INVESTIGACIÓN TÉCNICA · FRONTERA DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS

¿Resiste el CFD de ventiladores el estallido de Navier–Stokes?

El giro de 2026 en Navier–Stokes no invalida el CFD: aclara dónde confiar en las ecuaciones y dónde el ingeniero debe apoyarse en datos de ensayo.

Artículo técnico · Equipo editorial de SUNXFAN · 2026-11

Web: https://en.sunxfan.com/es/blog/navier-stokes-blowup-cfd-fan-engineering/

En el mundo de los ventiladores negociamos con el aire todos los días. Cada arco de rodete y cada curva de voluta se apoyan en el mismo conjunto de ecuaciones: Navier–Stokes. Describen cómo se mueve un fluido viscoso: el suelo matemático sobre el que se asientan la predicción meteorológica, el diseño aeronáutico y la aerodinámica de cada ventilador centrífugo y axial que fabricamos.

Desde hace más de dos décadas, una pregunta pende sobre ese suelo: en tres dimensiones y con datos iniciales suaves, ¿la solución se mantiene suave para siempre, o puede «estallar» en tiempo finito, llevando la velocidad o la vorticidad al infinito?

En 2026 esa pregunta dio un giro real. No porque se haya resuelto, sino porque la comunidad matemática empezó a tomarse en serio una posibilidad que durante mucho tiempo rechazó: que el estallido sea el comportamiento intrínseco de un fluido en condiciones extremas y que la suavidad sea el caso que necesita una explicación adicional.

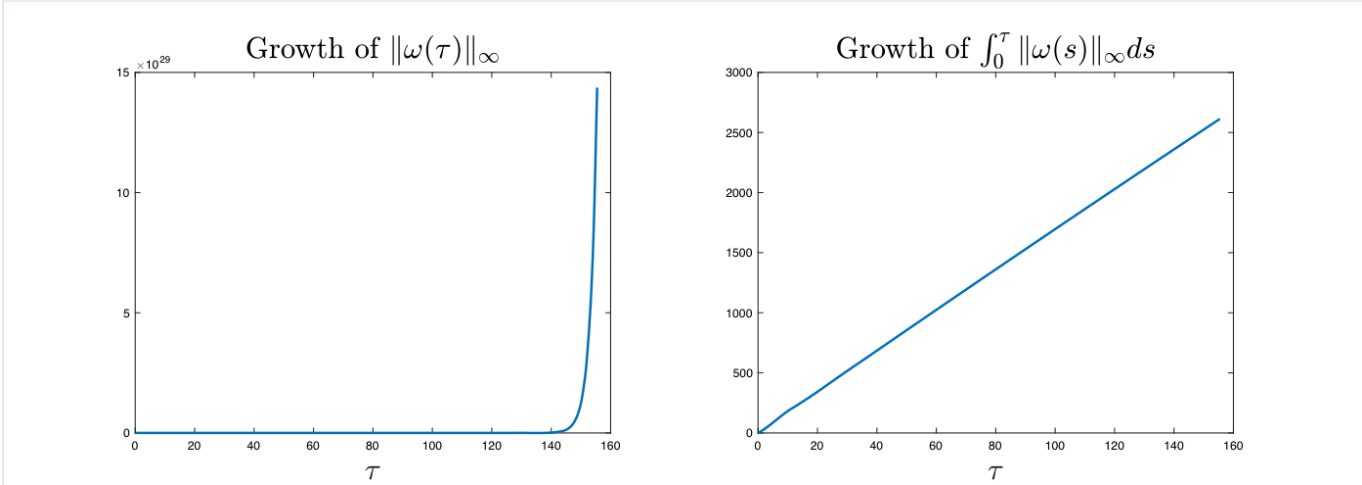


Fig. 15 Growth of maximum vorticity for the rescaled Navier-Stokes model. Left plot: the amplification of

Figura 1 — Evolución de la vorticidad para las ecuaciones de Navier–Stokes 3D en un marco axisimétrico generalizado. La vorticidad máxima crece abruptamente en tiempo finito y la vorticidad integrada incumple el criterio de Beale–Kato–Majda, que es exactamente la firma numérica que dejaría una singularidad de tiempo finito. Figura original: referencia 1 (Hou, J. FoCM 2026, Fig. 15/16).

1. El giro de 2026: tres líneas de evidencia que apuntan en la misma dirección

1.1 El estallido forzado de OpenAI: una conmoción para el área, no un veredicto

El 8 de septiembre de 2026, OpenAI anunció que un sistema multiagente había construido, en unas 88 horas, un estallido en tiempo finito para las ecuaciones de Navier–Stokes incompresibles en 3D, forzadas por un término de fuerza suave y de soporte compacto, y verificado en Lean 4. Leyendo solo el titular, parece una respuesta directa al Problema del Milenio.

El escrutinio llegó rápido. Una auditoría independiente en Lean descubrió que la formalización compilada no traducía fielmente el manuscrito en lenguaje natural: el lema 8.6 afirma controlar el operador inverso con m+4 derivadas, mientras que el código Lean exige m+5. La objeción de fondo tiene que ver con el propio

enunciado del problema. La versión del Milenio no lleva forzamiento y tiene energía finita; la construcción de OpenAI se apoya en un forzamiento suave diseñado para seguir inyectando enstrofía en los números de onda altos. Que un estallido forzado responda a una pregunta sin forzamiento dista mucho de estar resuelto. El Clay Mathematics Institute no ha aceptado nada, y la propia OpenAI declaró que no reclamaría el premio.

1.2 El PINN de Caltech: un perfil autosimilar en un mundo sin forzamiento

El contraste con la vía forzada de OpenAI es la construcción de un perfil de estallido autosimilar para las ecuaciones de Euler en 3D mediante una red neuronal informada por la física, obra de un equipo de Caltech: sin forzamiento, sin dominio acotado, en espacio libre. Terence Tao respaldó públicamente esa línea de trabajo la noche anterior al anuncio de OpenAI. Su importancia es metodológica: no se inyecta nada externo; se deja que las ecuaciones desarrollen su propia singularidad, lo que se acerca más a la imagen de una inestabilidad hidrodinámica intrínseca.

1.3 El consenso se desplaza: de «demostrar la suavidad» a «entender el estallido»

Lo que importa más que cualquier prueba aislada es que el propio consenso se está moviendo. En 2026 Tao afirmó sin rodeos que el pensamiento del área ha cambiado y que la conjetura de regularidad se considera hoy ampliamente falsa: habría datos iniciales concretos que estallan en tiempo finito. A lo largo de 2025–2026, grupos independientes comunicaron construcciones o evidencia sólida basadas en el estiramiento encadenado de tubos de vórtice, el bloqueo topológico y mecanismos en cascada. El esfuerzo colectivo migra desde demostrar que las soluciones se mantienen suaves hacia describir cuándo fallan y de qué manera.

2. La geometría detrás del estallido: un bucle de realimentación de estiramiento de vorticidad

Que Navier–Stokes pueda descontrolarse se debe a un mecanismo geométrico que el flujo 3D no puede evitar: el estiramiento de vórtices. Estire un tubo de vórtice a lo largo de su eje y la conservación del momento angular lo obligará a girar más rápido y a adelgazar; girar más rápido amplifica aún más el estiramiento. Es un bucle de realimentación positiva. La pregunta matemática es si la disipación viscosa siempre es lo bastante fuerte para contenerlo.

Los cálculos numéricos de Caltech muestran la consecuencia con claridad: en las ecuaciones axisimétricas generalizadas, la vorticidad máxima crece como $O(1/(T-t))$ en tiempo finito y la vorticidad integrada incumple el criterio de Beale–Kato–Majda, lo que marca la formación de una singularidad de tiempo finito. La viscosidad desempeña aquí un papel contraintuitivo. Como la regularización viscosa vuelve la solución más suave y estable, puede reforzar la alineación no lineal que impulsa el estiramiento de vórtices en lugar de amortiguarla.

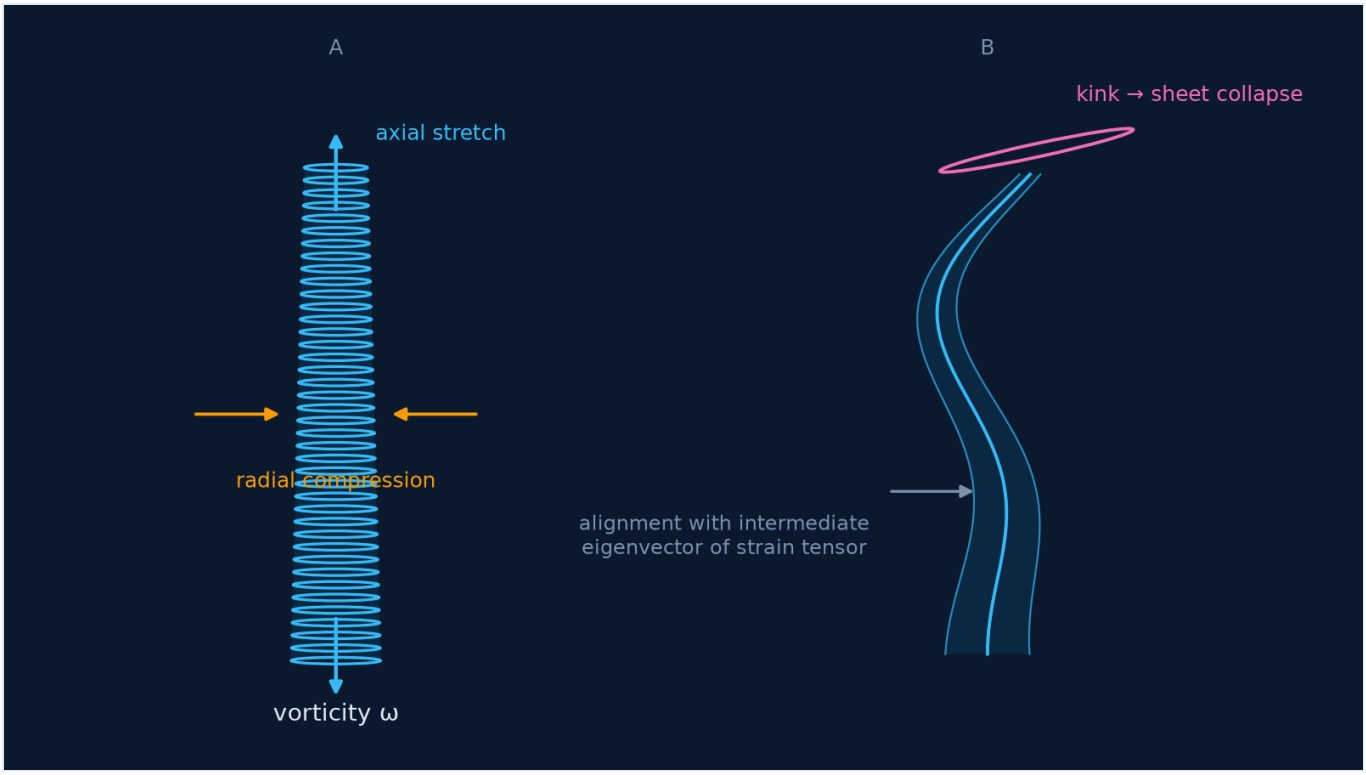


Figura 2 — Esquema del estiramiento de un tubo de vórtice. A medida que el tubo se estira axialmente y se comprime radialmente, la vorticidad tiende a alinearse con el autovector intermedio del tensor de velocidad de deformación, y el tubo acaba acodándose y colapsando en láminas. Esta es la geometría del propio término de estiramiento. Figura original: referencia 2 (Ruhr-Universität Bochum, Fig. 2.3); redibujada aquí para mayor claridad.

3. Qué significa esto para el ingeniero de ventiladores: una conclusión malinterpretada con frecuencia

La mala lectura habitual es esta: si Navier–Stokes puede estallar, entonces el CFD y el diseño de ventiladores que se apoyan en él no son válidos.

Ocurre lo contrario. El estallido es una afirmación sobre un modelo continuo a resolución infinita en condiciones extremas. El CFD de ingeniería nunca resuelve ese problema. Resuelve una versión domesticada: geometría acotada, malla discreta, un cierre de turbulencia RANS o LES y un objetivo definido en términos de flujo medio. Lo que el ingeniero combate a diario no es una vorticidad que se va al infinito, sino gradientes pronunciados, remolinos mal resueltos, separación y cierres que dejan de funcionar en silencio en ciertos regímenes de operación.

Una simulación de grandes remolinos (LES) de 2025 sobre ventiladores axiales para refrigeración de electrónica hace visible esa «no suavidad de ingeniería». Con presiones de salida normales (0 y 6 mmH_2O), el flujo del lado de succión permanece adherido, aparecen tubos de vórtice de entrada emparejados con buena coherencia y los vórtices de fuga en la punta están claramente definidos. A 12 mmH_2O aparece una zona de separación en el borde de ataque y el vórtice separado se despliega en espiral hacia la punta. En la condición de pérdida a 18 mmH_2O los tubos de vórtice de entrada desaparecen por completo, sustituidos por

turbulencia de gran escala caótica y difusa, mientras la zona de separación del lado de succión se extiende hasta cerca del 80% de la altura del álabe y el 20% de la cuerda. En toda esta imagen no aparece ninguna singularidad, pero sí un hecho: los cierres de turbulencia aguantan en flujo adherido y pierden credibilidad en separación amplia y pérdida.

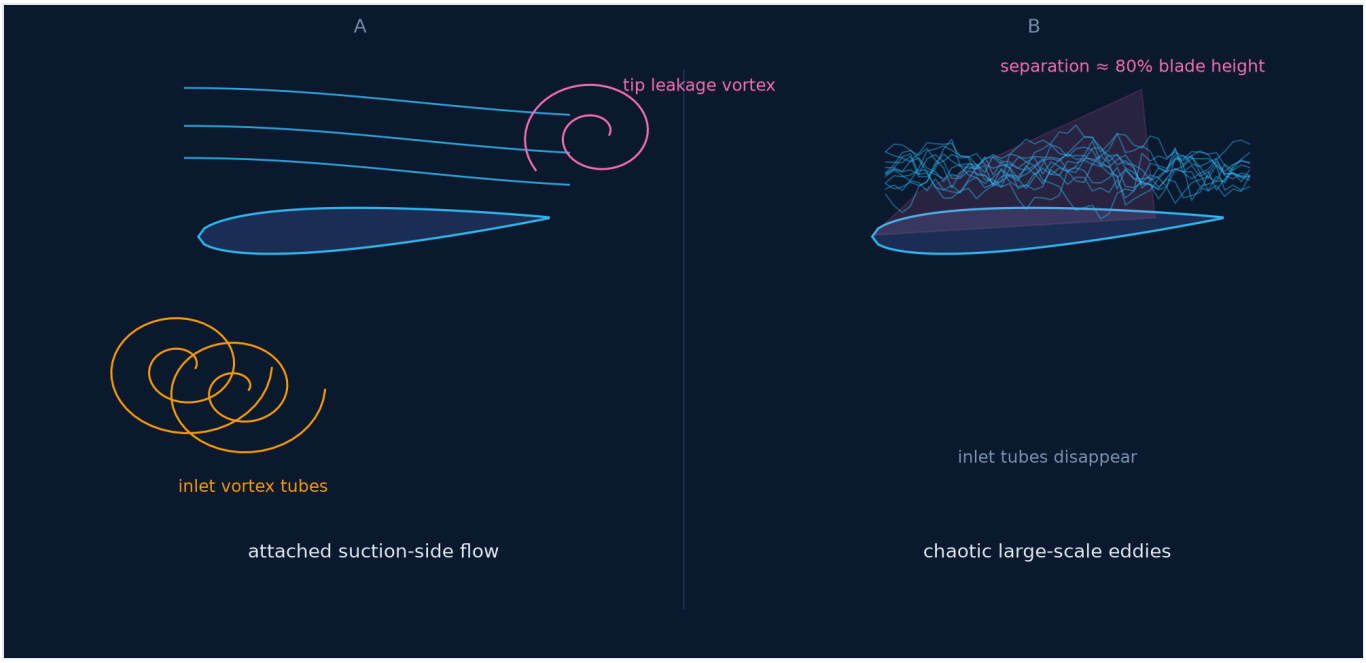


Figura 3 — Estructura del flujo de un ventilador axial, condiciones normales frente a pérdida. A la izquierda, flujo adherido en el lado de succión con tubos de vórtice de entrada coherentes y vórtices de fuga en la punta bien definidos; a la derecha, los tubos de entrada han desaparecido, domina la turbulencia de gran escala y la zona de separación se extiende por el álabe. Esta es la realidad no suave que el CFD de ingeniería trata a diario, y marca el límite de validez del cierre. Figuras originales: referencia 3 (Applied Acoustics 2025, Fig. 15–18); esquema redibujado aquí.

4. La visión de SUNXFAN: un modelo preciso es una variable de eficiencia y de ruido

Un hecho que se subestima con facilidad en la industria del ventilador: cada punto de eficiencia aerodinámica y cada decibelio de reducción de ruido proceden, en última instancia, de una descripción más precisa de la estructura del flujo.

Que un ventilador centrífugo EC mantenga su zona de alto rendimiento en carga parcial depende de si el flujo secundario y los vórtices de separación dentro del rodete se mantienen dentro del rango previsto. Un estudio CFD de un ventilador centrífugo multipaleta de álabes curvados hacia delante encontró una amplia zona de recirculación en el codo a la entrada del rodete, una separación marcada disparada en el borde de ataque del álabe y una interacción chorro-estela entre la lengüeta de la voluta y la estela del rodete, fuente principal de inestabilidad del flujo y de ruido discreto. Otro estudio de flujo interno en ventiladores centrífugos multipaleta observó asimismo recirculación y grandes remolinos dentro de los pasos entre álabes, incluso en el punto de máximo rendimiento. Nada de esto es una singularidad matemática, pero todo ello es la misma ecuación de Navier–Stokes expresada a escala de ingeniería.

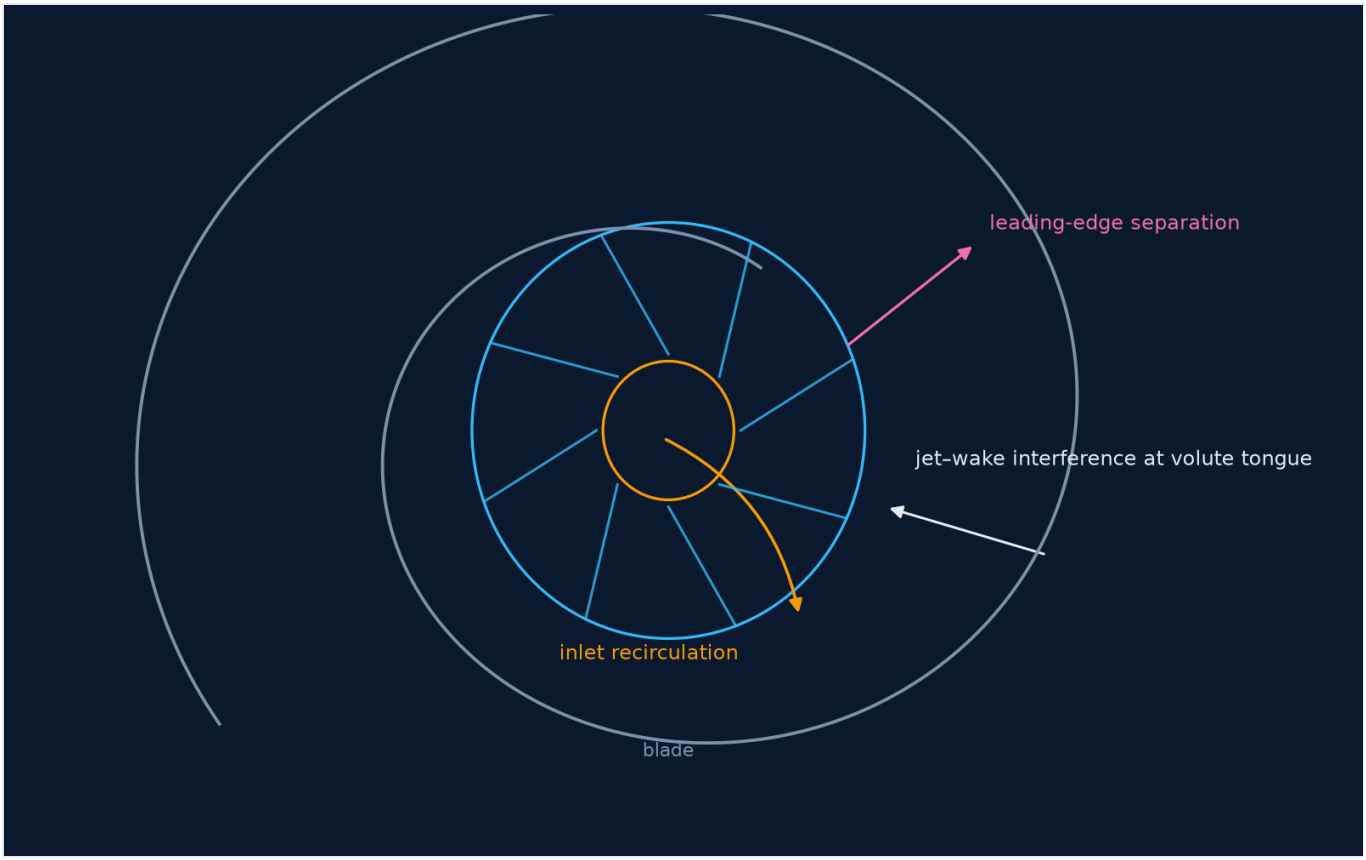


Figura 4 — Líneas de corriente y campo de velocidad en el interior de un rodete centrífugo. La recirculación de entrada, la separación en el borde de ataque y la interferencia chorro-estela cerca de la lengüeta de la voluta son las fuentes principales de pérdida de eficiencia y de ruido discreto. No interviene ninguna singularidad, y aun así se trata de la ecuación de Navier–Stokes a escala de ingeniería. Figuras originales: referencia 4 (TU Darmstadt, Fig. 9/12); esquema redibujado aquí.

El valor práctico de la frontera matemática de 2026 no es la demostración del estallido en sí, sino la cultura de simulación que fomenta: un CFD consciente de su validez, en el que se sabe qué puntos de operación puede sostener el modelo y cuáles exigen refinamiento local, un cierre distinto o una vuelta al ensayo físico. Para las aplicaciones de HVAC, refrigeración de centros de datos y almacenamiento de energía, aire limpio y arquitecturas de 800V HVDC que atiende SUNXFAN, eso significa juzgar con más claridad qué decisiones aerodinámicas pueden delegarse al CFD y cuáles deben anclarse en datos medidos.

5. Cierre: la matemática admite que el fluido puede desbocarse; la ingeniería aprende a convivir con ello

El problema de existencia y suavidad de Navier–Stokes está lejos de resolverse en 2026. El resultado de OpenAI está contestado, la construcción de Caltech aún necesita verificación independiente y el millón de dólares del Clay Institute sigue sin reclamar. Lo que sí ha cambiado es la suposición por defecto: la suavidad global ya no se da por sentada, y la estructura, las condiciones y las consecuencias del estallido son hoy un objetivo legítimo de investigación.

Para el ingeniero que está detrás de un ventilador, es una postura conocida. Nunca hemos poseído un mundo de flujo permanentemente suave. Lo que tenemos es separación, mezcla, inestabilidad y capas límite que

luchan contra un gradiente adverso de presión. La frontera se movió porque la matemática admitió por fin, en su lenguaje más riguroso, lo que la ingeniería afronta a diario: el aire no siempre se porta bien. La ingeniería real sigue consistiendo en entregar un ventilador eficiente, silencioso y fiable allí donde no se porta bien.

References

1. Hou, T. Y. *J. FoCM* (2026): crecimiento rápido de la vorticidad máxima y el criterio de estallido de BKM en las ecuaciones de Navier–Stokes axisimétricas generalizadas.
2. Ruhr-Universität Bochum, tesis doctoral, Figura 2.3: estiramiento de tubos de vórtice y colapso en forma de lámina.
3. *Applied Acoustics* (2025): LES de ventiladores axiales para refrigeración de electrónica en condiciones normales y de pérdida, Fig. 15–18.
4. TU Darmstadt: análisis CFD de un ventilador centrífugo, velocidades y líneas de corriente, Fig. 9–12.
5. Zenodo, «A Structural Dismantling of OpenAI's 'Finite-Time blowup for Navier–Stokes'», septiembre de 2026.
6. Zenodo, «Navier–Stokes Lost in Translation», octubre de 2026: sobre el desajuste en la formalización en Lean y los enunciados con y sin forzamiento.
7. Terence Tao, comentarios públicos sobre el cambio en el consenso acerca de la regularidad de Navier–Stokes, 2026.

Acerca de SUNXFAN®: SUNXFAN fabrica ventiladores centrífugos y axiales industriales EC, DC y CA para climatización HVAC, gestión térmica de centros de datos y almacenamiento de energía, y aplicaciones de aire limpio, incluidos conjuntos de ventiladores construidos para arquitecturas de 800V HVDC. Creemos que la atención sostenida a las preguntas más básicas de la mecánica de fluidos es lo que mantiene eficientes y fiables los sistemas de ventilación a largo plazo.