

# Funciones de producción de las juntas tóricas (O-Ring) del F-35 versus el mosaico de guerra

## Algunas matemáticas sencillas

JÖRG SCHIMMELPFENNIG, PhD

### Introducción

El 28 de enero de 1986, el transbordador espacial *Challenger* se despedazó a los 73 segundos de su vuelo, cobrando la vida de los siete astronautas a bordo. La Comisión Presidencial sobre el Accidente del Transbordador Espacial *Challenger*, conocido como el *Rogers Report* (Informe Rogers), identificó la falla de las juntas tóricas de goma que sellan las juntas en uno de los propulsores como la causa del accidente: “La falla específica fue la destrucción de los sellos que están destinados a evitar que los gases calientes se filtren a través de la junta durante la combustión propulsora del motor del cohete”.<sup>1</sup> El tanque externo fue destruido, lo que provocó la ruptura del orbitador.

Trágicamente, la posibilidad de una falla en la junta tórica se conocía desde hacía algún tiempo, pero no se comunicó correctamente. Aunque la causa original del desastre fue un diseño defectuoso, la causa inmediata (juntas tóricas defectuosas que cuestan solo un par de dólares) le dio su nombre a la idea de Michael Kremer de una función de producción de juntas tóricas.<sup>2</sup> En contraste con la visión clásica de la producción como una función determinista de algunos insumos, se considera que la producción consiste en una amplia gama de subsistemas independientes, todos propensos a fallar y tener éxito solo si ninguno de los subsistemas falla.

El primer ejemplo de una posible aplicación en la defensa fue la sugerencia de interpretar las operaciones de la cabina de vuelo de un portaaviones como una función de producción de juntas tóricas.<sup>3</sup> Es decir, a menos que todo caiga en su lugar, puede producirse una falla catastrófica, como lo demostró tristemente el accidente del USS Forrestal el 29 de julio de 1967. Otro ejemplo de secuencia similar al de una junta tórica, aunque no en el nombre, se proporciona en el libro *Naval Operations Analysis* (Análisis de operaciones navales). En él se afirma que para que un submarino tenga éxito en destruir un submarino enemigo, primero tendría que detectarlo, luego identificarlo como el objetivo correcto, encontrar una solución de disparo, lanzar el torpedo (o torpedos), al menos un torpedo tendría

que hacer contacto con el objetivo, no dejarse engañar por ningún señuelo, y su detonador debería eventualmente disparar la ojiva.<sup>4</sup> Esta secuencia ilustra cómo cualquier otro tipo de cadena de muerte también puede interpretarse como una función de producción de juntas tóricas, desde la idea general de un bucle **observar-orientar-decidir-actuar** (OODA por sus siglas en inglés) hasta el uso de un ataque con drones para eliminar a un terrorista en particular.<sup>5</sup> También es válido para cada sistema de armas individual, ya sea un avión de seguimiento de la Segunda Guerra Mundial como el P-40 Warhawk; un tanque de guerra M1 Abrams; o, por último, pero no menos importante, el F-35 Lightning II.

### **El F-35: una función de producción de juntas tóricas de última generación**

Generalmente considerado el avión de combate más avanzado que existe, el F-35 no solo muestra una maniobrabilidad y letalidad extremas, sino que es una plataforma que incorpora todos los subsistemas necesarios para llevar a cabo un ataque contra objetivos enemigos de superficie y aéreos por igual. Aun así, constituye una función de producción de juntas tóricas. Siguiendo el paradigma OODA, un piloto incapaz de observar u orientar no sería capaz de decidir, y mucho menos actuar. Por lo tanto, si solo uno de los subsistemas de un F-35 está incapacitado, ya sea cinéticamente, por medio de un ciberataque, o simplemente por interferencia, toda la plataforma se vuelve básicamente inútil. Las matemáticas detrás de la función de producción de juntas tóricas aclaran el dilema.

En el escenario se da por sentado que hay cuatro tareas o subsistemas necesarios para completar con éxito una misión, como “observar”, “orientar”, “decidir” y “actuar”. Las probabilidades de que estas tareas se cumplan con éxito se indican mediante  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  y  $p_4$ , respectivamente. La probabilidad de éxito de la misión, asumiendo la independencia estocástica, la da el  $p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4$  y la probabilidad de fracaso de la misión por  $1 - p_1 \cdot p_2 \cdot p_3 \cdot p_4$ . Para dar un ejemplo numérico, incluso si cada subsistema tiene un 90 por ciento de posibilidades de hacer exactamente lo que se supone que debe hacer, la probabilidad de éxito de la misión es;  $(0.9)^4 = 0.6561$ ; es decir, la misión fallará en más de uno de cada tres casos. Si la tasa de éxito del subsistema aumenta al 95 por ciento, la probabilidad de falla bajaría a  $1 - (0.95)^4 = 0.1855$ , pero la misión aún fallaría en casi uno de cada cinco casos. Sin embargo, uno estaría equivocado al suponer que aumentar la confiabilidad de un subsistema es una manera fácil de aliviar el problema. A primera vista, aumentar la confiabilidad de (todos) los subsistemas por 5 puntos porcentuales para aumentar la confiabilidad de éxito en general aproximadamente un 24 por ciento, de 0,6561 a 0,8145, parece una gran idea. El costo de aumentar la confiabilidad de cualquier

subsistema es exponencial. Costaría menos aumentar su probabilidad de éxito de, digamos, 70 a 80 por ciento, que aumentarla de 80 a 90 por ciento, y el costo adicional se vuelve cada vez más prohibitivo cuanto más se acerca al 100 por ciento. En términos de la teoría de la función de producción de juntas tóricas y que denota las funciones de costo por  $C_i(p_i)$ , esto se lee como  $C_i' > 0$  and  $C_i'' > 0$ . Para ilustrar el efecto mediante el uso de la forma funcional más simple para una función de costo compatible con juntas tóricas,  $C_i(p_i) = 1/(1 - p_i)$ , si la confiabilidad de un subsistema aumentara del 70 al 80 por ciento, el costo aumentaría en un 50 por ciento; elevar la confiabilidad del 70 al 90 por ciento triplicaría el costo. Por último, debería ser superfluo señalar que una probabilidad de éxito igual a uno es imposible de lograr; así como el hombre no es perfecto, no hay tecnologías disponibles que nunca fallen.

### **De la superioridad estadounidense (no solo aérea) a la denegación de área/anti-acceso**

A lo largo de la historia, e incluso hasta la Segunda Guerra Mundial, la guerra ha sido en gran medida un juego de números. Al comienzo de la Guerra del Pacífico, el Zero era el avión de combate más avanzado; sin embargo, Japón no tenía suficientes. A diferencia de sus homólogos estadounidenses, los pilotos japoneses tenían experiencia en combate, pero de nuevo, había muy pocos. El Tigre alemán fue considerado el mejor tanque de su época, y muy superior al Sherman estadounidense. Sin embargo, afortunadamente para los Aliados, había muchos más Sherman que Tigres.

Todo esto está en línea con los modelos de guerra (táctica). Bradley Fiske en 1905 y Frederick Lanchester en 1916 sugirieron que, en combate naval y combate aéreo, respectivamente, duplicar la cantidad de una fuerza debería ser más importante que duplicar su calidad.<sup>6</sup>

Sin embargo, desde el final de la Segunda Guerra Mundial y durante las décadas de la Guerra Fría, el panorama cambió a medida que EE. UU. logró una brecha cada vez mayor en los avances de la tecnología de armas con respecto a sus rivales, Rusia y China. La simple razón fue la economía. Así como una economía dirigida no podía competir con una economía de libre mercado, tampoco podía su base industrial de defensa. La superioridad numérica rusa no ayudó. La mayor tasa de muertes de los sistemas de armas estadounidenses habría bastado para detener a las fuerzas rusas. Los submarinos rusos podían ser rastreados dondequiera que fueran, pero no al revés, y los comandantes rusos lo sabían. Los bombardeos de precisión durante la guerra de Vietnam vieron el advenimiento de la capacidad de “una bomba, un objetivo”. La superioridad aérea estadounidense alcanzó su apogeo durante la Operación Tormenta en el Desierto. Los cazabombar-

deros furtivos estadounidenses podían entrar en el espacio aéreo iraquí a voluntad, y como señaló el general David Deptula en 2001; “la Guerra del Golfo comenzó con más objetivos en el plan de ataque de un día que el número total de objetivos alcanzados por toda la Octava Fuerza Aérea en todo 1942 y 1943: más ataques aéreos a blancos separados en 24 horas que nunca en la historia de la guerra”.<sup>7</sup>

El panorama cambió con el 11 de septiembre y las guerras subsiguientes en Afganistán e Irak por tres razones. Primero, las plataformas de combate aéreo de primera línea ya no se consideraban necesarias para las operaciones de contrainsurgencia. En segundo lugar, el costo de pelear dos guerras al mismo tiempo aplazó otros gastos, lo que llevó a una reducción en la cantidad de F-22 y F-35. En tercer lugar, se asumió implícitamente que el espacio aéreo continuaría siendo indiscutible. Sin embargo, habiendo tenido amplias oportunidades de estudiar la forma de guerra estadounidense durante las décadas en que sus fuerzas habían reinado suprenas, Rusia y China, conscientes de que seguirían siendo incapaces de igualar los desarrollos tecnológicos y el gasto militar de Estados Unidos, optaron por tomar un camino completamente diferente. En lugar de intentar ponerse al día, cambiaron el juego al embarcarse en respuestas doctrinales y estrategias que harían inútil la superioridad de las fuerzas estadounidenses. Los dos países simplemente prohibirían el acceso a áreas en disputa, como el Mar Báltico o el Mar de China Meridional, respectivamente, o negarían la capacidad de operar en esas áreas (es decir, A2/AD). En particular, por la negación de acceso, las operaciones estadounidenses en el área respectiva se verían obstaculizadas o demoradas en el mejor de los casos, impidiendo efectivamente que las fuerzas estadounidenses persigan el principio fundamental de la guerra táctica que es, como dice la Armada de EE. UU., “¡Dispara con eficacia primero!”<sup>8</sup> Cualquier intento de entrar en el espacio de batalla en disputa se encontraría con una resistencia feroz y relativamente barata. El costo de un misil antibuque chino DF-26 “asesino de portaaviones” es una fracción de cualquiera de sus objetivos previstos: haría que las pérdidas estadounidenses fueran insostenibles.

El panorama es sombrío. Los juegos de guerra siguen demostrando que las fuerzas chinas, al embarcarse en lo que Jeffrey Engstrom llama una estrategia de “confrontación del sistema” y al llevar a cabo una “guerra de destrucción del sistema”, ganarían incluso contra los sistemas de armas más avanzados, como el F-35.<sup>9</sup> Los elementos básicos de la “destrucción del sistema” son atacar las articulaciones, o nodos, interrumpiendo el flujo de un adversario; apuntar a redes y enlaces de datos (aislando así sus fuerzas); apuntar a los activos de alto valor de un adversario deshabilitando sus elementos esenciales (como C2, ISR u otros subsistemas esenciales); deshabilitar la infraestructura operativa de un adversario; y de-

morar las cadenas de muerte de un adversario. Como recoge esta cita del informe final de la Comisión de Estrategia de Defensa Nacional:

Si Estados Unidos tuviera que luchar contra Rusia en una contingencia báltica o contra China en una guerra por Taiwán. . . los estadounidenses podrían enfrentar una derrota militar decisiva. Estas dos naciones poseen capacidades de ataque de precisión, defensas aéreas integradas, misiles balísticos y de crucero, capacidades avanzadas de guerra cibernética y antisatélite, fuerzas aéreas y navales significativas y armas nucleares, un conjunto de capacidades avanzadas que hasta ahora solo poseía Estados Unidos. El ejército de los EE. UU. enfrentaría desafíos abrumadores para establecer la superioridad aérea o el control del mar y recuperar el territorio perdido al principio de un conflicto. Contra un enemigo equipado con capacidades avanzadas de anti-acceso/denegación de área, el desgaste de los activos de capital estadounidenses (barcos, aviones, tanques) podría ser enorme. La acumulación prolongada y deliberada de una fuerza abrumadora en el teatro que tradicionalmente ha sido el sello distintivo de la guerra expedicionaria estadounidense sería mucho más difícil y costosa, si es que fuera posible. Dicho sin rodeos, el ejército de EE. UU. podría perder la próxima guerra de estado contra estado que libere<sup>10</sup>

Reducir la cantidad de plataformas estadounidenses, ya sean B2, F-22 o F-35, sin duda no ayuda, ni tampoco el hecho de que sean funciones de producción de juntas tóricas.

## Mosaico de Guerra

“Mosaic Warfare” (mosaico de guerra) es una creación de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de la Defensa (DARPA, por sus siglas en inglés).<sup>11</sup> Con las publicaciones del estudio de investigación del Instituto Mitchell escritas por el general David Deptula y Heather Penney,<sup>12</sup> y una versión abreviada en el *Air Force Magazine*,<sup>13</sup> la idea ha entrado en discusiones militares convencionales.

La idea básica del mosaico de guerra es sorprendentemente sencilla e intuitivamente llamativa. Si su adversario persigue sus sistemas (“guerra de destrucción de sistemas”), ¡sencillamente sepárelos! En lugar de poner todos los huevos proverbiales (leer subsistemas o nodos) en una canasta (leer a bordo de una sola plataforma [función de producción de juntas tóricas] como el F-35), use plataformas pequeñas que alberguen nodos separados. Si su fuerza original consistía en, digamos, cuatro F-35, opte por cuatro plataformas pequeñas que alberguen solo un nodo cada una de la cadena de muerte, digamos observación; opte por cuatro plataformas pequeñas que alberguen solo otro nodo de la cadena de eliminación, digamos orientación; y así sucesivamente. Y asegúrese de que todas las plataformas pequeñas puedan comunicarse de forma independiente con las demás. Si solo se deshabilitara una plataforma pequeña, no habría ningún daño porque las tres

plataformas restantes que albergan el mismo subsistema o nodo se harían cargo. En contraste, deshabilitar el subsistema o nodo de un F-35 haría que ese F-35 fuera ineficaz. Si cada F-35 recibiera un solo golpe, no quedaría ninguna cadena de muerte. Por otro lado, hacer inoperable una red de cadena de eliminación separada requeriría deshabilitar no solo cuatro plataformas pequeñas, sino cuatro plataformas idénticas (es decir, todas las que alojan el mismo nodo). Si bien el efecto de esta estrategia es obvio (la probabilidad de éxito de la misión debería aumentar con el mosaico de la guerra), su magnitud no lo es.

### Ejemplos de matemáticas del mosaico de guerra

Para ilustrar el alcance de los beneficios que se pueden esperar cuando se cambia al mosaico de guerra, considere la cadena de muerte de un F-35 que consta de  $k$  nodos, usando la imagen del bucle OODA,  $k$  equivaldría a cuatro y tener una formación de  $n$  naves. Suponga que para que la misión tenga éxito, fuera suficiente si solo una nave pasa y mata. Entonces, usando la misma notación que en la Sección F-35, la probabilidad de que un F-35 individual lo atravesara sería  $p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_k$  y la probabilidad de fallar o tener que abortar por, correspondientemente,  $1 - p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_k$ . Con independencia estocástica, el escenario más probable, la probabilidad de que todas las  $n$  naves fallen sería  $(1 - p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_k)^n$ . Por lo tanto, la probabilidad de completar con éxito una misión cuando se utilizan  $n$  F-35s (es decir, que al menos una nave sobreviva para matar) es

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

Alternativamente, suponga que en lugar de tener todos los nodos  $k$  alojados en una plataforma (F-35), se utilizan pequeñas subplataformas  $k$  para cada F-35, cada una de las cuales es responsable de solo uno de los nodos  $k$ . Entonces cualquiera de los nodos  $k$  se vería comprometido solo si todas sus respectivas subplataformas  $n$  se destruyen o se vuelven ineficaces por otros medios. Para aislar el efecto del mosaico de guerra, se supone que todos los  $p_1$  a  $p_k$  permanecen sin cambios (lo más probable es que al menos algunas de estas probabilidades aumenten, ya que las subplataformas deberían ser más difíciles de detectar debido a que son más pequeñas; algunas subplataformas también podrían ser no tripuladas, aumentando su maniobrabilidad). Entonces, como la probabilidad de que el nodo  $i$  falle sea igual a  $(1 - p_i)^n$ , la probabilidad de que el nodo  $i$  sobreviva es  $1 - (1 - p_i)^n$ , más la probabilidad de que todos los nodos sobrevivan y el éxito de la misión, por lo tanto, es

$$(2) \text{ probabilidad (éxito|mosaico de guerra)} = (1 - (1 - p_1)^n) \cdot (1 - (1 - p_2)^n) \cdot \dots \cdot (1 - (1 - p_k)^n).$$

La diferencia entre (2) y (1) aumenta las posibilidades de éxito de la misión debido al cambio en el mosaico de guerra.

Para visualizar la magnitud de la influencia del mosaico de guerra, suponga que todos los  $p_i$  son idénticos, de ahora en adelante denotados por  $p := p_1 = p_2 = \dots = p_k$ .<sup>14</sup> Entonces (1) y (2), respectivamente, pueden simplificarse a

(1a) probabilidad (éxito|F-35s) =  $1 - (1 - p^k)^n$  y (2) se convierte

(2a) probabilidad (éxito|mosaico de guerra) =  $(1 - (1 - p)^n)^k$ .

Esta fórmula permite evaluar el resultado de diferentes escenarios mediante una simple calculadora de bolsillo.

Es obvio que para cualquier misión de una sola nave no puede haber un efecto de mosaico de guerra. Por lo tanto, suponga  $n = 2$  (es decir, una misión de dos naves) y  $k = 4$  (OODA). Con  $p = 0,9$ , (1a) produce 0,88173279, mientras que (2a) produce 0,96059601 (es decir, cambiar al mosaico de guerra mejoraría las posibilidades de éxito de la misión en aproximadamente 7,9 puntos porcentuales). Sin embargo, como una probabilidad de éxito de la misión F-35 de alrededor del 88 por ciento todavía suena bastante bien y no está exactamente en línea con “el ejército de los EE. UU. podría perder la próxima guerra de estado contra estado que libere”,<sup>15</sup> pruebe  $p = 0,7$  en cambio. (1a) arrojaría 0,42255199 - ahora la misión fracasaría la mayoría de las veces - mientras que (2a) arrojaría 0,68574961, es decir, el mosaico de guerra aumentaría la probabilidad de ganar en aproximadamente 26,3 puntos porcentuales y la elevaría por encima de dos de tres niveles.<sup>16</sup>

Las fórmulas (1a) y (2a) se pueden utilizar para evaluar fácilmente los resultados de otros escenarios jugando con  $k$ ,  $n$  y  $p$  (es decir, si se trata de un cambio en el número de subsistemas o nodos, el número de plataformas o la fiabilidad de los subsistemas). Los resultados siguen siendo ciertos: el mosaico de guerra siempre mejorará las posibilidades de éxito de la misión, y cuanto mayores sean las posibilidades de una misión F-35 exitosa, mayores serán los beneficios obtenidos.

## Resumen

Este artículo nunca tuvo la intención de probar la validez del concepto de mosaico de guerra. En particular, ni siquiera trató de abordar cuestiones tecnológicas o doctrinales como el peligro de que las comunicaciones entre subplataformas se vean comprometidas (el fracaso de la misión sería obvio; por otro lado, si un F-35 quedara aislado, aún podría intentar continuar). Tampoco abordó cuánto tiempo llevaría desarrollar subplataformas y ponerlas en servicio (el conflicto del Mar de China Meridional podría tornarse candente en el corto plazo); el tiempo que lleva idear una nueva doctrina (mientras el comandante sobre el terreno no esté convencido, todo es en vano); o la compatibilidad de la guerra aérea “tradicional” (es decir, depositar la confianza en sistemas de armas con función de producción de juntas tóricas altamente sofisticadas pero más vulnerables) y aplicar el mosaico de guerra (¿se pueden ejecutar en paralelo?).

Dicho esto, para que cualquier idea nueva viva, se debe dar a conocer; la historia, incluidas todas las facetas, debe circular. Este artículo se concentra en la magnitud probable del efecto del mosaico de guerra en el éxito de la misión. Usando un argumento matemático que no es exactamente de ciencia espacial, el artículo sugiere que este enfoque puede, la mayoría de las veces, mejorar sustancialmente las posibilidades de éxito de la misión en escenarios donde los enfoques tradicionales están destinados a fallar. Teniendo en cuenta que los sistemas de mosaico de guerra pueden resultar mucho más baratos que los sistemas de armas de plataforma única que se utilizan hoy en día, el mosaico de guerra comienza a parecer cada vez más atractivo. □

## Notas

1. “Report of the Presidential Commission on the Space Shuttle Challenger Accident (In compliance with Executive Order 12546 of February 3, 1986):” 40 <https://history.nasa.gov/rogersrep/v1ch4.htm> “Informe de la Comisión Presidencial sobre el Accidente del Transbordador Espacial Challenger (En cumplimiento de la Orden Ejecutiva 12546 del 3 de febrero de 1986):” 40 <https://history.nasa.gov/rogersrep/v1ch4.htm>.

2. Michael Kremer, “The O-Ring Theory of Economic Development,” (La teoría de la junta tórica del desarrollo económico) *Quarterly Journal of Economics* 108, no. 3 (agosto de 1993): 551–75.

3. Gene Rochlin, Todd La Porte, y Karlene Roberts, “The Self-Designing High-Reliability Organization: Aircraft Carrier Flight Operations at Sea” (La organización de alta confiabilidad que se diseña a sí misma: Operaciones de vuelo de portaaviones en el mar), *Naval War College Review* 40, no. 4 (1987) (Revista de la Escuela de Guerra Naval 40, no. 4 (1987): 76–90.

4. Daniel H. Wagner, W. Charles Mylander y Thomas J. Sanders, eds., *Naval Operations Analysis* (Análisis de operaciones navales), Annapolis, MD: Naval Institute Press, 1999).

5. La esencia misma del concepto se traslada a otros modelos no estocásticos, como el de Driver y DeFeyter, donde la “inteligencia”, los “recursos” y las “estructuras de oportunidad política” se “multiplican, en lugar de sumar, para reflejar que todos los componentes son necesarios” para tener la oportunidad de ganar en una guerra no convencional. William “Dave” Driver y Bruce E. DeFeyter, *The Theory of Unconventional Warfare: Win, Lose, and Draw* (La teoría de la guerra no convencional: Ganar, perder y (Monterey, CA: Naval Postgraduate School, 2008).

6. Bradley A. Fiske, *Política de la Armada Estadounidense*, Actas del Instituto de los Estados Unidos 31 (enero de 1905): 1-80; Frederick W. Lanchester, *Aircraft in Warfare: The Dawn of the Fourth Arm* (Las aeronaves en la guerra: El advenimiento del Cuarto Ejército) (Londres: Constable, 1916). Si bien el modelo de Lanchester trataba sobre el combate aéreo, sin que él lo supiera, un artículo escrito por Jehu Chase en 1902 como teniente en la Escuela Superior de Guerra de la Armada, fue un precursor en la descripción de la guerra naval. Las matemáticas eran las mismas, pero Chase, a diferencia de Lanchester y Fiske, incluso había tenido en cuenta el poder de permanencia, es decir, las características defensivas. Usando su modelo, Chase en particular señaló las ventajas de las tácticas de aislar a las fuerzas enemigas. Fue esta recomendación la que llevó inmediatamente a la clasificación del documento. No fue desclasificado hasta 1972. Ver Jehu V. Chase,

“A Mathematical Investigation of the Effect and Superiority of Force in Combats upon the Sea” (Investigación matemática del efecto y superioridad de las fuerzas en combate en el mar) (artículo inédito, 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). David A. Deptula, *Operaciones basadas en efectos: Cambio en la naturaleza de la guerra* (Arlington, VA: Fundación de Educación Aeroespacial, 2001).

8. Véase Wayne P. Hughes, *Fleet Tactics and Coastal Combat*, 2ª 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* (Confrontación de sistemas y guerra de destrucción del Sistema: Cómo el Ejército de Liberación Popular Chino busca librar la guerra moderna) (Santa Monica, CA: The RAND Corporation, 2018).

10. Eric Edelman y Gary Roughead, *Providing for the Common Defense: The Assessment and Recommendations of the National Defense Strategy Commission* (Provisión para la defensa común: Evaluación y recomendaciones de la Comisión de Estrategia de Defensa Nacional) (Washington, DC: Instituto de Paz de los Estados Unidos, 2018): 14.

11. Strategic Technology Office *Outlines Vision for Mosaic Warfare*, (Oficina de Tecnología Estratégica describe la visión para el mosaico de guerra), (DARPA, 4 de agosto de 2017 <https://www.darpa.mil/news-events/2017-08-04>).t4, 2017, <https://www.darpa.mil/news-events/2017-08-04>).

12. David Deptula y Heather Penney, *Restoring America's Military Competitiveness: Mosaic Warfare* (Restaurando la competencia de la milicia estadounidense: Mosaico de guerra) (Arlington VA: The Mitchell Institute for Aerospace Studies, 2019).

13. David Deptula y Heather Penney, “Mosaic Warfare” (Guerra de mosaic) *Air Force Magazine* 102, no. 11 (2019): 51–55.

14. Si las funciones de costo de los subsistemas son idénticas,  $p_1 = p_2 = \dots = p_k$  sería la solución de minimización de costos/maximización del éxito de todos modos.

15. Edelman and Roughead, *Providing for the Common Defense. (Proporcionando la defensa común)*, Consulte la cita citada anteriormente en la sección sobre denegación de área/anti-acceso.

16. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que si  $p$  se reduce aún más, la ganancia, aunque siempre es positiva, eventualmente volverá a ser menor.



### Jörg Schimmelfennig, PhD

Es profesor emérito de microeconomía teórica y aplicada en la Universidad del Ruhr, Bochum, Alemania. Sus principales áreas de investigación son la regulación económica, la economía ferroviaria, la economía de la defensa y la estrategia y táctica. Es colaborador habitual en conferencias internacionales y ha publicado en importantes revistas académicas. Es miembro de, entre otros, el Royal United Services Institute, el Institute for Defense and Government Advancement, el U.S. Naval Institute, la Naval Historical Foundation, la Army Historical Foundation, la Air Force Association y la Army Records Society. Se desempeñó como asesor de instituciones y empresas de renombre, así como de autoridades reguladoras. También es colaborador y revisor de las artes. Schimmelfennig estudió matemáticas, física y economía en la Universidad de Bielefeld, Alemania, y obtuvo su doctorado en economía en la Universidad de Osnabrück, Alemania.