óbvio que para qualquer missão de um navio não pode haver um efeito de guerra em mosaico. Portanto, assumo $n = 2$ (ou seja, uma missão de dois navios) e $k = 4$ (OODA). Com $p = 0,9$, (1a) dá 0,88173279, enquanto (2a) dá 0,96059601 (ou seja, mudar para a guerra em mosaico melhoraria as chances de sucesso da missão em cerca de 7,9%). No entanto, como uma probabilidade de sucesso da missão F-35 de cerca de 88% ainda soa muito boa e não está exatamente de acordo

com “os militares dos EUA podem perder a próxima guerra estado-contra-estado que lutam”,¹⁵ se usarmos $p = 0,7$ em vez disso, (1a) produziria 0,42255199 – agora a missão falharia com mais frequência do que o contrário – enquanto (2a) daria 0,68574961, i.e., Guerra em Mosaico aumentaria a chance de vitória em cerca de 26,3 pontos percentuais e aumentaria acima do nível de dois em três.¹⁶

As fórmulas (1a) e (2a) podem ser usadas para avaliar facilmente os resultados de outros cenários brincando com k , n e p (ou seja, se é uma mudança no número de subsistemas ou nós, o número de plataformas, ou confiabilidade dos subsistemas). Os resultados permanecem verdadeiros: a guerra em mosaico sempre aumentará as chances de sucesso da missão e, quanto mais chances de sucesso na missão do F-35, maiores serão os benefícios a serem obtidos.

Resumo

Este artigo nunca teve a intenção de provar a validade do conceito de guerra em mosaico. Particularmente, ele nem mesmo tentou abordar questões tecnológicas ou doutrinárias, como o perigo de comunicações entre subplataformas serem comprometidas (falha de missão seria óbvia; por outro lado, se um F-35 ficasse isolado, ele ainda poderia tentar continuar). Nem abordou quanto tempo levaria para desenvolver subplataformas e colocá-las em serviço (o conflito no Mar da China Meridional pode esquentar em breve); o tempo que leva para conceber uma nova doutrina (enquanto o comandante em campo não estiver convencido, tudo será em vão); ou a compatibilidade da guerra aérea “tradicional” (ou seja, confiar em sistemas de armas de função de produção de *O-rings* altamente sofisticados, mas mais vulneráveis) e aplicar guerra em mosaico (eles podem ser executados em paralelo?).

Dito isso, para qualquer ideia nova viver, a palavra deve se espalhar, a história, incluindo todas as facetas, deve ser divulgada. Este artigo se concentra na provável magnitude do efeito da guerra em mosaico no sucesso da missão. Usando um argumento matemático não exatamente científico, o artigo sugere que essa abordagem pode, na maioria das vezes, melhorar substancialmente as chances de sucesso da missão em cenários onde as abordagens tradicionais estão fadadas ao fracasso. Considerando que os sistemas de guerra em mosaico podem ser muito mais baratos do que os sistemas de armas de plataforma única em uso hoje, a guerra em mosaico pode começar a parecer cada vez mais atraente. ◻

Notas

1. Gene Rochlin, Todd La Porte, and Karlene Roberts, “The Self-Designing High-Reliability Organization: Aircraft Carrier Flight Operations at Sea”, *Naval War College Review* 40, no. 4 (1987): 76–90.
2. Michael Kremer, “The O-Ring Theory of Economic Development,” *Quarterly Journal of Economics* 108, no. 3 (August 1993): 551–75.
3. Gene Rochlin, Todd La Porte, and Karlene Roberts, “The Self-Designing High-Reliability Organization: Aircraft Carrier Flight Operations at Sea”, *Naval War College Review* 40, no. 4 (1987): 76–90.
4. Daniel H. Wagner, W. Charles Mylander, and Thomas J. Sanders, eds., *Naval Operations Analysis* (Annapolis, MD: Naval Institute Press, 1999).
5. A própria essência do conceito é transportada para outros modelos não estocásticos, como Driver e DeFeyter, onde «inteligência», «recursos» e «estruturas de oportunidades políticas» são «multiplicadas, em oposição a somadas, para refletir que todos os componentes são necessários» para ter uma chance de vencer em uma guerra não convencional. William “Dave” Driver and Bruce E. DeFeyter, *The Theory of Unconventional Warfare: Win, Lose, and Draw* (Monterey, CA: Naval Postgraduate School, 2008).
6. Bradley A. Fiske, American Naval Policy, *Proceedings of the United States Institute* 31 (Janeiro 1905): 1–80; Frederick W. Lanchester, *Aircraft in Warfare: The Dawn of the Fourth Arm* (London: Constable, 1916). Embora o modelo de Lanchester fosse sobre combate aéreo, sem que ele soubesse de um artigo escrito por Jehu Chase em 1902 que, como tenente do Naval War College, foi um precursor na descrição da guerra naval. A matemática era a mesma, mas Chase, em contraste com Lanchester e Fiske, tinha até levado em conta o poder de permanência, ou seja, as características defensivas. Usando seu modelo, Chase em particular apontou as vantagens das táticas de isolar as forças inimigas. Foi esta recomendação que imediatamente levou à classificação do artigo. Não foi desclassificado até 1972. Ver Jehu V. Chase, “A Mathematical Investigation of the Effect and Superiority of Force in Combats on the Sea” (artigo não publicado, Naval War College Archives, Newport, RI, RG 8, Box 109, XTAV [1902]).
7. David A. Deptula, *Effects-Based Operations: Change in the Nature of Warfare* (Arlington, VA: Aerospace Education Foundation, 2001).
8. See Wayne P. Hughes, *Fleet Tactics and Coastal Combat*, 2nd ed. (Annapolis, MD: Naval Institute Press, 2000).
9. Jeffrey Engstrom, *Systems Confrontation and System Destruction Warfare: How the Chinese People’s Liberation Army Seeks to Wage Modern Warfare* (Santa Monica, CA: The RAND Corporation, 2018).
10. Eric Edelman and Gary Roughead, *Providing for the Common Defense: The Assessment and Recommendations of the National Defense Strategy Commission* (Washington, DC: United States Institute of Peace, 2018): 14.
11. DARPA, *Strategic Technology Office Outlines Vision for Mosaic Warfare*, (DARPA, August 4, 2017, <https://www.darpa.mil/news-events/2017-08-04>).
12. David Deptula and Heather Penney, *Restoring America’s Military Competitiveness: Mosaic Warfare* (Arlington VA: The Mitchell Institute for Aerospace Studies, 2019).
13. David Deptula and Heather Penney, “Mosaic Warfare”, *Air Force Magazine* 102, no. 11 (2019): 51–55.

Jörg

14. Se as funções de custo dos subsistemas forem idênticas, $p_1 = p_2 = \dots = p_k$ seria a solução de minimização de custos/maximização de sucesso de qualquer maneira.

15. Edelman and Roughead, *Providing for the Common Defense*. See previously cited quote in the section on anti-access/area denial.

16. Deve-se notar, porém, que se for reduzido ainda mais, o ganho, embora sempre sendo positivo, acabará por se tornar menor novamente.



Jörg Schimmelpfennig, PhD

É professor emérito de microeconomia teórica e aplicada na Ruhr University, Bochum, Alemanha. Suas principais áreas de pesquisa são regulação econômica, economia ferroviária, economia de defesa e estratégia e tática. Ele é um colaborador regular em conferências internacionais e publicou nas principais revistas acadêmicas. Ele é membro, entre outros, do Royal United Services Institute, do Institute for Defense and Government Advancement, do U.S. Naval Institute, da Naval Historical Foundation, da Army Historical Foundation, da Air Force Association e da Army Records Society. Atuou como consultor para instituições e empresas renomadas, bem como autoridades regulatórias. Também é um colaborador e revisor de artes. Schimmelpfennig estudou matemática, física e economia na Universidade de Bielefeld, Alemanha, e obteve seu doutorado em economia na Universidade de Osnabrück, Alemanha.