

**Universidad de Oviedo**  
**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

***INTERACCIÓN NO  
ESTACIONARIA ENTRE EL  
ROTOR Y EL ESTATOR EN  
UNA TURBOMÁQUINA AXIAL***

**TESIS DOCTORAL**

**D. Jesús Manuel Fernández Oro**

***Noviembre 2004***



Universidad  
de Oviedo

Reservados todos los derechos  
© El autor

Edita: Universidad de Oviedo  
Biblioteca Universitaria, 2007  
Colección Tesis Doctoral-TDR nº 22

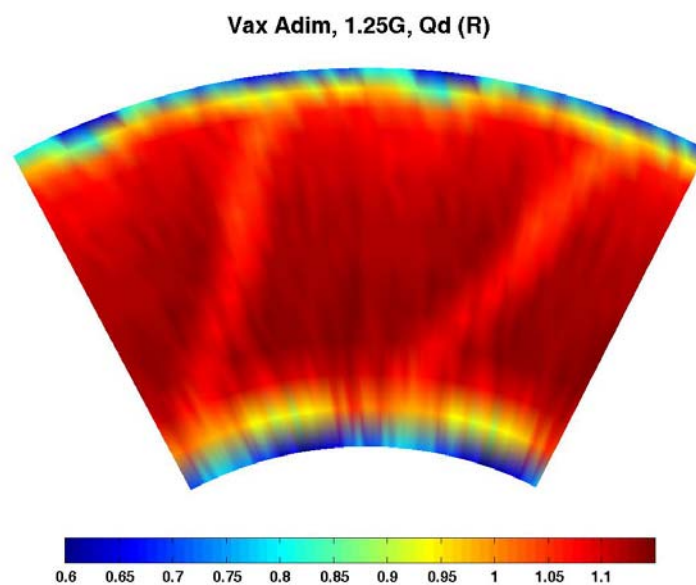
ISBN: 978-84-690-9132-6  
D.L.: AS.05851-2007





## Capítulo 6

### CARACTERÍSTICAS ESTACIONARIAS DE LA INTERACCIÓN ROTOR-ESTATOR



“How can I just let you walk away... Just let you leave without a trace.”

“Against all odds”.  
Phil Collins (1951-).  
Músico británico.

Se exponen a continuación los resultados obtenidos a partir de las simulaciones numéricas, tanto bidimensionales como tridimensionales, y su comparativa con las medidas experimentales estacionarias, con el objeto de observar efectos de la interacción que se manifiestan en el patrón de flujo promediado en el tiempo.

Los resultados numéricos que van a mostrarse no son el resultado de una simulación estacionaria, sino el promedio de una colección de resoluciones intermedias del flujo obtenidas a partir de una modelización no estacionaria de la soplante. Respecto a los resultados experimentales, se hará un procedimiento similar de promediado de las medidas no estacionarias, tanto para las de anemometría térmica como para las de fluctuación de la presión, pudiendo cotejar así los resultados medidos por la sonda de cinco agujeros.

Finalmente, en un breve apartado de conclusiones, se recogen los aspectos más a destacar, que servirán además como hilo conductor hacia el siguiente capítulo, que mostrará efectos no estacionarios instantáneos asociados a la interacción rotor-estator.



## 6.1.- CARACTERIZACIÓN GLOBAL DE LA SOPLANTE

Bajo este apartado se recogen los resultados, tanto numéricos como experimentales, relacionados con el comportamiento global de la soplante de estudio. En particular, se va a definir la nomenclatura que será empleada durante el resto del análisis de los resultados para hacer referencia a los seis casos de estudio, y se mostrarán las curvas características experimentales y numéricas obtenidas en la caracterización global de la máquina.

### 6.1.1.- Nomenclatura.

Puesto que de aquí en adelante se hará referencia siempre a los seis casos estudiados, tanto en metodología numérica como experimental, se recoge a continuación una pequeña tabla en la que se plantea la nomenclatura utilizada. Como se observa en la tabla 6.1, se analizaron tres caudales de funcionamiento para dos distancias entre haces. La distancia inferior entre coronas es de 80 mm en la punta, mientras que la distancia superior se eleva hasta los 100 mm. Asimismo, se comenzó el estudio para el caudal nominal de la máquina, esto es, unos  $16.5 \text{ m}^3/\text{s}$  una vez entubado en el banco de ensayos, estudiándose a posteriori caudales un 15% y un 30% inferiores al nominal.

	Caudal nominal	Caudal -15% nominal	Caudal -30% nominal
Gap Superior	$1.25G, Q_n$	$1.25G, 0.85Q_n$	$1.25G, 0.7Q_n$
Gap Inferior	$G, Q_n$	$G, 0.85Q_n$	$G, 0.7Q_n$

Tabla 6.1. Casos de estudio.

### 6.1.2.- Curvas características numéricas bidimensionales.

Dada la complejidad geométrica de la soplante en su dirección radial, merced al retorcimiento radial de los álabes, se ha creído oportuno estudiar tres secciones bidimensionales de la máquina: sección de base (*hub* – 380mm), sección central (*midspan* – 600mm) y sección de punta (*tip* – 820mm). En un primer paso, se ha calculado la curva característica para cada una de esas secciones, para a continuación, centrar el estudio en el patrón de flujo para 3 caudales distintos (los mismos que van a ser estudiados en el laboratorio de forma experimental). Asimismo, se ha duplicado el número de casos, ya que se han contemplado dos posibles distancias (*gaps*) entre los haces, por lo que se ha tenido que repetir la metodología anterior con vistas a analizar la influencia de la separación entre coronas.

Se ha obtenido la curva característica de la modelización numérica bidimensional (figura 6.1). En concreto, esta figura corresponde con la situación de *gap* inferior. También se obtuvieron las curvas correspondientes al *gap* superior, sin que llegasen a apreciarse apenas cambios en estas prestaciones globales. Puede observarse cómo las tres secciones convergen en el punto de diseño (entorno a  $18 \text{ m}^3/\text{s}$ ), en virtud a la condición de vórtice libre que impone valor constante de presión a lo largo de la envergadura. A caudales bajos, las curvas difieren notablemente entre sí, así como con la curva experimental, debido a la no inclusión de efectos tridimensionales de capa



límite en este modelo. Por el contrario, sí parece recoger más fielmente la entrada en zona de desprendimiento, entorno a los 10.5 m<sup>3</sup>/s, tal y como predicen las curvas experimentales. En particular, para esa zona de desprendimiento, el modelo numérico presentaba muchos problemas de convergencia, por lo que las condiciones neutras de presión estática nula a la salida y presión total nula a la entrada del dominio perdían consistencia.

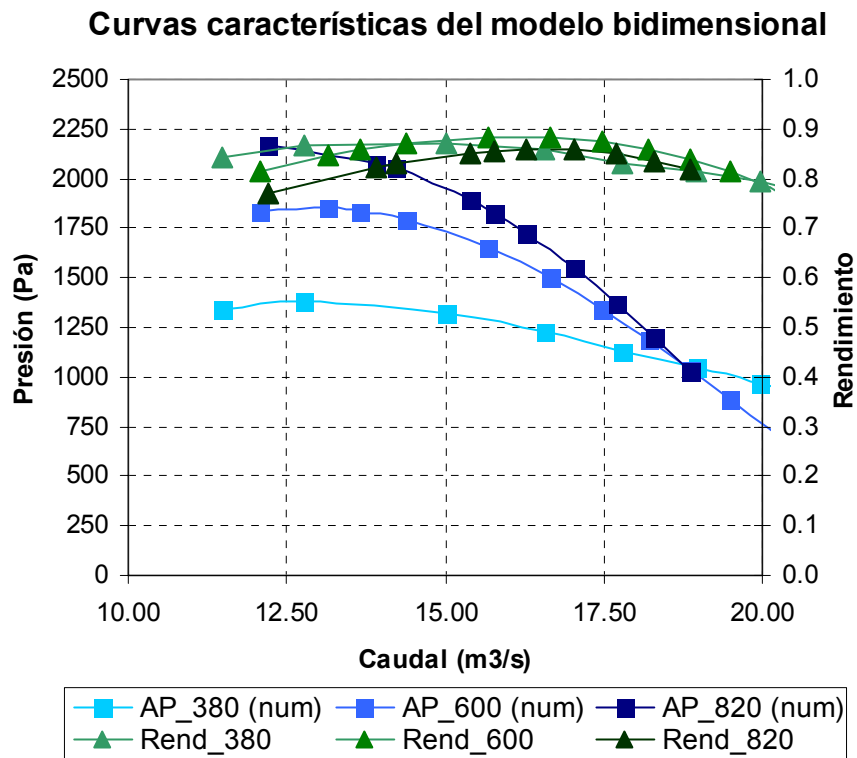


Fig. 6.1. Curva característica del modelo bidimensional para las tres secciones de estudio.

### 6.1.3.- Curva característica numérica tridimensional. Comparativa con la curva experimental.

Se compara a continuación la curva característica de la soplante de estudio, medida experimentalmente, con los puntos calculados a partir de la modelización numérica tridimensional. En principio, existe un buen acuerdo a caudales cercanos al nominal, si bien conforme se aleja el cálculo hacia puntos cercanos al desprendimiento, las diferencias se hacen importantes. Lógicamente, la definición de la malla empleada es insuficiente para capturar con una buena resolución los efectos de desprendimiento y de separación de capa límite en la superficie de los álabes cuando se modeliza el ventilador a carga parcial. El rendimiento que aparece en la gráfica es un rendimiento global de todo el montaje experimental, por lo que en él está incluido el rendimiento eléctrico del motor, rendimientos mecánicos de los acoplamientos e incluso el rendimiento de un variador de frecuencia empleado para conseguir el accionamiento del ventilador a la velocidad de giro de diseño. No se ha podido disponer de una medida directa del rendimiento hidráulico de la soplante, de ahí la razón de incluir en la gráfica este rendimiento tan general y obviamente tan bajo. Aún así, nótese cómo alcanza valores



máximos en la zona de caudal de diseño, lo cual sirve de constatación de la idoneidad del diseño efectuado: efectivamente da máxima eficiencia en esa zona de trabajo.

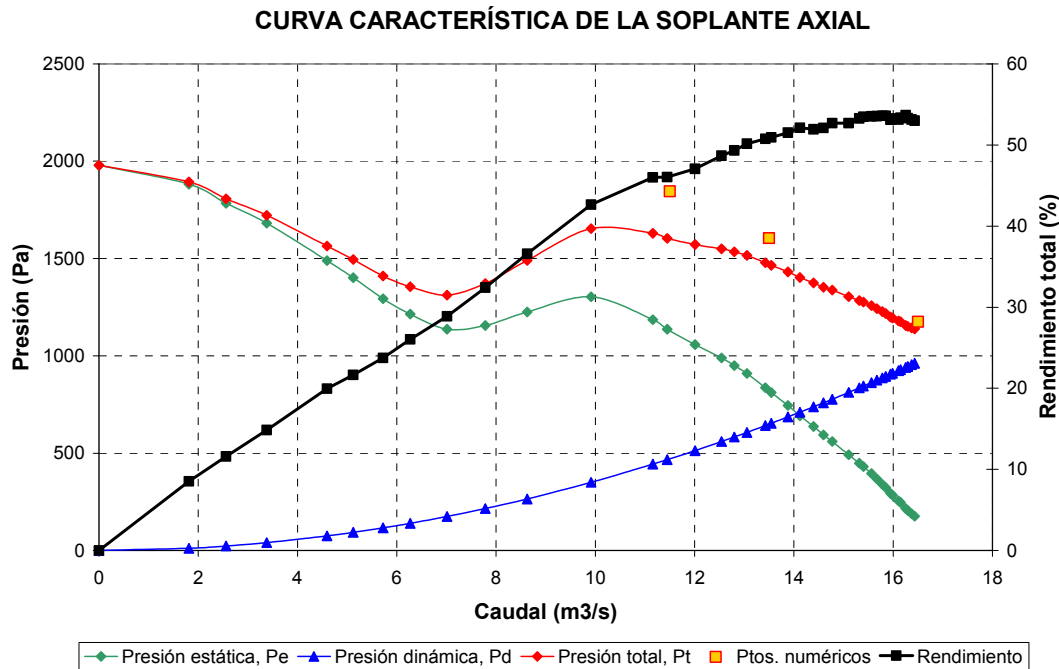


Fig. 6.2. Curva característica de la soplante axial. Comparativa con puntos numéricos.

## 6.2.- RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación se exponen los resultados más relevantes que se han obtenido a partir de las medidas experimentales del flujo en el interior de la soplante de estudio, tanto por la sonda de cinco agujeros, como por anemometría térmica.

Como se están analizando características estacionarias, o promediadas del flujo, se van a poder comparar resultados de la sonda de cinco agujeros (que ofrece medidas ya estacionarias) con los de la sonda de hilo caliente, a partir de su doble promedio, primero para eliminar la parte turbulenta (*ensemble* o “*phase-average*”) y luego para promediar a paso de álabe (*time-average* o “*passage-average*”).

Para la sonda de cinco agujeros se dispone de resultados para el caudal nominal, con los dos *gaps* estudiados, mientras que para la sonda de hilo caliente se han analizado todos los casos contemplados en este trabajo. Asimismo, a partir de los resultados temporales ofrecidos por la anemometría térmica, se han obtenido los campos relativos de la velocidad y su posterior promediado, procedimiento inviable en el caso de la sonda de presión. Solamente se podría haber medido el flujo relativo con dicha sonda, si se hubiese realizado un montaje en el que la sonda girase solidaria al rotor, pero esta posibilidad se antojaba hartó complicada y no aportaría nada nuevo a las medidas relativas conseguidas con hilo caliente.



### 6.2.1.- Medidas con sonda de cinco agujeros.

Las medidas realizadas con la sonda de cinco agujeros fueron efectuadas como un primer acercamiento al flujo en el interior de la máquina. El objetivo marcado con esta metodología fue doble: por un lado se trataba de iniciarse en el estudio experimental y de establecer un contrapunto a los resultados numéricos que el modelo numérico tridimensional del ventilador comenzaba a ofrecer. Por otro lado, permitió conocer el grado de discretización espacial necesario sobre los diversos sectores de medida para alcanzar una buena representación transversal del flujo entre haces.

La campaña de ensayos con este método de medida comprendió el barrido de los sectores tanto aguas abajo del rodete como entre haces, para los dos *gaps* de estudio, siempre con la máquina trabajando a caudal nominal. Ya que no se tenía programado en este primer bloque de pruebas la variación de la carga del ventilador, no se dispuso éste en el montaje con cono de regulación de la figura 3.1.2, sino que se accionó libremente, dejando únicamente el oído de aspiración de la máquina como tramo inicial de conducción. La ausencia de toda la conducción previa conlleva que el ventilador sea capaz de ofrecer un caudal un poco más elevado a cuando lo hace sobre el banco de ensayos. A la vista de la figura 6.2, se comprueba que si se continúa la curva de presión total hasta cortar a la presión dinámica, se alcanzan valores de caudal próximos a 17.25 m<sup>3</sup>/s –caudal que se ha denominado “de diseño”,  $Q_d$ - en lugar de los 16.5 m<sup>3</sup>/s con los que está trabajando el ventilador a cono completamente abierto en el montaje del banco. Por esta razón, los mapas de velocidad obtenidos con la sonda de presión se han nombrado como  $Q_d$ , en alusión al caudal de trabajo real de la soplante en dichos ensayos.

Puntualizar en último lugar que, puesto que se ha contemplado el uso de anemometría térmica de doble hilo, la sonda de presión es el único instrumento que va a proporcionar medidas de la componente radial de la velocidad, aún cuando éstas sean promediadas en el tiempo. Además, ya que los campos de velocidad son construidos a partir de medidas de presión, la sonda proporciona en primer término mapas de presión estática y total que sirven como información complementaria para la validación del modelo numérico. A continuación se muestran los resultados medidos y se comentan un par de interesantes cuestiones comparándolas con lo que se verá en el próximo apartado 6.3.2.2.

La figura 6.3 recoge para las dos configuraciones ensayadas, los tres componentes de la velocidad en el sector de medida entre haces de la máquina. Al ser medidas estacionarias, recogidas por un sensor en el marco absoluto de referencia, son comparables a los mapas numéricos a caudal nominal promediados en el tiempo para el marco de referencia del estator (figuras 6.23, 6.25 y 6.27). Las componentes de la velocidad se muestran adimensionalizadas por una serie de coeficientes que se utilizarán también para los resultados numéricos. A saber:

- La componente axial se adimensionaliza siempre por su propia media, con el objeto de hacer todos los casos comparables entre sí.
- La componente circunferencial se divide siempre por la velocidad de arrastre en la punta, salvo para el marco relativo, en el que se adimensionaliza por la velocidad de arrastre local en cada radio.

- La componente radial no se muestra como tal, sino que se construye el ángulo azimutal, a partir de la relación entre dicha componente radial en cada punto y la componente axial. De esta forma, se observa la componente radial en forma de ángulo que induce un flujo secundario en la dirección radial. Dicho ángulo se define como:  $Az = \arctg \frac{V_{rad}}{V_{ax}}$ .

Por otro lado, se ha adoptado el criterio de duplicar la ventana de visualización, de forma que los resultados muestren dos sectores de directriz (en vez de uno sólo) para conseguir una mejor representación de las diversas variables estudiadas. El punto de vista está situado siempre aguas abajo de la etapa, así que el lector está viendo los mapas desde la salida de la máquina (como si el chorro de aire le incidiese en los ojos).

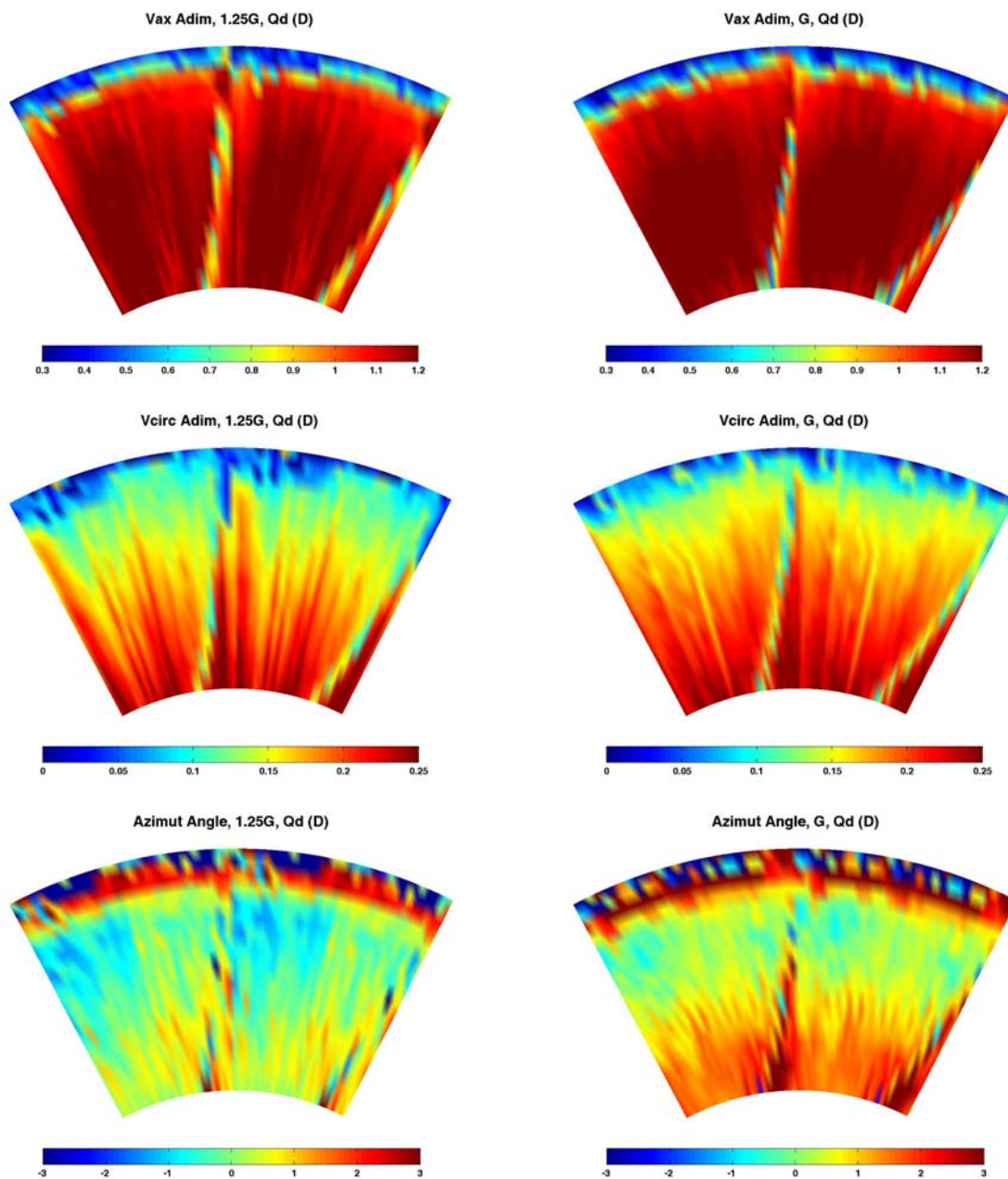


Fig. 6.3. Componentes de la velocidad, adimensionalizadas, en la zona entre haces (D) para el marco de referencia absoluto. Vista de dos sectores de directriz.





Respecto a las componentes axial y tangencial, destaca la clara uniformidad circunferencial del flujo, si bien puede apreciarse una mayor velocidad del flujo en la cara de succión de las directrices, tal y como podrá observarse también en los mapas numéricos. Las estelas de las directrices se han capturado de forma notable, a pesar de que su extremada esbeltez dificulta una perfecta definición de las mismas para la discretización adoptada, cercana al grado circunferencial. Al reducir el *gap*, el flujo axial se focaliza, y pierde la total uniformidad circunferencial para concentrarse en las proximidades de la cara de succión del estator. También se refuerza el mapa de la componente tangencial en ese caso. Sorprende el perfecto acuerdo de dicha componente con su homóloga numérica (figura 6.25). Por el contrario, en la componente radial se aprecian mayores diferencias (figura 6.27), si bien para el caso del *gap* superior, se pueden establecer paralelismos en el establecimiento de las células de flujo secundario.

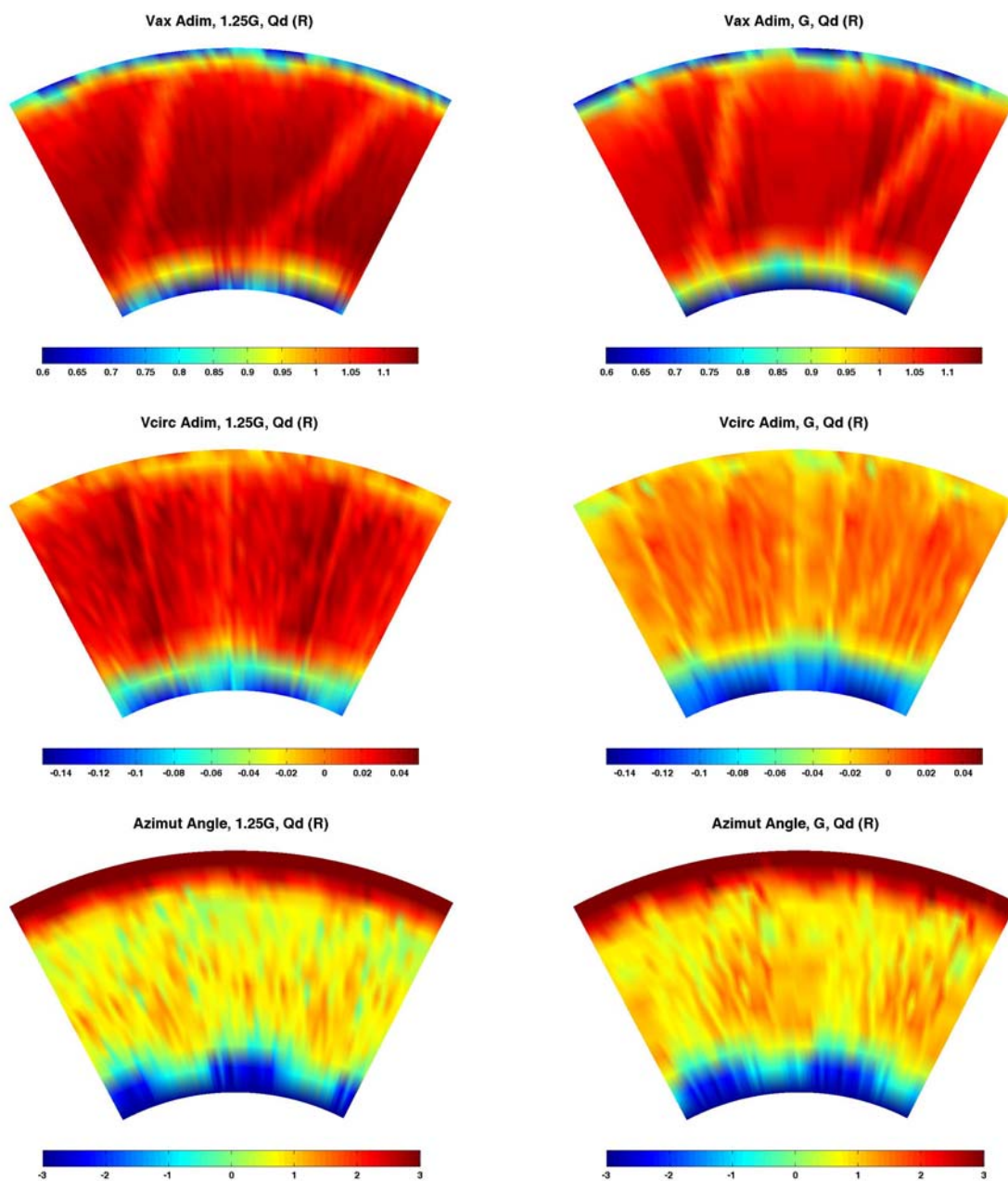


Fig. 6.4. Componentes de la velocidad, adimensionalizadas, en la zona aguas abajo del rodete (R) para el marco de referencia absoluto. Vista de dos sectores de directriz.



Sobre la generación de flujos secundarios se discutirá más en detalle sobre el modelo numérico (*ver apartado 6.3.2.2*). Valga ahora como reflexión que la mala definición de las estelas capturadas por la sonda en la dirección radial es la responsable de las notables discrepancias que se observan respecto de los resultados numéricos.

La figura 6.4 recoge los resultados medidos tras el rodete. **Para la componente axial de la velocidad se muestra uno de los resultados más reveladores conseguidos en esta investigación: es la presencia de la estela de directrices una vez que el flujo ha pasado a través del rodete.** Como son resultados estacionarios, no se aprecia ningún efecto asociado al paso del rodete, pero sí aparece con claridad la estela del estator aguas abajo de la etapa. Obviamente, gran parte del flujo asociado a dichas estelas ha sufrido una importante disipación y difusión dentro del flujo promediado, pero la estructura permanece muy bien definida. Al reducir el *gap* se intuye una mayor intensidad de esas estelas residuales, pero cierto es que el plano de medida se encuentra más cerca del estator en este caso (se mantiene la distancia relativa al borde de salida de los álabes en ambos casos, pero el estator se ha acercado en la segunda configuración). El modelo numérico trata de reproducir un comportamiento similar (figuras 6.24, 6.26 y 6.28), consiguiendo efectivamente que las estelas de las directrices se vean en esa zona.

Retomando el resto de componentes representadas en la figura 6.4, no se aprecia en ellas la existencia de las estelas de estator como en la componente axial. Si acaso, se puede apreciar un cierto despunte de la intensidad de los valores en la zona de capa límite, algo similar a lo que se aprecia en la zona del cubo en las figuras 6.26 y 6.28 y que podría deberse al residuo de las estelas. De todas formas, son medidas en la zona de capa límite, con flujo desprendido y bajo ángulos de *offset* muy importantes (hasta 60°), así que dichas aseveraciones deben ser tratadas con total cautela.

Lógicamente, al ser caudal de diseño, la componente circunferencial es prácticamente nula, si acaso se observa una leve deriva asociada al ángulo de desviación a la salida de los álabes, consecuencia de la inevitable imperfección del guiado de la corriente (*ver apartado 1.3.3.5*). Respecto al ángulo azimutal de la corriente tras el rotor, se observan importantes discrepancias entre lo experimental y lo obtenido en el modelo numérico (figura 6.28). Ahora bien, tales diferencias son perfectamente asumibles si se tiene en cuenta que el modelo numérico tridimensional no aporta efectos de huelgo radial y que la incertidumbre en las medidas con respecto a la componente radial es ya importante. Ambos resultados, por tanto, deben ser observados con cierta reserva, si bien sí que se confirma que el orden de magnitud parece bien acordado. En ambos casos, la uniformidad circunferencial es total, no siendo comparables por lo expuesto anteriormente las diferencias en base y punta.

Se completa la batería de resultados de la sonda con los mapas de presión estática entre haces y tras rodete, en las figuras 6.5 y 6.6. Nuevamente se llega a un muy buen acuerdo entre las medidas numéricas de las figuras 6.39 y 6.40 y las que se representan a continuación. No parece observarse ningún efecto inducido por las directrices aguas abajo del rodete, aún cuando entre haces sí que se pueden apreciar claramente los efectos de estela sobre el campo de presión. La cara de presión de las directrices presenta sus valores máximos muy desplazados radialmente a lo largo de su envergadura. Curiosamente, hay mayor uniformidad circunferencial cuando el *gap* es más reducido, en clara contraposición a la tendencia que se ha observado hasta ahora en las componentes de la velocidad.

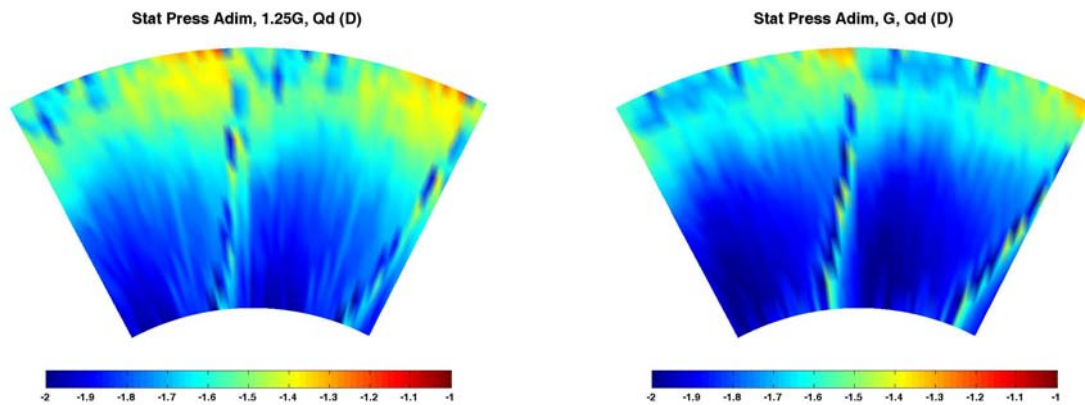


Fig. 6.5. Mapa de presión estática, adimensionalizada por la presión dinámica, en la zona entre haces (D). Vista de dos sectores de directriz.

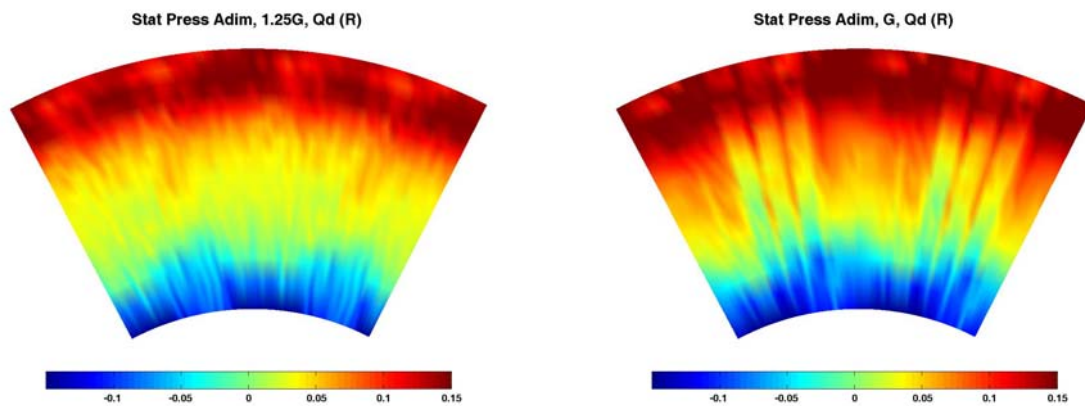


Fig. 6.6. Mapa de presión estática, adimensionalizada por la presión dinámica, en la zona aguas abajo del rodete (R). Vista de dos sectores de directriz.

### 6.2.2.- Medidas por anemometría térmica.

Aún siendo de clara naturaleza no estacionaria, se van a incluir las medidas promediadas en el tiempo, tanto en el marco de referencia relativo como absoluto, de la sonda de hilo caliente. Una vez observada la incidencia del paso de estelas de directriz a través del rotor para el caudal de diseño (sonda de cinco agujeros), se procede a extender el estudio a diversos caudales para analizar un factor más dentro del marco de la interacción entre haces. En primer lugar, se analiza el incremento de presión en el rodete y la distribución radial del grado de reacción a partir de un doble promedio temporal y circunferencial, en procedimiento análogo al efectuado con el modelo numérico. Una vez comparadas las prestaciones globales del ventilador, se pasa a una descripción cualitativa del flujo promedio.

#### 6.2.2.1.- Ecuación de Euler y grado de reacción.

Antes de adentrarse en la caracterización del flujo, se ha querido seguir analizando características globales del funcionamiento de la máquina, tales como la distribución radial del incremento de presión del rotor o la también distribución radial del grado de reacción. Un análisis detallado de estas variables permite enlazar con los criterios de diseño que fueron adoptados para esta turbomáquina, en particular, criterios de vórtice libre y de grado de reacción superior a la unidad. En la figura 6.7 se han



agrupado los resultados obtenidos para ambas variables, a partir de las ecuaciones (1.14) para el grado de reacción y (1.3) para el incremento de presión, y que han sido promediados temporal y circunferencialmente en los planos de entrada y salida del rotor para poder hacer el balance correctamente.

La figura engloba los tres caudales estudiados, y dentro de cada caso se comparan los resultados obtenidos para los dos *gaps* de estudio (curvas roja y azul). Los puntos son las medidas experimentales en cada radio, que a su vez han sido ajustadas por curvas suavizadas para permitir una representación más continua de las variables. Además, se han incluido unas líneas a trazos que representan la media total de la distribución.

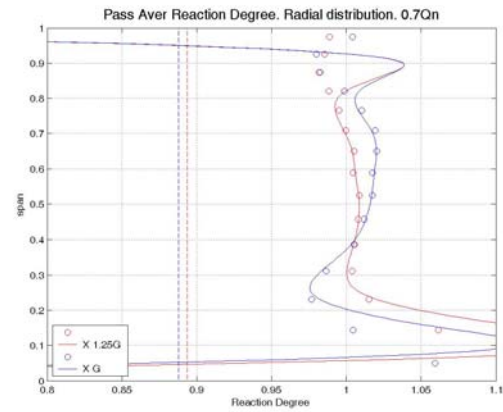
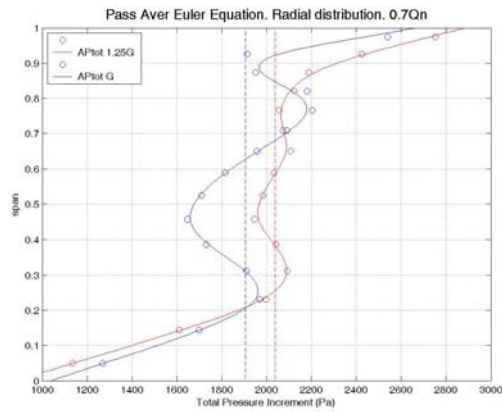
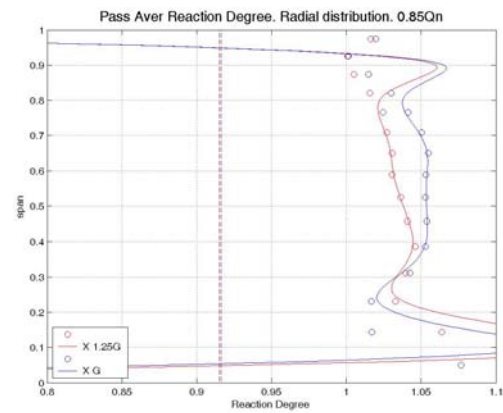
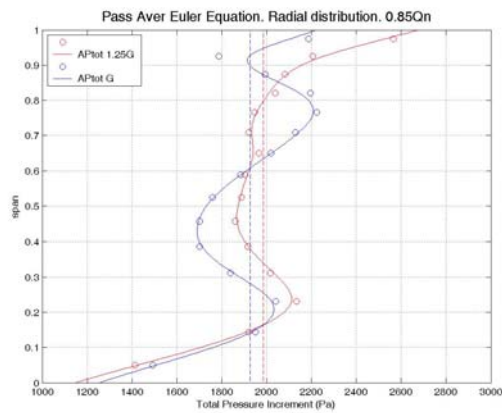
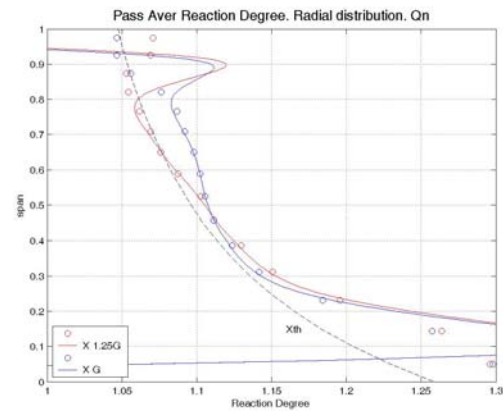
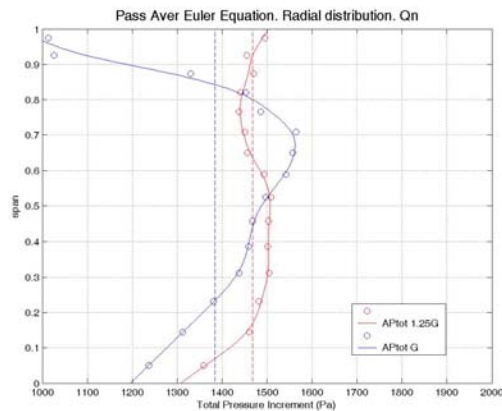


Fig. 6.7.1. Incremento de presión en el rodete para los tres caudales de estudio. Comparativa entre *gaps*.

Fig. 6.7.2. Grado de reacción en el rodete para los tres caudales de estudio. Comparativa entre *gaps*.



Destaca la no uniformidad radial que presenta el incremento de presión en el rodete a caudales nominales, en el caso de *gap* inferior. Además, el valor medio es algo superior al calculado numéricamente (figura 6.22), lo cual es sorprendente (en general, los modelos numéricos subestiman pérdidas), sobre todo cuando a caudales más bajos, sí que la media es más baja en el caso experimental que en el modelo. No parece por tanto, que el resultado esté libre de una importante incertidumbre producida por la discretización circunferencial, aún cuando este resultado sea media de medias. A caudales bajos, la distribución parece adelantarse en la punta frente a la base, en modo similar a cómo se va a apreciar en la figura 6.22. Sobre la diferencia entre las distribuciones como consecuencia del *gap*, no puede afirmarse otra cosa que es debido a incertidumbres experimentales.

La distribución del grado de reacción presenta un mayor acuerdo con lo esperado teóricamente a caudal nominal. En la zona del cubo, las discrepancias parecen amplificarse. Cuando se reduce el caudal, el grado de reacción se acerca a la unidad, en similar tendencia a lo que se verá numéricamente. Asimismo, parece adivinarse también un leve adelantamiento de los valores en la zona de punta respecto del cubo a medida que el ventilador trabaja a menor carga.

Como ya se ha insinuado, para completar el análisis, también se han obtenido estas distribuciones a partir de los datos numéricos, si bien éstas se comentarán en el siguiente apartado 6.3.2.1, con el objeto de poner de manifiesto una vez más las bondades del modelo numérico.

#### 6.2.2.2.- Resultados promediados en el tiempo (“**Passage-averaged**”).

Se finalizan los resultados experimentales con la inclusión de ocho figuras en las que se muestran las componentes axial y circunferencial de la velocidad, entre haces y tras rodete, para el marco de referencia fijo y móvil en cada uno de los seis casos de estudio. Se anima al lector a que vaya comparando los resultados numéricos del apartado 6.3.2.2 con los que se presentan a continuación. Debido al gran acuerdo alcanzado entre ambos resultados, muchos de los comentarios que podrían realizarse en esta sección, se efectuarán sobre las figuras de los resultados numéricos. Por el contrario, se hará hincapié en fenómenos particulares que sí se ven sobre las medidas experimentales y que están más ocultos en la modelización. El objeto de esta manera de proceder es la de garantizar una mayor brevedad expositiva en los resultados.

#### Marco de referencia del estator

El promedio temporal sobre el marco de referencia absoluto elimina todo efecto de giro de rotor, ofreciendo una perfecta representación del flujo promedio asociado al paso entre los canales del estator.

La figura 6.8 muestra cómo es la componente axial media adimensionalizada entre haces. Las diferencias entre ambos *gaps* son de cierta importancia, sobre todo por la aparición de una concentración del flujo entre la base y el *midspan* en el *gap* inferior. Esa concentración se mantiene en todo el rango de caudales. También se observa una importante capa límite en la zona de punta, mientras que en la base la capa límite no ha sido recogida por las medidas. Conclusiones similares a las del apartado 6.3.2.2 se

pueden establecer en este caso, sobre todo en lo que se refiere a la reducción de caudal: para la configuración con *gap* superior, la disminución de caudal sólo se traduce en una disminución del valor medio de la velocidad del flujo, pero no hay cambios apreciables en el patrón de flujo.

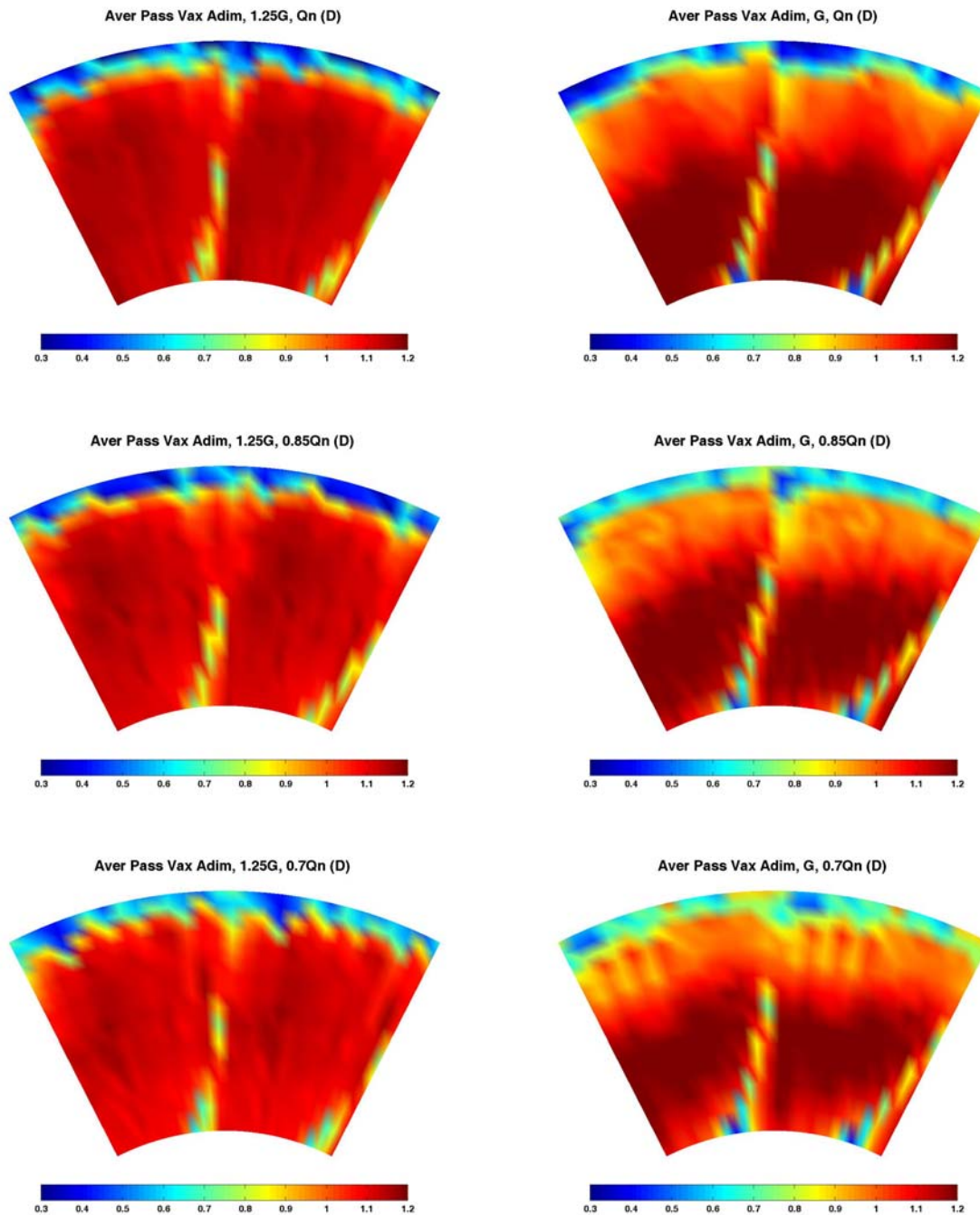


Fig. 6.8. Componente axial de la velocidad para el marco de referencia del estator (absoluto) en la zona entre haces (D). Vista de dos sectores de directriz.

La figura 6.9 muestra el flujo tras el rotor. A caudal nominal aparecen con cierta nitidez los efectos de las estelas de directriz, que aún no han sido completamente mezcladas en el flujo promedio. A carga parcial, la presencia de estos déficits de velocidad media, son visibles para el caso del *gap* inferior, mientras que para la otra



configuración apenas si son ya visibles en el caso del 85% del caudal nominal. En el caso de *gap* inferior se puede observar una zona de nucleación de mínimos de velocidad axial, prácticamente anclada en la zona de la capa límite de punta. Ese núcleo de mínimos de velocidad se hace más grande conforme el ventilador trabaja a menores caudales. El hecho de que aparezcan en el mapa tras haber realizado el promedio temporal, implica que es un fenómeno cuya generación no está ligada al paso de los álabes del rotor, sino que su origen proviene de las propias directrices. Esto no significa que la causa de la generación del fenómeno no esté ligada al paso del rotor, sino que la propia generación tiene que provenir de las directrices del estator.

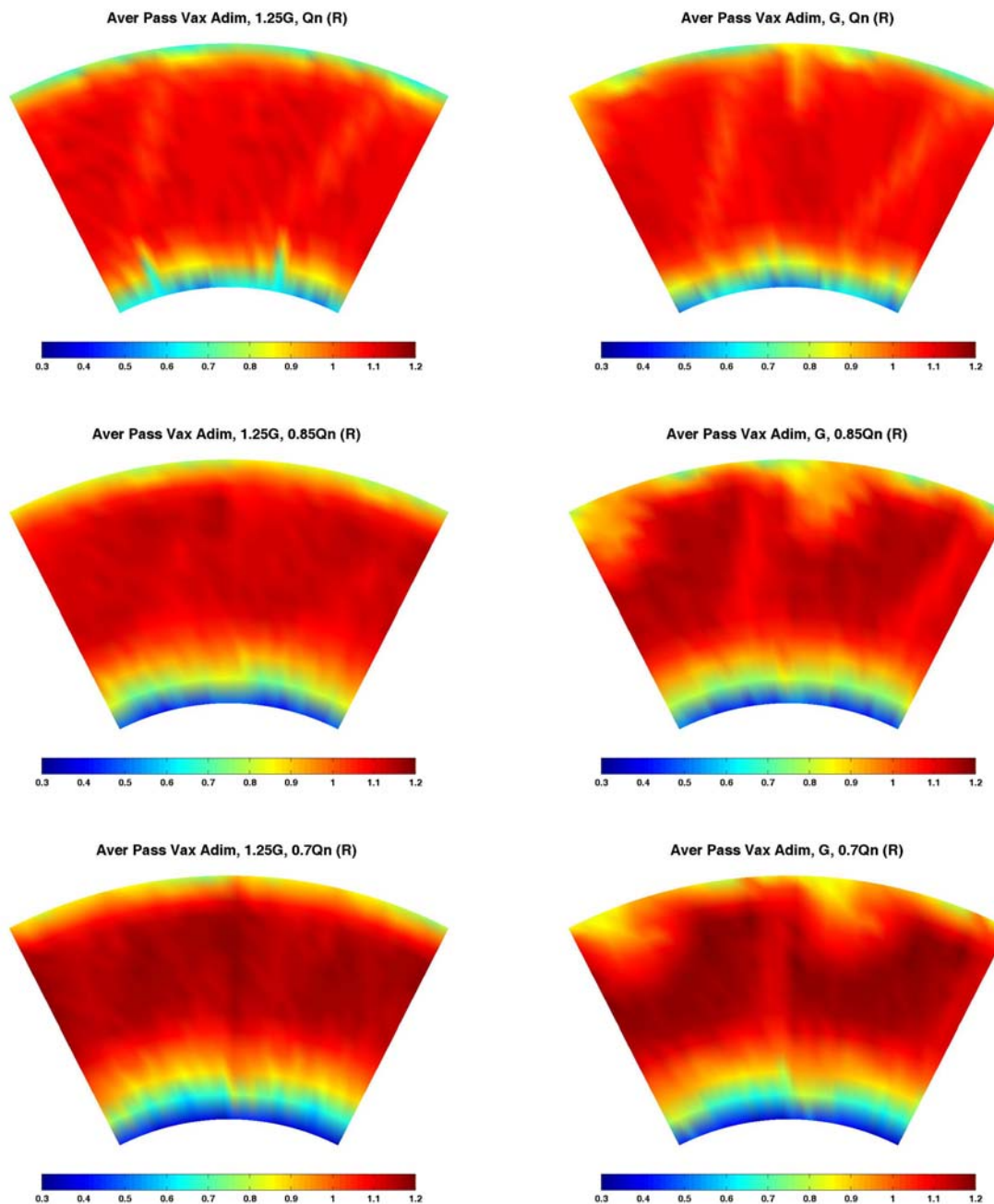


Fig. 6.9. Componente axial de la velocidad para el marco de referencia del estator (absoluto) en la zona aguas abajo del rodete (R). Vista de dos sectores de directriz.



Los mapas de velocidad relativa, mostrados en la figura 6.12, permitirán completar la descripción de dicho fenómeno, poniendo de relieve una curiosa realidad del estudio no estacionario de la máquina: **la generación de un fenómeno se entiende desde un punto de vista, mientras que la propagación se comprende desde el marco de referencia complementario.**

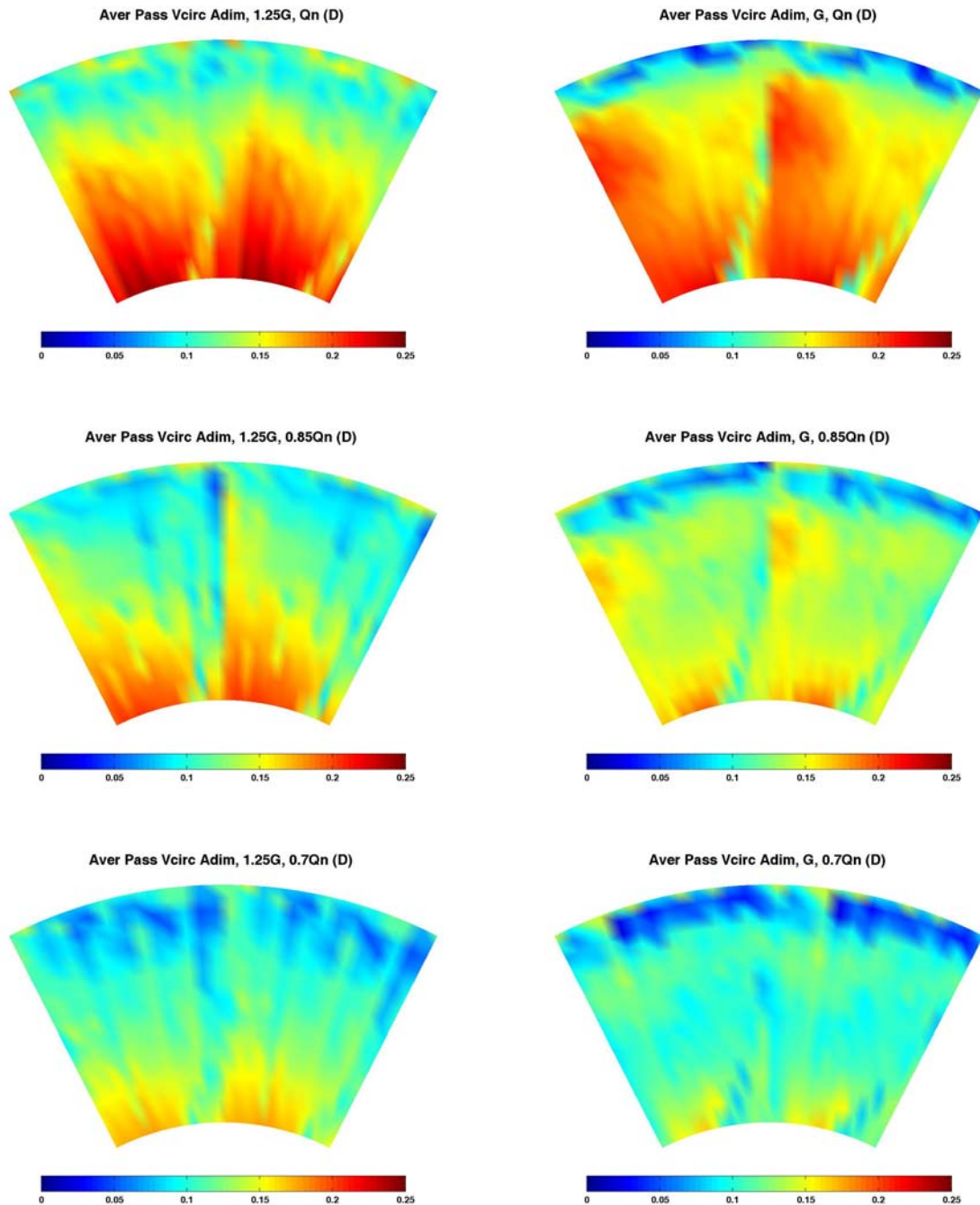


Fig. 6.10. Componente circunferencial de la velocidad para el marco de referencia del estator (absoluto) en la zona entre haces (D). Vista de dos sectores de directriz.

En la zona detrás del rodete no se captura la capa límite de punta, sino que en esta ocasión aparece la capa límite de la zona del cubo. Motivos constructivos de la envolvente cilíndrica del ventilador, al incluir las directrices reutilizadas de la máquina





agrícola comercial (figura 3.2), son los responsables de que no haya una perfecta nivelación en la base entre el cubo del estator y del rotor. Por esta razón, el sector de medida entre haces está desplazado hasta la carcasa en la punta, mientras que el del rotor lo está justo hasta el cubo. En la figura 6.10 se muestra la componente circunferencial entre haces. La comparativa con la figura 6.25 presenta un acuerdo muy notable. Nuevamente, se observa un aumento de la componente en la cara de succión de directriz cuando se reduce el *gap* axial entre haces. A caudales bajos, la uniformidad circunferencial crece, aunque las estelas siempre aparecen para romper la continuidad tangencial del flujo.

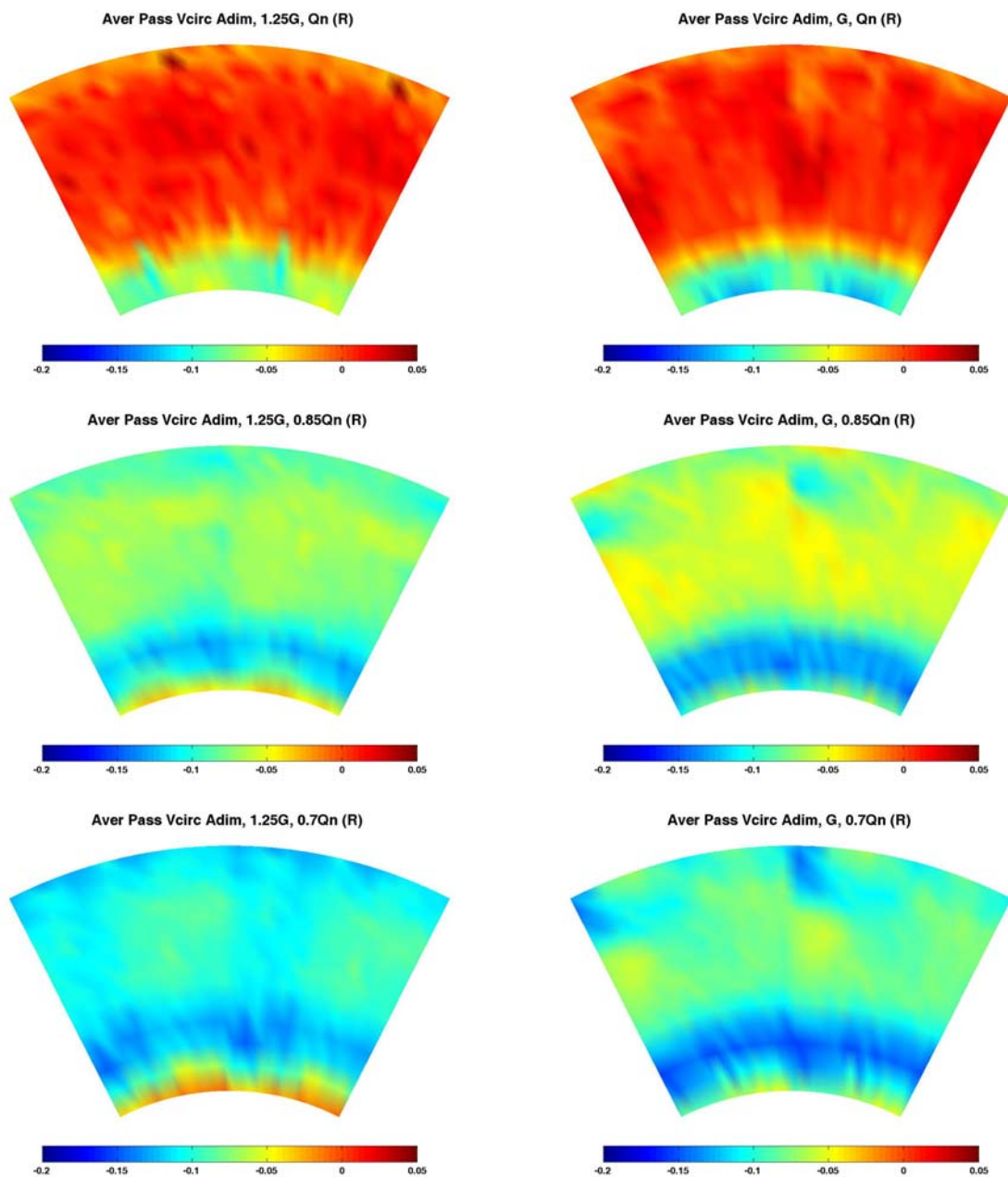


Fig. 6.11. Componente circunferencial de la velocidad para el marco de referencia del estator (absoluto) en la zona aguas abajo del rodete (R). Vista de dos sectores de directriz.



Tras el rodete, a caudal nominal, apenas existe componente circunferencial (figura 6.11). La uniformidad tangencial es completa, no apreciándose estelas previas del estator. Al igual que en los mapas de la sonda, únicamente en la zona de capa límite se puede asignar al residuo de dichas estelas unos puntos de mayor intensidad (sobre todo en el caso de caudal nominal con el *gap* superior). Sorprende el gran tamaño de la capa límite en la zona del cubo, probablemente potenciada por un efecto de disminución de la sección del canal al paso por el rodete.

### Marco de referencia del rotor

A partir de los datos en el punto de vista absoluto, se puede construir el campo de velocidades relativo, a través de un decalaje en la posición circunferencial de esos datos en cada punto y una interpolación de los mismos, finalizando con una posterior reconstrucción de la serie temporal en el punto de vista relativo. El procedimiento empleado consistió en la toma de los datos experimentales en cada sector, para acto seguido, iniciar su tratamiento matricial en MatLab. La idea clave es que en cada punto de medida (que es fijo) se tiene la evolución temporal de una variable y lo que se pretende ahora es obtener la serie temporal de esa variable en dicho punto, pero sabiendo que a partir del instante inicial, el punto va a desplazarse con el giro de la máquina. Para ello, en el instante siguiente al inicial (un incremento en la discretización temporal), el dato que se necesita conocer corresponde exactamente con el valor de la variable en el instante anterior en un punto situado circunferencialmente “antes” del de referencia (esto es, en el sentido contrario al giro de la máquina) y a una distancia igual a lo que recorre tangencialmente la máquina en dicho incremental de tiempo. Como esa distancia no tiene porqué coincidir con la discretización circunferencial empleada, es necesario entonces realizar una interpolación circunferencial de los datos de partida. Si se repite este proceso hasta obtener la periodicidad impuesta por el paso de directriz en la nueva evolución temporal relativa, se habrá completado el cambio de referencia. Finalmente, el campo relativo promediado es obtenido a partir de la media de esa evolución temporal, esta vez a paso de álabe de estator, como corresponde a un observador que viaja anclado en el rotor (en el punto de vista relativo, un punto que gira con el rodete ve pasar directrices a la velocidad de giro de la máquina, en sentido opuesto al de rotación del rotor).

La figura 6.12 resume las características de la componente axial promediada para un observador en movimiento. En este caso, el efecto de las estelas de las directrices queda completamente filtrado y únicamente va a poder apreciarse el efecto potencial de bloqueo que introduce cada álabe en el patrón del flujo. En la configuración con *gap* inferior, a caudal nominal se aprecian unas zonas de máximos, separadas por una banda bastante gruesa, que va de cubo a punta, y que señala claramente cuál es la posición de los álabes en dicha posición arbitraria. Al reducir el caudal, el “ancho” de esas zonas de bloqueo aumenta, llegando a ser más importante esa zona que el resto de flujo que viaja a través de los canales del rotor. Si se observa a continuación el caso con *gap* inferior, se pone de relieve la importancia que el efecto de bloqueo de los álabes está introduciendo en el flujo. Ya a caudal nominal se forma un importante déficit de velocidad en la zona de punta para la posición de cada álabe. El desequilibrio entre la zona de bloqueo y la zona de paso por el canal se hace también más patente. A caudales bajos, el déficit de velocidad inicia un proceso de “nucleación”, concentrando la principal zona de paso del flujo en unas estructuras circulares muy definidas en la posición radial media.

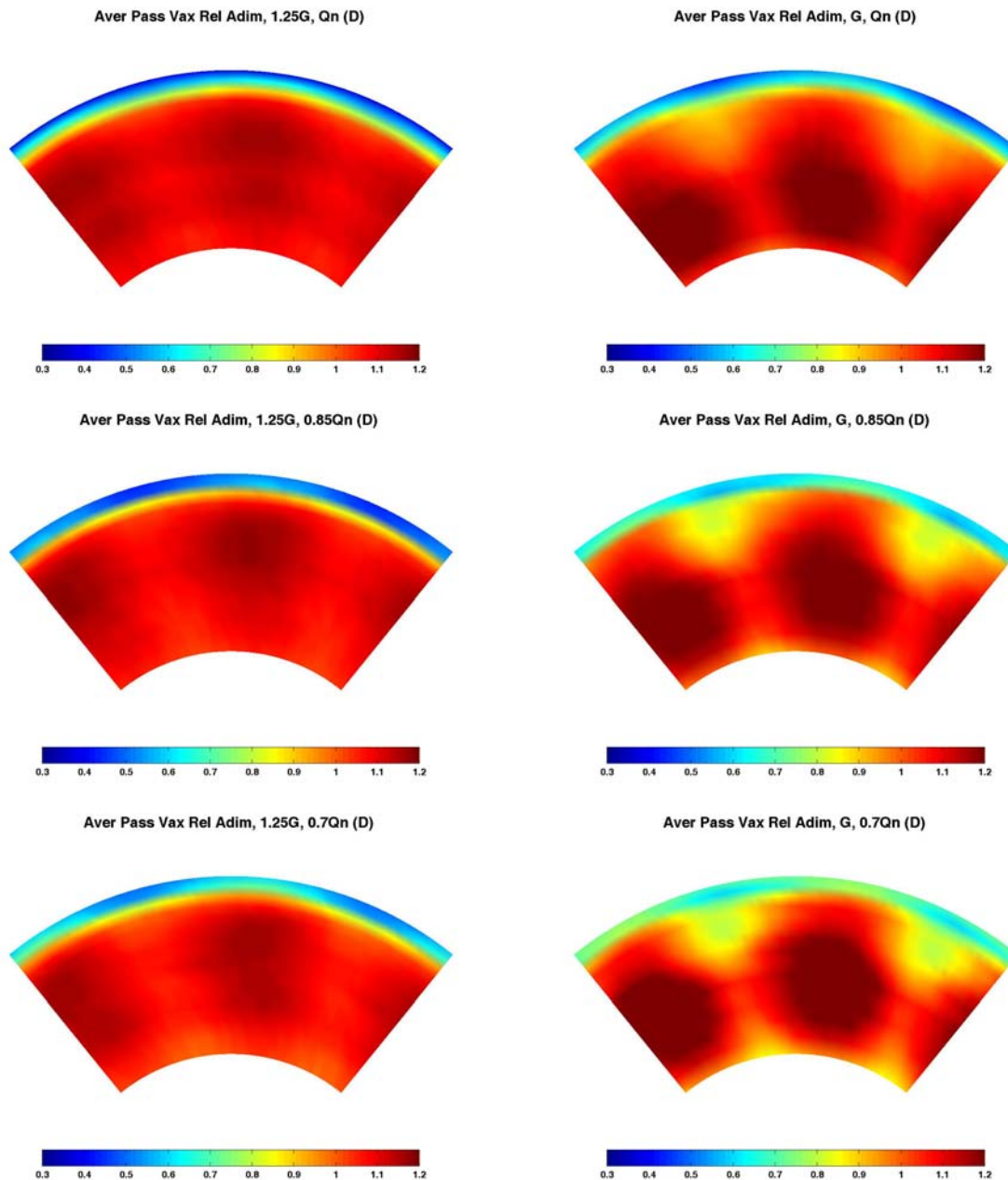


Fig. 6.12. Componente axial de la velocidad para el marco de referencia del rotor (relativo) en la zona entre haces (D). Vista de dos sectores de rodete.

Estos “núcleos” de muy baja velocidad son los responsables de que aparezca toda una banda tangencial de poca velocidad tras los haces fijos en los mapas de la figura 6.8. Dichos núcleos viajan con los álabes del rotor, y al interactuar con las estelas de las directrices, amplifican el efecto de déficit de velocidad. Ese efecto de disminución de la velocidad, aunque alcanza su máximo cuando coinciden la estela y el paso del álabe, se mantiene activo tanto antes de que pase el álabe como unos breves instantes después. Por esta razón, en la figura 6.9, aun habiendo promediado a paso de álabe, se observa esa “nucleación” como un efecto asociado a la cara de succión de las directrices.

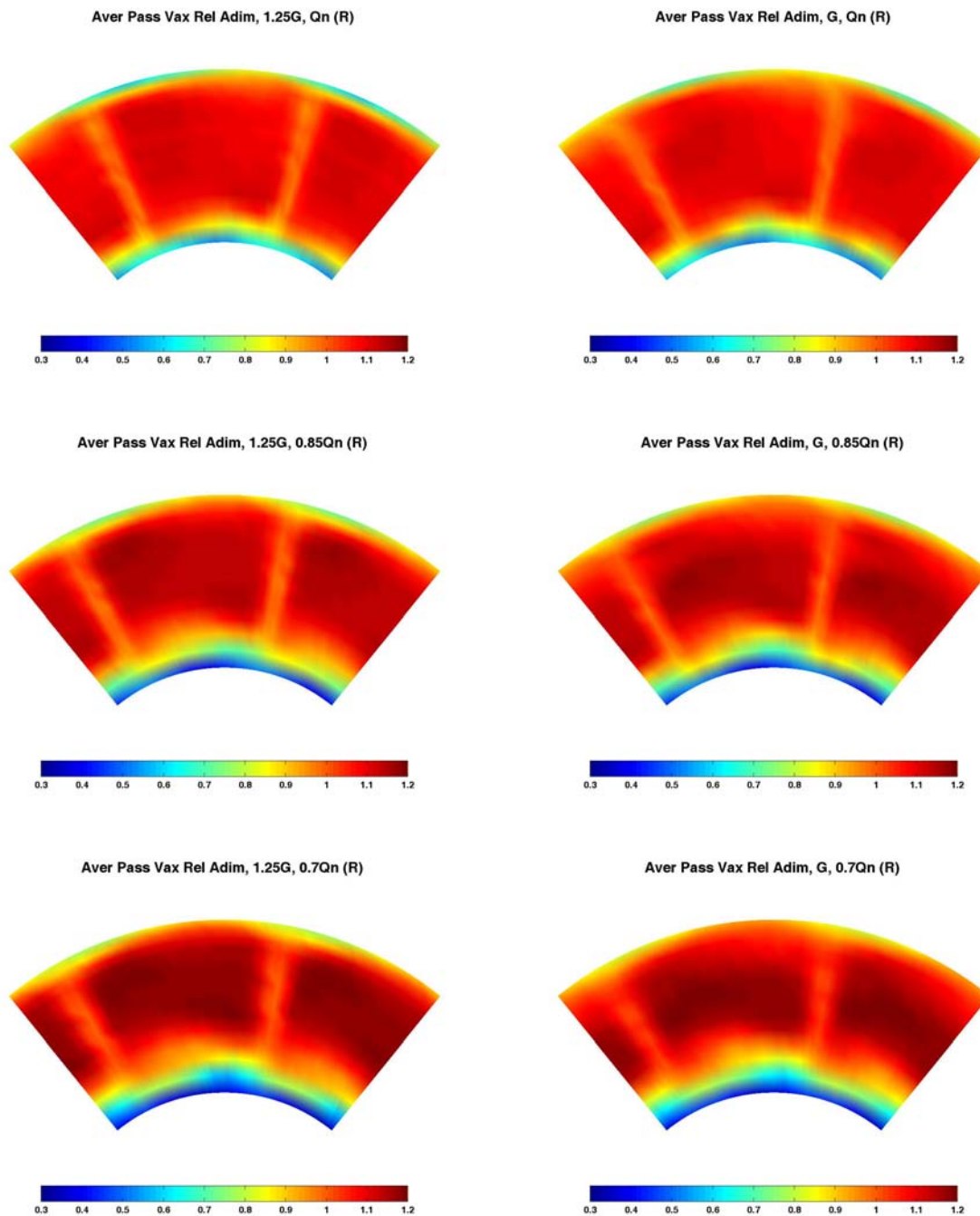


Fig. 6.13. Componente axial de la velocidad para el marco de referencia del rotor (relativo) en la zona aguas abajo del rodete (R). Vista de dos sectores de rodete.

La figura 6.13 permite observar cómo es la estela desprendida desde los álabes del rodete. El flujo mantiene una mejor uniformidad tangencial para los caudales de diseño, volviéndose más desordenado y con una capa límite en la zona de base mucho más gruesa cuando el ventilador trabaja a carga parcial. Asimismo, se pone de manifiesto el crecimiento de la capa límite de los álabes (ancho de estela) al reducir el caudal, corroborando los resultados sobre las superficies ábabe a ábabe del modelo numérico bidimensional que serán recogidos en la figura 6.19.

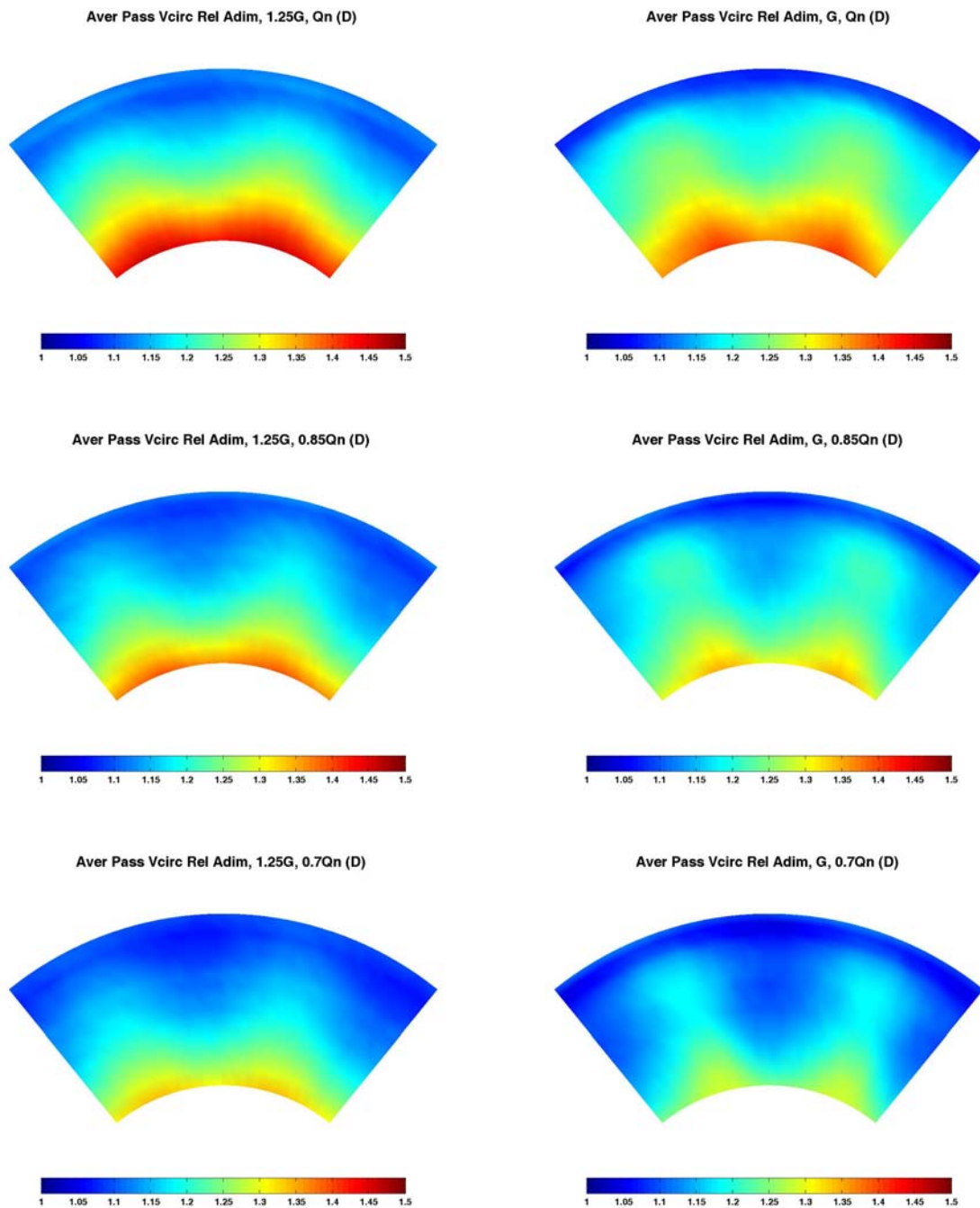


Fig. 6.14. Componente circunferencial de la velocidad para el marco de referencia del rotor (relativo) en la zona entre haces (D). Vista de dos sectores de rodete.

Se completa el apartado con los mapas relativos de la velocidad circunferencial tanto entre haces (figura 6.14) como tras el rodete (figura 6.15). La adimensionalización local realizada permite observar variaciones circunferenciales de la componente. Entre haces se vuelve a hacer presente el bloqueo con mayor repercusión, incluso en leves modificaciones de la estructura, mientras que en la zona tras el rodete se observa un importante desprendimiento en la zona de cubo.

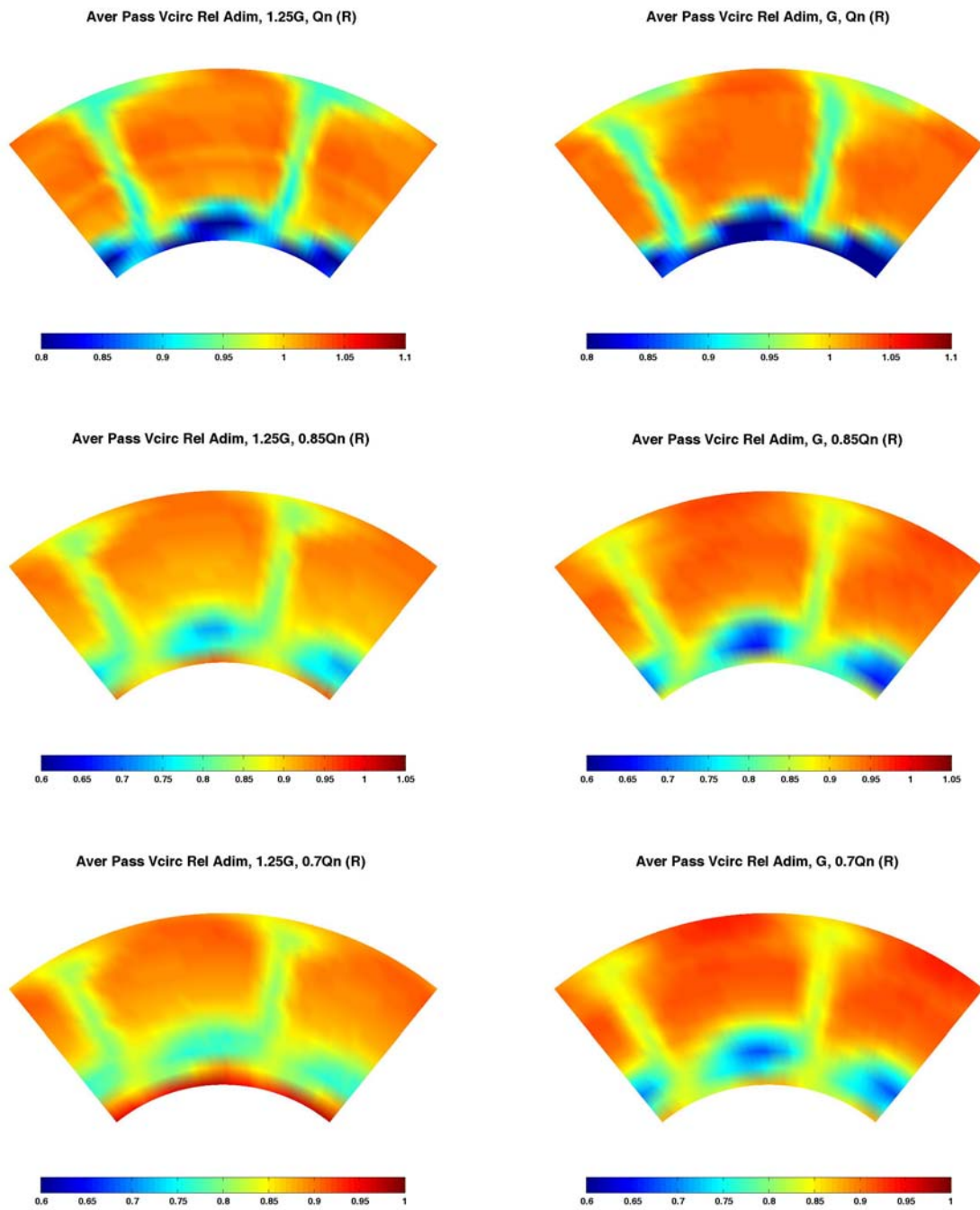


Fig. 6.15. Componente circunferencial de la velocidad para el marco de referencia del rotor (relativo) en la zona aguas abajo del rodete (R). Vista de dos sectores de rodete.



### 6.3.- RESULTADOS NUMÉRICOS

A continuación se exponen los resultados más relevantes que se han obtenido a partir de la resolución numérica del flujo en el interior de la soplante de estudio, tanto para el modelo bidimensional como el tridimensional.

#### 6.3.1.- Modelo bidimensional.

Se comienza mostrando resultados de los mapas de velocidad absoluta y relativa promediados en el tiempo (*"Passage-averaged"*). Para ello, se han aplicado las ecuaciones (5.19) y (5.21), en su definición discreta, sobre el conjunto de los mapas instantáneos de velocidad calculados por la simulación no estacionaria. Se muestran para los seis casos de estudio, agrupados a su vez para las tres secciones bidimensionales modelizadas. De forma general, tanto los mapas de velocidad absoluta como los de relativa en este apartado de resultados numéricos bidimensionales se han adimensionalizado por la velocidad de arrastre de los álabes en cada sección.

El hecho de modelizar la turbulencia, permite que aunque la simulación sea no estacionaria, los resultados instantáneos sean análogos a haber realizado un promediado de datos de cada posición relativa entre haces para muchas vueltas de rotor. Esto es, libera de ejecutar un promediado de cada fase, tal y como debe hacerse a partir de datos experimentales con el objetivo de eliminar la turbulencia. Ahora bien, la generación de resultados promediados en el tiempo requiere la elaboración del campo promedio a partir de los resultados instantáneos de cada una de las fases, o posiciones relativas intermedias entre haces. Si se busca el campo de velocidad absoluto, basta con ejecutar el promedio a paso de álabe de rotor. En el caso de calcular la velocidad en el marco de referencia relativo, entonces el promedio ha de hacerse como si el observador viajara con el rotor, promediando entonces para paso de álabe de estator.

La ejecución de ambos promedios se ha llevado a cabo a partir de la implementación de una UDF de postproceso capaz de hacer la media de las colecciones de mapas instantáneos almacenados, bien sobre 26 pasos temporales (marco de referencia fijo), bien sobre 18 pasos temporales (marco de referencia móvil). Este hecho implica que el número de pasos temporales totales en los que la rotación de la máquina va a desarrollar un giro completo, no es algo del todo arbitrario. Evidentemente, debe ser un número suficientemente elevado como para que la discretización temporal sea adecuada, pero además ha de buscarse de tal manera que sea múltiplo tanto del número de directrices como del número de álabes. Así se consigue que tanto un canal de directrices como un canal de rodete, sea cubierto durante la simulación en un número entero de pasos temporales, pudiendo efectuarse la media de forma directa, sin necesidad de extrapolaciones. En este caso, la discretización temporal empleada de 234 pasos temporales por vuelta de rotor (en bidimensional, deslizamiento completo del perímetro del dominio del rotor a lo largo de la interfaz con el estator), es un valor múltiplo de trece y de nueve que garantiza este hecho.



### Marco de referencia del estator

La figura 6.16 muestra resultados de la velocidad absoluta en la sección de base, la figura 6.17 en la sección central y la figura 6.18 en la sección de punta. Para cada figura se ha mantenido una escala constante para poder comparar los casos agrupados por caudales. Cabe reseñarse que los máximos de las escalas (1.4 *-hub-* ; 0.8 *-midspan-* ; 0.6 *-tip-*) se ven reducidos en la dirección radial como consecuencia del menor peso que el bloqueo físico de las directrices van teniendo progresivamente sobre la sección total de paso del flujo.

Se ha centrado el análisis sobre la zona de interacción entre haces, por lo que se muestran los mapas en la zona de estela del estator. Diversos factores, tales como el punto de funcionamiento, la sección considerada o el *gap* axial han sido recogidos, llevando a las siguientes conclusiones acerca de las características del flujo promedio:

- La corriente se defleca suavemente en todas las situaciones y merced a la aceleración del flujo al paso por el estator, el gradiente de presión favorable controla el crecimiento de las capas límites de las directrices, que resultan ser extremadamente delgadas, por lo que las estelas desprendidas también presentan un fino espesor. Se aprecia que la longitud de las estelas es superior en la sección de base, reduciéndose conforme se sube a lo largo de la envergadura.
- En lo que se refiere al guiado de la corriente, se observa una leve desviación respecto de la deflexión geométrica impuesta por las directrices. Esta desviación parece ser más importante cuanto más se aleja el funcionamiento de la soplante respecto de su punto nominal.
- La carga aerodinámica de los álabes se va retrasando progresivamente según se sube radialmente por la envergadura de los mismos. Así, en la sección de cubo, la zona de alta velocidad, región con mayor cantidad de movimiento en la cara de succión de los álabes, queda próxima al borde de salida. Por el contrario, para la sección de punta, el máximo se sitúa aproximadamente a la mitad de la cuerda, acercándose al *leading edge* del perfil. Esta característica, muy apreciable para los casos a caudal nominal, se antoja clave para entender las condiciones del flujo de entrada al rotor aguas abajo en función del *gap* de la etapa. Como puede observarse en la figura 6.18, el flujo es extremadamente uniforme entre estelas, en toda la zona entre haces, así que la distancia entre las coronas resulta ser un factor menos condicionante que en el resto de secciones.
- Lógicamente, al reducir la separación entre haces, se fuerza a que la longitud de las estelas sea más pequeña. Esto se puede apreciar en mayor o menor medida para todos los caudales representados en las figuras 6.16 a 6.18.



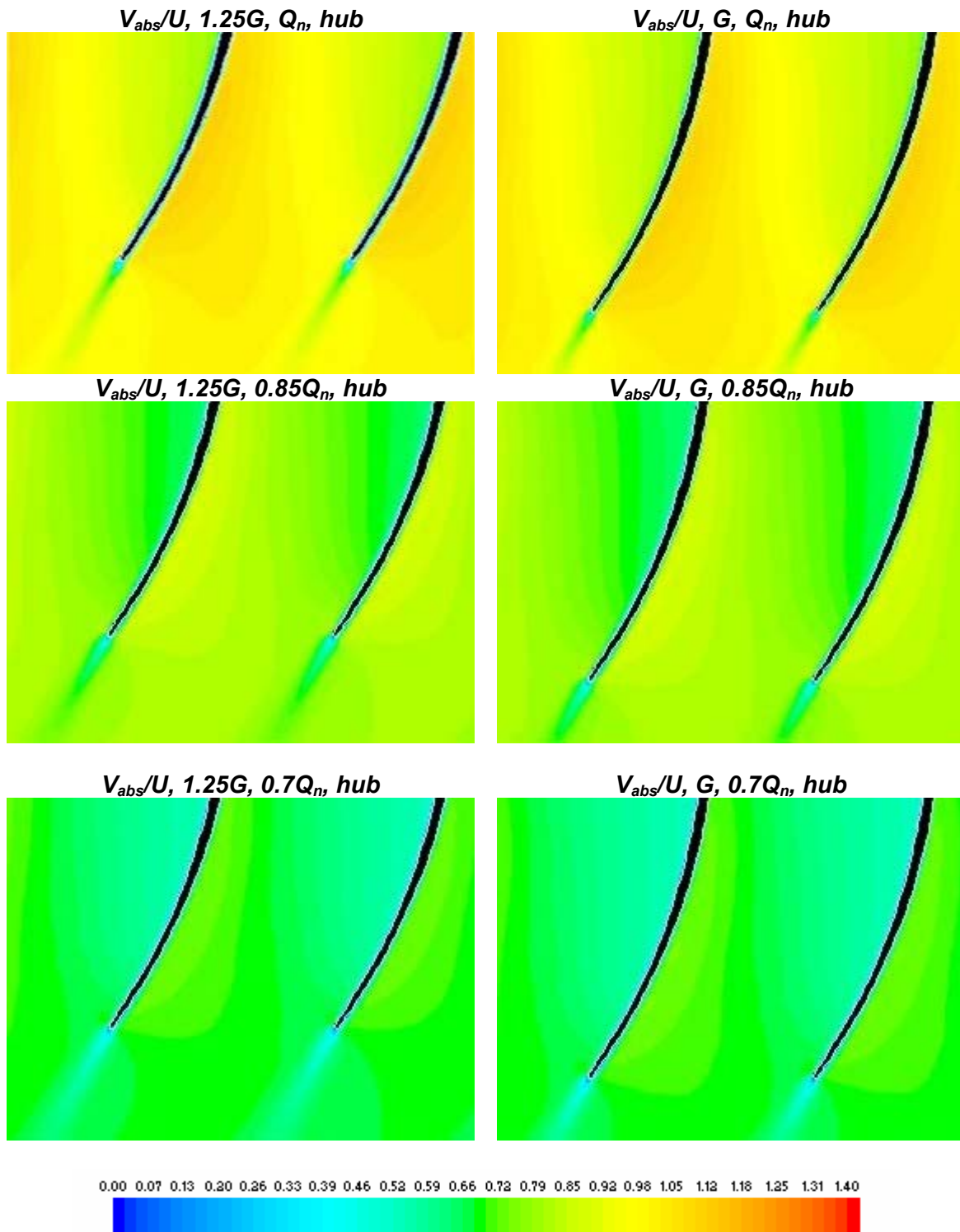


Fig. 6.16. Mapa de la velocidad absoluta promediada a paso de álabe de rotor, adimensionalizada por la velocidad de arrastre en la punta, en la sección de base sobre el estator.

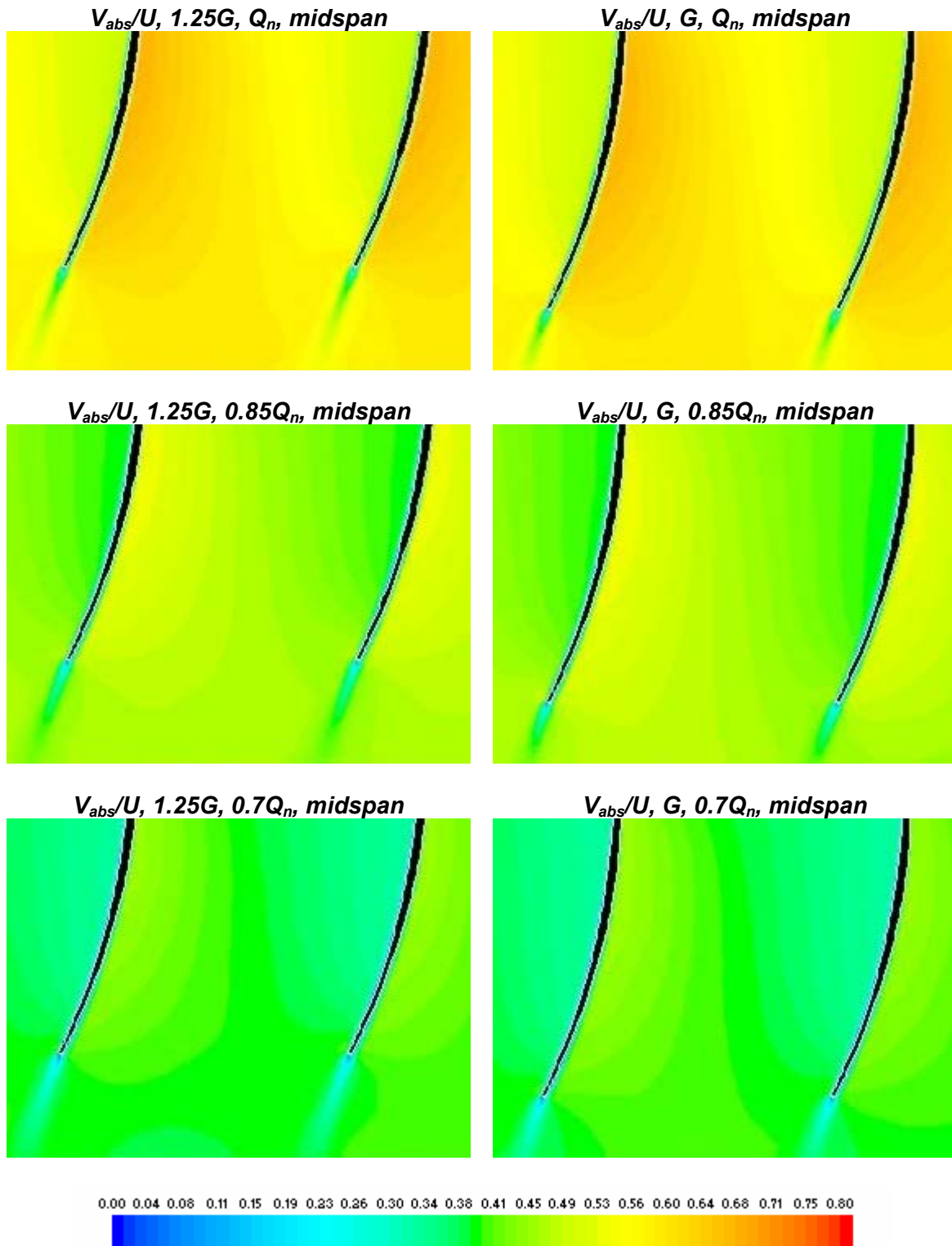


Fig. 6.17. Mapa de la velocidad absoluta promediada a paso de álabe de rotor, adimensionalizada por la velocidad de arrastre en la punta, en la sección media sobre el estator.

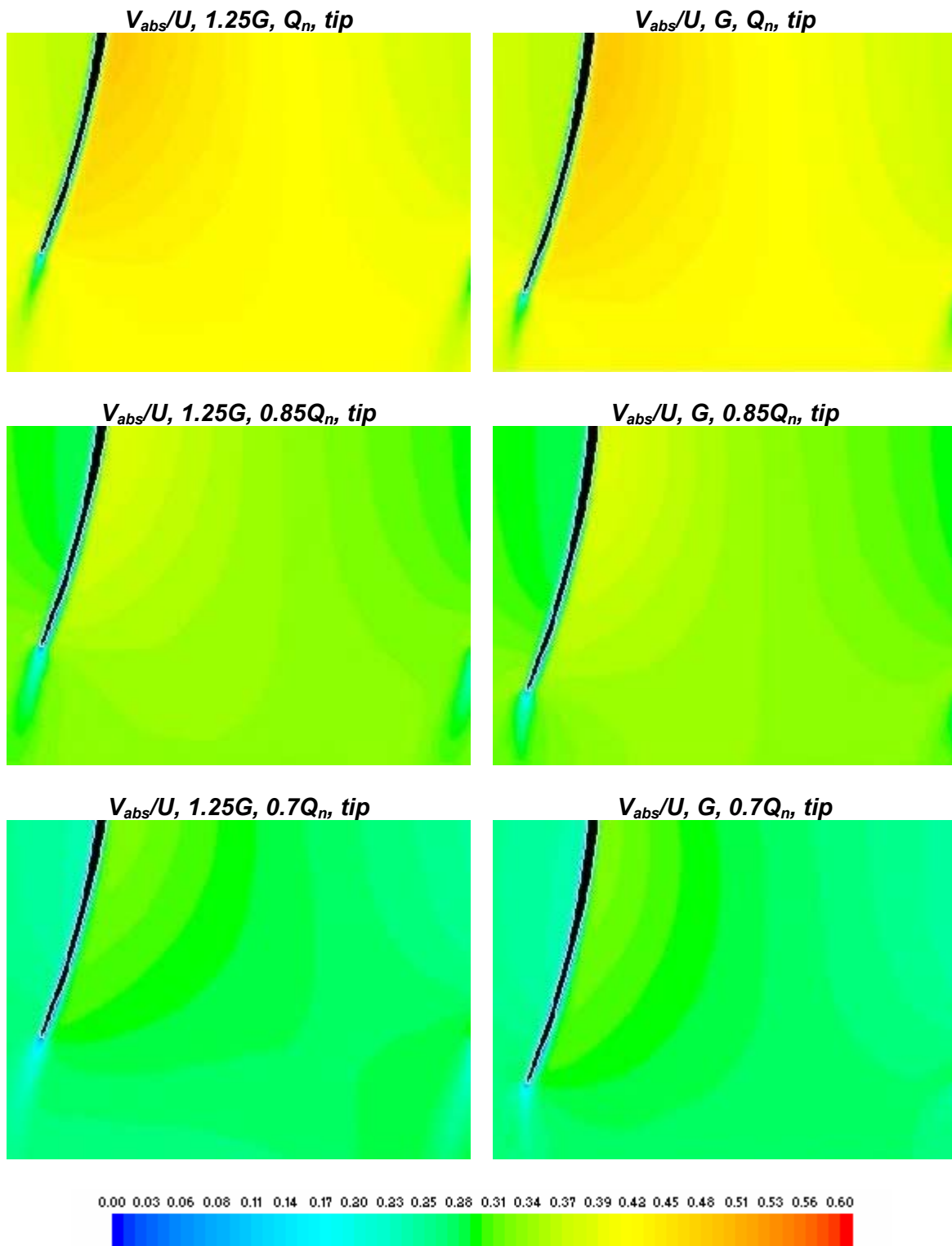


Fig. 6.18. Mapa de la velocidad absoluta promediada a paso de álabe de rotor, adimensionalizada por la velocidad de arrastre en la punta, en la sección de punta sobre el estator.



Marco de referencia del rotor

En las figuras 6.19, 6.20 y 6.21 se muestra la velocidad relativa en la zona de rotor promediada a paso de directriz, calculada de forma análoga al marco de referencia absoluto mostrado anteriormente.

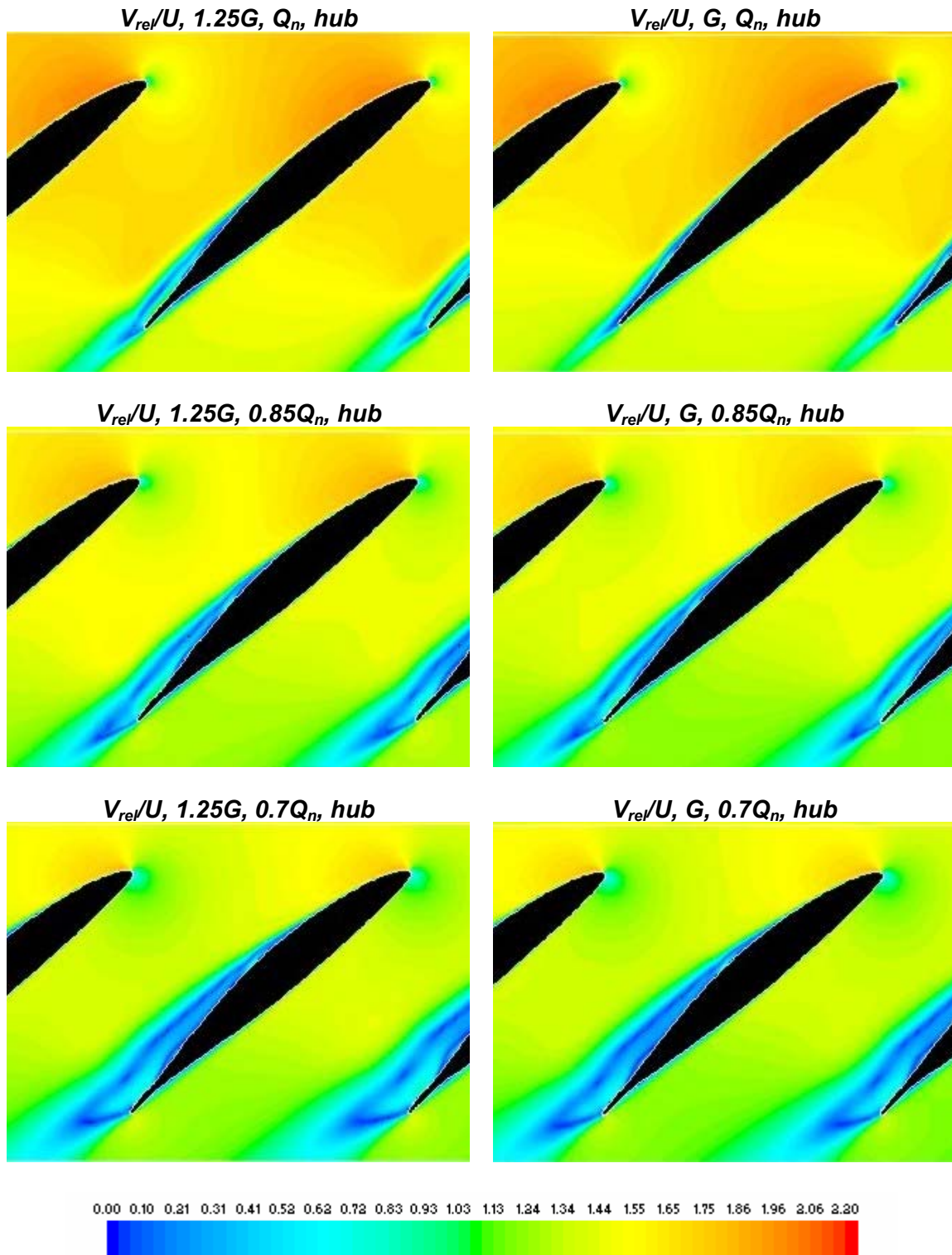


Fig. 6.19. Mapa de la velocidad relativa promediada a paso de álabes de estator, adimensionalizada por la velocidad de arrastre en la punta, en la sección de base sobre el rotor.

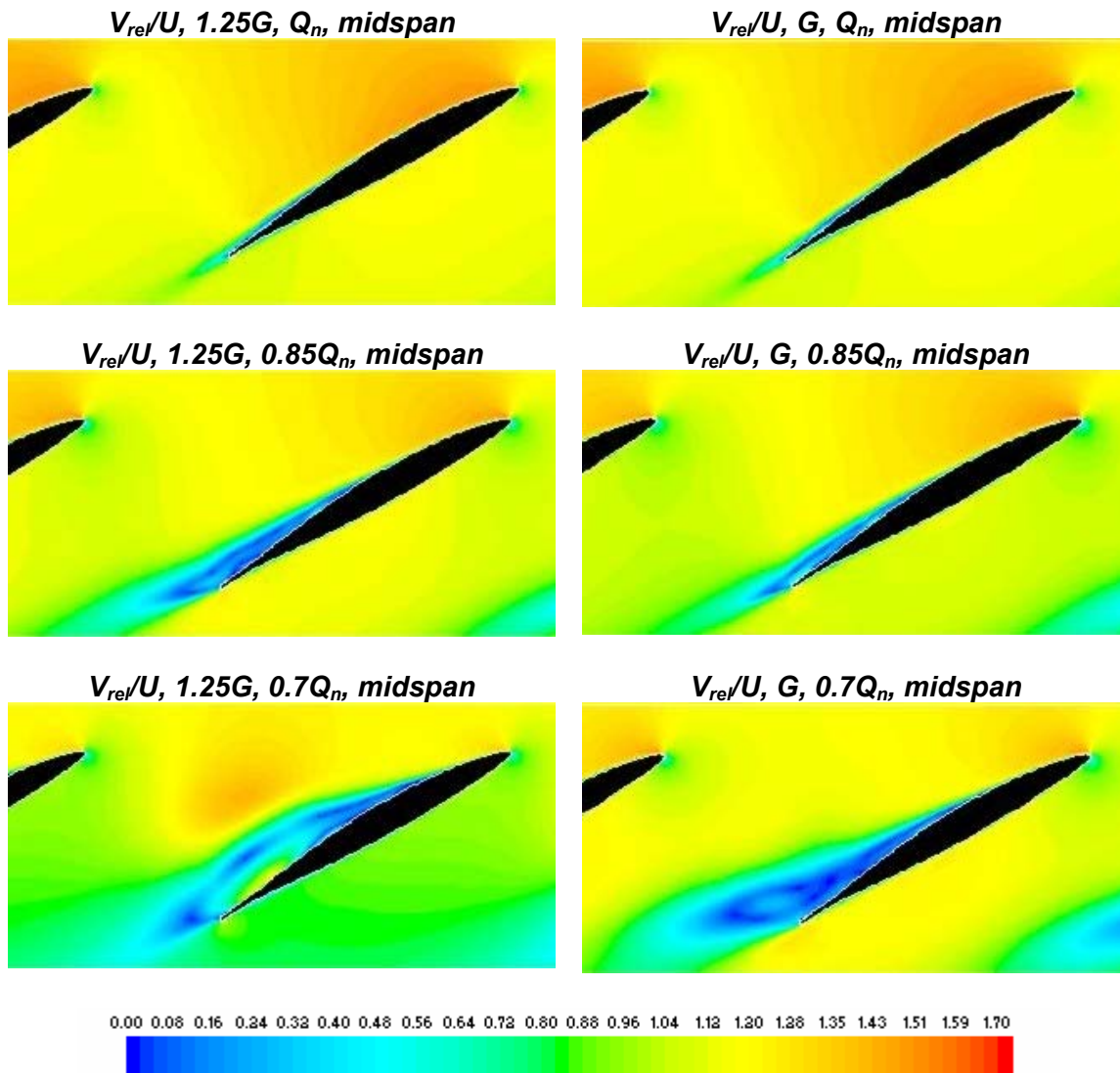


Fig. 6.20. Mapa de la velocidad relativa promediada a paso de álabe de estator, adimensionalizada por la velocidad de arrastre en la punta, en la sección media sobre el rotor.

Los resultados mostrados se agrupan para cada sección, mostrando los resultados numéricos conseguidos en cada caudal para los dos *gaps*. Nuevamente, se ha utilizado una escala general en cada sección para apreciar con más claridad los cambios producidos en cada caudal de estudio. Nótese cómo de nuevo el mayor bloqueo de los álabes en la zona de base obliga a una mayor velocidad de paso (mayor rango de escala) como consecuencia de la importante reducción de sección asociada a dicha zona.

Como características más destacables se pueden citar:

- En general, las estelas desprendidas por los álabes del rotor son más anchas en la zona de base que en la zona de punta, como consecuencia de una mayor curvatura y un mayor grosor de los álabes. Además, las estelas son sensiblemente más pronunciadas que las desprendidas desde el estator y se ven mucho más condicionadas por el punto de funcionamiento. Lógicamente, para



caudales más bajos, las estelas presentan un ancho superior, debido a un adelanto del punto de desprendimiento. Las importantes reducciones de caudal conllevan ángulos de ataque cada vez mayores y, por tanto, una progresiva pérdida en las prestaciones del perfil.

- La reducción de caudal en cada sección conlleva asimismo un adelanto de la zona de máxima carga aerodinámica, que termina por estar completamente concentrada en la zona del borde de ataque para los caudales más bajos. Del mismo modo, el punto de estancamiento va creciendo al ir reduciéndose el caudal de trabajo.
- No se aprecian apenas diferencias sobre el campo promediado para el rotor entre las dos situaciones con *gap* axial diferente. Si acaso, se puede adivinar un mayor espesor de las estelas para el *gap* superior, pero en la zona del borde de ataque no se observa cambio alguno.

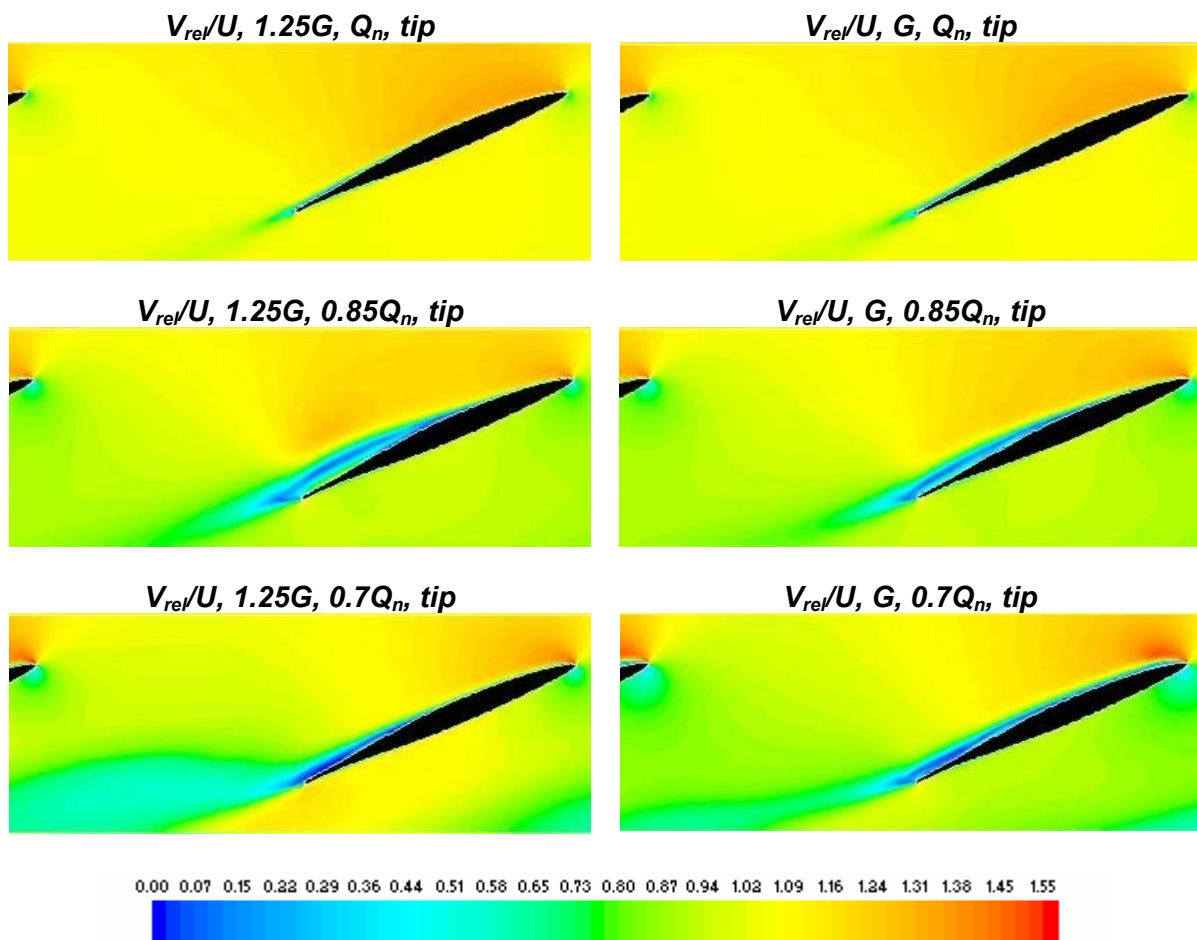


Fig. 6.21. Mapa de la velocidad relativa promediada a paso de álabe de estator, adimensionalizada por la velocidad de arrastre en la punta, en la sección de punta sobre el rotor.



### 6.3.2.- Modelo tridimensional.

En lo referido a la simulación tridimensional, se ha optado por mostrar representaciones transversales, para aprovechar la potencialidad que la dirección radial añade al estudio. De hecho, no se van a mostrar representaciones álabe a álabe, que servirían como contraste a los resultados del modelo bidimensional, pero que aportarían menor precisión como consecuencia de una menor discretización espacial del modelo 3D frente a su hermano bidimensional. Por el contrario, la representación de los mapas de velocidad en sectores análogos a los medidos experimentales, servirá como un perfecto método para validar y contrastar los esfuerzos computacionales realizados respecto de esas medidas experimentales.

Para todos los mapas representados, correspondientes a los sectores D y R, nuevamente se ha de tener presente que el lector observa los campos de velocidad como si estuviese situado aguas abajo de los mismos; esto es, se está mirando a la máquina desde el plano de salida de la misma.

#### 6.3.2.1.- Ecuación de Euler y grado de reacción.

La figura 6.22 aporta distribuciones radiales de la ecuación de Euler y del grado de reacción para poder establecer la comparación con las de la figura 6.7. Los casos analizados se agrupan de la misma forma, representando las curvas con los mismos criterios que los descritos en el apartado 6.2.2.1.

En el caudal de diseño la distribución radial del incremento de presión es prácticamente constante, como era de esperar, ya que dicho resultado deriva directamente de la condición impuesta de diseño de vórtice libre (*ver apartado 1.3.4.1*). Solamente en las zonas de capa límite se tiene una cierta deriva respecto de ese patrón. Como puede apreciarse, no hay diferencias entre ambos *gaps*, en lo que se refiere a prestaciones globales, como ya se había comprobado experimentalmente al obtener la curva característica de la máquina en ambas situaciones. El valor medio ronda los 1350 Pa, lo cual quiere decir, que a la vista de los 1175 Pa de incremento total que ofrece la máquina para toda la etapa (figura 6.2), se están perdiendo del orden de 200 Pa en el estator. Cuando se reduce el caudal, obviamente el valor medio aumenta, observándose además una cierta tendencia a dar más presión desde la base a la punta.

Respecto al grado de reacción, en el caso de caudal nominal, se tiene un acuerdo muy bueno con la distribución que predice el modelo teórico (curva negra a trazos). Como era previsible, los valores son superiores a la unidad, en perfecta consonancia a los descritos en la figura 1.18 variando desde un valor de 1.05 en la punta hasta prácticamente 1.3 en la base de los álabes. Por el contrario, en los caudales inferiores se puede apreciar una sucesiva inversión de la distribución radial, que se completa en el caudal -30% del nominal, para el cual, se tiene mayor grado de reacción en las zonas de punta que en las del cubo. Asimismo, el valor medio del grado de reacción va disminuyendo con el caudal, pasando de estar por encima de la unidad en el caudal de diseño a rondar valores cercanos a 0.9 en el caudal más bajo.

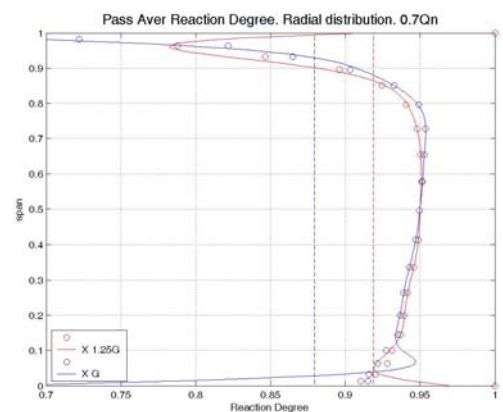
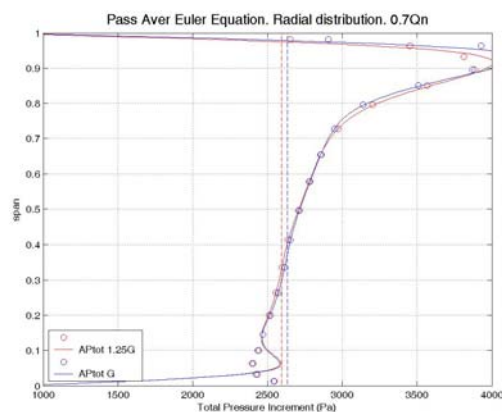
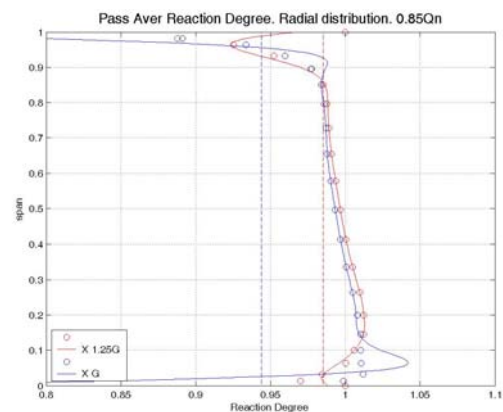
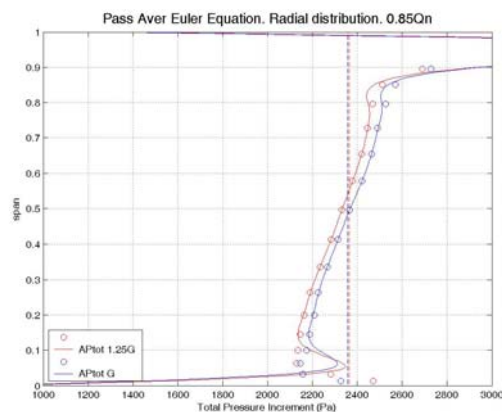
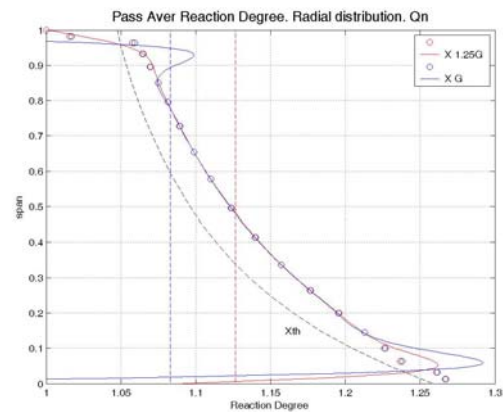
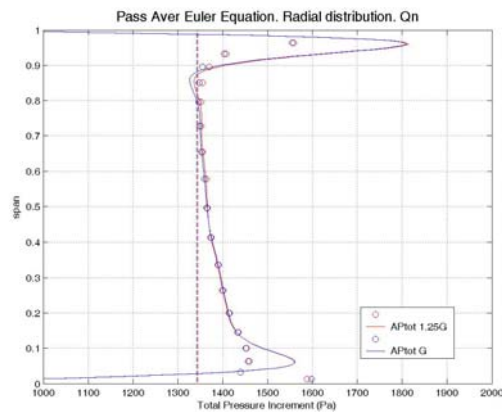


Fig. 6.22.1. Incremento de presión en el rodete para los tres caudales de estudio. Comparativa entre gaps.

Fig. 6.22.2. Grado de reacción en el rodete para los tres caudales de estudio. Comparativa entre gaps.

### 6.3.2.2.- Resultados promediados en el tiempo (“*Passage-averaged*”).

#### Marco de referencia del estator

Se mostrarán a continuación los resultados numéricos tridimensionales para el marco de referencia absoluto. La estructura seguida para la representación de los datos, común a todas las figuras de este apartado, consiste en agrupar para cada sector de análisis los seis casos de estudio (tres caudales para dos gaps). Exactamente de la





misma forma que fue estructurado el análisis para los resultados experimentales. Se van a analizar por separado las componentes axiales, circunferenciales y radiales de la velocidad, primero en la zona entre haces y a continuación aguas abajo del rodete.

La figura 6.23 muestra la componente axial de la velocidad, adimensionalizada por su valor medio en cada caso (esto es, en cada caudal) y promediada en el tiempo al paso de álabe del rotor; para una posición entre haces en el modelo numérico igual a la del sector D en las medidas experimentales. Se han representado dos sectores correspondientes a la longitud angular de dos pasos de canal de estator, para una mejor representación. Al haber realizado el promedio al paso de álabe del rotor, todo efecto inducido por éste queda filtrado en la representación. Por este motivo únicamente se aprecian características del flujo promedio asociadas a la presencia de las directrices aguas arriba. Como se observa claramente en todos los casos, la estela de las directrices es capturada perfectamente por la modelización. Asimismo, la zona de capa límite en cubo y punta también queda de manifiesto en las figuras. Cabe destacar el crecimiento que experimenta dicha capa límite en la zona de punta cuando el caudal de funcionamiento se va reduciendo progresivamente. En todas las figuras destaca la clara uniformidad del flujo en el sentido circunferencial, si bien para caudales nominales se aprecia una mayor velocidad del flujo en la zona cercana a la cara de succión de las directrices. Además, existe una clara tendencia a que el máximo de velocidad se sitúe muy cerca de la punta, efecto que se potencia para el caudal un 30% inferior al nominal, merced también a un mayor bloqueo inducido por el engrosamiento de la capa límite de punta.

Respecto a la figura 6.24, indicar que se está mostrando la misma magnitud que antes, si bien lo que se ha hecho es cambiar el plano de representación; en este caso, el sector aguas abajo del rotor. Además, se ha generado una imagen de todo el perímetro, en lugar de haber limitado la representación a un par de sectores únicamente. Nuevamente, el promedio realizado sobre la velocidad desde el punto de vista absoluto filtra todo efecto generado por el rodete, así que las únicas variaciones en el patrón de flujo son aquellas que había introducido el estator previamente. Tanto para el caso de *gap* superior como de *gap* inferior, en el punto de diseño se aprecian las estelas del estator previo una vez el flujo ha alcanzado la salida del rotor. En este punto, las estelas del estator no aparecen igual de concentradas y finas que entre las coronas, sino que el transporte y difusión del flujo, añadido a la modelización de la turbulencia que introduce el código numérico, ha hecho que su distribución espacial sea mucho más difusa que antes. En la zona de punta, las estelas aparecen más debilitadas, ofreciendo un flujo más uniforme, mientras que en la base el efecto de las estelas permanece más patente (probablemente, en esa zona las estelas dispongan de menos espacio para poder difundirse en la corriente media). Respecto a la diferencia entre *gaps*, en el caso de caudal -15% del nominal, sí parece que en el caso de *gap* reducido el efecto de las estelas permanece menos difuminado que en su homólogo superior. Finalmente, nótese cómo para el caudal más bajo el efecto de las estelas se ha perdido por completo tras el rodete. La captura de las estelas del estator aguas abajo del rodete es una clara contribución del esquema LES a la modelización, que permite una menor difusión numérica que un modelo más clásico como el RSM. Esto se verá en el próximo capítulo 7, cuando se analicen las bondades de cada modelo de turbulencia (ver apartado 7.3.1).

Sobre los casos numéricos a caudales bajos (tanto -15% como -30%) hay que señalar que no se tiene una perfecta periodicidad canal a canal. El motivo de esta



discrepancia reside en la generación de vórtices que incluye la modelización LES de la turbulencia. Esta generación de vórtices no estacionarios, que se ve incrementada al alejarse el punto de funcionamiento respecto del nominal, implicaría la necesidad de promediar a varios canales, algo que resultaría muy costoso en términos computacionales. Por esta razón, aunque el modelo es ejecutado en régimen estable de las variables globales de funcionamiento (presión total, caudal de la máquina), localmente van a aparecer inestabilidades aperiódicas del flujo.

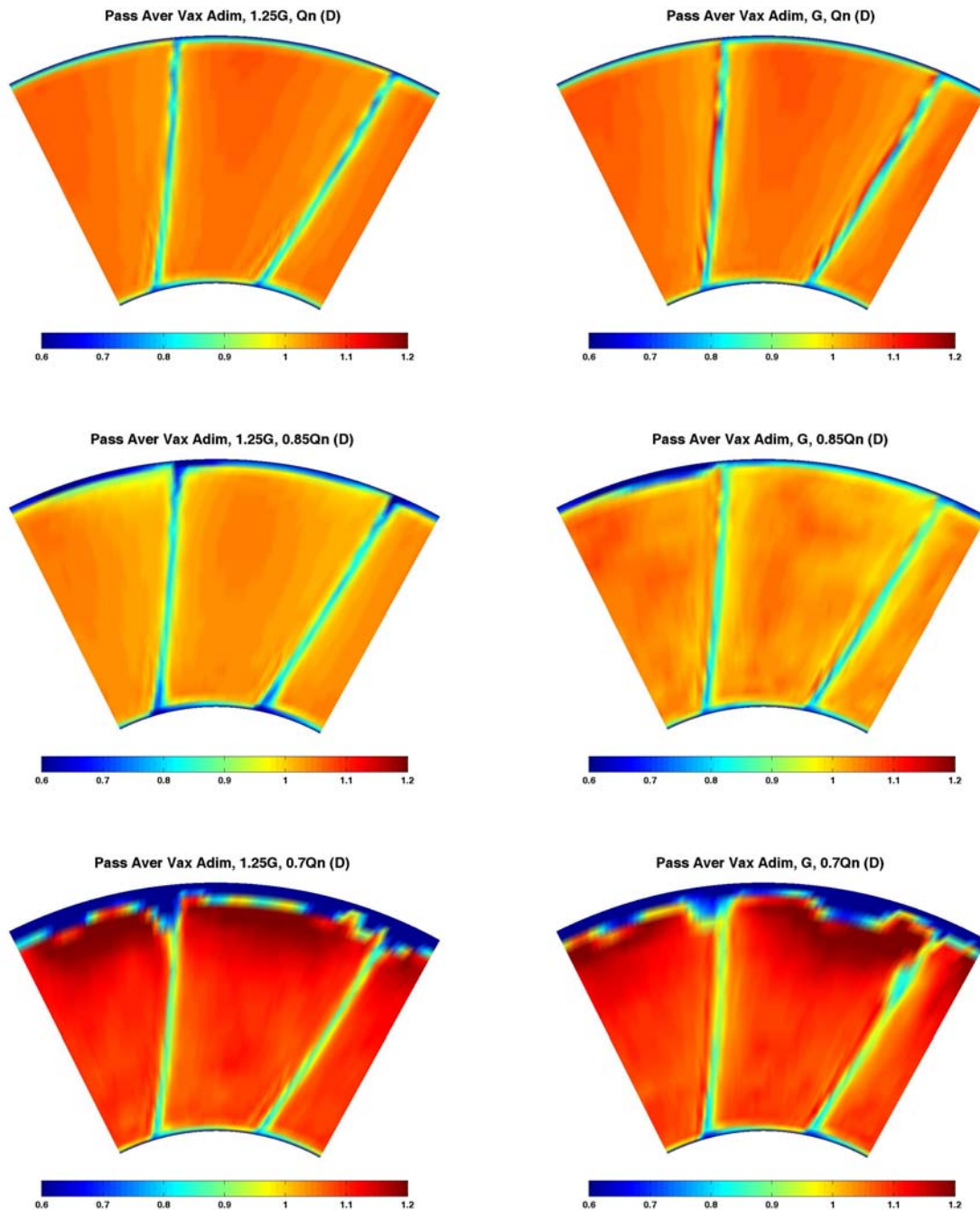


Fig. 6.23. Componente axial de la velocidad para el marco de referencia del estator (absoluto) en la zona entre haces (D). Vista de dos sectores de directriz.

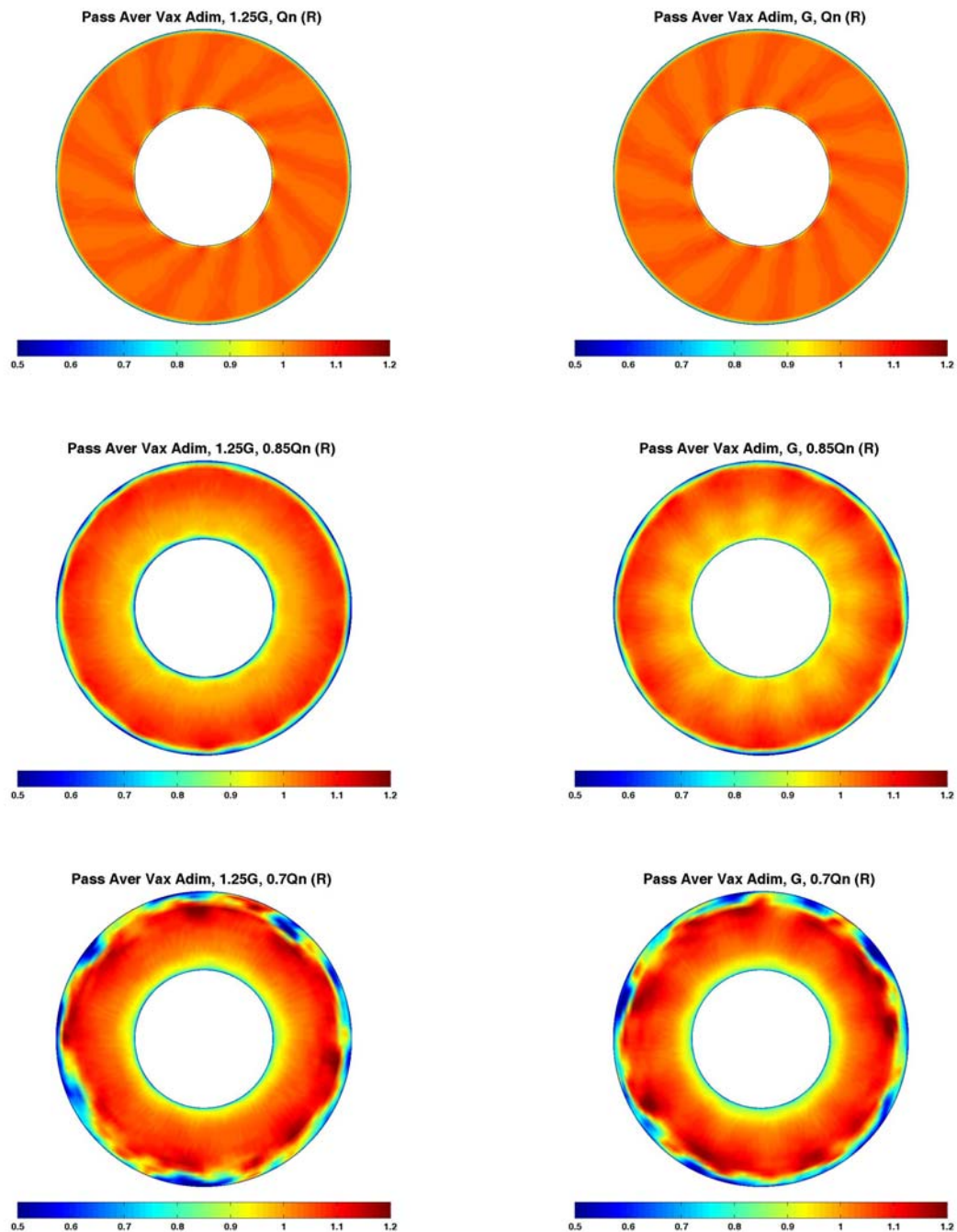


Fig. 6.24. Componente axial de la velocidad para el marco de referencia del estator (absoluto) en la zona aguas abajo del rodete (R). Vista completa de la soplante.

Las figuras 6.25 y 6.26 son análogas a las previas, pero esta vez representando la componente circunferencial de la velocidad, adimensionalizada por la velocidad de arrastre en la punta de los álabes. La figura 6.25 analiza el comportamiento de la componente tangencial en la zona entre haces de la soplante. Debido al retorcimiento radial de los álabes del rotor, las directrices sufren también una cierta torsión según su propia envergadura, de modo que se le pueda inducir a la corriente la prerrotación necesaria a la entrada del rotor. Estas razones geométricas imponen una mayor deflexión de las directrices en la base que en la punta, por lo que es lógico que la componente circunferencial sea mayor en el cubo que en la punta, como se desprende



de la figura 6.25 para el caso nominal. Como se puede comprobar, existe una importante uniformidad, rota únicamente por la presencia de las estelas de las directrices. En el caso del *gap* más reducido, la discontinuidad de las estelas se ve reforzada, apareciendo un déficit en el sentido radial que parece estar asociado a la cara de presión, y un aumento ligado a la cara de succión de dichas directrices. Para los caudales inferiores el patrón se repite, apreciándose un decaimiento de la magnitud como no podía ser de otra manera (menores caudales, menores velocidades; pero con el mismo coeficiente de adimensionalización).

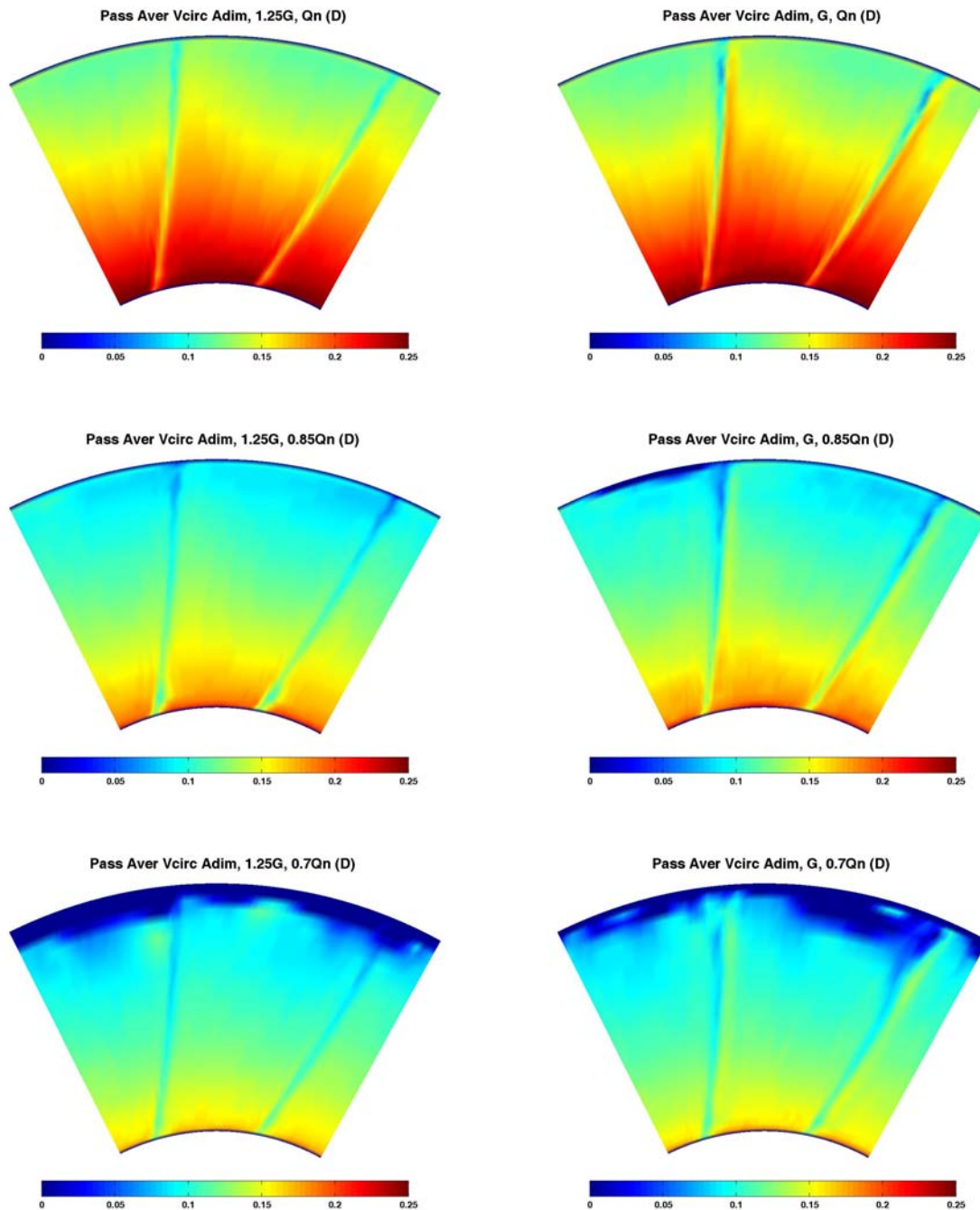


Fig. 6.25. Componente circunferencial de la velocidad para el marco de referencia del estator (absoluto) en la zona entre haces (D). Vista de dos sectores de directriz.



La figura 6.26 muestra la componente circunferencial tras el rotor. A primera vista, destaca cuán uniforme es para todos los casos analizados. En principio, la condición de diseño obliga a que la velocidad sea completamente axial a la salida del rodete en toda su envergadura radial, por imposición geométrica directa derivada de la condición de vórtice libre. Efectivamente, ambos *gaps* muestran un valor prácticamente nulo para el caudal nominal de la soplante. Se observa una leve “huella” dejada por las directrices, en la zona del cubo, pero se puede concluir que la uniformidad es total en todas direcciones. Para caudales inferiores, la componente circunferencial de la velocidad crece (lógico a partir de consideraciones cinemáticas de triángulos de velocidad), pero también presenta una clara uniformidad en todas direcciones.

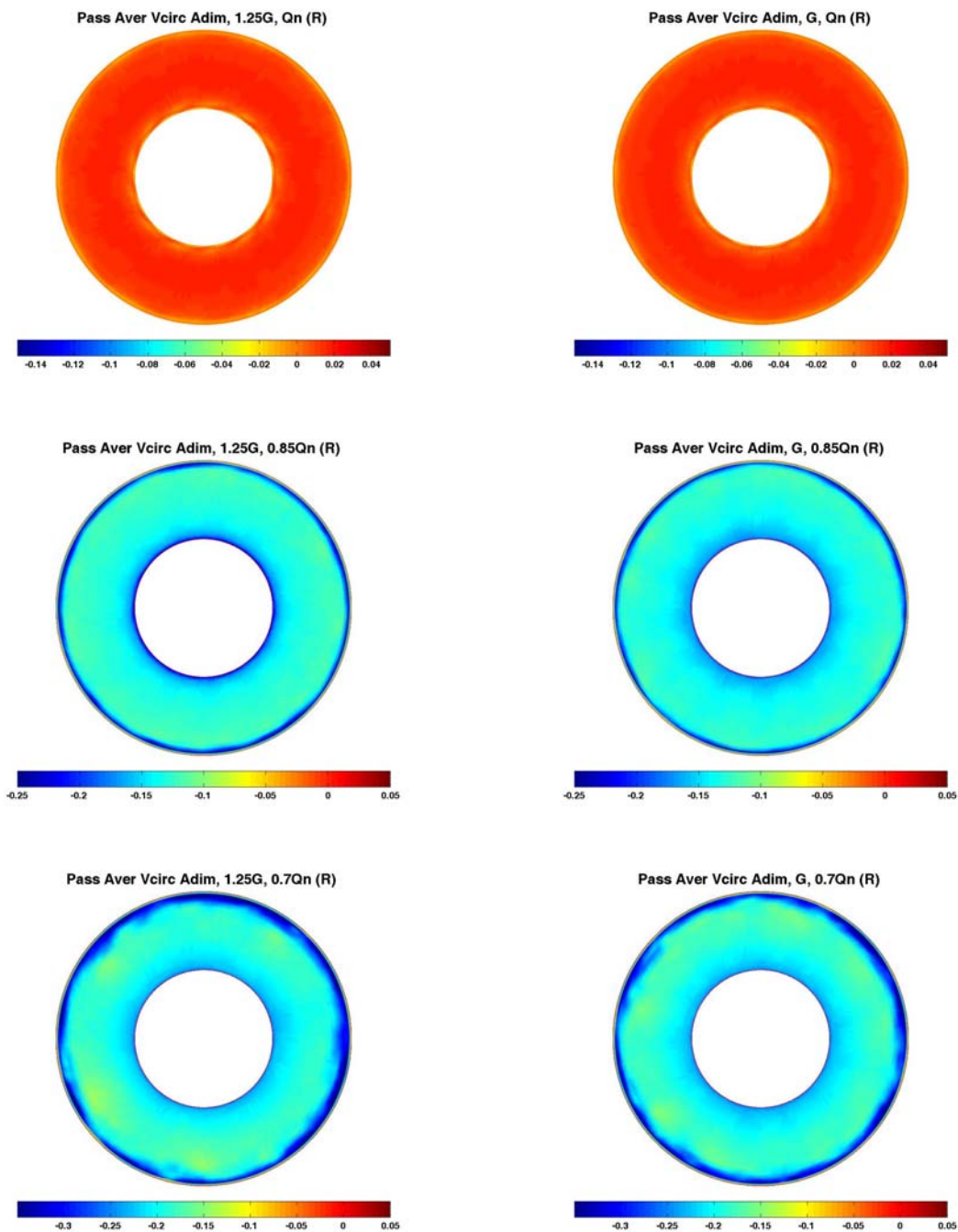


Fig. 6.26. Componente circunferencial de la velocidad para el marco de referencia del estator (absoluto) en la zona aguas abajo del rodete (R). Vista completa de la soplante.



A continuación se analiza el ángulo azimutal de la corriente, definido anteriormente en el apartado 6.2.1, y que da idea de la presencia de flujos secundarios en la dirección radial de la máquina. Este ángulo se calcula localmente (en cada punto) como relación entre las componentes radial y axial de la velocidad, y su signo informará de si el sentido de la corriente secundaria es bien hacia la punta o bien hacia el cubo. En la figura 6.27 se han marcado, sobre el caso de caudal nominal y *gap* superior, las trayectorias de las dos células de flujo secundario que se establecen a la salida del estator, de forma análoga a cómo predice la teoría de flujo tridimensional de la figura 1.24. La curvatura de las directrices es contraria a la que se muestra en la corona de la figura 1.24, por lo que el sentido de giro de las corrientes cambia.

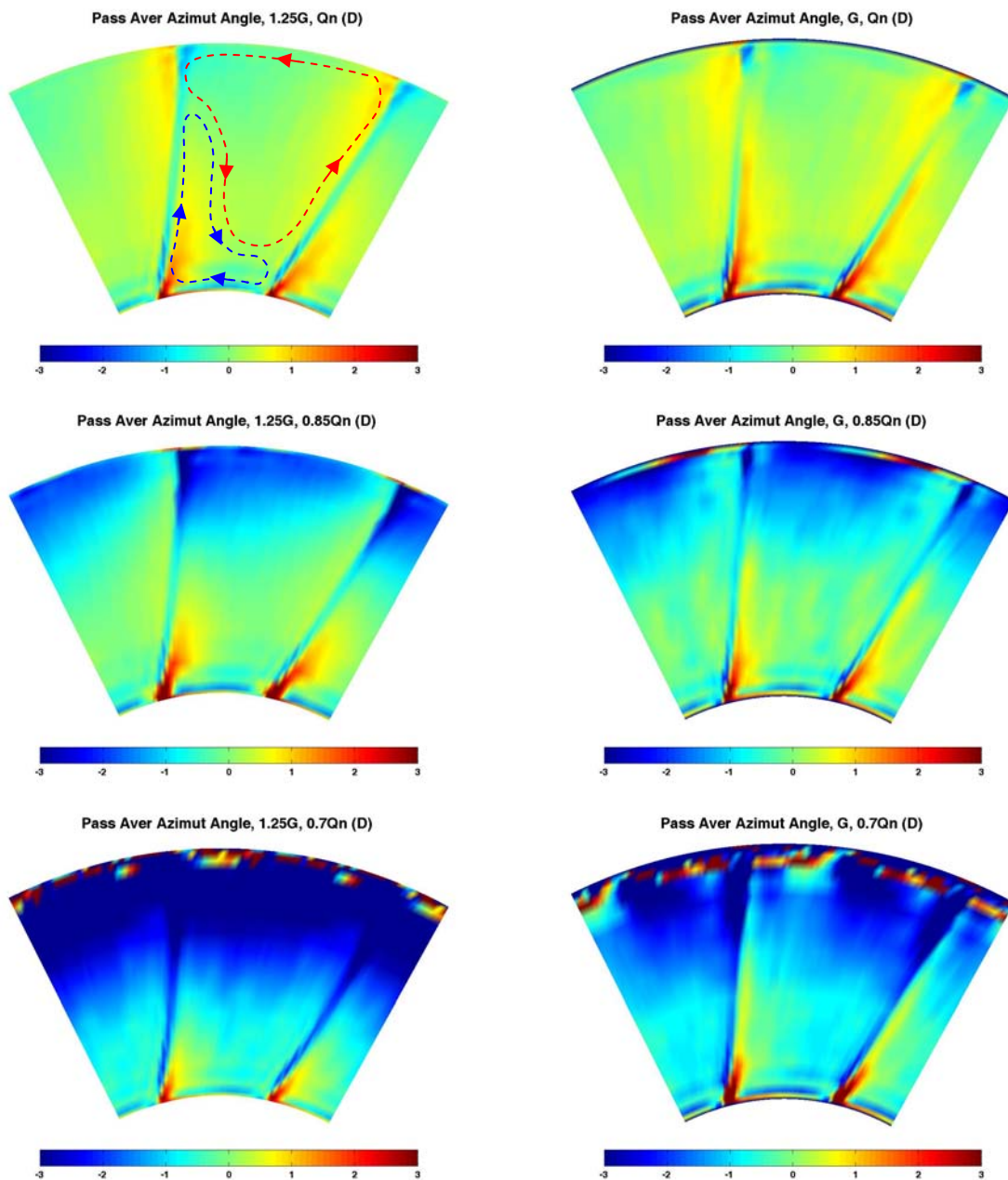


Fig. 6.27. Ángulo azimutal de la velocidad para el marco de referencia del estator (absoluto) en la zona entre haces (D). Vista de dos sectores de directriz.



Este tipo de flujos secundarios contribuyen con la existencia de una no-estacionariedad adicional, de menor importancia que la provocada por el flujo principal, pero cuyos efectos podrán ser aún percibidos a la salida del rotor, al analizar este ángulo promediado en dicha zona. En general, las corrientes son pequeñas (del orden de  $3^\circ$  de desviación azimutal), como no podía ser de otra manera al haber diseñado la etapa bajo la condición de equilibrio radial por vórtice libre. Conforme se reduce el caudal, la célula superior aumenta de tamaño en cada canal, reduciéndose de forma muy importante la corriente ascendente por la cara de succión de las directrices. Respecto a la variación del *gap*, al reducir éste, el bloqueo del álabe a la corriente principal aumenta, favoreciendo que parte del flujo se vea obligado a escapar radialmente, y aumentando por tanto el flujo secundario en cada una de las células.

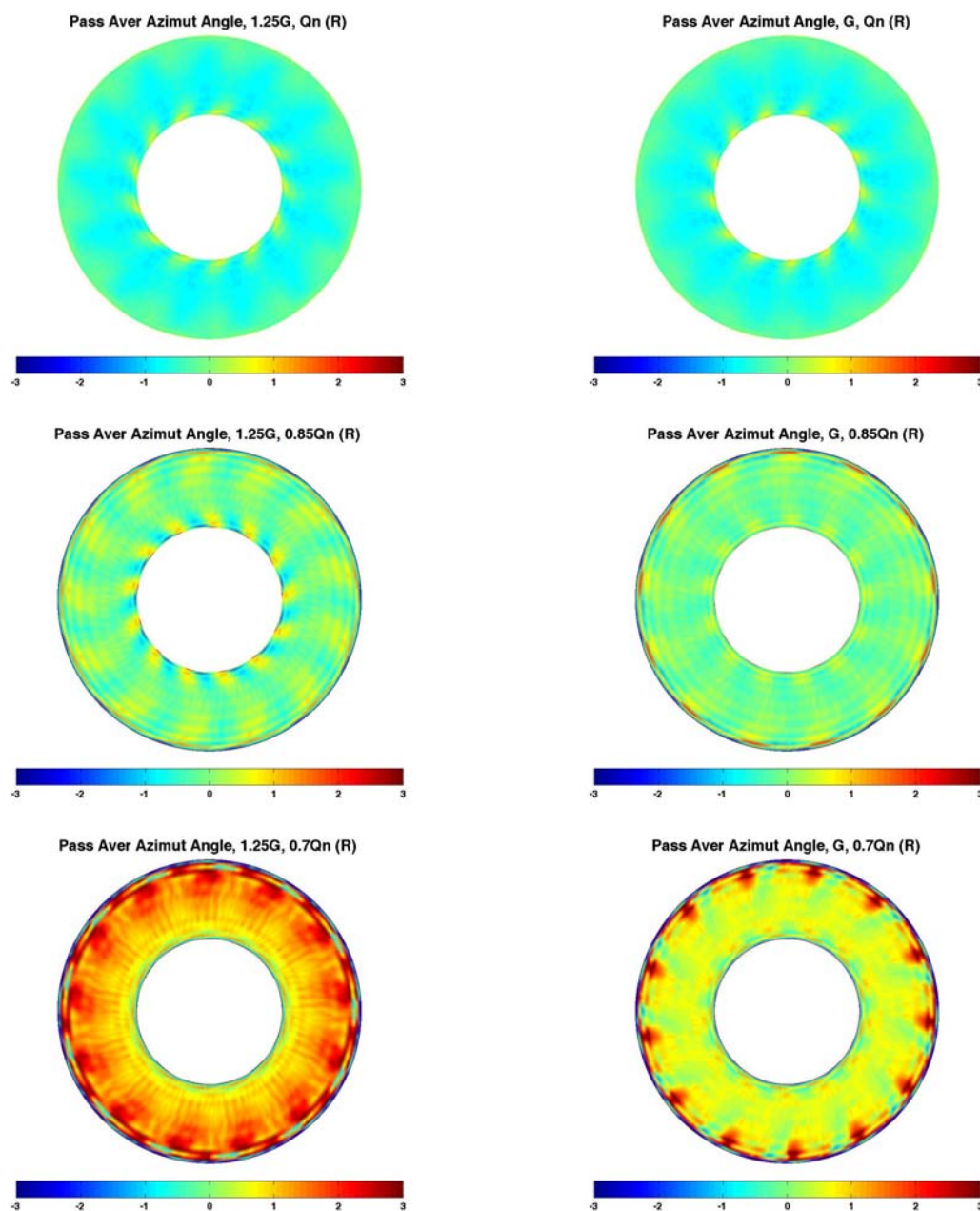


Fig. 6.28. Ángulo azimutal de la velocidad para el marco de referencia del estator (absoluto) en la zona aguas abajo del rodete (R). Vista completa de la soplante.



En la figura 6.28 se observan los residuos de los vórtices generados previamente por las corrientes secundarias radiales, sobre todo en la zona de succión de las directrices. Se ha hecho una representación global de toda la soplante para apreciar de forma más clara la existencia de trece estructuras vorticales heredadas del flujo tras las directrices. A cargas parciales del ventilador, el flujo principal deja de estar equilibrado, volviéndose éste mucho más desordenado y favoreciendo el incremento de flujos secundarios a la salida del rodete.

Finalmente, se completa el estudio del flujo en el marco de referencia absoluto con la inclusión de mapas de vorticidad en las secciones de interés, adimensionalizada por la velocidad de giro del rotor. En la figura 6.29 se puede apreciar una clara estructura núcleo-estela, de forma que salvo en la zona de estelas, la vorticidad es prácticamente nula en todo el ancho del canal.

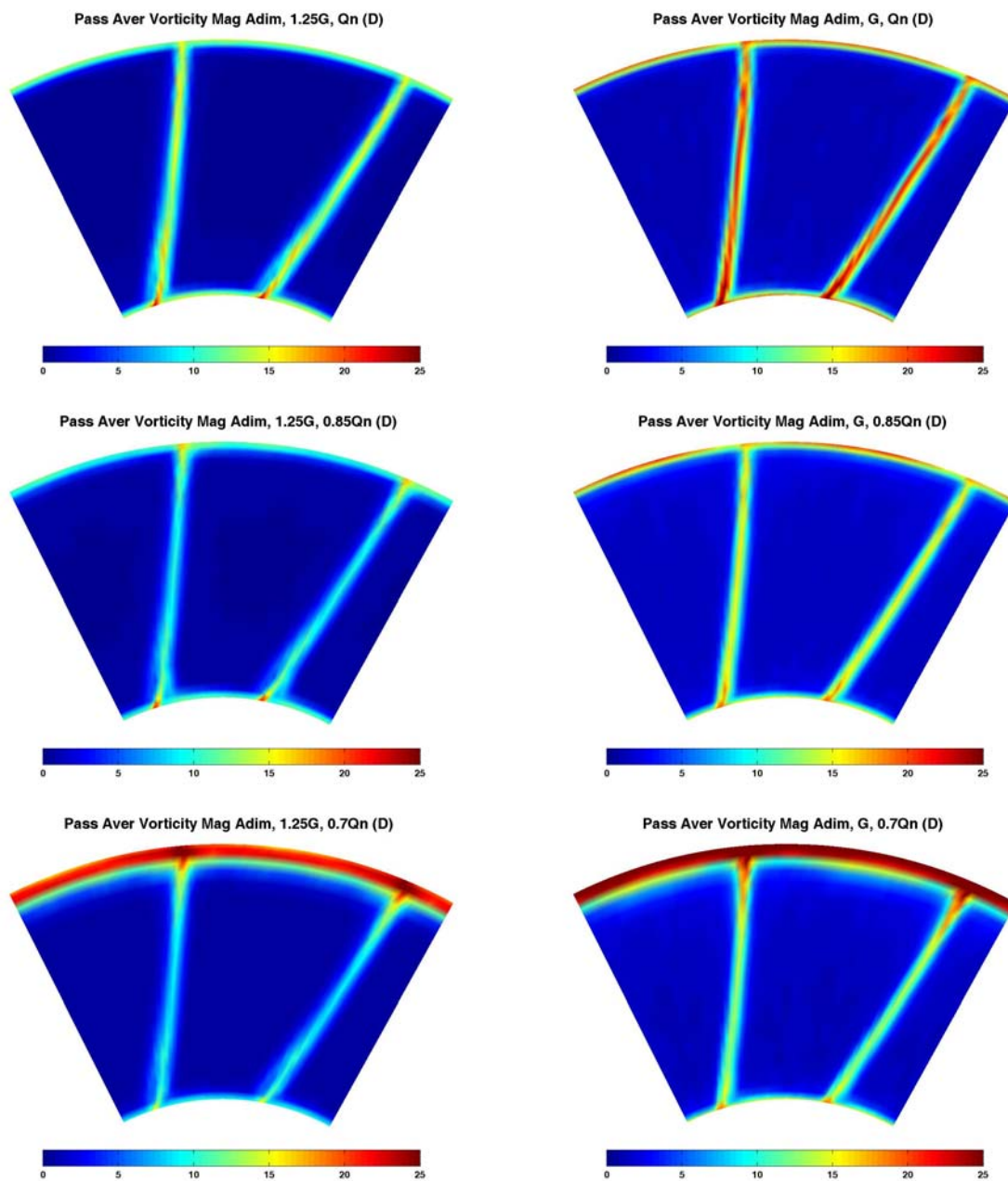


Fig. 6.29. Mapas de vorticidad en el marco de referencia del estator (absoluto) en la zona entre haces (D). Vista de dos sectores de directriz.



La vorticidad aumenta de forma importante a caudales bajos en la zona de punta como consecuencia directa del engrosamiento de la capa límite en dicha zona. Otra característica interesante es observar cómo aumenta la vorticidad de las estelas cuando se ha reducido el *gap* entre haces. En principio, esto se debe al efecto combinado de las componentes circunferenciales y radiales de la velocidad. Como se ha podido observar en las figuras 6.25 y 6.27, en la zona de estelas, estas componentes son mayores en el caso con *gap* inferior, inducidas por la mayor cercanía de los álabes del rotor. Ese bloqueo del rotor impide que la corriente viaje axialmente, por lo que aumentan las componentes tangencial y radial como única “vía de escape” a esa parte del flujo que se ve bloqueada. Por tanto, ese aumento del gradiente de las componentes es el que amplifica el valor de la vorticidad en la zona de estelas. La figura 6.30 aporta información sobre la vorticidad tras el rotor, promediada en el tiempo, así que muestra el residuo de la vorticidad generada por el estator, una vez el flujo sale de la etapa.

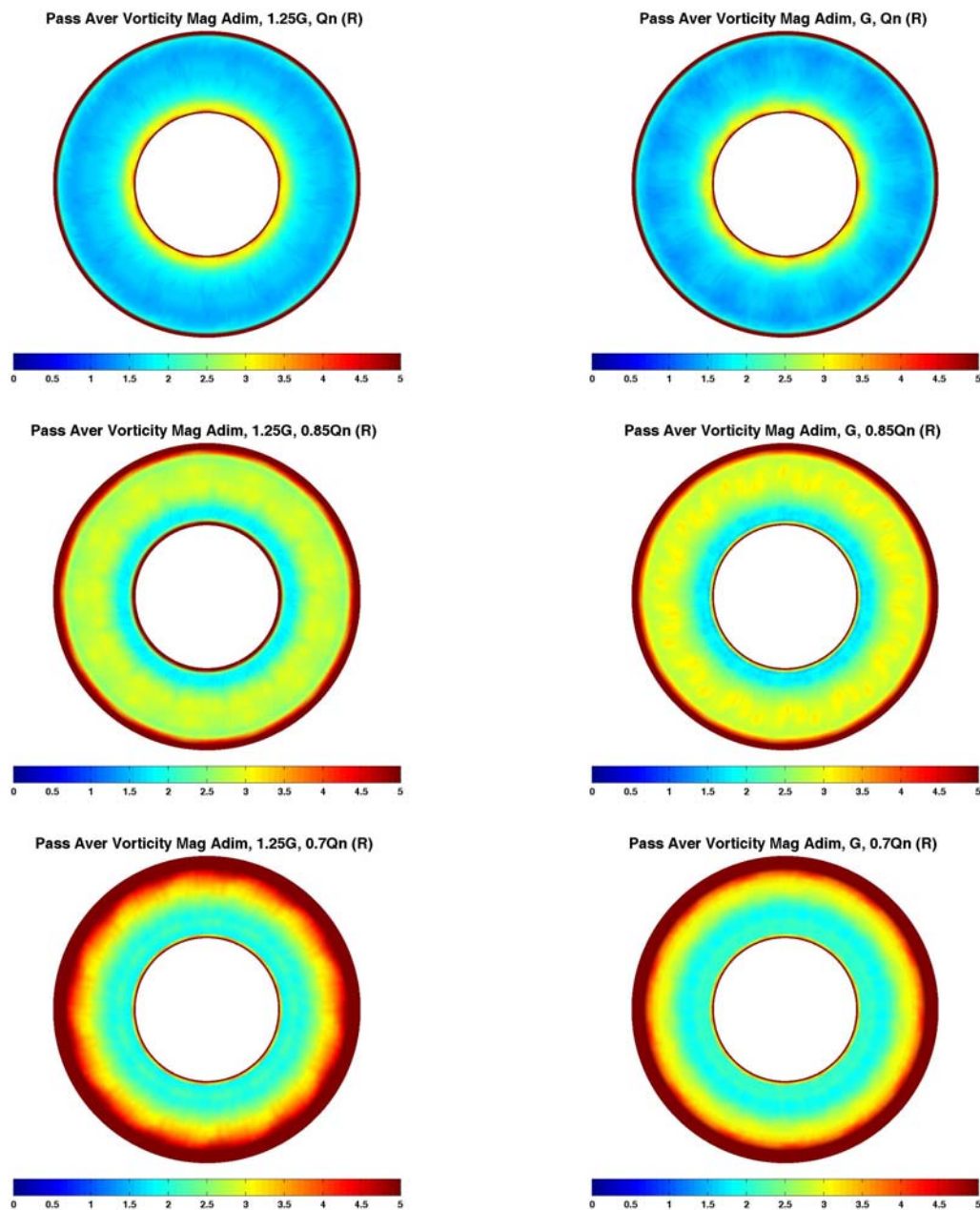


Fig. 6.30. Mapas de vorticidad en el marco de referencia del estator (absoluto) en la zona aguas abajo del rodete (R). Vista completa de la soplante.



### Marco de referencia del rotor

Viajando de forma solidaria al giro del rodete, el observador relativo percibe el paso de las directrices a la velocidad de rotación de la máquina, en sentido contrario a como se observa el giro de la máquina para cualquier observador en reposo. Promediando entonces el flujo instantáneo en cada posición a paso de directriz, se puede analizar cómo se le presenta a cada álabe el flujo promedio a su entrada.

En la figura 6.31 se ha representado la componente axial de la velocidad relativa en el sector entre coronas de la etapa. Como siempre, se ha promediado por el valor medio de la misma para cada caudal estudiado. Al realizar el promedio a paso de directriz, todo efecto asociado al giro de las mismas queda filtrado, y por tanto, únicamente se van a apreciar efectos estacionarios resultado de la presencia del rotor aguas abajo (ahora quieto para el observador). Efectivamente, en todos los caudales analizados, se aprecian perfectamente nueve ondulaciones en el mapa de velocidad. Se habla de ondulaciones, y no de estelas, porque el efecto que se está recogiendo en estos mapas es el del bloqueo que el rotor induce en la zona entre coronas. De hecho, se puede hablar de interacción potencial, pues esta modulación que induce el rotor, está íntimamente ligada a las variaciones de presión circunferencial debidas al paso del rotor a lo largo del tiempo. El hecho de una mayor o menor cercanía del rotor, se ve claramente en estas representaciones. Obsérvese cómo al reducirse el *gap* (casos *G*), la intensidad de esas ondulaciones crece notablemente. Las zonas de máximos y mínimos se ven claramente potenciadas, correspondiendo la zona del mínimo a la posición actual de los álabes del rotor. Para los caudales inferiores, en el caso de *gap* inferior, siempre queda muy perfilada la posición de los álabes del rotor, mientras que para una distancia superior, el efecto se mantiene, pero de una forma más difusa en la dirección tangencial. Llama la atención que a pesar de la importante diferencia de solidez del rotor entre la base y la punta, y la también notable diferencia entre el grosor de los álabes en cubo o carcasa, esto no se traduzca en una diferencia del bloqueo potencial según la dirección radial, como consecuencia de la importante deflexión que sufren los álabes radialmente.

Avanzando en el análisis, la figura 6.32 recoge cómo es la velocidad axial justo tras el rodete. En esta ocasión, se han representado dos sectores de longitud circunferencial igual al paso de canal de rotor. Obviamente, al representar el marco de referencia relativo, se aprecia cómo es la estela promedio desprendida desde los álabes del rotor. Las diferencias del patrón de flujo relativo son considerables entre caudales, no así entre la distancia de haces estudiada. Por ejemplo, para el caso de funcionamiento nominal se observa una importante variación de la estela desde el cubo a la punta. En concreto, nótese cómo el valor es mucho más pequeño en la zona del cubo, lo cual denota una estela con mayor déficit de velocidad en esa zona, que en otros radios superiores de la máquina. Otro curioso efecto que se aprecia a caudal nominal es la existencia de una especie de estela “sombra”, que viene ligada a una interacción entre las estelas de los álabes del rotor y las estelas desprendidas del estator que van pasando por entre los canales del rotor. (También se intuye este efecto en los caudales de -15% y -30% del nominal). Como esta figura analiza principalmente el flujo tras el rotor, no se aprecian grandes diferencias entre los casos al variar la separación axial de la etapa.

Finalmente, si se fija la atención en los caudales inferiores, se constata una gran diferencia en el patrón de flujo respecto al caso nominal: la uniformidad únicamente rota por la presencia de estelas antes, se pierde completamente ahora, y en su lugar,



aparece un notable gradiente circunferencial de velocidad, focalizando el máximo de velocidad para el caso del -30% del caudal en una zona muy determinada. Se puede apreciar también un importante crecimiento de la capa límite en la punta para el caudal más pequeño.

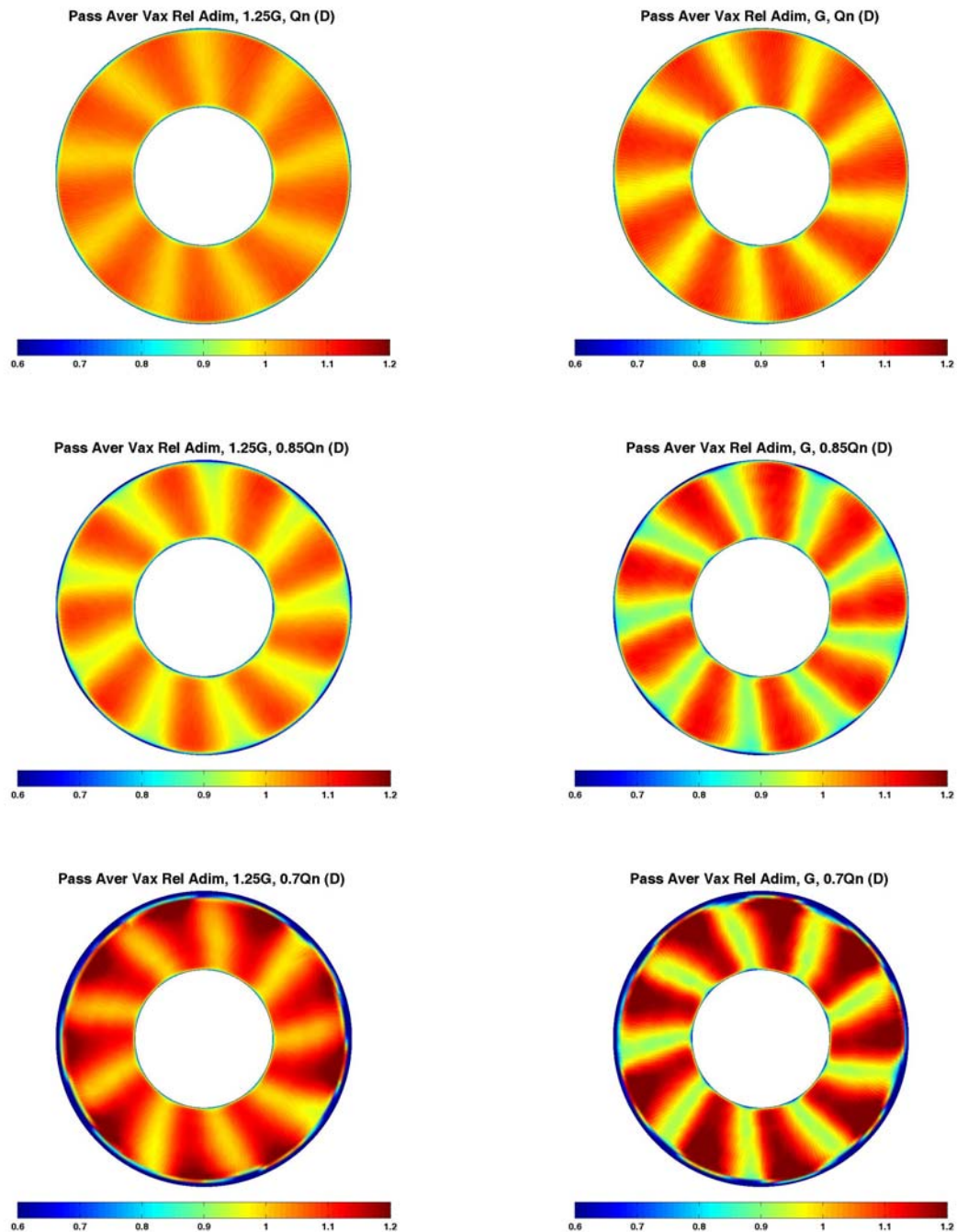


Fig. 6.31. Componente axial de la velocidad para el marco de referencia del rotor (relativo) en la zona entre haces (D). Vista completa de la soplante.

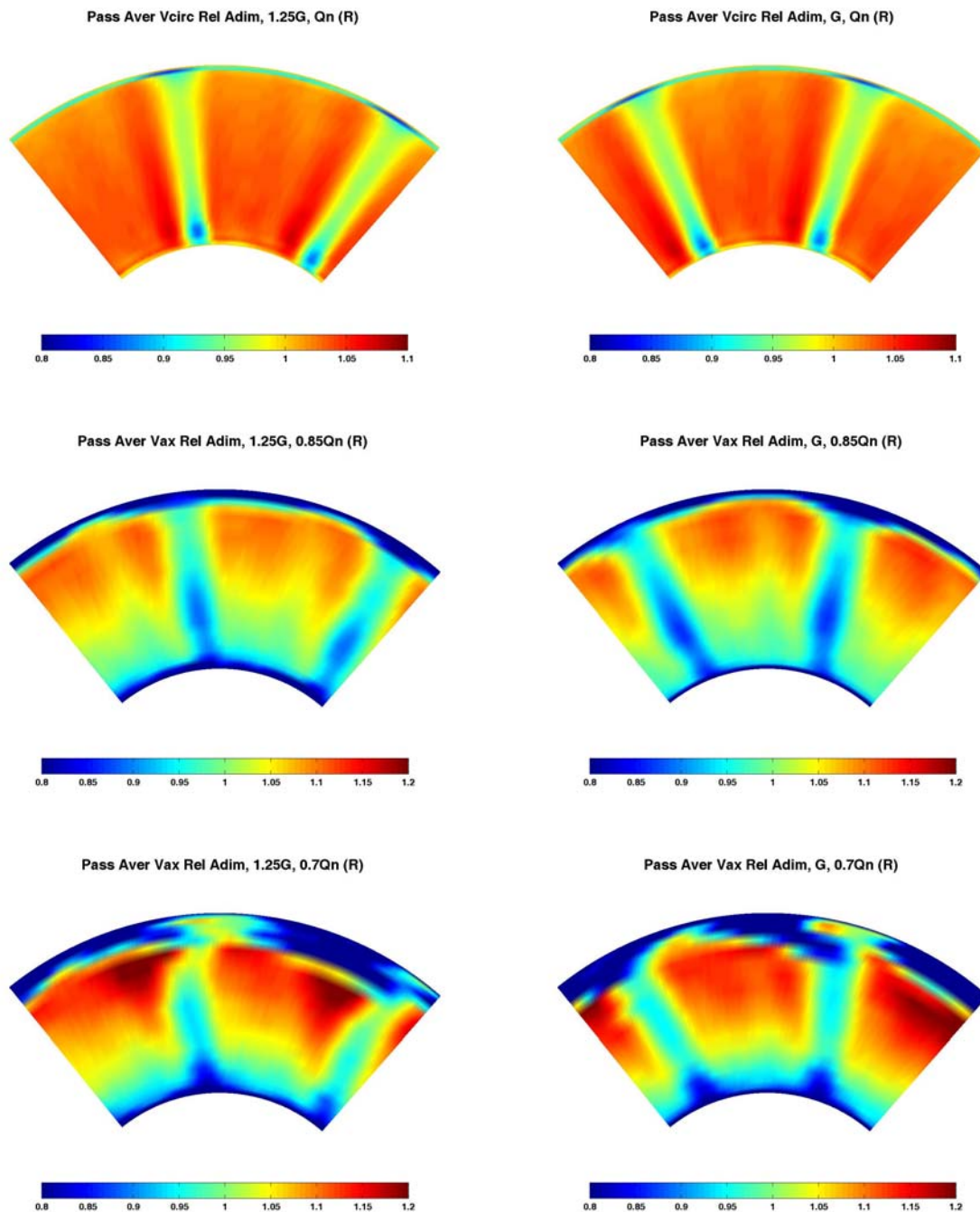


Fig. 6.32. Componente axial de la velocidad para el marco de referencia del rotor (relativo) en la zona aguas abajo del rodete (R). Vista de dos sectores de rotor.

La componente circunferencial promediada de la velocidad relativa se analiza en la figura 6.33, para la zona entre haces. Nuevamente se puede apreciar el efecto potencial introducido por el bloqueo físico de los álabes del rotor. Queda patente cómo una distancia más pequeña entre haces consigue que la modulación sea mucho más acuciada. Para la representación de estos mapas de velocidad, fue necesario restar la velocidad de arrastre asociada en cada punto, al mapa original de velocidades obtenido en el marco de referencia absoluto de la máquina. Conceptualmente, lo que se está representando en estos mapas es la proyección de la velocidad relativa a la entrada del rotor, habitualmente designado en los triángulos de velocidad como  $W_{lu}$ . En este caso,



se ha adimensionalizado por la velocidad de arrastre en cada radio, de forma que se verán mucho más claramente las variaciones circunferenciales del flujo relativo. En la zona de punta, donde se tiene una mayor velocidad de arrastre, la componente adimensionalizada de la velocidad relativa es más grande, haciéndose próximo a 1 el cociente entre ambas; mientras que en la zona de cubo tiene menor peso la velocidad de arrastre, por lo que el cociente sobrepasa claramente la unidad.

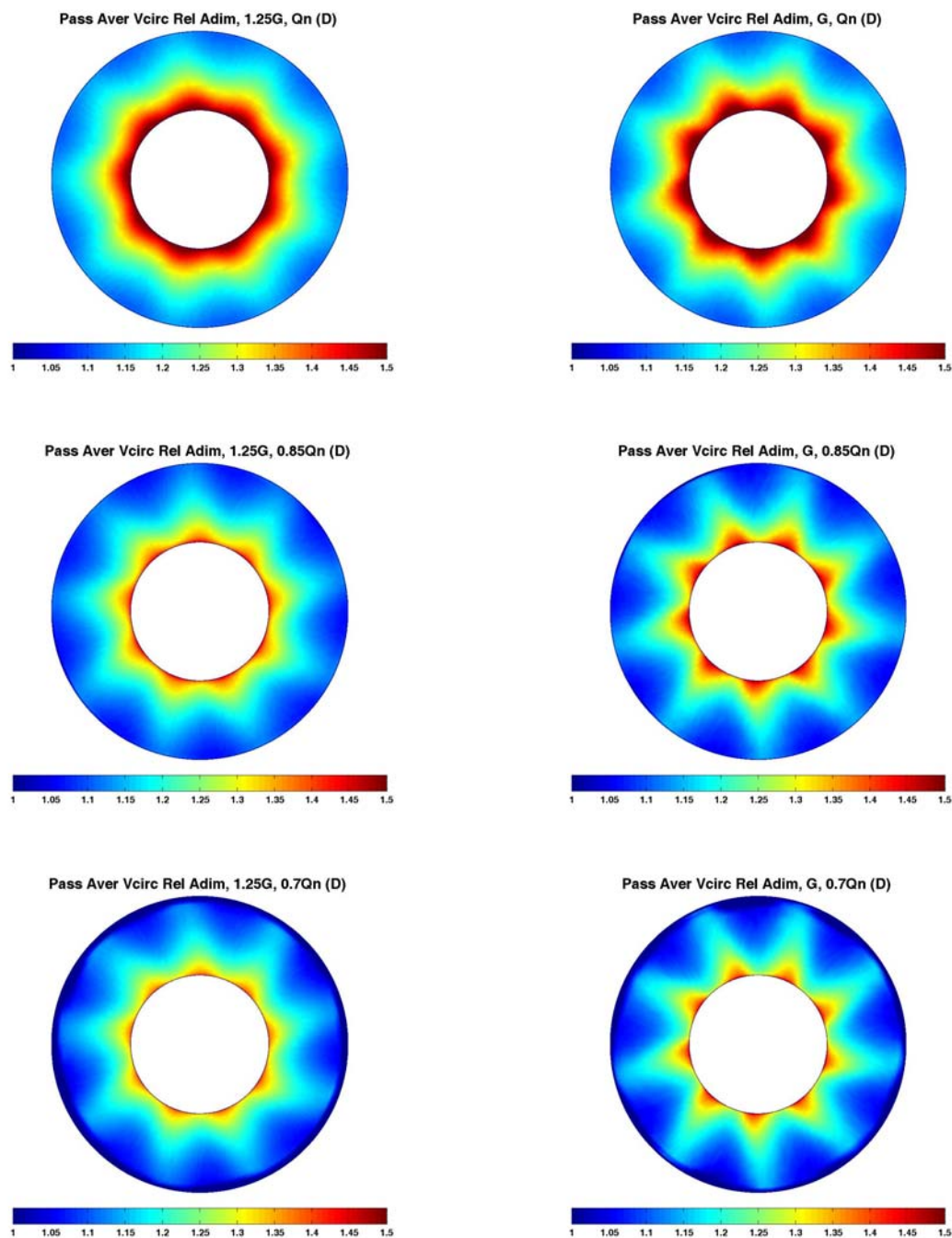


Fig. 6.33. Componente circunferencial de la velocidad para el marco de referencia del rotor (relativo) en la zona entre haces (D). Vista completa de la soplante.



Para concluir el análisis, se muestra la velocidad circunferencial relativa justo tras el rotor, promediada a paso de directriz. La adimensionalización utilizada evita que en todos los casos se observe un gradiente de velocidad relativa en la dirección radial, como lógica consecuencia del aumento de la velocidad de arrastre en ese sentido (discutido a partir de triángulos de velocidad). De esta forma se aprecian más claramente las variaciones circunferenciales. Para caudales inferiores, el flujo ya no se ajusta a la deflexión que imponen los álabes (figuras 6.19 a 6.21), así que no cabe realizar un razonamiento por triángulos de velocidad para prever adecuadamente la dirección del flujo tras el rotor. Nótese que la componente es muy uniforme en la dirección radial, excepto en la zona de estelas, donde su valor se reduce notablemente.

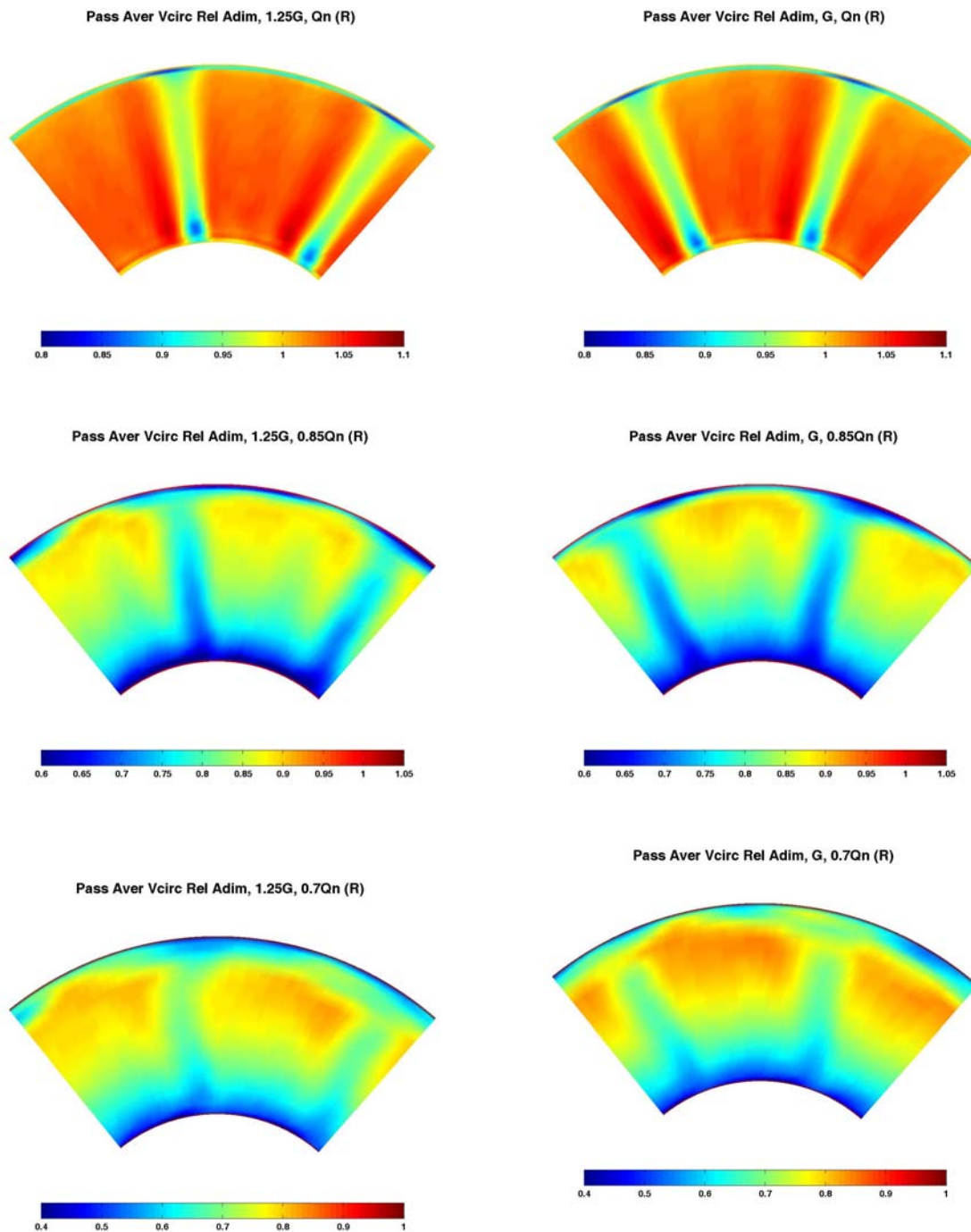


Fig. 6.34. Componente circunferencial de la velocidad para el marco de referencia del rotor (relativo) en la zona aguas abajo del rodete (R). Vista de dos sectores de rotor.



El ángulo azimutal, visto desde el punto de vista relativo, se muestra en la figura 6.35. En este caso, el efecto de bloqueo promediado a paso de directriz, se manifiesta como un flujo secundario radial de punta a base en el borde de ataque de cada álabe. El ancho del canal de rodete sirve en este caso para cerrar el “circuito” de dicha corriente secundaria. Puesto que el plano de medida (D) se encuentra a menor distancia de los álabes en el caso del *gap* inferior, es lógico que los valores del ángulo azimutal se vean amplificados.

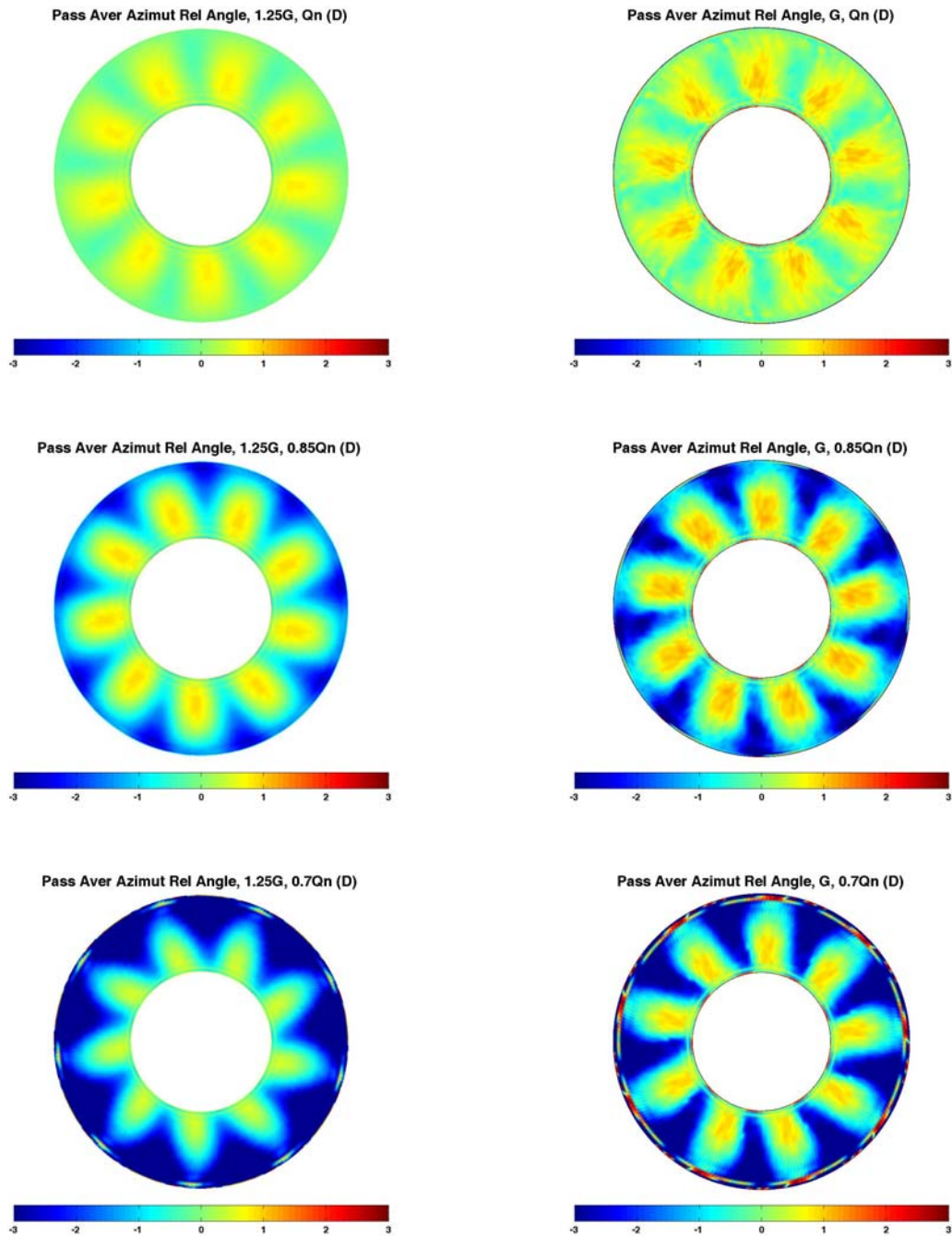


Fig. 6.35. Ángulo azimutal de la velocidad para el marco de referencia del rotor (relativo) en la zona entre haces (D). Vista completa de la soplante.

Aguas abajo del rodete, en el punto de vista relativo, la figura 6.36 descubre la estructura del flujo secundario producido por el paso del flujo promedio a lo largo de un canal de rodete, tal y como ya se apuntó en la figura 1.26. A diferencia de lo visto en la zona tras directrices, en este caso únicamente se genera una célula en sentido horario. Para caudales inferiores, la estructura se hace más compleja y se intuye que se forman en cada canal dos células, una mucho más intensa que otra, pegada a la cara de presión de los álabes. Otra interesante característica es que en la zona de punta, el flujo secundario ascendente se retrasa circunferencialmente, efecto que permanece en todo el rango de caudales observados.

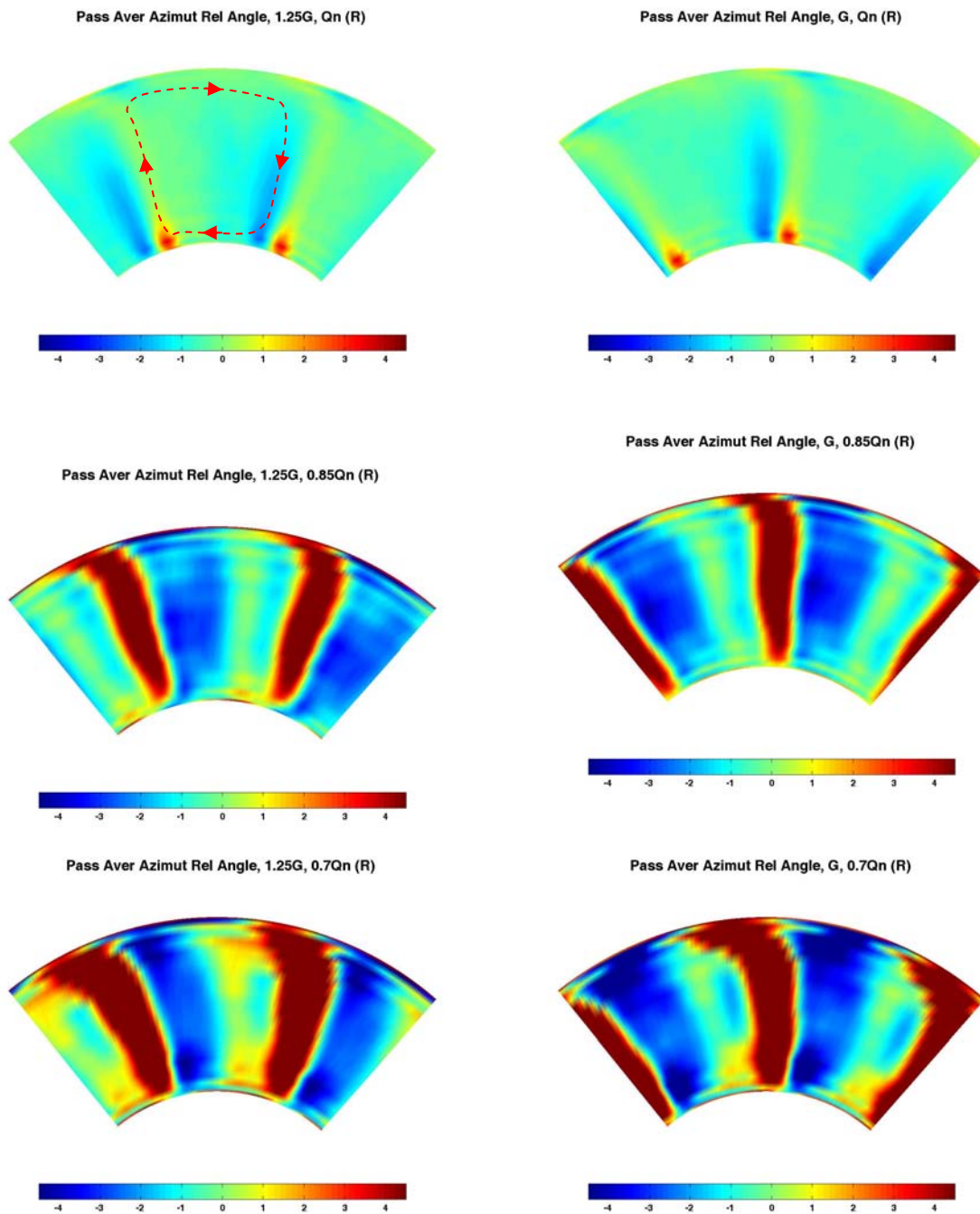


Fig. 6.36. Angulo azimutal de la velocidad para el marco de referencia del rotor (relativo) en la zona aguas abajo del rodete (R). Vista de dos sectores de rotor.



Los mapas de vorticidad relativa se han calculado a partir de la ecuación ya descrita en el capítulo 1,  $\vec{\Omega}_R = \vec{\Omega} - 2\vec{\omega}$ , que adimensionalizada por la velocidad de giro y representada por su valor absoluto, conduce a la expresión:

$$\frac{|\vec{\Omega}_R|}{|\vec{\omega}|} = \sqrt{\left(\frac{|\vec{\Omega}|}{|\vec{\omega}|}\right)^2 + 4\left(1 - \frac{\text{proy}_Z \vec{\Omega}}{|\vec{\omega}|}\right)}. \text{ Como es habitual en el marco relativo, entre haces se se}$$

observa el efecto que induce el rotor, sobre todo muy visible en el caso del *gap* inferior. Los valores de vorticidad relativa son muy pequeños en todos los casos, ya que se está eliminando la contribución de la velocidad de giro (se resta  $-2\vec{\omega}$  en la ecuación).

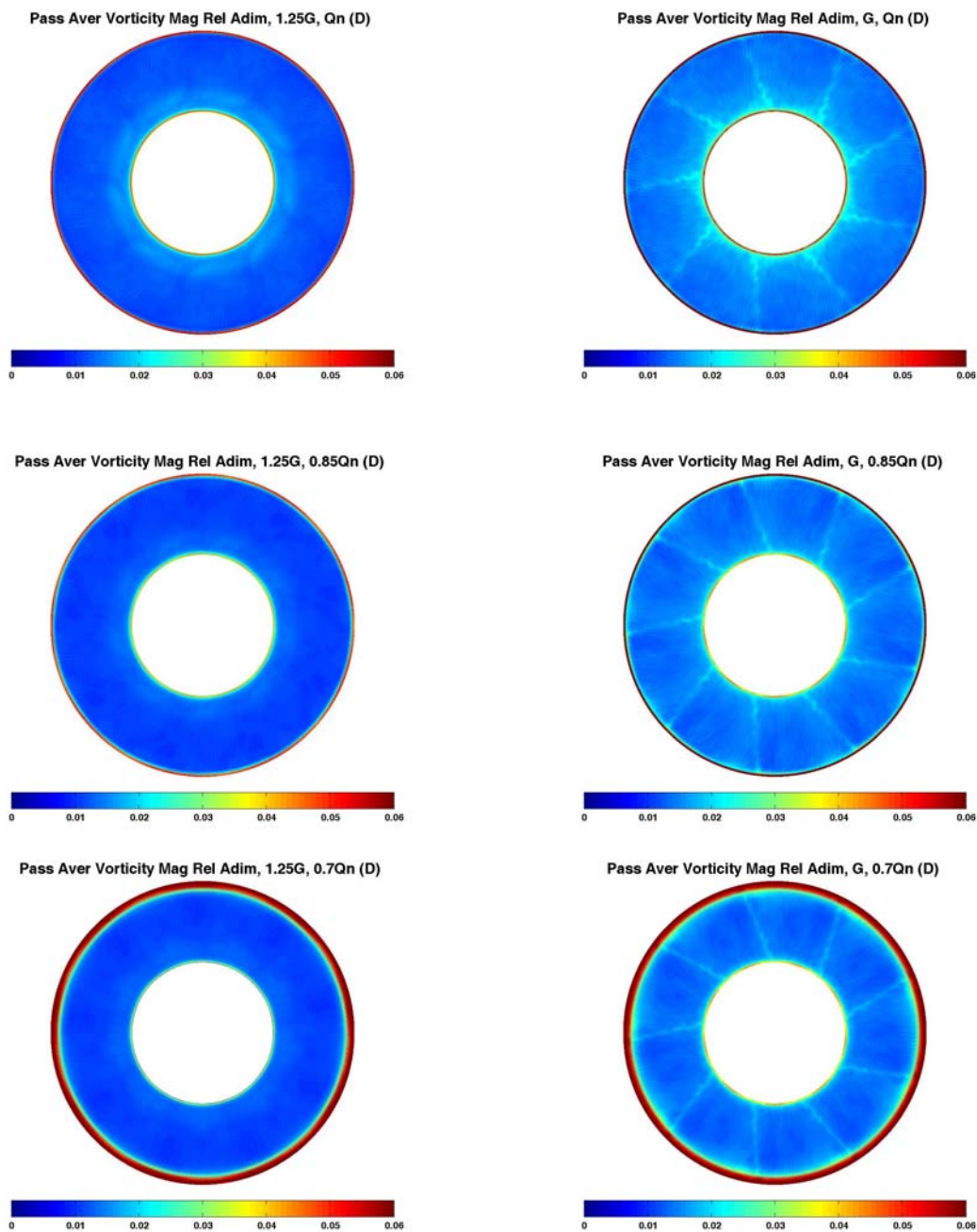


Fig. 6.37. Mapas de vorticidad relativa para el marco de referencia del rotor (relativo) en la zona entre haces (D). Vista completa de la soplante.



Tras el rotor, la vorticidad relativa permite caracterizar la morfología de las estelas desprendidas desde los álabes. Se observa con nitidez cómo la estela queda dividida en dos zonas, cada una de ellas con un sentido del vector vorticidad contrapuesto. Al ejecutar el valor absoluto, sólo se obtienen valores positivos, pero queda patente la vorticidad de la capa límite asociada a la cara de presión del álabes por un lado y a la cara de succión por otro: es la variación del gradiente de velocidad en el sentido circunferencial la que genera esa doble estructura en cada estela de álabes. En el resto del canal, el flujo es uniforme y prácticamente potencial para todos los casos analizados.

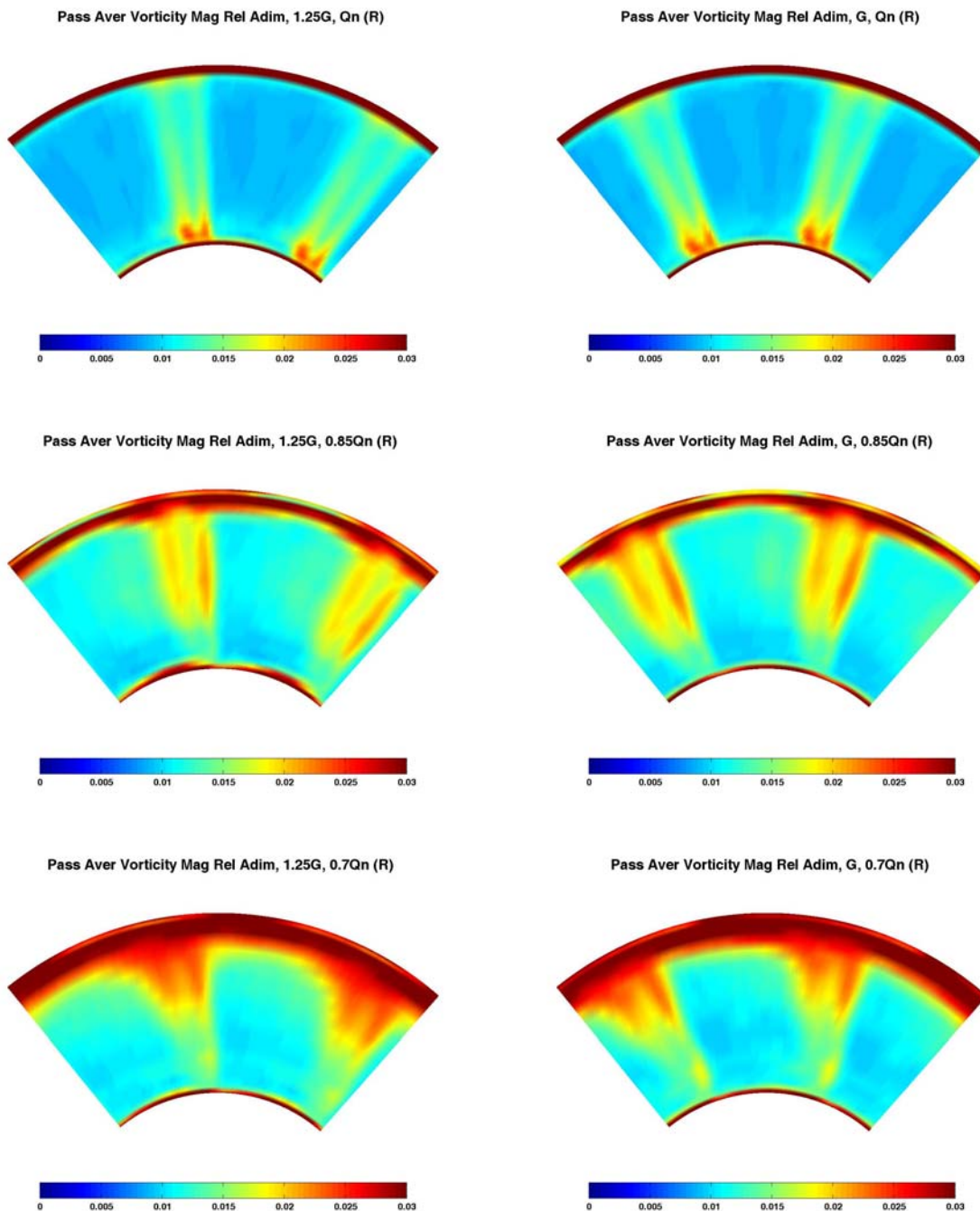


Fig. 6.38. Mapas de vorticidad relativa para el marco de referencia del rotor (relativo) en la zona aguas abajo del rodete (R). Vista de dos sectores de rodete.

Destaca cómo según se va reduciendo el caudal, la zona de máximos de la estela se desplaza radialmente desde la zona del cubo a la zona de punta, así como el ya característico engrosamiento de la capa límite de punta que se observa en toda la serie de resultados numéricos aquí mostrados.

### Mapas de presión

Se completa este apartado incluyendo mapas de presión estática para el caso de caudal nominal de la soplante. Se comparan ambos *gaps* de estudio. En un primer bloque se introducen los mapas correspondientes a la zona entre haces de la máquina y en un segundo bloque se recopilan las distribuciones obtenidas tras el rodete. Destaca el efecto de las estelas del estator en el mapa de presión estática cuando se reduce la distancia entre coronas.

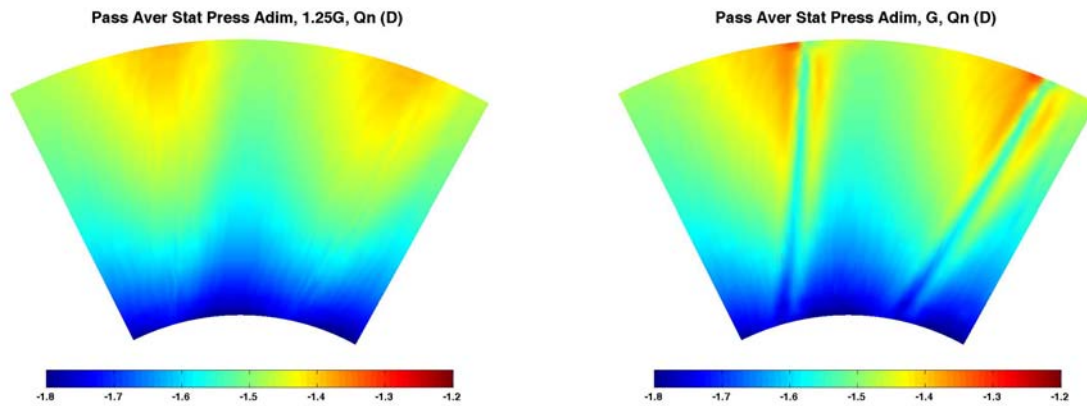


Fig. 6.39. Mapa de presión estática promediada, adimensionalizada por la presión dinámica, en la zona entre haces (D). Vista de dos sectores de directriz.

La presión estática se ha normalizado por la presión dinámica asociada a la componente media de la velocidad axial. En la presión estática a la salida, se observan valores muy bajos, como consecuencia de la descarga del chorro libre a la atmósfera. Aún así, aún se tiene un pequeño valor para compensar las pérdidas por fricción y de expansión del chorro en el tramo final del entubado.

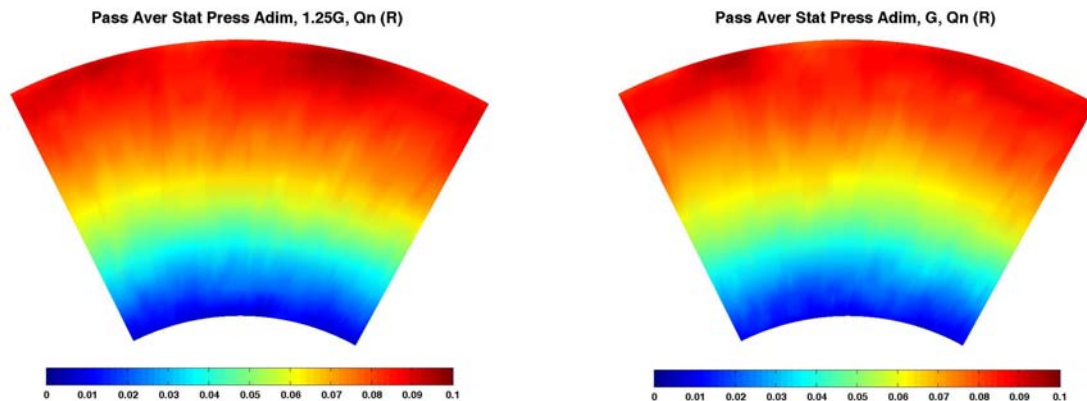


Fig. 6.40. Mapa de presión estática promediada, adimensionalizada por la presión dinámica, en la zona aguas abajo del rodete (R). Vista de dos sectores de directriz.



## 6.4.- CONCLUSIONES

Se han obtenido y comparado los efectos estacionarios, tanto experimentales como numéricos, de la interacción entre el estator y el rotor en un ventilador axial de una única etapa.

Los resultados numéricos analizados provienen tanto de un modelo bidimensional como de uno tridimensional, ejecutados mediante simulaciones no estacionarias, y cuyos resultados se han promediado temporalmente para analizar los patrones del flujo, promediados tanto en el punto de vista del rotor, como del estator.

Se han analizado variables generales de diseño, obteniéndose distribuciones radiales del grado de reacción y del incremento de presión generados por el rotor, observando un adecuado acuerdo entre lo diseñado teóricamente y lo analizado tanto numérica como experimentalmente. En esta primera etapa, se determinaron también las prestaciones globales de la máquina con medidas en el banco de ensayo, encontrando un buen ajuste con los resultados numéricos tridimensionales a caudales óptimos, no así a carga parcial (figura 6.2) –crecen los efectos de huelgo radial que no se han introducido en el modelo. Asimismo, se ha constatado que las prestaciones bidimensionales no arrojan una excesiva concordancia con la curva real, al no haber modelizado en ese caso los efectos de capa límite en cubo y punta.

A partir del modelo bidimensional, se han obtenido representaciones álabes y álabes de tres secciones de la soplante (base, media y punta), observando en ellas las distribuciones de las cargas aerodinámicas sobre álabes y directrices y la morfología de las estelas desprendidas desde los perfiles.

La completa caracterización del flujo promediado se analizó tanto en el modelo numérico tridimensional, como con resultados de la sonda de presión, observando la estructura del flujo a la salida del estator y en la zona aguas abajo del rodete. Se han introducido dos factores complementarios al estudio, como son el caudal de funcionamiento y la distancia entre las coronas de la etapa, con el objeto de analizar la evolución de la interacción con la variación de los mismos. Se ha comprobado cómo una mayor proximidad de los haces constitutivos de la máquina, conlleva una mayor no uniformidad de las diversas componentes de la velocidad, alterando la distribución del flujo tanto axial como circunferencialmente. Se ha podido observar cómo las estelas del estator permanecen de forma residual en el flujo promediado una vez el flujo ha superado la corona móvil (figuras 6.4, 6.9 y 6.24). Este revelador resultado, observado tanto en el análisis numérico como en los resultados experimentales con la sonda de presión y mediante anemometría térmica, ha puesto de relevancia la existencia de fenómenos de difusión e interacción de las estelas de las directrices (*wake mixing; wake-blade interactions*) con el rotor situado aguas abajo. Conjuntamente, la anemometría térmica ha permitido una descripción temporal del flujo, que tras haber sido reducida a una media en el marco de referencia relativo, ha puesto énfasis sobre efectos potenciales de la interacción entre las coronas, confirmando los resultados descritos numéricamente. En particular, se ha capturado un fenómeno relacionado con el bloqueo del rotor, pero cuyo transporte quedó ligado al propio transporte de las estelas del estator por la corriente media.



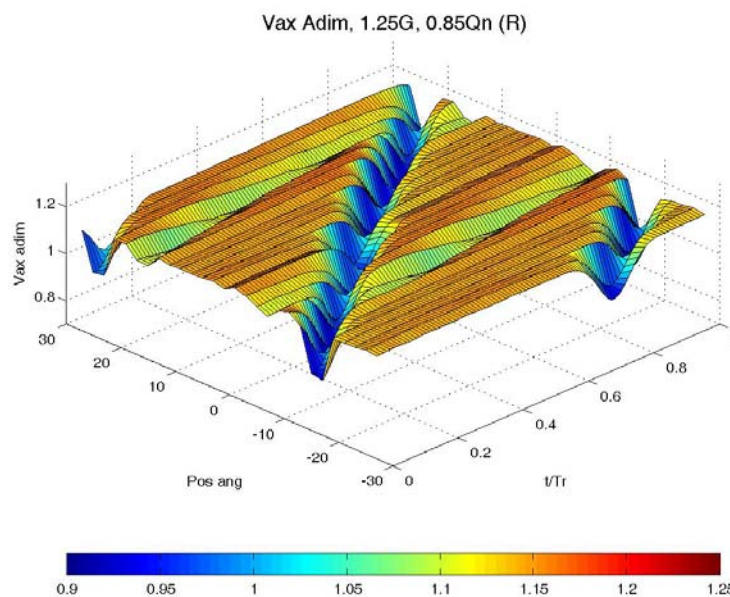
Se concluye, por tanto, que el modelo tridimensional, aún cuando a carga parcial no proporciona las mismas prestaciones que la máquina real, gracias a la modelización LES de la turbulencia, sí consigue una buena captura y representación temporal de las estelas y de los efectos potenciales de interacción entre los haces de la soplante. Las medidas experimentales han permitido validar los procedimientos desarrollados, y ponen las bases para adentrarse en el próximo capítulo, donde se adentrará en detalle en la fenomenología puramente no estacionaria. El modelo numérico, validado para el estudio de la interacción, pondrá finalmente el broche al estudio del flujo instantáneo (“*phase-averaged*”) y de las características no estacionarias del flujo.





## Capítulo 7

### CARACTERÍSTICAS NO ESTACIONARIAS DE LA INTERACCIÓN ROTOR-ESTATOR



“Spinning on an axis... Spinning on an axis...  
Staring in the face... Of time and space”

“*Spinning on an axis*”.  
Paul McCartney (1942-).  
Músico británico.

*En este capítulo se analizarán los resultados instantáneos de las simulaciones bidimensionales y tridimensionales ejecutadas, así como las medidas no estacionarias realizadas con anemometría térmica de doble hilo en los planos de estudio.*

*El objeto es introducir la variable tiempo en el análisis, describiendo los fenómenos de interacción y asociándolos a la frecuencia de paso de álabe del rotor. Se observará el flujo en planos álabe a álabe para tres secciones de estudio mediante el modelo numérico bidimensional, caracterizándose la evolución de las estelas entre haces y tras el rotor y observando el efecto de las estelas del estator sobre la carga aerodinámica de los álabes. A partir del modelo numérico tridimensional y de las medidas de hilo caliente, se elaborarán representaciones sectoriales instantáneas de las componentes de la velocidad y de la vorticidad. Tanto para una posición radial, como para una posición angular arbitraria, se construirán mapas temporales de las variables y se analizarán las fuerzas sobre álabes y directrices tanto en el dominio temporal como en el de la frecuencia.*



## 7.1.- INTRODUCCIÓN

Operando incluso bajo condiciones óptimas de diseño, es inevitable que el flujo incidente sobre los álabes se vea condicionado por las estelas y por las distribuciones circunferenciales y radiales no uniformes asociadas a los canales de directriz, heredadas desde el estator aguas arriba. Bajo funcionamiento estable, esas variaciones espaciales se traducen en respuestas temporales que fluctúan en función de una serie de parámetros característicos, tales como el número de álabes y directrices, la velocidad de giro o la proximidad de los haces implicados en el fenómeno. Para el estudio de estos fenómenos, es habitual realizar el estudio frecuencial de dichas respuestas temporales, en la búsqueda de las frecuencias características de funcionamiento.

En el estudio frecuencial de una turbomáquina axial es habitual la presencia de picos a la frecuencia de giro (inestabilidades mecánicas, excitaciones con rodamientos...), a la frecuencia de paso de álabe (fenómenos fluidodinámicos asociados al paso de cada álabe), a frecuencias múltiplo de la giro un número de veces igual al número de directrices (fenómenos relacionados con la presencia de perfiles fijos) o a frecuencias adicionales (propagación de perturbaciones, desprendimiento rotativo...). Todas estas fuentes de excitación originan cargas no estacionarias sobre las diversas partes de la máquina, dando lugar finalmente a la aparición de vibraciones y ruido (Neise, 1992; Wallis, 1993).

Se trata a continuación de profundizar en los efectos no estacionarios de la interacción entre el flujo que, proveniente del estator, es obligado a intercambiar energía en el rotor. Mapas temporales álabe a álabe y sobre los sectores transversales mostrarán cómo es el flujo en cada instante, tanto para el marco de referencia fijo como para el móvil. Un análisis de fuerzas sobre los álabes y directrices pondrá de manifiesto las frecuencias características de excitación sobre los haces, y el estudio de fluctuaciones de presión sobre la carcasa servirá de contrapunto al estudio numérico frecuencial.

Se presentan en primer término las mediciones experimentales realizadas y después, los cálculos y resultados numéricos obtenidos en el modelo desarrollado, para concluir con una interpretación y resumen de los resultados más relevantes, que hará las veces de hilo conductor con el último capítulo de resultados de esta tesis.

## 7.2.- RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se van a mostrar a continuación resultados instantáneos obtenidos con la sonda de anemometría térmica, si bien en primer lugar se mostrarán los resultados de la medida de la fluctuación de presión en la carcasa. En ambos casos, se recuerda que son resultados promediados de varios canales, con el objeto de haber eliminado la turbulencia (medidas de velocidad) y el ruido (medidas de presión) presentes en las medidas puntuales.

### 7.2.1.- Fluctuaciones de presión en la carcasa

Las medidas de fluctuación de presión en la carcasa tienen un doble objeto. En primer lugar, permiten una cierta caracterización frecuencial de la máquina, de forma





que aunque es cierto que estas medidas no son tan adecuadas como sí lo serían las medidas reales de los esfuerzos sobre los álabes, al menos permitirán observar las frecuencias propias de los fenómenos asociados al paso de álabes. Y en segundo lugar, al medir justo sobre el huelgo radial, el mapa de presiones dará alguna información sobre cómo se está desarrollando el flujo secundario en el huelgo de punta (caudal de fugas, desprendimiento de vórtices...) –recuérdese el apartado 1.3.4.3 de la presente memoria.

La figura 7.1 ofrece una distribución temporal del mapa de presiones adimensionalizado por la presión dinámica, sobre los álabes del rotor, cubriendo una extensión circunferencial igual a un sector de directriz y tomando medidas cada 2° (en el apartado 3.5.3 ya se detalló el procedimiento). Se comparan ambos *gaps*, y se observan resultados a diversos caudales de funcionamiento. Se observa el paso de álabes en todas las figuras a través de una banda de color azul oscuro que cruza el mapa transversalmente. En todos los mapas se tiene una zona de valor negativo, correspondiente a depresión, y otra zona con valores positivos, de sobrepresión. Se pueden identificar por tanto, las caras de succión y de presión del álabes según pasa por los diversos puntos de medida. También cabe resaltar el hecho de que la zona de sobrepresión, ligada a la zona de flujo potencial entre canales, disminuye notablemente al reducir el caudal de funcionamiento. No se observan grandes diferencias al modificar el *gap*, si bien parece que en el caso de *gap* superior la zona de depresión parece más extensa. En la misma línea, se puede afirmar que existe una mayor intensidad de las zonas de sobrepresión para dicho *gap*. El hecho de que los valores máximos y mínimos de presión se distancien más conlleva obviamente un aumento de la diferencia de presión entre ambas caras de los álabes, y por tanto, un incremento del caudal de fugas que circula a través del huelgo radial ( $Q_L = \sqrt{(2 \cdot \Delta p) / \rho}$ ).

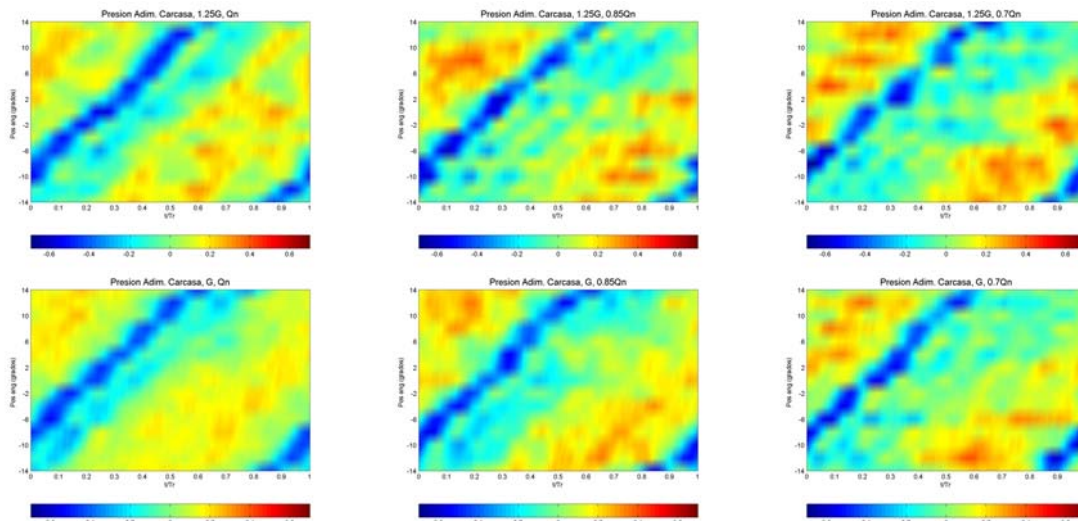


Fig. 7.1. Mapas de presión sobre la carcasa, adimensionalizada por la presión dinámica. Comparativa entre *gaps*.

La figura 7.2 muestra una comparativa tridimensional de los mapas temporales obtenidos a caudal nominal y a un 70% de éste. Se incluyen para remarcar las diferencias entre la situación a caudal nominal y a carga parcial. Entre álabes, el flujo es muy uniforme fuera de las zonas de capa límite de los álabes cuando la máquina opera en los puntos de diseño (mapa de la izquierda). Por el contrario, la reducción de caudal



genera un flujo muy poco uniforme en el canal, flujo que pretende recuperarse, pero que sólo logra alcanzar valores importantes de presión muy cerca de la cara de succión del álabe contiguo. Es reseñable la existencia de oscilaciones superpuestas (en el espectro aparecen recogidos varios armónicos de la frecuencia de paso de álabe) a la estructura principal del mapa de presión. Estas oscilaciones, que se hacen más acuciadas conforme el caudal de análisis es más bajo, ponen de manifiesto la extrema complejidad del flujo en el huelgo radial. De hecho, su frecuencia de generación puede estar ligada a la frecuencia de desprendimiento de vórtices en la punta. Efectivamente, el espectro de la señal capturada en la imagen central, muestra como frecuencia fundamental la de 360 Hz (BPF), pero sus armónicos tienen un peso muy importante como consecuencia de la importancia de esas oscilaciones asociadas a la estructura vortical del flujo en el huelgo.

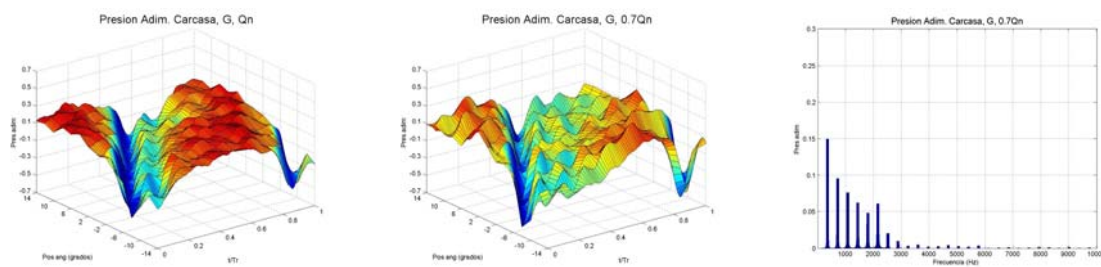


Fig. 7.2. Mapas tridimensionales y espectro de frecuencias de la presión sobre la carcasa.

### 7.2.2.- Medidas con anemometría térmica.

Como paso siguiente en el análisis del flujo no estacionario, se incluyen ahora mapas instantáneos construidos a partir de las medidas puntuales realizadas con la sonda de hilo caliente. Se trata de poner el contrapunto a los mapas numéricos que serán presentados y analizados posteriormente. Se recogen como siempre componentes axial y circunferencial de la velocidad, entre haces y tras el rotor, en ambos marcos de referencia, fijo y móvil. Todas las figuras corresponden al caso de *gap* inferior, para el que los efectos de interacción entre haces son mayores.

#### Marco de referencia del estator

Las figuras en el marco absoluto recogen mapas instantáneos para cinco instantes intermedios en el giro de la máquina. A saber,  $t/T_R=0.0$ ;  $t/T_R=0.2$ ;  $t/T_R=0.4$ ;  $t/T_R=0.6$  y  $t/T_R=0.8$ .

La figura 7.3 muestra la evolución de la componente axial entre haces. Se observa el efecto del bloqueo en rotación, y también se aprecia la interacción no estacionaria establecida entre las estelas de estator y ese bloqueo. Al igual que va a ocurrir en la figura 7.28, el déficit de la estela se intensifica al coincidir con el paso del bloqueo del rotor. Obsérvense las diferencias en la estela central para caudal de 70% del nominal entre el instante  $t/T_R=0.0$  y  $t/T_R=0.4$ . A pesar de que la discretización espacial no garantiza unas estelas bien perfiladas, se puede apreciar ese movimiento radial de la interacción, así como una intensificación de las estelas al coincidir con el bloqueo (otro ejemplo claro es la comparativa en  $t/T_R=0.0$  y  $t/T_R=0.6$  en el caudal intermedio). Por otro lado, la formación de esos importantes núcleos de baja velocidad en la zona de punta impide observar si el efecto potencial se deforma por efecto de la zona de succión



de las estelas de estator (efecto discutido a propósito de los resultados numéricos). En su lugar, aparece un efecto complementario, consistente en la permanencia de un déficit de velocidad en la zona de punta de directrices debido al importante tamaño circunferencial del bloqueo en esa zona. Aun cuando el bloqueo ha pasado, la inminente cercanía del bloqueo inducido por el siguiente álabe reaviva el déficit (véase a caudal 70% del nominal, en  $t/T_R=0.6$  y  $0.8$ ). Ese punto fijo se manifiesta aguas abajo tras el rotor, ya que no se desplaza con los álabes: únicamente es modulado por su paso (figura 7.4).

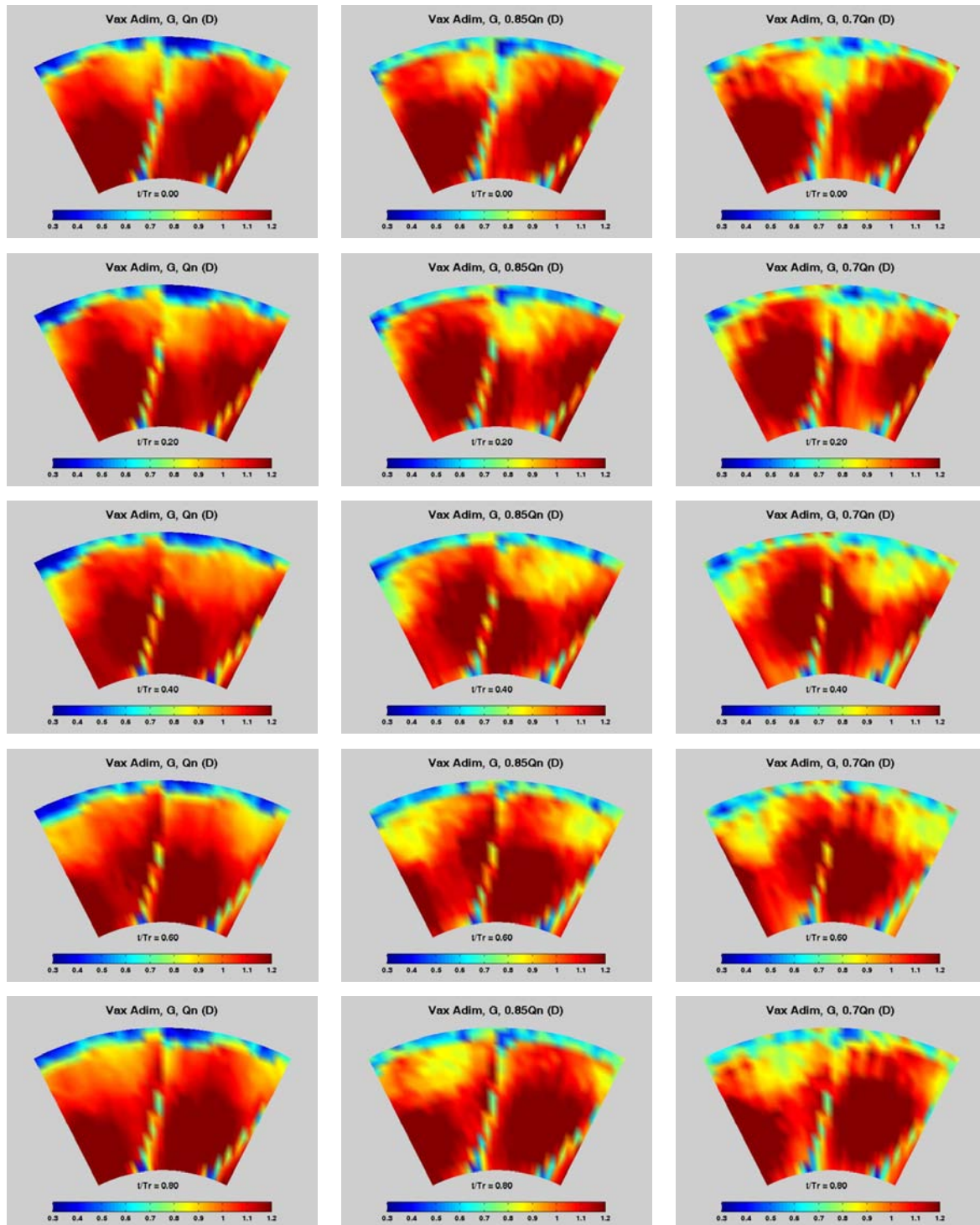


Fig. 7.3. Mapas instantáneos de la componente axial de la velocidad adimensionalizada en la zona entre haces (D). Configuración con gap inferior. Comparativa entre caudales.

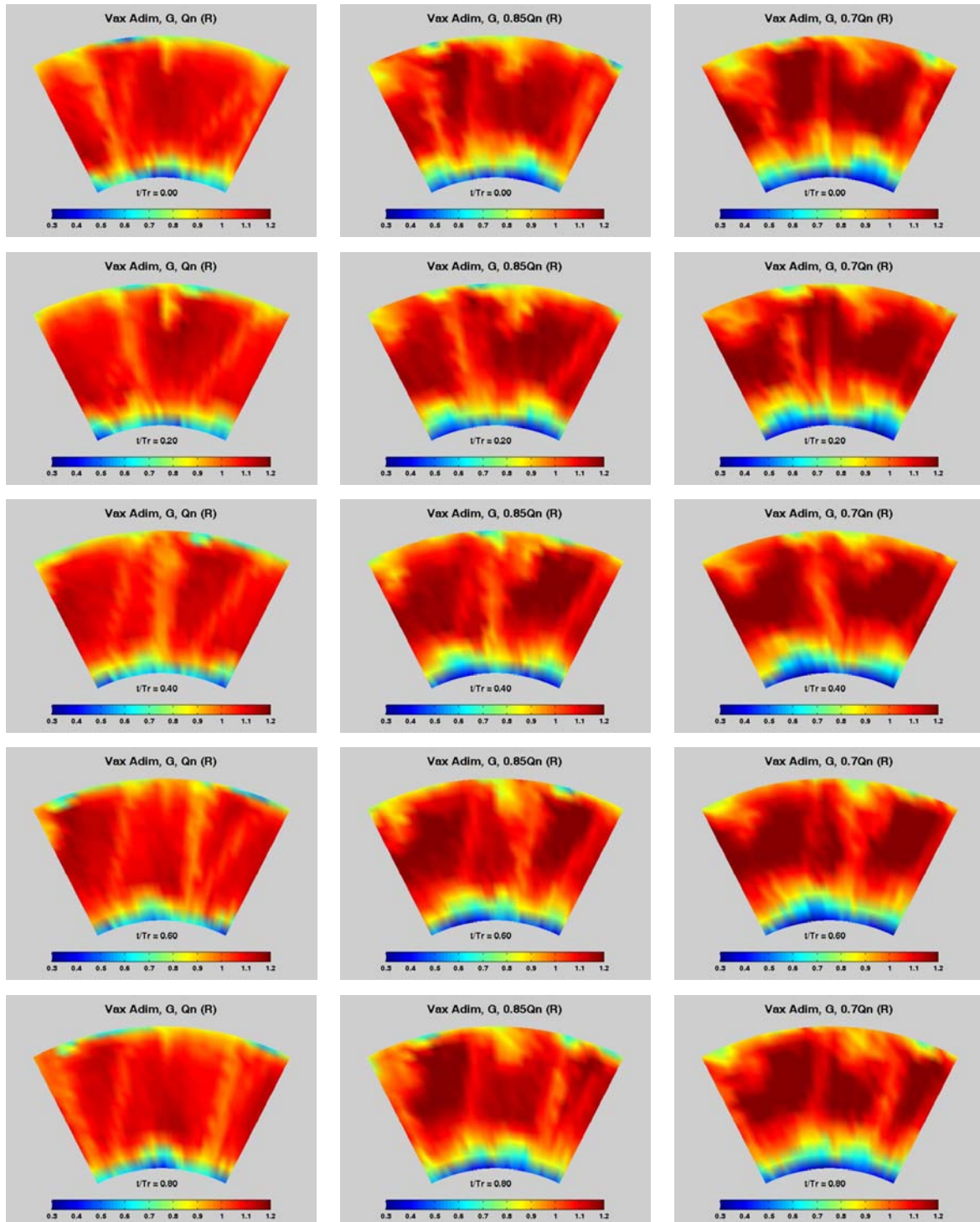


Fig. 7.4. Mapas instantáneos de la componente axial de la velocidad adimensionalizada en la zona aguas abajo del rodete (R). Configuración con gap inferior. Comparativa entre caudales.

La figura 7.5 muestra la componente circunferencial entre haces, adimensionalizada por la velocidad de arrastre en la punta. En estos mapas, el acuerdo entre lo medido y el modelo es máximo, como ya se había visto en los mapas promediados en el capítulo anterior. Destaca de nuevo cómo las zonas de bloqueo que son coincidentes en ese instante con la posición circunferencial de las estelas, revitalizan el déficit de velocidad (p.e.: caudal 85% del nominal, en  $t/T_R=0.0$ , estela



central suavizada, frente a la misma estela en  $t/T_R=0.8$ ). Respecto al patrón de interacción no estacionaria entre la cara de succión de las estelas y el efecto de bloqueo de los álabes, constátase la excelente similitud con el modelo numérico.

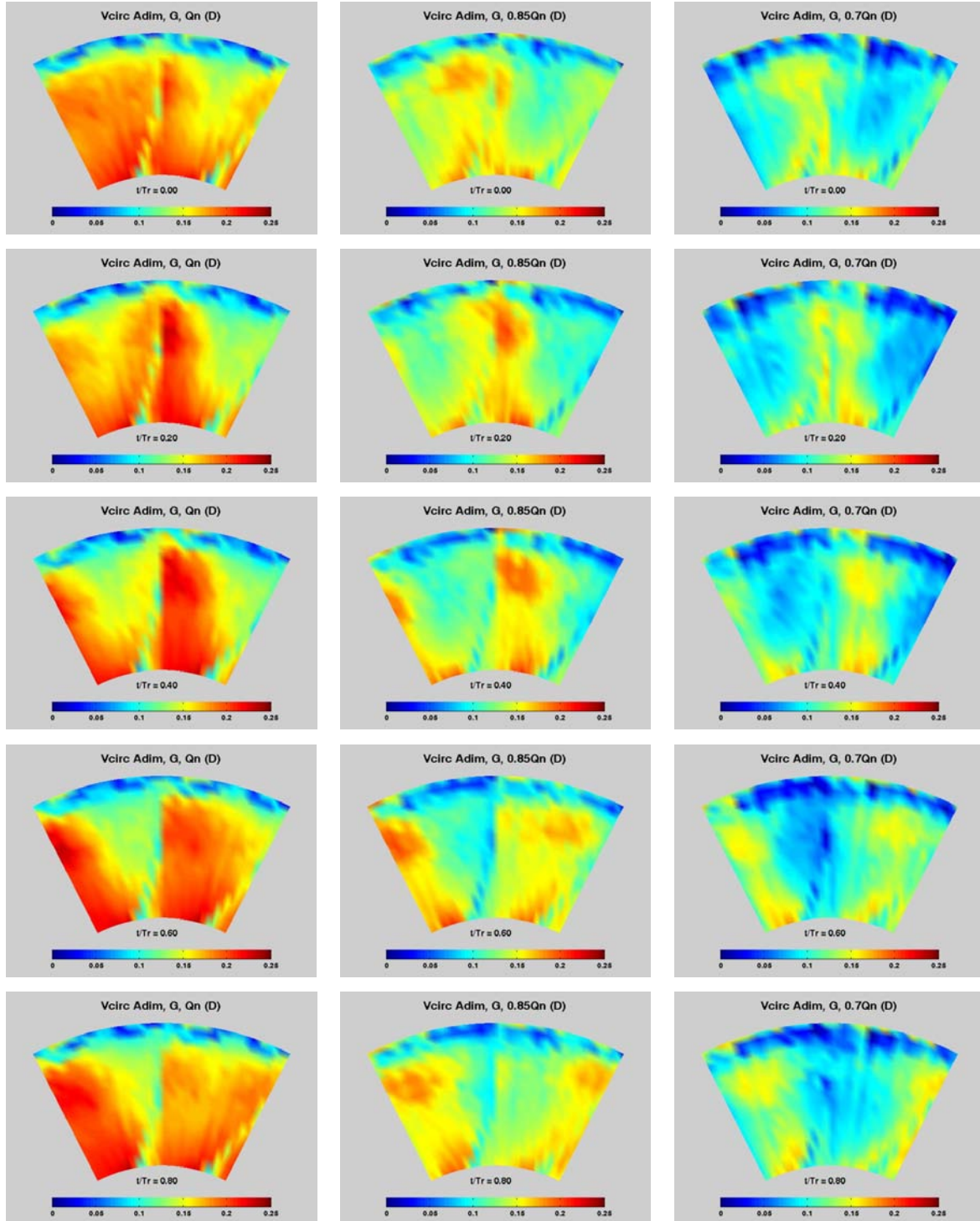


Fig. 7.5. Mapas instantáneos de la componente circunferencial de la velocidad adimensionalizada en la zona entre haces (D). Configuración con gap inferior. Comparativa entre caudales.



Tras el rotor (figura 7.6), sólo es apreciable el paso de cada álabe del rodete. A caudales bajos se observa levemente el déficit de velocidad anclado a la zona de punta en las directrices, y cómo tras el rotor, se ve aumentado cuando interacciona con el paso de álabe (por ejemplo, en los instantes  $t/T_R=0.4$  y  $t/T_R=0.6$  a caudal del 85% del nominal; o también en  $t/T_R=0.2$  y  $t/T_R=0.4$  a caudal -30% del nominal).

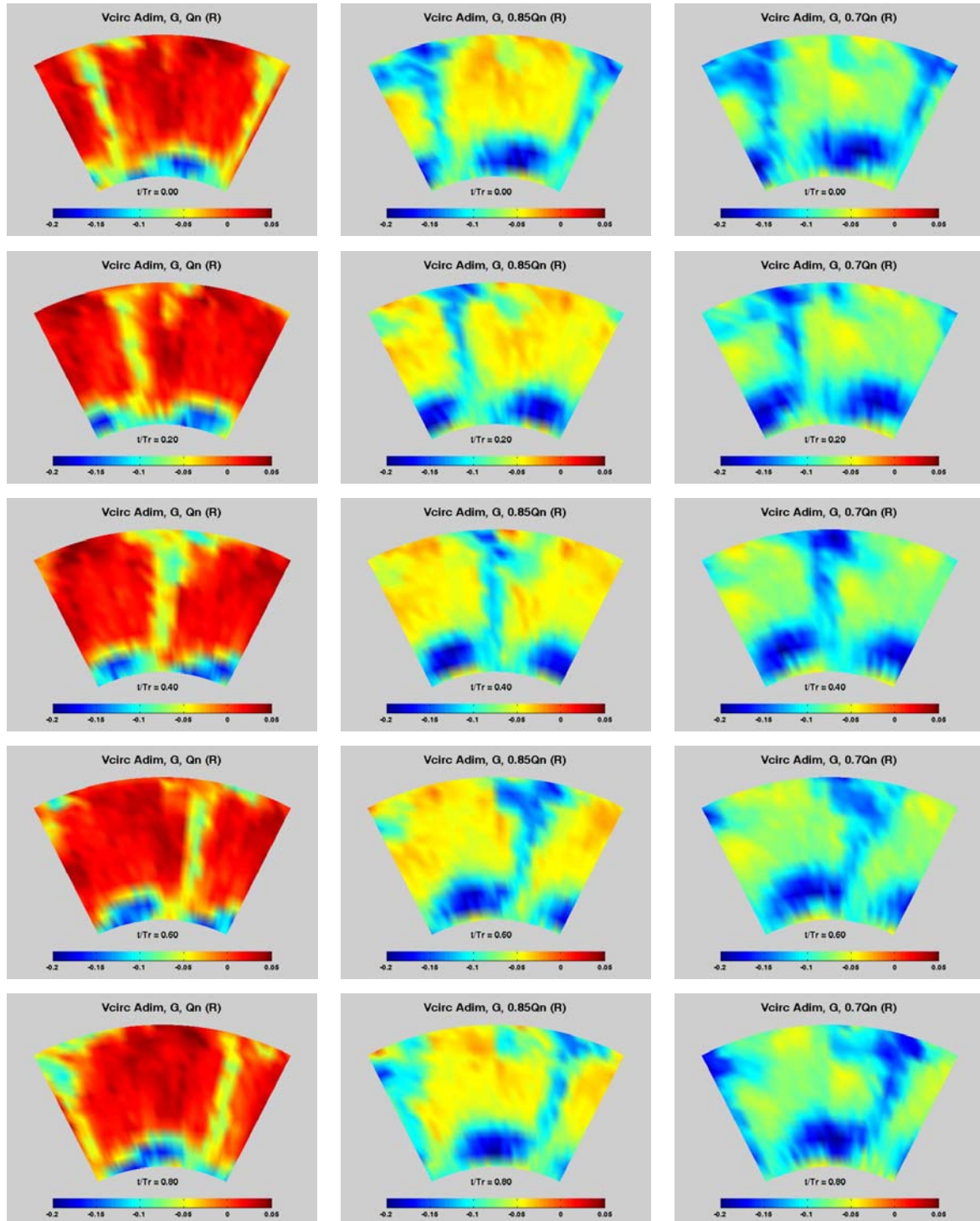


Fig. 7.6. Mapas instantáneos de la componente circunferencial de la velocidad adimensionalizada en la zona aguas abajo del rodete (R). Configuración con gap inferior. Comparativa entre caudales.



Marco de referencia del rotor

Se muestra la evolución de las componentes de la velocidad en los instantes  $t/T_S=0.000$ ;  $t/T_S=0.206$ ;  $t/T_S=0.397$ ;  $t/T_S=0.603$  y  $t/T_S=0.794$ , que corresponden con cinco instantes intermedios al paso de directriz por su canal. La figura 7.7 muestra el paso de estelas de directriz, vistas desde el rodete para la componente axial y cuyo patrón de flujo ya ha sido analizado previamente sobre la figura 7.3.

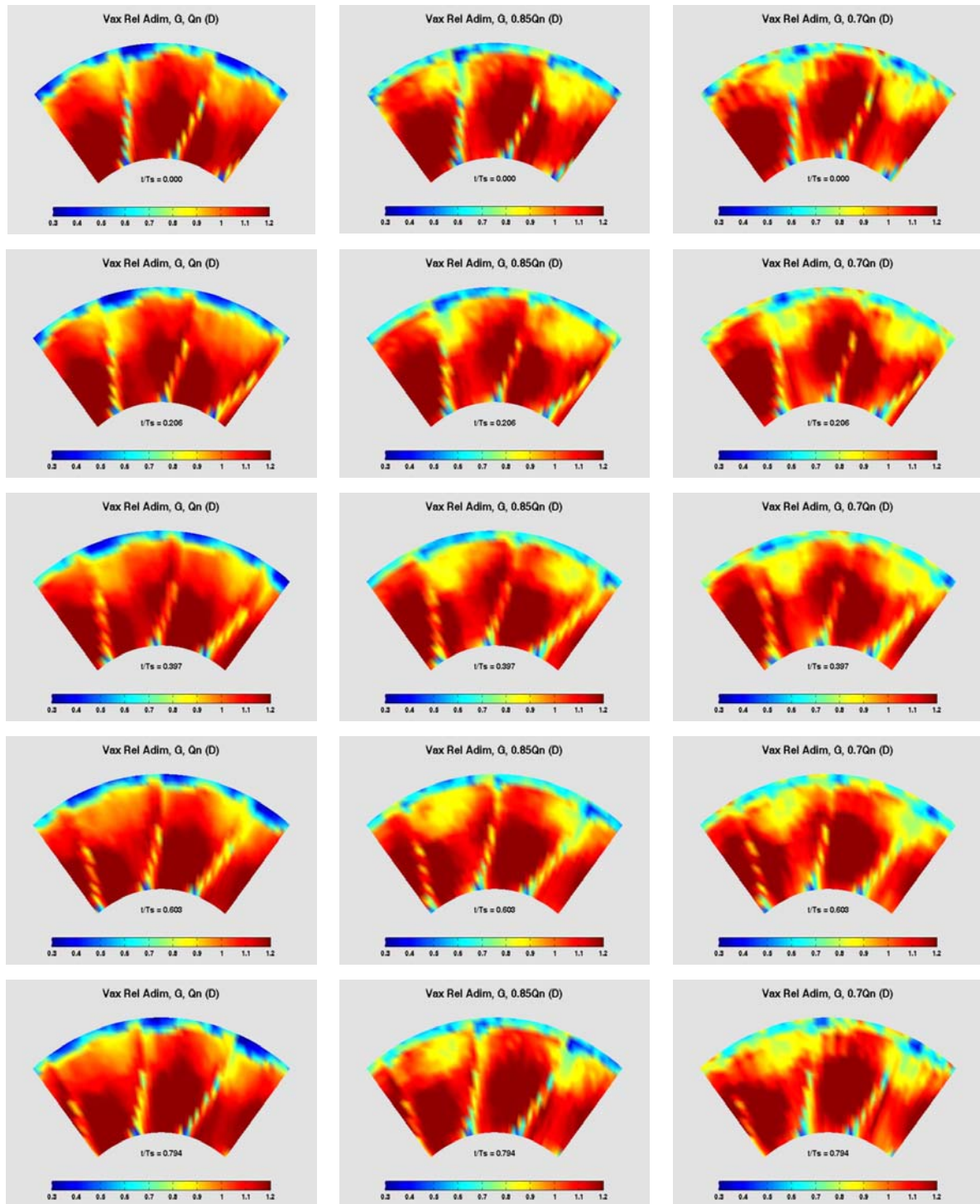


Fig. 7.7. Mapas instantáneos de la componente axial de la velocidad relativa adimensionalizada en la zona entre haces (D). Configuración con gap inferior. Comparativa entre caudales.



Es complicado tratar de analizar la interacción que las estelas del estator induce sobre las generadas por el rotor. Esto es debido a que la discretización espacial no es lo suficientemente adecuada como para poder extraer conclusiones definitivas. Es cierto que se aprecia una cierta ondulación de las estelas al paso de las estelas de directriz (p.e. caudal intermedio en  $t/T_S=0.000$ ; o en  $t/T_S=0.794$  para el caudal nominal), pero el ancho de dichas estelas es prácticamente del mismo orden que la discretización empleada.

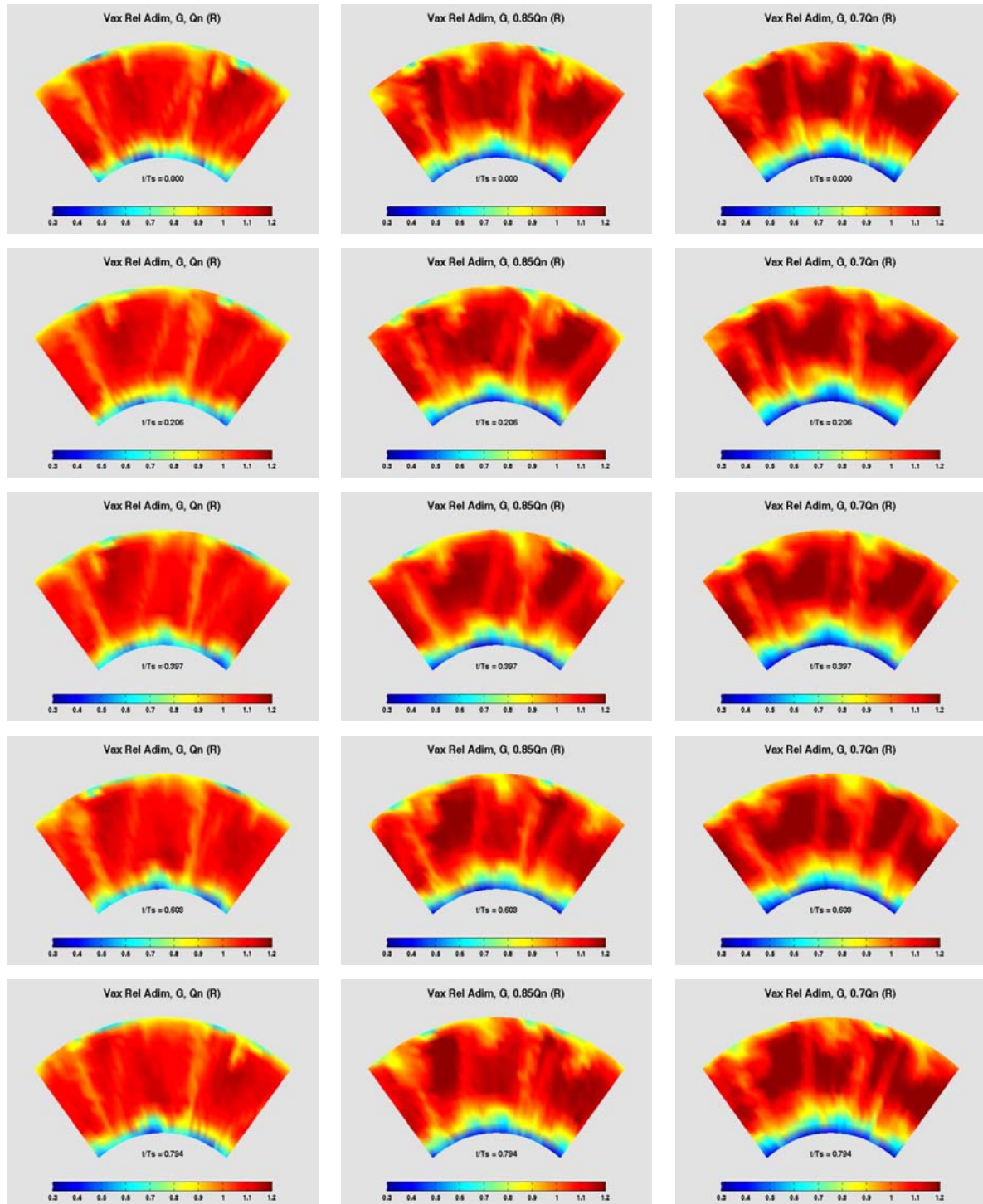


Fig. 7.8. Mapas instantáneos de la componente axial de la velocidad relativa adimensionalizada en la zona aguas abajo del rodete (R). Configuración con gap inferior. Comparativa entre caudales.





Por tanto, las estelas aparecen muy difuminadas, y se antoja bastante arriesgado asignar al paso de las estelas del estator esos efectos de ondulación, que bien podrían deberse en realidad a oscilaciones propias del método de medida.

Se finaliza este apartado con la inclusión de la componente circunferencial en el marco relativo. La figura 7.9 muestra la distribución de dicha componente entre haces, mientras que la figura 7.10 lo hace tras el rotor.

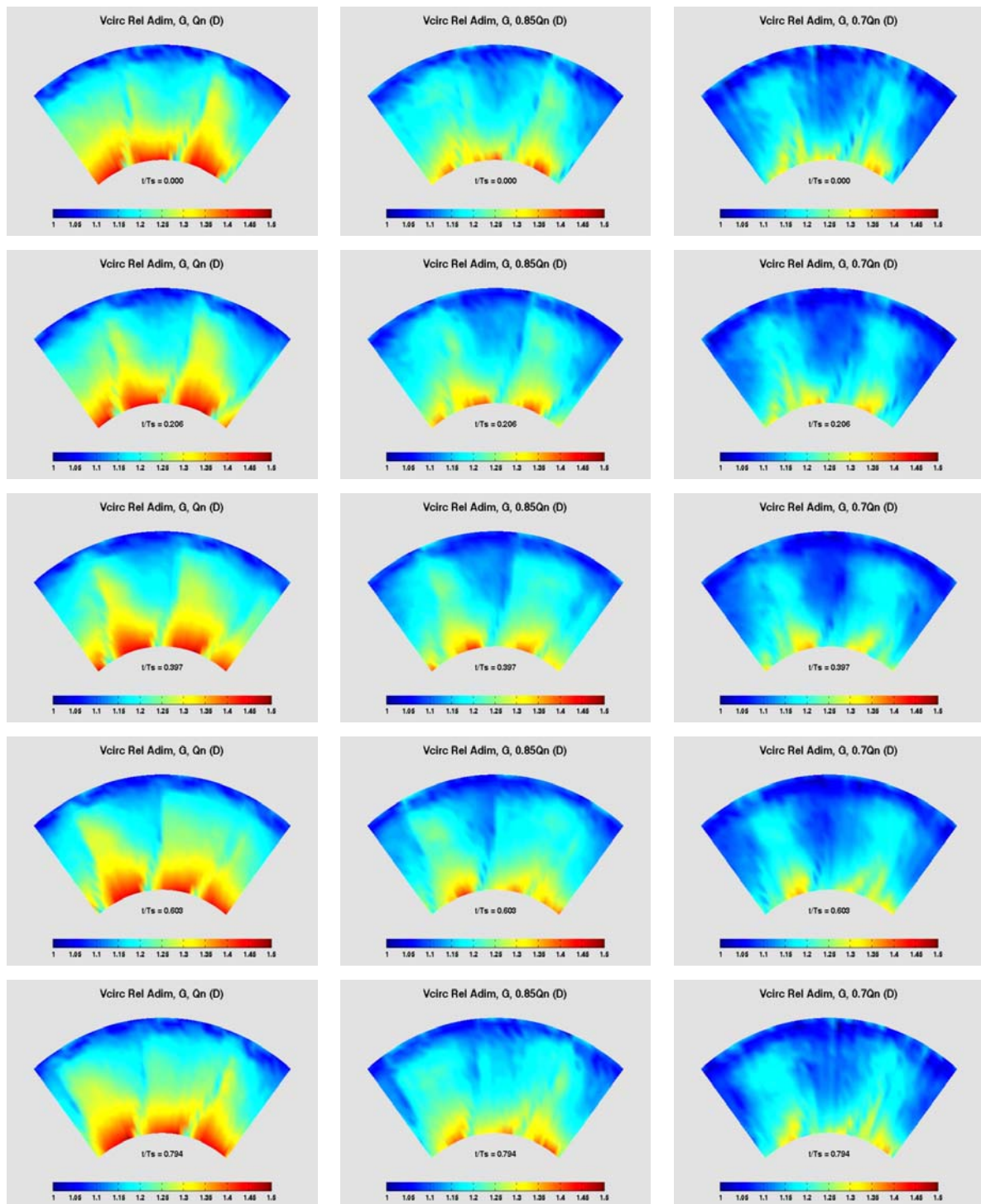


Fig. 7.9. Mapas instantáneos de la componente circunferencial de la velocidad relativa adimensionalizada en la zona entre haces (D). Configuración con gap inferior. Comparativa entre caudales.



Nuevamente se aprecia una cierta oscilación de las estelas de los álabes del rotor (p.e. a caudal nominal, nótese las diferencias entre la estela de la izquierda en  $t/T_R=0.000$  y en  $t/T_R=0.397$ ), aunque no pueda afirmarse categóricamente que es debido a la interacción con las estelas previas del estator. Estos efectos de oscilación se observarán con más detalle y certeza sobre los resultados numéricos (*ver apartado 7.3.3*).

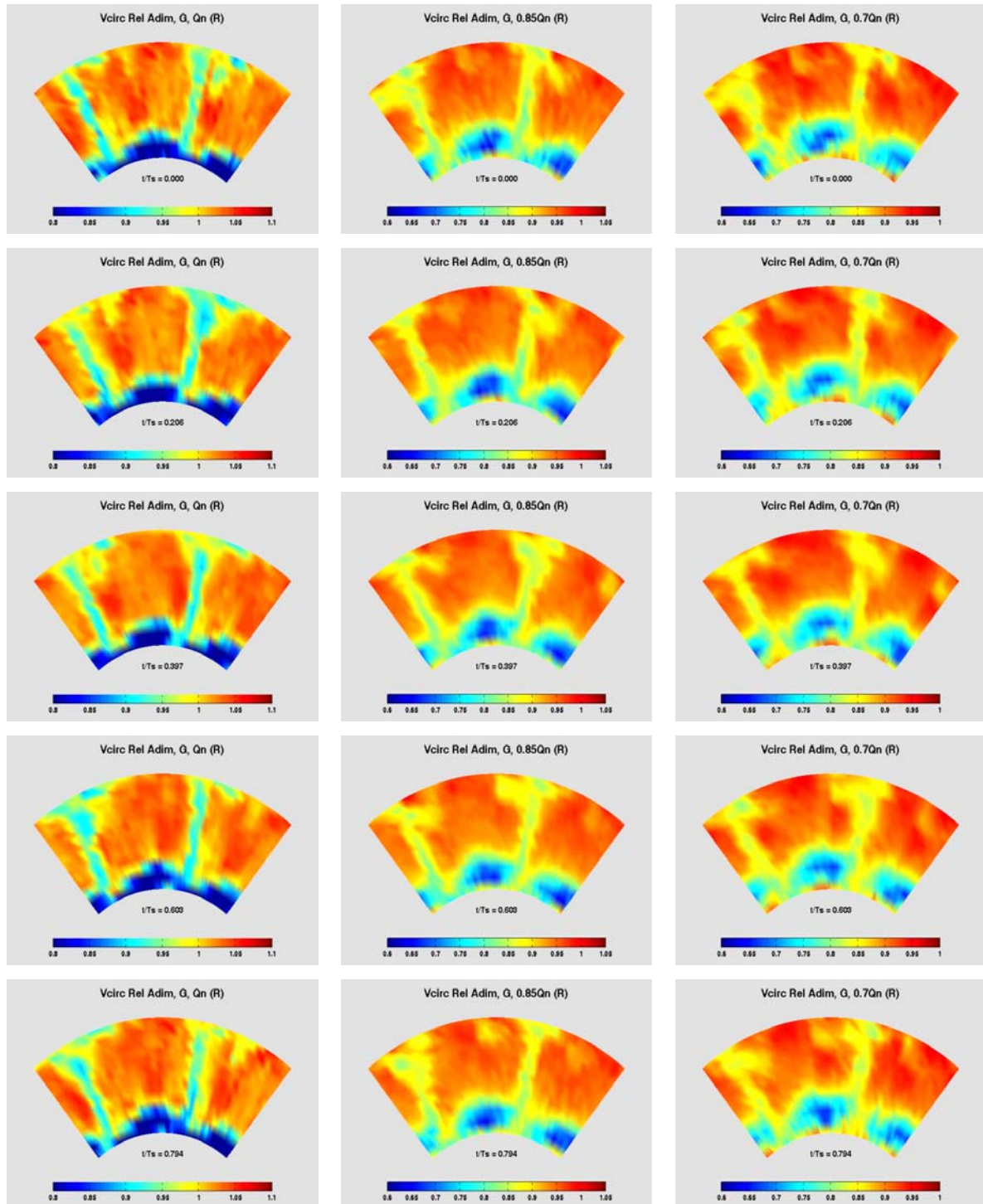


Fig. 7.10. Mapas instantáneos de la componente circunferencial de la velocidad relativa adimensionalizada en la zona aguas abajo del rodete (R). Configuración con gap inferior. Comparativa entre caudales.



### 7.3.- RESULTADOS NUMÉRICOS

Se resumen en este apartado los resultados correspondientes a los modelos numéricos no estacionarios ejecutados. En primer lugar se discute la elección del modelo de turbulencia empleado a partir de las representaciones espacio-temporales de las estelas modelizadas. Acto seguido, se exponen resultados del modelo bidimensional, analizando cómo es el flujo en las superficies álabes a álabes en varias secciones radiales para caudal nominal, completando la definición de las estelas con representaciones temporales en las tres secciones de estudio. A continuación se desarrolla el modelo numérico tridimensional, que será comparado en el último epígrafe con las medidas de anemometría térmica.

#### 7.3.1.- Comparativa LES-RSM.

Toda simulación numérica requiere la elección del modelo de turbulencia más apropiado al caso de estudio que se plantea. En esta ocasión, se ha discutido sobre la elección de un modelo de turbulencia LES frente a uno RSM, centrándose la comparativa de los modelos en la forma en que ambos esquemas son capaces de capturar las fluctuaciones de velocidad asociadas, tanto a la generación de estelas tras los álabes y directrices, como a efectos de bloqueo producidos por el movimiento de las superficies constituyentes del rotor de la máquina.

Se ha planteado una comparativa de tipo cualitativo, observando la idoneidad de cada modelo de turbulencia en referencia a lo medido experimentalmente. En concreto, se han analizado diferencias sobre las componentes axiales y circunferenciales de la velocidad en los planos situados entre haces en la etapa y tras el rotor de la máquina. Obviamente, se han elegido planos de representación en el modelo numérico de forma que sus posiciones relativas a las coronas fuesen las mismas que las definidas para la obtención de las medidas experimentales. En la figura 7.11 se han agrupado mapas temporales de la componente axial de velocidad, adimensionalizada por su propia media. En este tipo de representación, que será utilizada intensivamente a partir del próximo apartado, se genera un mapa tridimensional de la velocidad a partir de la sucesiva colocación de la distribución circunferencial de la velocidad (eje denominado *pos ang*), una detrás de otra en el tiempo, para los diversos instantes registrados (a lo largo del eje de tiempos,  $t/T_R$ ). Este mapa temporal se presenta para una posición radial concreta, en este caso, para la posición central de la envergadura, denominada *mid-span*. Debido a la periodicidad de los álabes, únicamente se representan dos canales del estator (*pitch* de directriz; en realidad bastaba con uno, pero se ha duplicado para una mejor representación), y por motivos de periodicidad temporal, solamente se representa el tiempo correspondiente al paso de un álabes de rodete, de forma también adimensional. Se muestran resultados en la zona tras directrices (D), así como en la zona posterior al rodete (R), para ejecuciones del modelo numérico con ambos esquemas de turbulencia sobre el caudal nominal. Además, se han incluido resultados tanto del modelo geométrico con *gap* superior como del modelo con *gap* inferior. El motivo de no haber incluido este análisis de los modelos de turbulencia en el capítulo anterior, se basa en las características temporales de este tipo de mapas. Es necesario que aparezca la variable tiempo para poder apreciar con perfecta claridad cómo captura cada modelo la morfología de las estelas desprendidas desde los álabes y directrices. Por tanto, puesto que no parecía apropiado adelantar este tipo de mapas al capítulo

precedente, el autor ha preferido retrasar esta comparativa LES/RSM hasta este punto del análisis de resultados.

Las estelas de las directrices, al estar fijas, aparecen como un acusado déficit en el mapa de velocidad, distribuidas paralelamente al eje de tiempo (esto es, en el tiempo no cambian de posición). Por el contrario, tras el rotor –plano (R)-, las estelas de los álabes aparecen transversalmente, como consecuencia del movimiento de las mismas en la dirección circunferencial. Agrupados por columnas, se tiene la comparativa entre los resultados LES y RSM, en referencia a lo que se ha medido experimentalmente. Como conclusiones directas más importantes destacan:

- Las estelas de las directrices aparecen más fielmente capturadas por el modelo LES que por la modelización RSM. En general, es una característica propia del modelo de turbulencia RSM, que parece laminar más claramente las variaciones espaciales. Así, la tendencia a suavizar las estelas de los álabes y directrices aparece de forma muy clara en el plano detrás de las directrices.

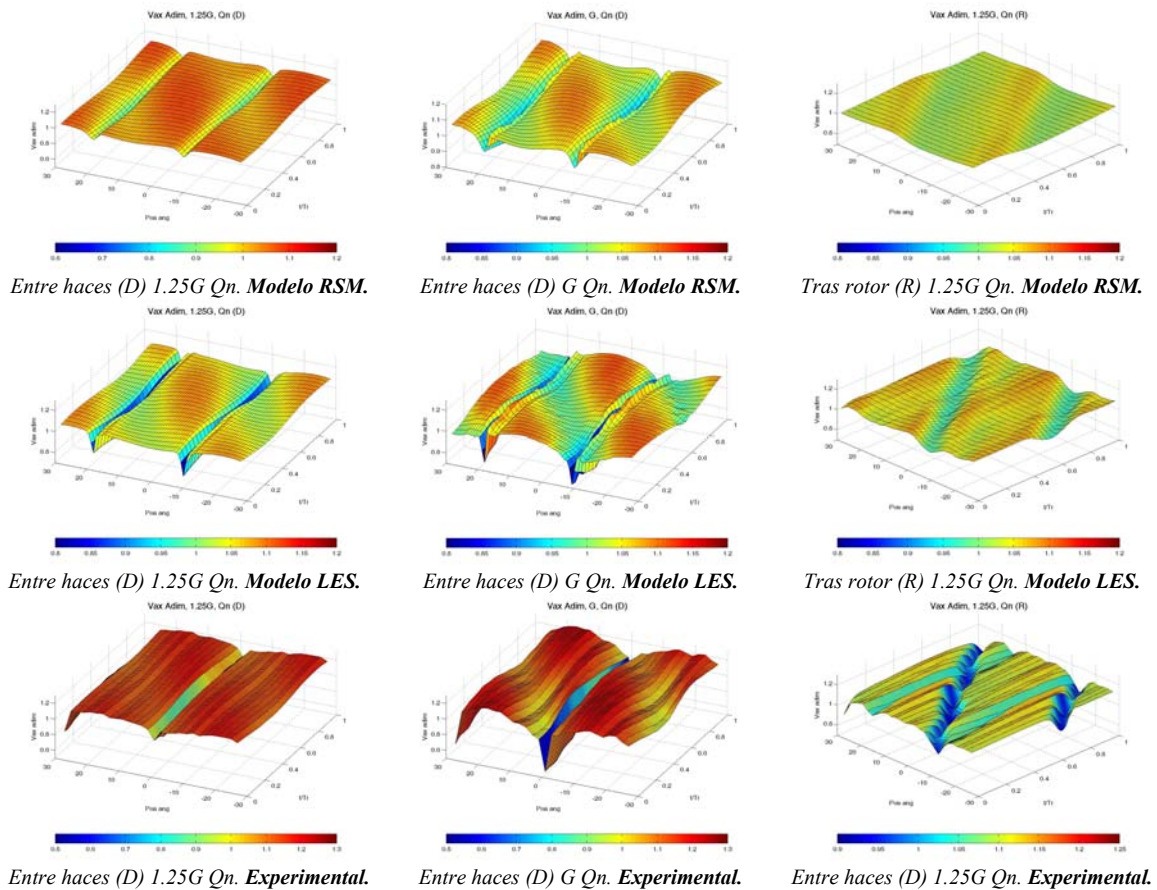


Fig. 7.11. Comparativa cualitativa entre modelos de turbulencia LES y RSM en relación a los resultados experimentales, sobre la componente axial de la velocidad.

- Tras el rotor, es definitiva la diferencia que ambos modelos presentan. En este caso, la estela del rotor no queda claramente definida por el modelo RSM, sino que se observa una cierta ondulación o modulación del flujo promedio, sin que llegue a apreciarse claramente una estructura núcleo-estela del flujo en el plano de medida. Por el contrario, el modelo LES sí es capaz de capturar más

fielmente la forma de la estela, apreciándose también el paso de las estelas provenientes del estator como una leve modulación del flujo promedio, semejante a las que aparecen en el mapa experimental.

- En general, ambos modelos reproducen con suficiente precisión el efecto de bloqueo de los álabes entre haces, manifestado como una modulación potencial, de forma transversal, como corresponde a un fenómeno que se encuentra girando en el tiempo.

En la figura 7.12 se analiza la componente circunferencial de la velocidad, adimensionalizada por la velocidad de arrastre en la zona de punta. Conclusiones análogas a las expresadas con anterioridad sobre la componente axial pueden ser establecidas para la componente tangencial. Si cabe, la componente circunferencial participa en menor medida de la estructura núcleo-estela,

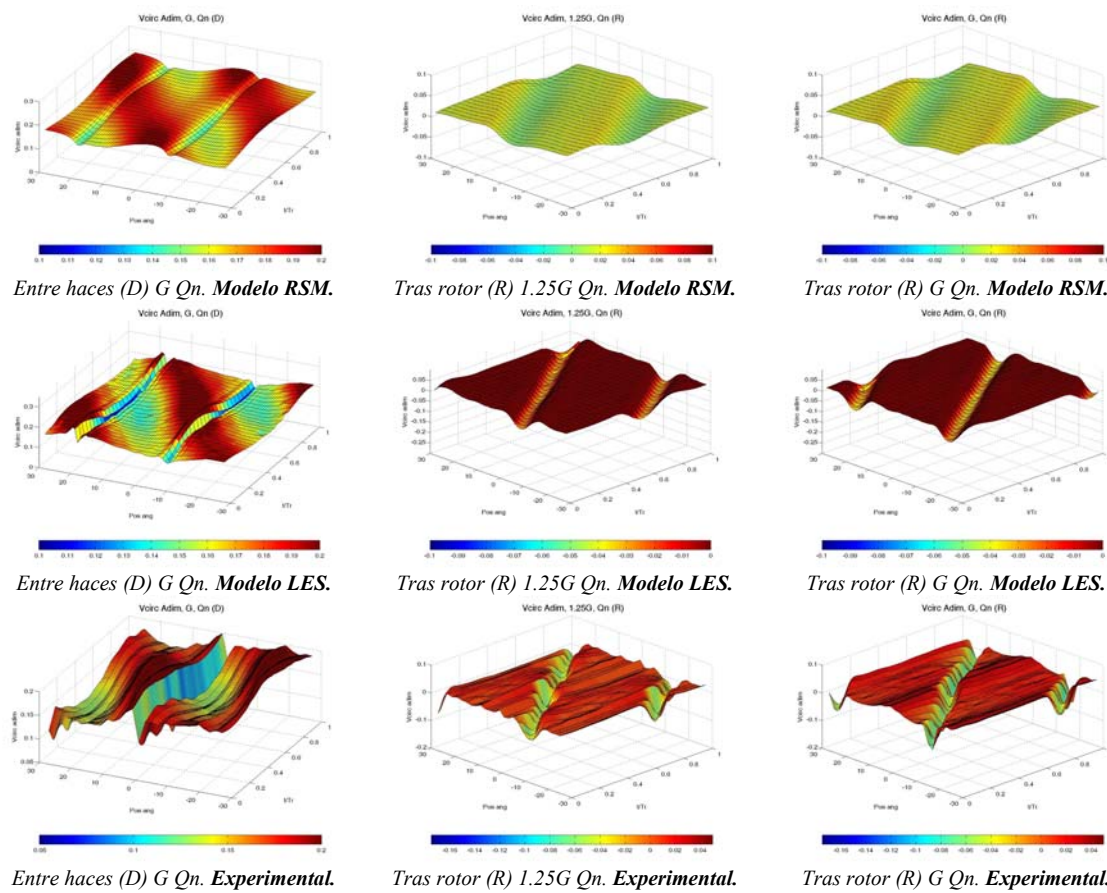


Fig. 7.12. Comparativa cualitativa entre modelos de turbulencia LES y RSM en relación a los resultados experimentales, sobre la componente circunferencial de la velocidad.

A la vista de estos diversos resultados, para el caso menos exigente en la modelización, que es el del caudal nominal, se puede concluir que si el propósito del trabajo es el estudio de la interacción entre rotor y estator entonces:

- Ambos modelos recogen con buena precisión el efecto potencial generado por el paso de los álabes. Tal efecto, manifestado como una modulación del flujo



promedio crece en ambos modelos al aproximar las coronas entre sí, lo cual confirma la robustez de su descripción numérica.

- Por el contrario, el modelo LES supera con claridad a la modelización de tensiones de Reynolds en la caracterización de las estelas generadas desde los álabes y las directrices. LES las define con mayor claridad y no favorece la excesiva difusión numérica de las mismas de la cual adolece el modelo RSM.
- Finalmente, dado que esta modelización numérica se engloba dentro de una línea de investigación más ambiciosa, en la que no sólo se pretende caracterizar el flujo, sino que también se trata de estudiar el ruido generado aerodinámicamente; la práctica totalidad de la bibliografía consultada acerca de fenómenos aeroacústicos, recomienda el empleo de modelizaciones LES para los cálculos aerodinámicos de partida.

### 7.3.2.- Simulación bidimensional.

Continuando con la nomenclatura definida en el capítulo seis, y manteniendo las mismas secciones y sectores de referencia para el análisis de las diversas variables, se inicia el estudio de la interacción no estacionaria en superficies álabe a álabe para las secciones de base, centro y punta del ventilador. Solamente se reproducen aquí resultados para caudal nominal.

#### 7.3.2.1.- Representaciones álabe a álabe.

##### Marco de referencia del estator

Ante la imposibilidad material de reproducir la secuencia completa del movimiento del rotor a lo largo del tiempo, se han capturado cuatro instantes intermedios en el devenir de un álabe a lo largo de un canal del rotor. Debido a la periodicidad en el movimiento de las superficies, el flujo en el marco de referencia fija se hace periódico cada vez que un álabe recorre por completo tangencialmente uno de sus canales. El tiempo transcurrido en dicho tránsito se denota como  $T_R$  y corresponde con  $1/9$  del período de giro de la máquina (0.025 s).

La figura 7.13 muestra el mapa de velocidad adimensionalizada desde un punto de vista absoluto en la sección de base, para los dos casos de *gap* superior e inferior modelizados. Cuando se alcanza el instante  $t/T_R=1.0$ , la posición relativa de los álabes con respecto al estator es idéntica a la observada en el instante inicial, por lo que la simulación del paso de un canal basta para caracterizar el giro completo del ventilador. Se han representado los instantes  $t/T_R=0.0$ ;  $t/T_R=0.24$ ;  $t/T_R=0.52$  y  $t/T_R=0.76$ , para lograr un seguimiento lo más lineal posible de las estelas y del movimiento de los álabes. Sobre la figura cabe destacar:

- En  $t/T_R=0.0$ , en la distribución de velocidad sobre la cara de succión del álabe central de la figura (caso de *gap* superior), comienza a incidir la estela de una directriz previa. Dicha distribución se ve deformada por esa estela, obligando a que el máximo de velocidad se retrase sobre la cara de succión. En el instante



$t/T_R=0.24$ , el álabe se ha desplazado lo suficiente como para que la estela incidente de antes, comience a abandonar la zona de carga aerodinámica. En ese momento, el máximo de velocidad se vuelve a “adelantar”, acercándose al borde de ataque del álabe en cuestión. Este movimiento de retraso y adelanto de la carga aerodinámica es un claro efecto no estacionario producido por las estelas del estator aguas arriba.

- Otro efecto inducido por las estelas del estator al paso de los álabes es su penetración por los canales del rotor, rompiendo la distribución de velocidad que se establece entre la cara de presión de un álabe en la zona del borde de ataque y la zona de cola de la cara de succión. Comparando  $t/T_R=0.52$  y  $t/T_R=0.76$ , se aprecia cómo la estela del estator ha penetrado por completo en el canal, rompiendo el patrón de velocidades.

Los efectos anteriores se pueden apreciar claramente en el punto de vista relativo (figura 7.16). Es interesante centrarse sobre lo que le ocurre a las directrices en el borde de salida, que están sufriendo el paso de álabes de rotor con mucha claridad. Por ejemplo:

- Las estelas de las directrices se alargan y acortan notablemente al interactuar bien con la zona de estancamiento de los álabes, bien con la carga aerodinámica de los álabes. Obsérvense las diferencias a tal extremo entre la estela de la directriz de la derecha de la figura en  $t/T_R=0.24$  o  $t/T_R=0.52$  y la estela de la directriz central en  $t/T_R=0.0$ .
- La cara de succión de cada directriz sufre distorsiones muy importantes al paso de cada álabe del rodete. Obsérvense la evolución de la distribución de velocidad en dicha zona a lo largo de los cuatro instantes aquí representados y cómo la carga aerodinámica del álabe se asocia a la de directriz, arrastrándola a su paso. En  $t/T_R=0.76$ , la zona de afección de la cara de succión alcanza a la estela del perfil contiguo, debido al arrastre (*shift*) generado por el campo de presiones del álabe, y a la gran solidez de la etapa en ese radio (directrices muy próximas entre sí).

Se completa el análisis en la zona del cubo con la comparativa entre los dos *gaps* de estudio. Como puntos de interés más relevantes se pueden citar:

- La interacción entre las caras de succión de álabes y directrices es notablemente mayor que antes. Si se comparan ambas figuras para  $t/T_R=0.76$ , se aprecia que mientras la interacción de ambas distribuciones de velocidad ya se ha disociado en el *gap* superior casi por completo, sobre el *gap* inferior persiste, aún cuando la carga aerodinámica del álabe implicado sobrepasa ya la estela de la directriz contigua a la de interés.
- Además, las estelas del estator penetran con mayor claridad en los canales entre álabes, merced al acercamiento relativo entre haces. Esto se puede observar de nuevo con mayor claridad en la evolución de la velocidad en el marco relativo. Curiosamente, las estelas del estator parecen ser más cortas entre los haces, al disponer de menor espacio en el que desarrollarse.

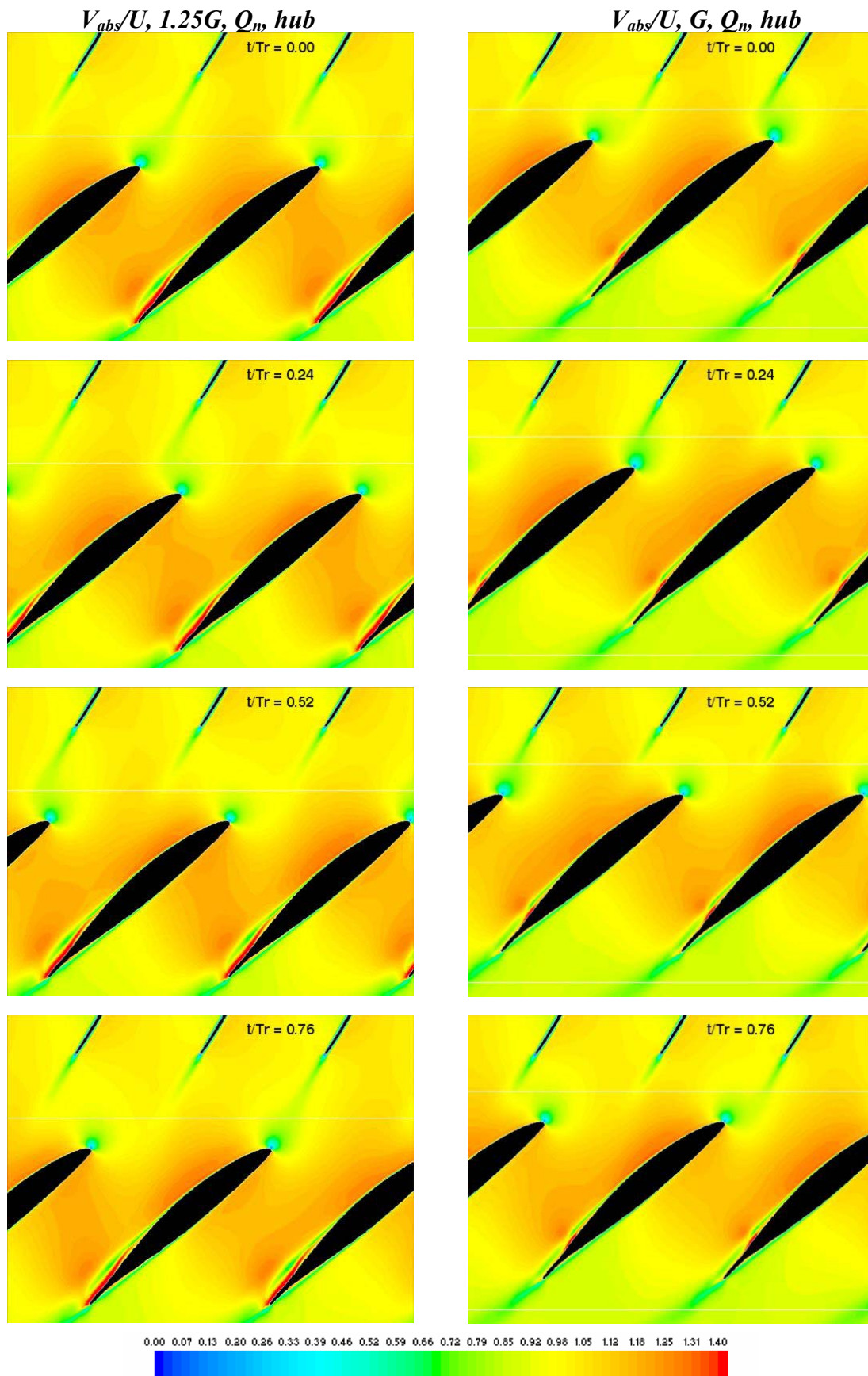


Fig. 7.13. Mapas instantáneos de la velocidad absoluta en la sección de base, adimensionalizados por la velocidad de arrastre en dicha sección. Comparativa entre gaps.



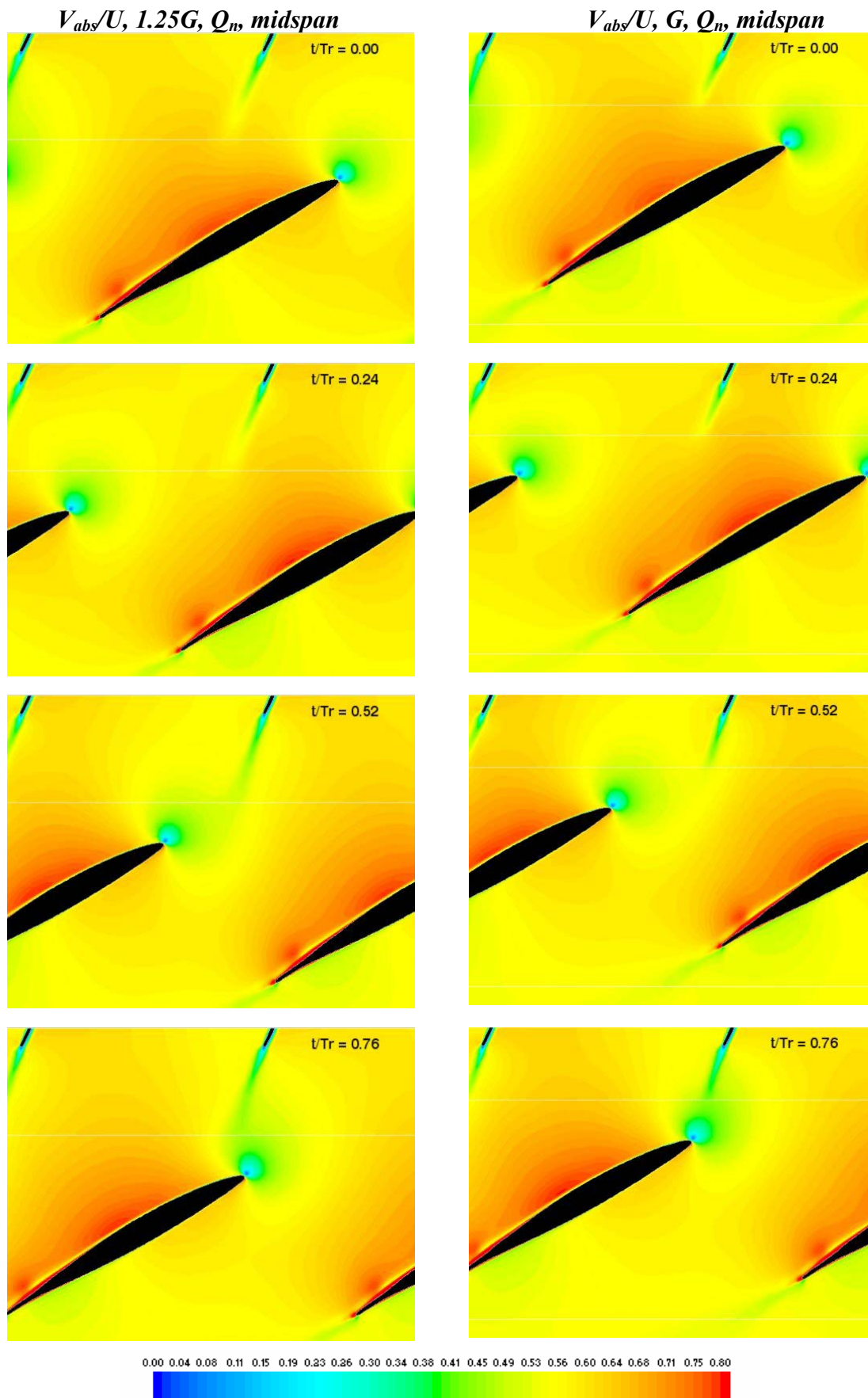


Fig. 7.14. Mapas instantáneos de la velocidad absoluta en la sección media, adimensionalizados por la velocidad de arrastre en dicha sección. Comparativa entre gaps.



La figura 7.14 permite analizar características del flujo similares a las descritas hasta ahora, pero en la sección central de la soplante. El aumento de la solidez, la mayor separación entre álabes y directrices (mayor *pitch* del canal) hace cambiar sustancialmente alguno de los aspectos que se veían en la zona de cubo. Las principales características dinámicas del flujo son ahora:

- Nuevamente las estelas inciden claramente sobre la distribución de velocidad en la cara de succión del álabe, penetrando en ella y distorsionando su forma conforme avanza el álabe. Al incidir de forma más perpendicular respecto del álabe que en la zona de cubo, no se aprecia que adelanten o retrasen el máximo de la distribución como antes: simplemente modulan.
- La mayor perpendicularidad que presentan las estelas en relación a la carga aerodinámica del álabe hace que ellas mismas modifiquen algo su trayectoria al paso de los álabes. La estela es “empujada” en el sentido de giro del rotor conforme va llegando el álabe que interactuará con la estela de cuestión. Véase este efecto comparando la estela de la directriz de la derecha en  $t/T_R=0.0$  y  $t/T_R=0.52$ .
- Se forma un pequeño punto de interacción en la cara de presión de las directrices, como un residuo de la asociación previa del paso de la carga aerodinámica de cada álabe con la distribución de velocidad de la cara de succión del estator. Se va formando en  $t/T_R=0.24$  y comienza a desaparecer en  $t/T_R=0.52$ . Este efecto no se daba en la zona del cubo.
- Nuevamente se observa el paso de estelas del estator por los canales del rotor, rompiendo la distribución de velocidades en el canal ( $t/T_R=0.24$  a  $t/T_R=0.52$ ).

Respecto a la diferencia entre *gaps*, se puede observar una mayor perturbación en la trayectoria de las estelas (se aprecia claramente en la animación del mapa de velocidad), así como una más clara interacción de las estelas con la distribución de velocidad en la cara de succión, de forma similar a lo visto en la sección de base.

Finalmente, el punto de vista del estator se completa con los mapas de velocidad adimensional en la zona de punta, siempre a caudal nominal. Siguiendo el mismo esquema que hasta ahora, la figura 7.15 incorpora la comparativa entre los dos *gaps*. Por cuestiones relacionadas con el origen de tiempos en la simulación de un canal, los mapas a *gap* inferior muestran un tiempo relativo diferente. Se ha respetado la posición relativa entre haces en un caso y otro para su comparación, de ahí la discrepancia en el tiempo, al haber partido ambas ejecuciones de una posición (origen de tiempos) distinta. Sobre esta sección se puede observar lo siguiente:

- Destaca lo grande que se ha hecho la zona de estancamiento del álabe, y cómo se ha retrasado la zona de carga aerodinámica del álabe, la cual nota de forma leve el paso de las estelas del estator. Además, ha desaparecido una zona de incremento de velocidad que en el resto de secciones se formaba en el borde de salida de los álabes sobre la cara de succión.

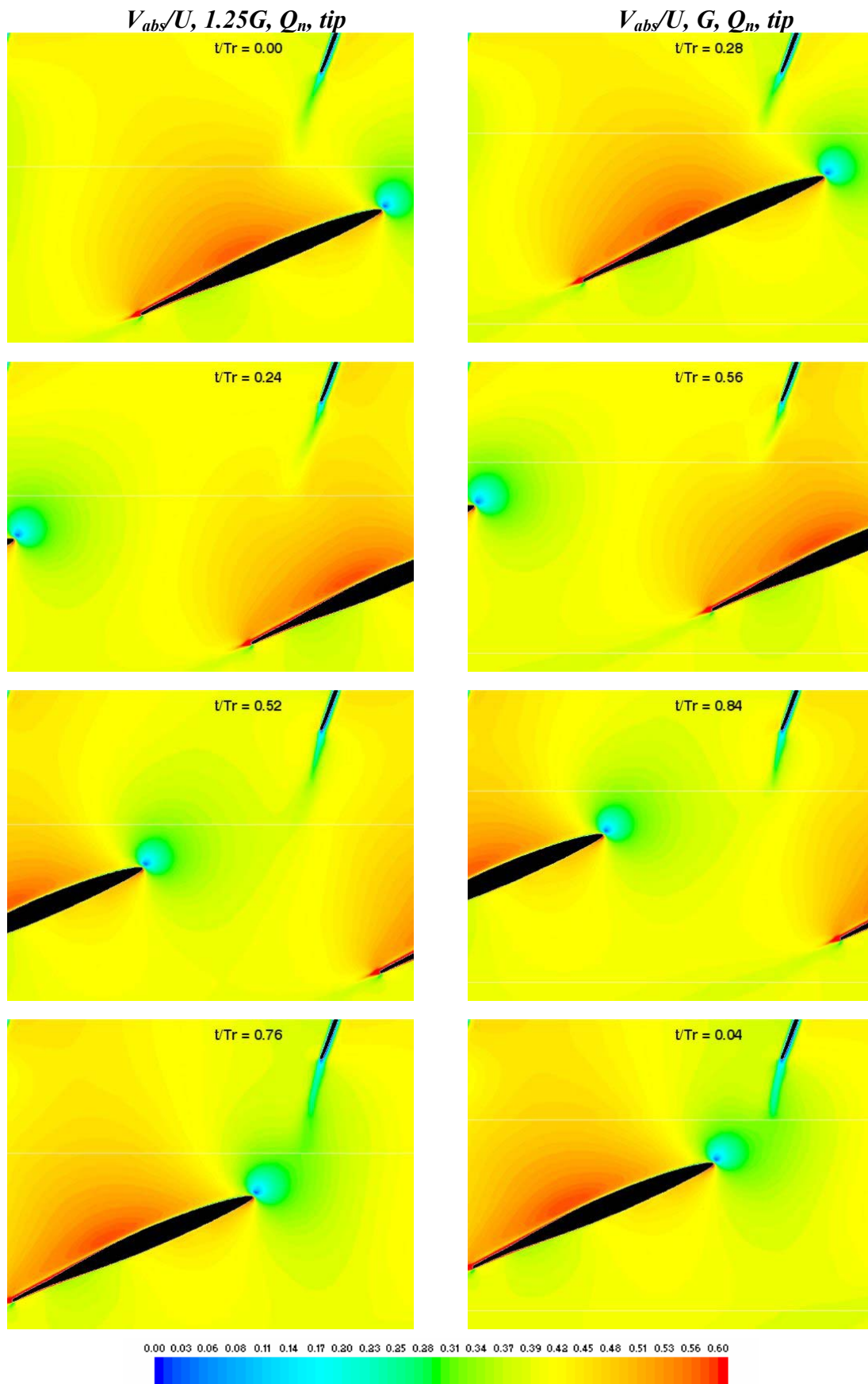


Fig. 7.15. Mapas instantáneos de la velocidad absoluta en la sección de punta, adimensionalizados por la velocidad de arrastre en dicha sección. Comparativa entre gaps.



- Y es que prácticamente, cada álabe se encuentra aislado del resto. La cascada de álabes se ha separado notablemente, y aunque evidentemente cada uno no trabaja como si estuviese aislado, es cierto que ya no hay ningún tipo de interacción entre las caras de presión y de succión de dos álabes consecutivos. Por esta razón, la carga en la zona de succión ocupa toda la superficie alar.
- Las estelas del estator serpentean ya claramente (véase  $t/T_R=0.00$  y  $t/T_R=0.76$ ), y establecen una mayor interacción con la zona de estancamiento que con la carga aerodinámica propiamente dicha de los álabes. Además, no es necesario que “rompan” la distribución de velocidad al paso por los canales del rodete; como ya se ha comentado antes, no hay interacción entre caras complementarias de álabes adyacentes.
- La reducción del *gap* desencadena de nuevo la aparición de una interacción más importante entre la carga de los álabes y la cara de presión de las directrices ( $t/T_R=0.56$ ), en forma de incremento de velocidad puntual. Además, la oscilación de las estelas se incrementa, al acercarse más al estator la gran zona de estancamiento en el borde de ataque de los álabes: primero interacciona la estela con el punto más adelantado de dicha zona (es incipiente en  $t/T_R=0.84$ ) – curvándose aquella en cierto modo en el sentido de giro del rotor- y cuando se han separado ( $t/T_R=0.28$ ), la estela vuelve a tener la dirección que le confiere la curvatura de la directriz.

### Marco de referencia del rotor

Representando el mapa de velocidad relativa en cada paso temporal, y anclando el punto de vista a un álabe en movimiento, se consigue observar la evolución desde un marco de referencia móvil. En este caso, el flujo se vuelve periódico cada vez que una directriz recorre, en sentido contrario al giro del rotor visto desde fuera, uno de sus canales tangencialmente. El tiempo transcurrido en cubrir ese *pitch* circunferencial se denota por  $T_S$  y corresponde con 1/13 del período de giro de la máquina.

Las figuras 7.16, 7.17 y 7.18 muestran en las tres secciones de base, media y punta, la velocidad relativa adimensionalizada para las dos configuraciones de *gap* analizadas. Se han representado cuatro instantes intermedios ( $t/T_S=0.0$ ;  $t/T_S=0.235$ ;  $t/T_S=0.529$  y  $t/T_S=0.765$ ) para observar la evolución de las variables. Ha de advertirse que la información contenida en estas figuras es exactamente la misma que en las figuras previas, si bien la diferencia descansa en la forma en que va a ser vista la información por cada observador. Este tipo de representación permite analizar con mayor nitidez los efectos de las estelas de las directrices sobre las distribuciones de velocidad de los álabes. Así, en la sección de base, se observa una distribución de velocidad en los álabes muy concentrada en la zona cercana al borde de entrada, en la cara de succión. Las estelas alteran de forma importante todo el flujo en el interior de los canales del rotor (lo modifican y lo separan), pero las distribuciones no sufren excesivos cambios de tamaño. La interacción potencial entre caras de álabes y directrices aparece, pero no es tan grande como en las otras dos secciones. Precisamente, ocurre lo contrario con el efecto de las estelas. Es verdad que siempre “cortan” la carga aerodinámica del álabe como si de un cuchillo que penetra en ellas se tratase, pero conforme se sube radialmente por las cascadas de la soplante, el efecto comienza a ser más local, que global, en todo el perímetro tangencial de los canales.

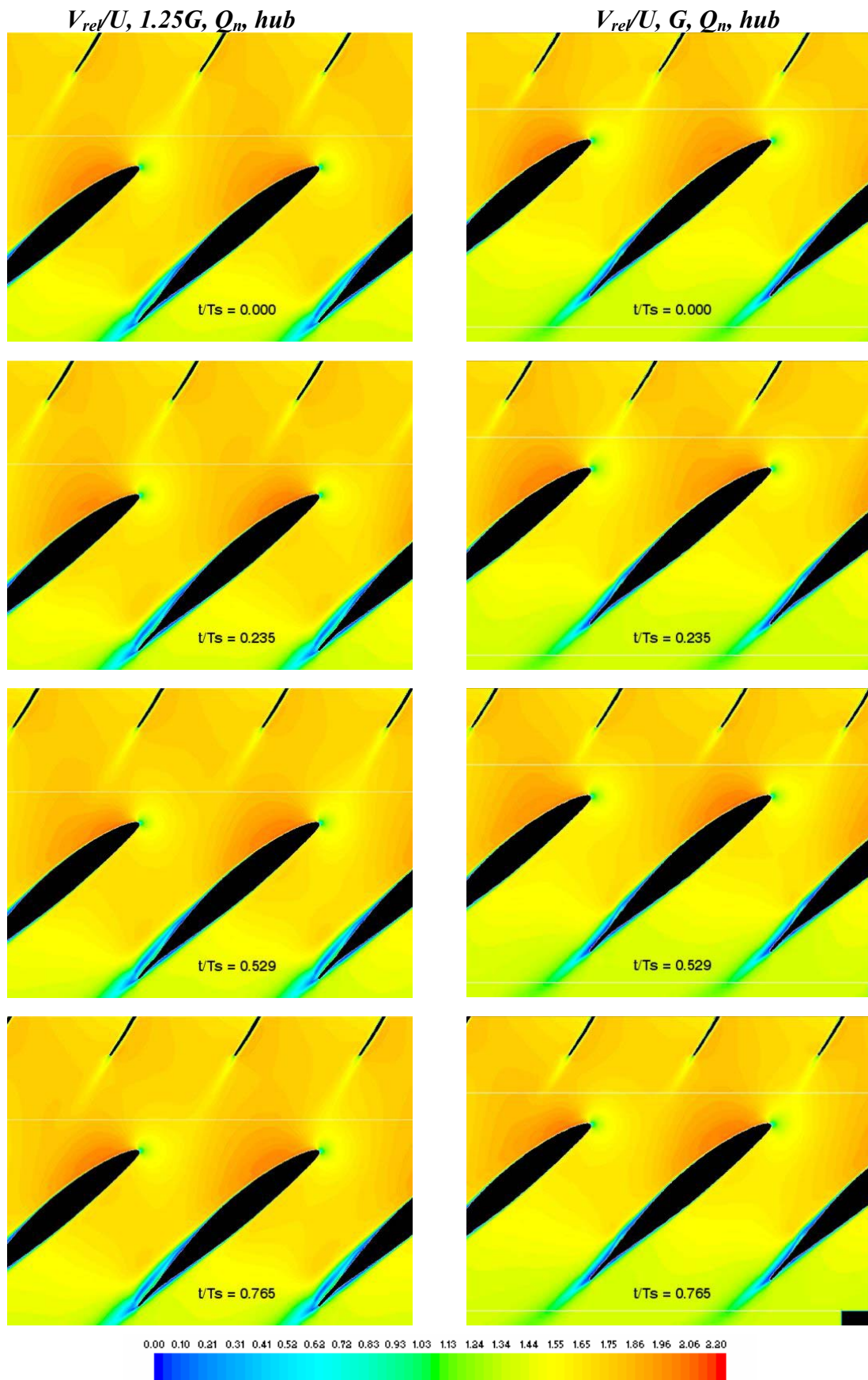


Fig. 7.16. Mapas instantáneos de la velocidad relativa en la sección de base, adimensionalizados por la velocidad de arrastre en dicha sección. Comparativa entre gaps.

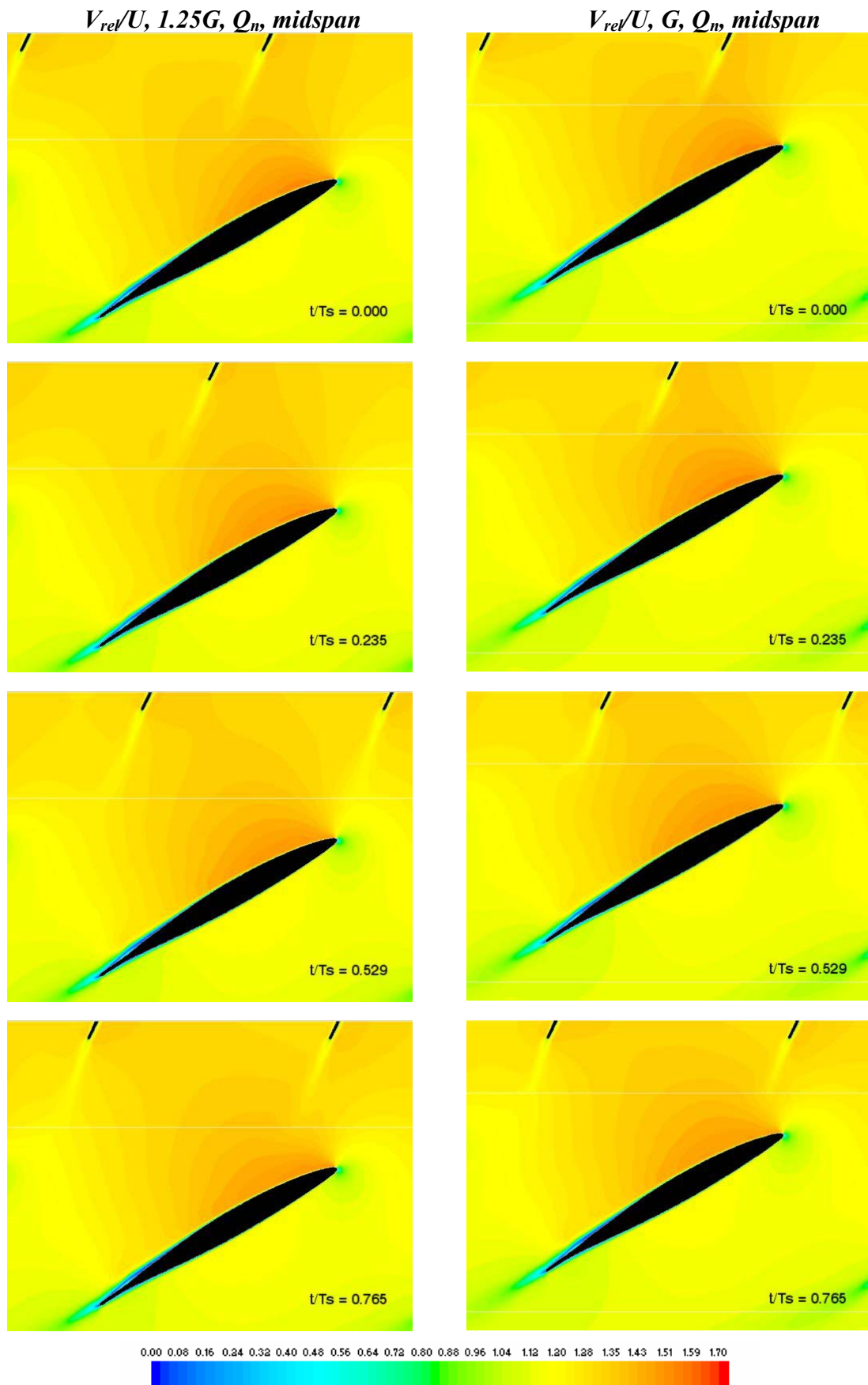


Fig. 7.17. Mapas instantáneos de la velocidad relativa en la sección media, adimensionalizados por la velocidad de arrastre en dicha sección. Comparativa entre gaps.

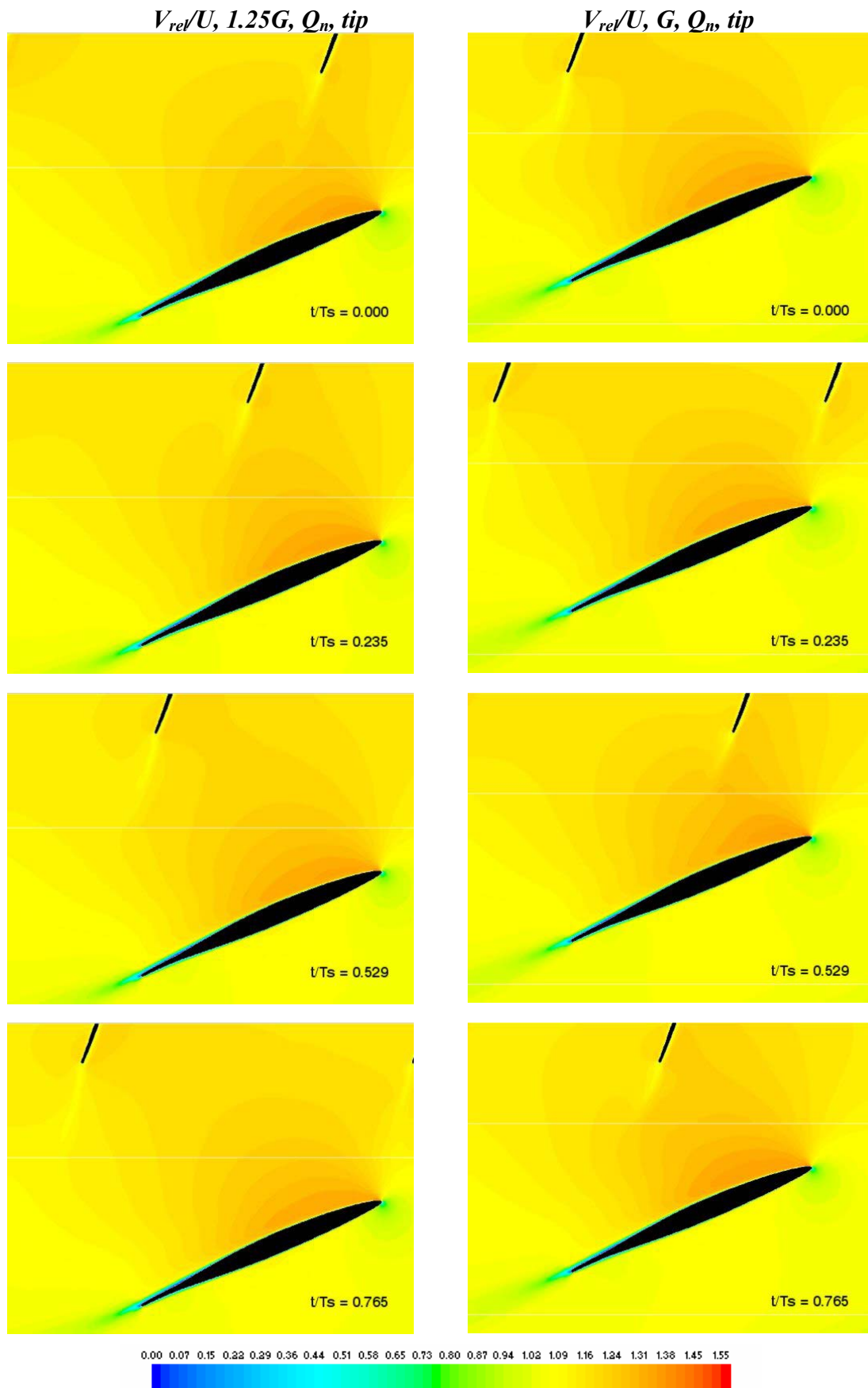


Fig. 7.18. Mapas instantáneos de la velocidad relativa en la sección de punta, adimensionalizados por la velocidad de arrastre en dicha sección. Comparativa entre gaps.



### 7.3.2.2.- Distribuciones de presión sobre álabes y directrices.

En este apartado se cuantifican las distribuciones instantáneas de presión sobre los álabes y las directrices. Se van a observar las variaciones de la carga aerodinámica sobre los haces fijo y móvil y cómo afectan las interferencias entre coronas en los campos de presión sobre las caras de succión y de presión de los diversos perfiles.

Se comienza mostrando la carga aerodinámica en las directrices en diversos instantes de tiempo -  $t/T_R=0.00$ ;  $t/T_R=0.26$ ;  $t/T_R=0.52$  y  $t/T_R=0.76$  - (figura 7.19). Se ha representado la presión estática sobre la cara de succión y de presión de los perfiles, a

través del coeficiente  $S = 1 - \frac{(p - p_{inlet})}{1/2 \rho W_m^2}$ . Son resultados instantáneos para la configuración con *gap* inferior en las tres secciones de análisis: base, media y punta. Con este coeficiente, se establece el equilibrio de presiones en la unidad, de forma que la cara de succión quedará siempre por encima de uno (se está restando la depresión con su signo), mientras que la cara de presión queda por debajo de dicho valor unitario.

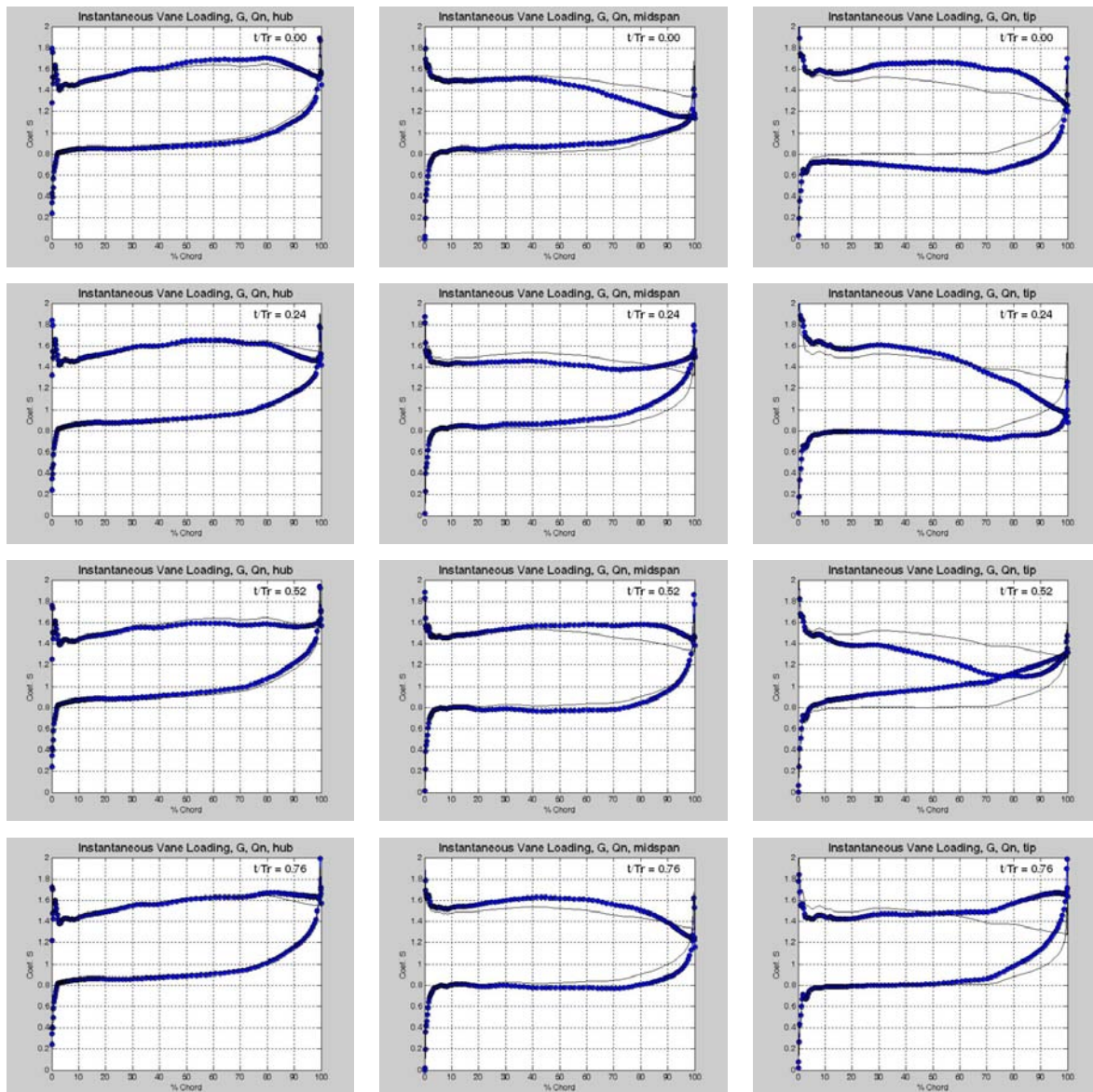


Fig. 7.19. Carga aerodinámica instantánea en las directrices en varias secciones. Gap inferior.





Cada figura muestra además el valor medio de las distribuciones (línea negra), para poder apreciar las diferencias en cada instante con el promedio de la carga aerodinámica. No se han incluido los mapas para el *gap* superior, pues muestran tendencias similares a los de la figura 7.19, pero con menores variaciones locales. Cabe destacar cómo la oscilación es mucho mayor conforme se observa una sección más cercana en la punta. Evidentemente, las oscilaciones de importancia se sitúan en las zonas finales de la directriz, pues es ahí donde se focaliza la interacción (del 70% de la cuerda en adelante en base y sección central). Pero en la punta, la interacción afecta prácticamente a toda la cuerda de la directriz (desde el 30-40% de la cuerda en adelante), de forma tan brutal que incluso hay instantes (en  $t/T_R=0.52$ ) en que las caras de succión y presión se invierten, inducidas por la carga aerodinámica de los álabes que penetran ostensiblemente entre los canales del estator (figura 7.15).

La figura 7.20 plantea un análisis similar sobre la superficie de los álabes. Se toman cuatro instantes intermedios en la duración total de un paso de directriz. ( $t/T_S=0.000$ ;  $t/T_S=0.235$ ;  $t/T_S=0.529$ ;  $t/T_S=0.765$ ).

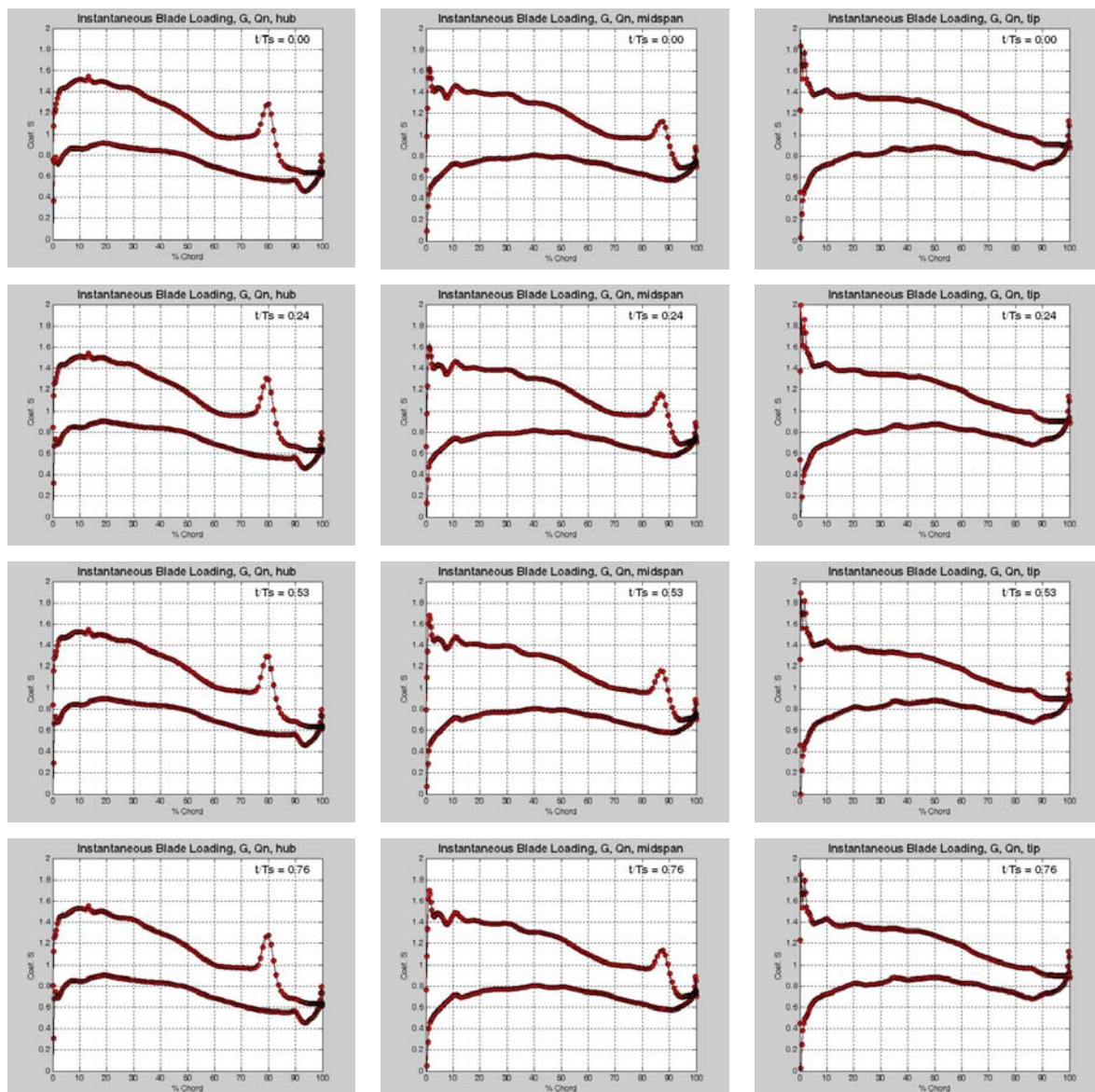


Fig. 7.20. Carga aerodinámica instantánea en los álabes en varias secciones. Gap inferior.



Las oscilaciones se concentran exclusivamente en la cercanía del borde de ataque de los álabes, siendo nuevamente algo más notables en las secciones cercanas a la punta. Sin embargo, las oscilaciones son de un orden de magnitud inferior a las observadas sobre las directrices. De hecho, nótese cómo la evolución temporal de la distribución apenas se aleja de su propia media (ambas curvas están siempre prácticamente superpuestas).

En las distribuciones de presión sobre los álabes, se observa en las secciones de base y media un repunte en la cara de succión, cercano al borde de salida (sobre el 80-90% de la cuerda): esto corresponde a la zona de desprendimiento de la capa límite en esa cara, que como ya se vio en los mapas de velocidad, engruesa para radios pequeños de la máquina. Este efecto se puede ver más en detalle sobre la figura 7.21, donde se representa el mapa de vectores de velocidad relativa sobre los álabes en las tres secciones de estudio. La forma abrupta en la que fueron rematados los bordes de salida de los álabes NACA 65 en el mecanizado, fuerza la existencia de una célula de recirculación del flujo en la cara de succión de los álabes en la base y la sección central (mapas de la izquierda en la figura 7.21). Este tipo de efectos locales no es recogido por la modelización tridimensional, que consta con una discretización espacial mucho más modesta. Aun así, sorprende que una vez iniciado el desprendimiento, el flujo vuelva a pegarse a la pared del álabes, en vez de separarse definitivamente.

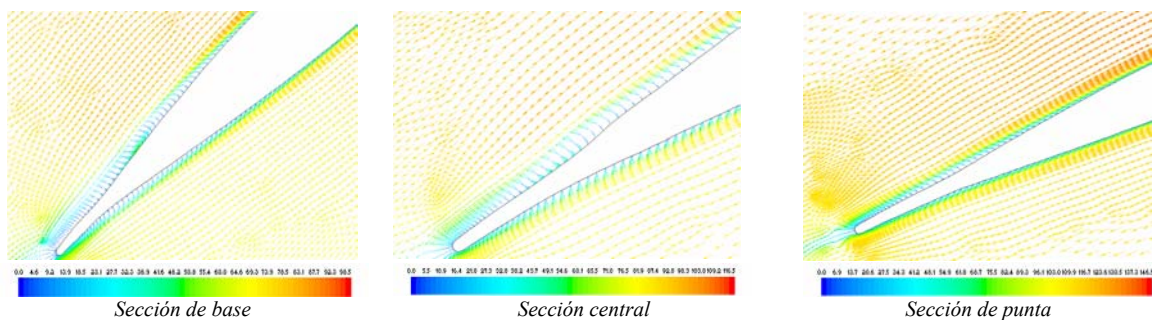


Fig. 7.21. Mapas de vectores de la velocidad relativa sobre la superficie de los álabes.

### 7.3.2.3.- Representaciones temporales

Tomando como referencia una línea situada a 15 mms de separación axial con respecto al borde de salida de las directrices, se puede dibujar la distribución circunferencial (de toda la máquina, o bien de un canal) de las componentes axial y tangencial de la velocidad en un instante determinado. Si a continuación, para el siguiente instante, se coloca la misma distribución de velocidad detrás de la primera, se puede ir construyendo un gráfico tridimensional tal y como se aprecia en la figura 7.22. El eje de profundidad corresponde al eje de tiempos, adimensionalizado a la duración de paso de álabes (referencia absoluta), mientras que el titulado “*pos ang*” representa dos canales de directriz (por eso varía entre 0 y 2, en tanto por uno). El eje vertical contiene la escala de la velocidad adimensionalizada por su media, centrada en la unidad. La línea elegida para la representación coincide en su situación en el modelo numérico con la posición relativa del sector (D) de las medidas experimentales, para garantizar la comparativa entre resultados. La figura 7.22 muestra resultados sobre las tres secciones de base, media y punta para ambos *gaps* de estudio.

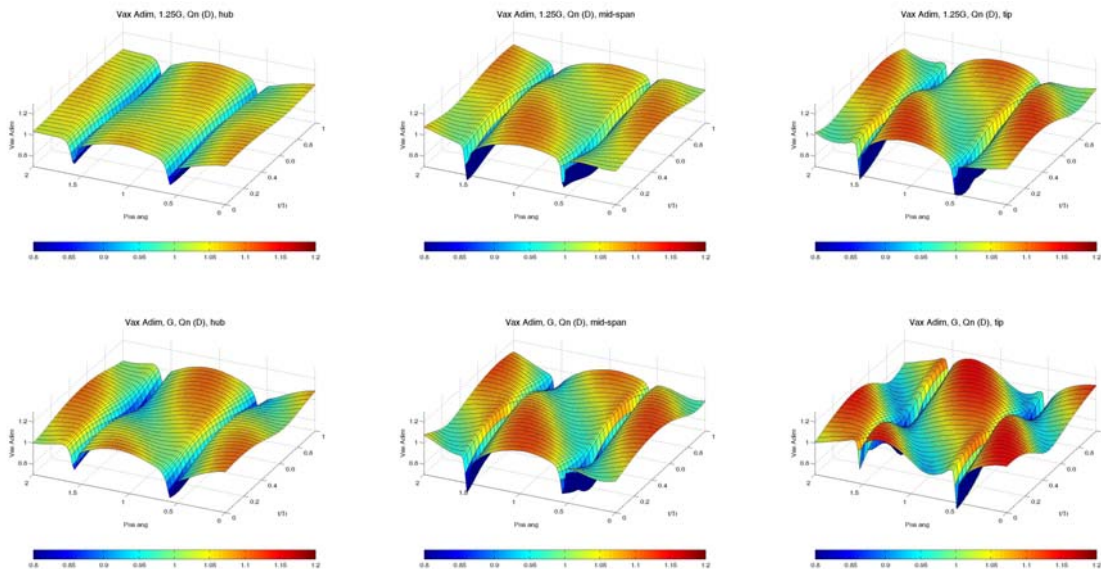


Fig. 7.22. Representaciones temporales de la velocidad axial adimensionalizada entre haces (D) para las tres secciones de estudio. Caudal nominal. Comparativa entre gaps.

En todos los mapas se observa la morfología de las estelas de las directrices: estelas finas y con un déficit de velocidad notable. Destaca cómo ese déficit es mayor en las posiciones radiales media y de punta, mientras que en la base (en ambos *gaps*) se suaviza en cierto modo. Otra importante conclusión de esa figura es que el efecto potencial del paso del álabe es más importante en la zona media y sobre todo en la punta, que en la zona de base, en conjunción a lo que ya se había visto en las representaciones álabe a álabe en el marco de referencia relativo. Este efecto de paso de álabe se manifiesta en los mapas a través de una modulación superpuesta al mapa tridimensional de carácter transversal, ya que en cada instante (avanzando en el eje de tiempos) el álabe ha cambiado de posición. Lógicamente, esa inclinación transversal refleja lo que el paso de álabe avanza por unidad de tiempo; esto es, la velocidad de rotación. Como las directrices no se mueven, su posición no cambia y por eso la captura de la estela viene caracterizada por una falla en la velocidad que es paralela al eje de tiempos.

Al reducirse el *gap*, los álaves se acercan a las directrices y por consiguiente a la línea que se está usando de referencia. En consecuencia, los efectos de interacción de los álaves aumentan y la oscilación en el mapa crece.

Tras el rodete (R), se ha repetido el mismo análisis (figura 7.23). La zona de cubo se encuentra más cerca del plano de medida que la zona de punta y por ese motivo las estelas del rotor (transversales en la figura) aparecen de forma muy marcada. Cuando se observan las zonas central y de punta, la estela del rotor aparece menos marcada, pero como contraposición se pueden apreciar claramente las estelas de las directrices provenientes de aguas arriba. Como ya se apuntó antes, las estelas del estator se manifiestan como un huella paralela al eje de tiempos (no cambian su posición en el marco absoluto). Al haber representado dos canales de directriz (eje “*pos ang*” de 0 a 2), se pueden ver dos estelas de directriz en todos los mapas, con especial énfasis en los de *midspan* y punta.

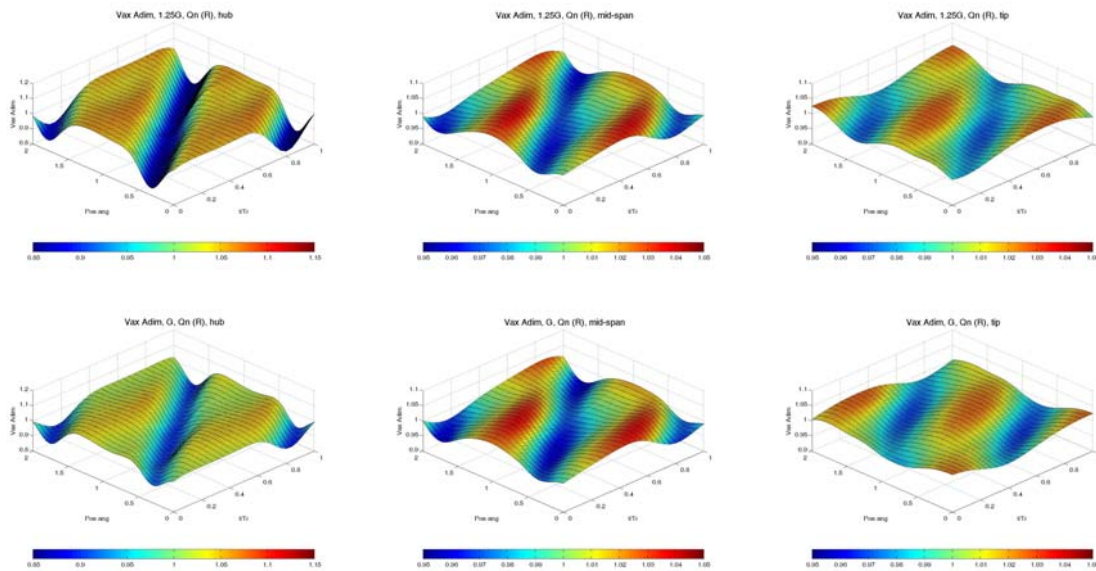


Fig. 7.23. Representaciones temporales de la velocidad axial adimensionalizada aguas abajo del rodete (R) para las tres secciones de estudio. Caudal nominal. Comparativa entre gaps.

Las figuras 7.24 y 7.25 recogen la componente circunferencial adimensionalizada por la velocidad de arrastre en la punta, nuevamente entre haces y tras el rodete. Como puede apreciarse entre haces, de nuevo el efecto potencial está más reforzado en las zonas media y de punta (las oscilaciones del mapa son superiores a lo que se aprecia en la base). Las estelas se reducen en déficit (sobre la componente circunferencial siempre el efecto de estela es más reducido en todos los casos), pero se aprecia una interacción en la zona de coincidencia de ambas estelas. Precisamente, para el *gap* inferior, ese efecto se amplifica notablemente, en las secciones central y de punta.

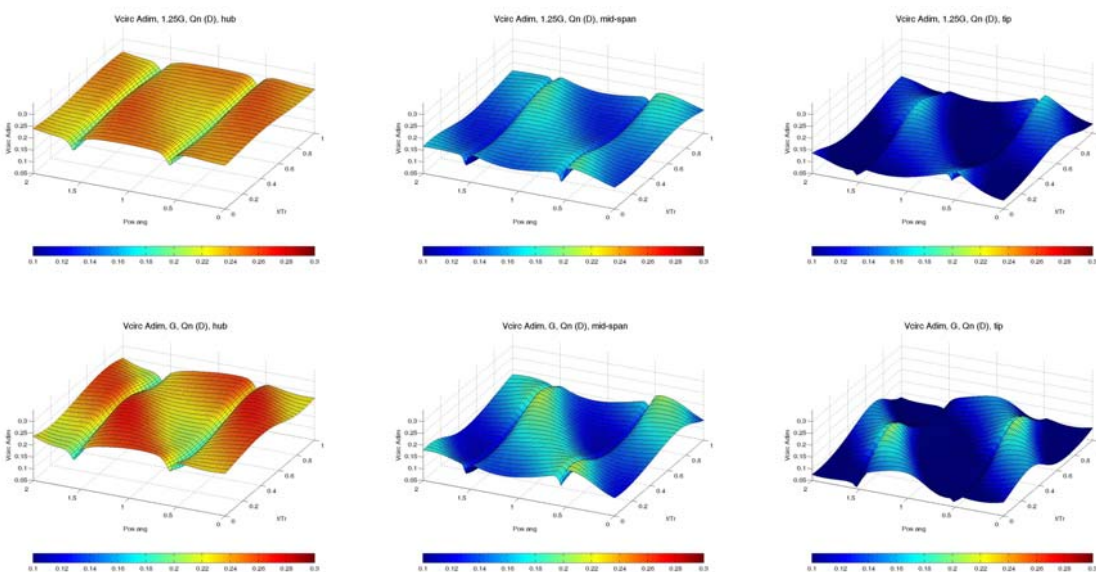


Fig. 7.24. Representaciones temporales de la velocidad circunferencial adimensionalizada entre haces (D) para las tres secciones de estudio. Caudal nominal. Comparativa entre gaps.

Tras el rotor, se siguen manteniendo las estelas de los álabes de forma mas leve que para la componente axial. No ocurre así con el efecto de las estelas de estator, las cuales se han difundido por completo para esta variable. Efectivamente, en la figura 7.25 no se aprecia presencia alguna de las mismas. En lo que se refiere a tendencias entre *gaps*, no se observan diferencias claras: tras el rotor, únicamente se observan estelas del rotor, cuya generación está muy poco condicionada por la separación entre haces.

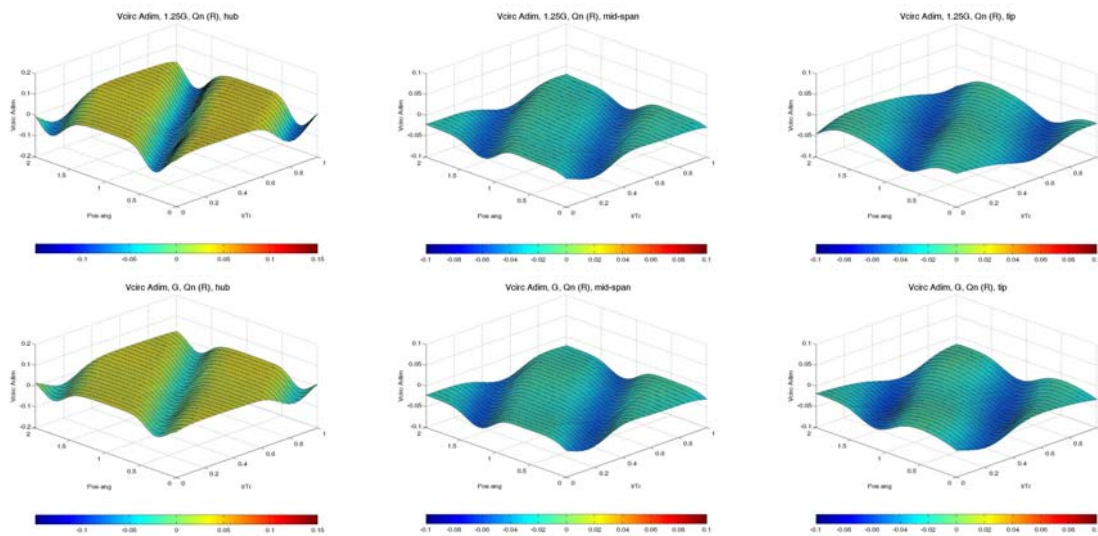


Fig. 7.25. Representaciones temporales de la velocidad circunferencial adimensionalizada aguas abajo del rodete (R) para las tres secciones de estudio. Caudal nominal. Comparativa entre *gaps*.

Para concluir con el modelo bidimensional, se incorporan figuras generadas a partir de los datos anteriores, pero en el marco de referencia relativo. Estas representaciones (figuras 7.26 y 7.27) son análogas a las previas, si bien representan en el eje de tiempos un paso de directriz de forma adimensional, mientras que en el eje de posiciones angulares recogen dos *pitch* del rodete. Además, en este caso, la vista de las distribuciones es completamente azimutal. La figura 7.26 muestra la componente axial de la velocidad relativa en las tres secciones de estudio para los dos *gaps* analizados, en la zona entre haces. En este caso, el estator gira en sentido contrario para el observador, por lo que las estelas de directriz son ahora transversales (con orientación complementaria) y de las que tres son visibles sobre la ventana de visualización abierta para dichas figuras. En un segundo plano, sobre el que se superponen las finas estelas de las directrices, aparecen las ondulaciones asociadas al bloqueo de los álabes capturados en esa ventana de visualización. Puede apreciarse nuevamente cómo con el *gap* inferior esa ondulación de fondo se amplifica. Además, se observa cómo las estelas interactúan con las zonas de bloqueo de los álabes. Por ejemplo, en la punta, para el *gap* superior, en la posición angular 1.2, la estela de estator aumenta el déficit de velocidad, mientras que en 1.8, se debilita al no ofrecer el rotor ningún impedimento físico al paso del flujo. Como no podía ser de otra manera, en la sección de base, las estelas “rompen” la estructura del bloqueo de una manera más clara que en el resto de secciones. En éstas últimas, la estela interfiere, pero la ondulación de bloqueo permanece muy uniforme



angularmente; mientras que en el cubo, la uniformidad angular del bloqueo está muy comprometida.

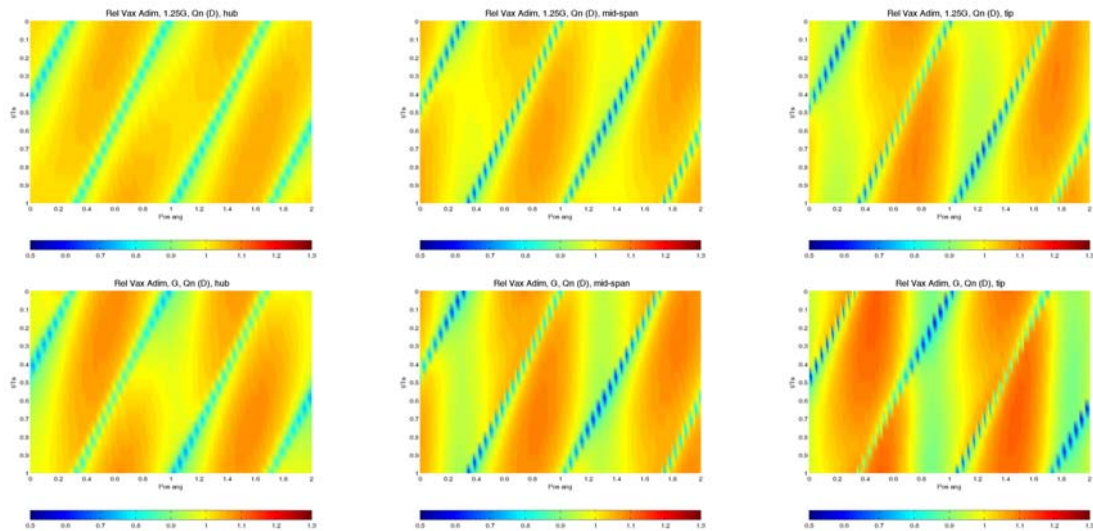


Fig. 7.26. Representaciones temporales de la velocidad relativa adimensionalizada entre haces (D) para las tres secciones de estudio. Caudal nominal. Comparativa entre gaps.

Tras el rotor, las estelas de éste sobre la componente axial de la velocidad relativa aparecen claramente identificables en primer término. En este caso, también se ven en segundo plano las estelas de las directrices en movimiento (aparecen casi 3 estelas completas:  $(13 \cdot 2/9 \approx 3)$ ) – sección de base, *gap* inferior.

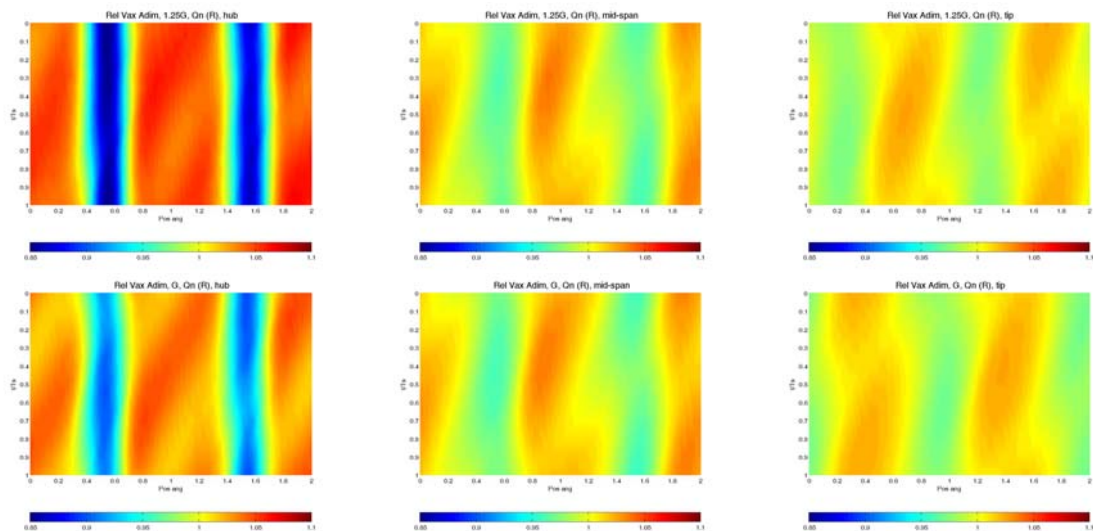


Fig. 7.27. Representaciones temporales de la velocidad relativa adimensionalizada aguas abajo del rodete (R) para las tres secciones de estudio. Caudal nominal. Comparativa entre gaps.

Tanto en la zona media como en punta, la perturbación de las estelas del estator superpuestas a las intrínsecas del rotor se manifiesta más claramente que en la zona del cubo.



### 7.3.3.- Simulación tridimensional.

La potencialidad del modelo bidimensional descansa en la gran definición de las discretizaciones empleadas en el cálculo. La precisión del flujo álabe a álabe resuelto por dicho modelo no puede alcanzarse, por motivos de economía computacional, sobre el modelo tridimensional. Entonces, a costa de una definición más grosera en esa dirección, se consigue crear un modelo tridimensional sobre el cual se pueden explotar resultados y distribuciones radiales. Siempre con esta consigna en mente, se procede ahora a analizar los resultados instantáneos alcanzados por el modelo sobre los sectores de medida transversales al flujo. Este último paso llevará a elaborar las conclusiones finales de este capítulo, facilitando la comparativa con los mapas experimentales ya presentados y analizados en el apartado 7.2.2.

#### 7.3.3.1.- Resultados instantáneos (sectores).

##### Marco de referencia del estator

Para recrear la secuencia de la variación de flujo en los sectores de estudio a lo largo de la duración de un paso de canal de álabe, se han generado una serie de figuras múltiples en las que se muestran cinco instantes intermedios en vertical (correspondientes a  $t/T_R=0.0$ ;  $t/T_R=0.2$ ;  $t/T_R=0.4$ ;  $t/T_R=0.6$  y  $t/T_R=0.8$ ; -cuando  $t/T_R=1.0$ , se tiene la misma situación que en  $t/T_R=0.0$ -), para cada uno de los caudales analizados. Únicamente se muestran mapas para un *gap* de estudio, generalmente el inferior, que goza de mayores efectos de interacción entre los haces que el superior. Esto se debe a que en el modelo bidimensional ya se han comparado secciones y separaciones axiales, por lo que se pretende ahora analizar en detalle la influencia de la variación del caudal de funcionamiento.

La figura 7.28 muestra la componente axial adimensional de la velocidad en la zona entre haces a lo largo del tiempo. Como puede observarse, en cada instante capturado, el efecto de bloqueo de los álabes se ha desplazado con el giro del rotor. Se aprecia una clara interacción entre dicho bloqueo de los álabes y las estelas de las directrices. Así, en la situación de caudal nominal, en el instante  $t/T_R=0.0$ , el bloqueo del álabe y la estela de la directriz de la izquierda interactúan en la zona de la base de la máquina, como se puede observar por el aumento del déficit de dicha estela. En  $t/T_R=0.2$ , el bloqueo se desplaza, y la interacción asciende radialmente hasta colocarse en la zona media. Por tanto, se puede afirmar que existe un claro desplazamiento radial de la interacción entre haces (efecto que no puede ser detectado en las mapas promediados del capítulo anterior, ni en el modelo bidimensional por razones obvias). Además, a caudales bajos, la interacción entre estela y bloqueo (*wake-blade interaction*) aumenta, en principio debido a un mayor desorden del flujo como consecuencia de un peor guiado del flujo a la entrada de los álabes. Compárense la zona de interacción de la estela de la izquierda en  $t/T_R=0.2$ , para los tres caudales presentados, y cómo efectivamente crece la intensidad del déficit de velocidad al reducirse la carga de la soplante. Efectos similares son apreciables en  $t/T_R=0.0$  (estela de la derecha en este caso) o  $t/T_R=0.8$  (estela de la derecha de nuevo). Como ya se ha dicho, la reducción de caudal implica un peor guiado de la corriente relativa a la entrada de los álabes, y por esa razón, el efecto de bloqueo se intensifica a carga parcial: la uniformidad “de fondo” decrece de forma importante. Asimismo, hay que destacar un curioso fenómeno que se



observa al paso de la zona de bloqueo por la estela en el lado de la cara de succión de las directrices: perfectamente reflejado en  $t/T_R=0.4$ , para caudal 85% del nominal, la zona de bloqueo se deforma, retrasándose en su movimiento en la sección de punta. Claramente influenciado por la zona de succión de directrices, el paso del bloqueo se ralentiza en la punta. A continuación, en  $t/T_R=0.6$ , el bloqueo ya recupera su composición original, si bien se ve forzado a acelerarse mientras tanto para lograrlo.

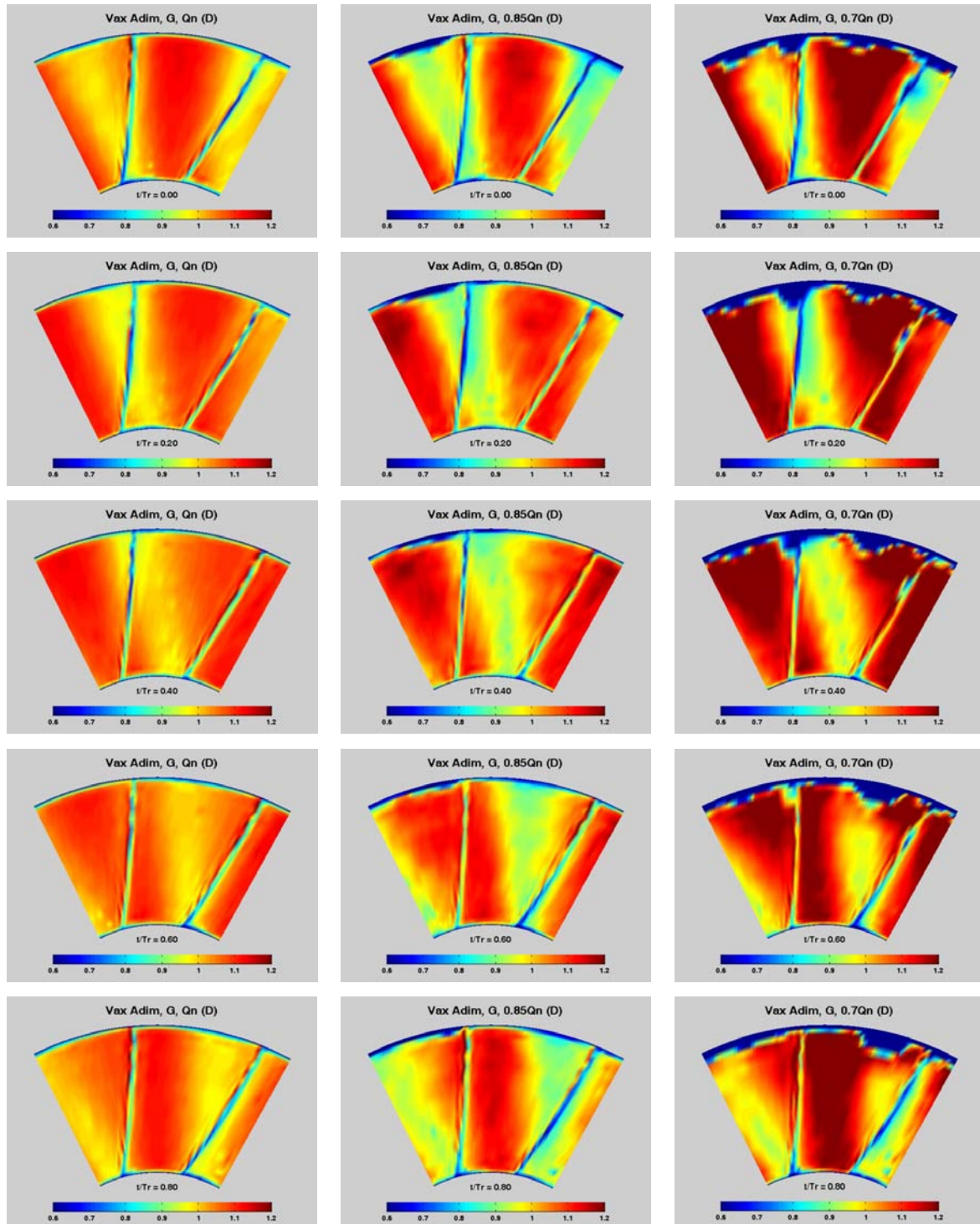


Fig. 7.28. Mapas instantáneos de la componente axial de la velocidad adimensionalizada en la zona entre haces (D). Configuración con gap inferior. Comparativa entre caudales.





Esa leve aceleración se observa en las animaciones construidas a partir de todos los mapas instantáneos de velocidad registrados en la simulación. En ese mismo instante  $t/T_R=0.4$ , se tiene recogido el mismo efecto de deformación en la punta de la zona de bloqueo en los caudales nominal y 70% del nominal.

La figura 7.29 muestra la misma variable que la figura previa, si bien se analiza ahora cómo es justo tras el rodete. Al estar trabajando con el marco absoluto, se observa a lo largo del tiempo el giro de las estelas provenientes desde los álabes.

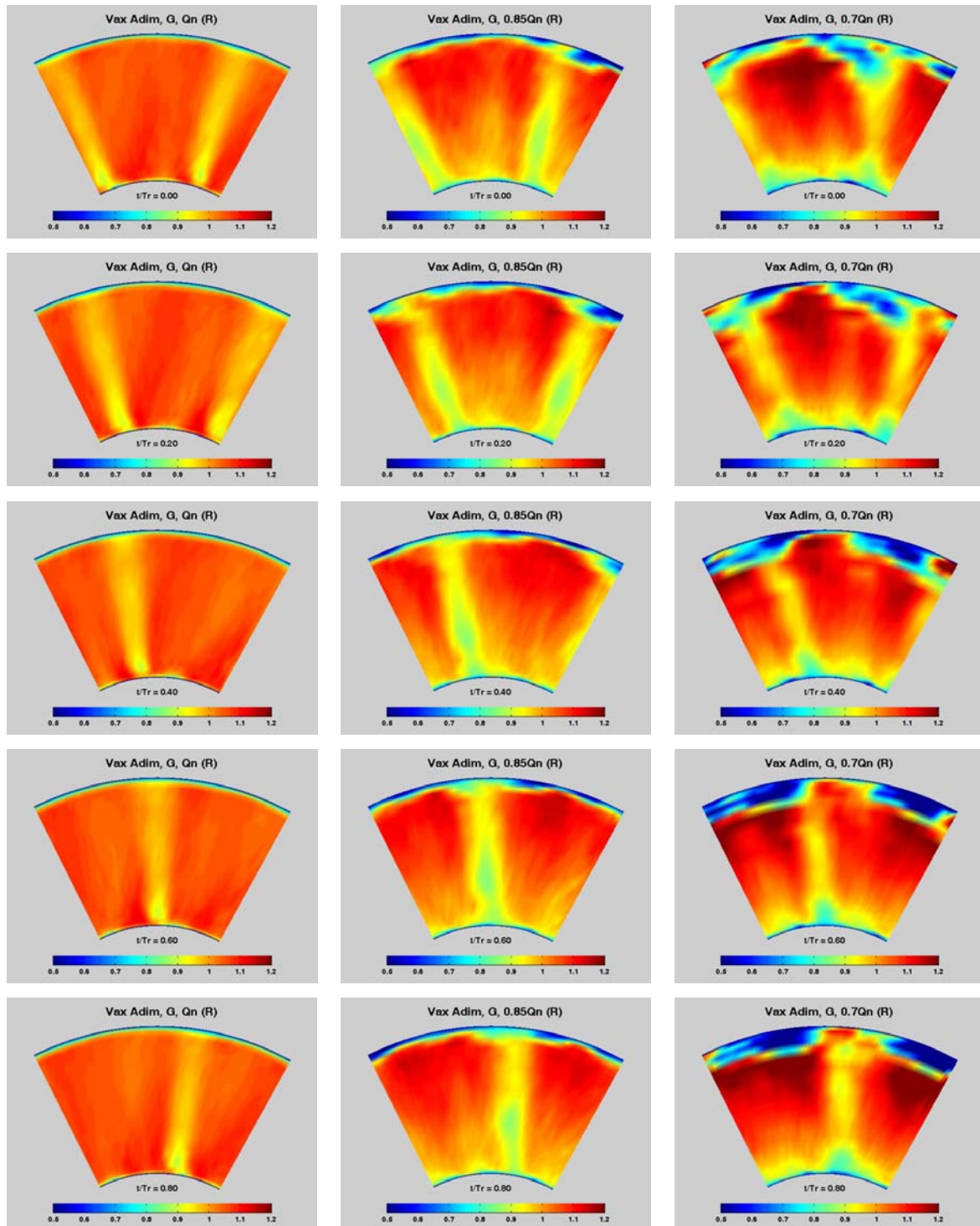


Fig. 7.29. Mapas instantáneos de la componente axial de la velocidad adimensionalizada en la zona aguas abajo del rodete (R). Configuración con gap inferior. Comparativa entre caudales.



La progresiva disminución de caudal se manifiesta en el engrosamiento de las estelas del rotor. El hecho de que se aprecien con mayor claridad en la base se debe en parte a que el plano de medida se encuentra más cerca del borde de salida del álabe en la base que en la punta. Por otro lado, el déficit de velocidad de las estelas de los álabes es bastante leve cuando se trabaja a caudal nominal. Precisamente, es para ese punto de funcionamiento para el que las estelas del estator siguen siendo observables tras el rotor. Dichas estelas interactúan con el paso de las de los álabes, en cierto modo de forma retardada. De hecho, en realidad, lo que ocurre es que una vez ha pasado la estela del rotor, la estela residual del estator se intensifica, potenciando su presencia en el canal del rodete. Se puede comprobar ese efecto en  $t/T_R=0.4$  (estela del estator a la derecha de los sectores) y también en  $t/T_R=0.8$  (ahora en la estela de estator de la izquierda). De forma análoga a la interacción estela-estator (*wake-blade*) observada entre haces, esta intensificación de la estela del estator presenta a su vez un movimiento radial de base a punta, coincidiendo con el paso del canal (*shift*) a lo largo de la envergadura de las estelas de directriz. Es curioso ver cómo el importante ancho de las estelas (una porción de los casi  $28^\circ$  de canal), el ancho de los canales ( $40^\circ$ ) y ese movimiento radial de la interacción se combinan de tal modo que la sensación global obtenida al ver la evolución temporal del flujo instantáneo es la de que exista una “estela sombra” que gira con el rotor desfasada unos pocos grados con las estelas propias de los álabes (p.e. en  $t/T_R=0.2$  –estela de álabe de la derecha–; o también en  $t/T_R=0.6$ ). En la animación completa de la distribución se observa muy claramente este hecho. Para finalizar el análisis de esta figura, apuntar que a caudales inferiores, el efecto de estelas de estator sólo es mínimamente apreciable en la zona del cubo (incluso prácticamente inapreciable para 70% del caudal nominal).

En la figura 7.30 se han recogido las distribuciones de la componente circunferencial de la velocidad, adimensionalizadas por la velocidad de arrastre en la punta. En esta ocasión se manifiesta la interacción entre estelas y el efecto de bloqueo con mayor nitidez sobre la distribución del bloqueo. La velocidad circunferencial se va modulando con el desplazamiento de los álabes, y presenta unas discontinuidades importantes justo en las estelas del estator. En las figuras de caudal nominal, en  $t/T_R=0.0$ , el álabe está enfrenteado al flujo justo entre la posición de las dos estelas de directriz, produciendo la ondulación que se observa en la distribución circunferencial. Cuando las zonas de máximo de la velocidad circunferencial pasan por la cara de succión de directrices, sufren una importante interacción y se amplifica su intensidad (en  $t/T_R=0.4$ ), así como una extensión radial que hace que ocupen por completo la envergadura de la máquina. Un comportamiento similar ocurre con la cara de presión asociada a las directrices, que intensifica el déficit de dicha componente circunferencial, cuando la zona inducida por el bloqueo de los álabes pasa por ahí. Al reducirse el caudal, estas interacciones se focalizan mucho más, merced a la menor uniformidad tangencial del efecto potencial de bloqueo. Así, para caudal 85% del nominal, se observa en  $t/T_R=0.4$ , cómo el máximo ocupa toda la cara de succión radialmente. Al reducirse el caudal, la velocidad baja y su componente circunferencial también, así que no es de extrañar que la distribución en la zona de punta presente valores más bajos. Respecto a la interacción con la zona de succión de directrices, obsérvese ahora el caudal del 70% del nominal en  $t/T_R=0.4$ : cuán importante se ha hecho la interacción en la zona de punta, que va a presentar el máximo de toda la distribución a lo largo del tiempo. Como contrapunto, destaca asimismo, la zona de valores mínimos, que queda asociada a la cara de presión de las estelas (zonas azul oscuro). Como resumen, puede concluirse que con la reducción de caudal, el efecto potencial de bloqueo disminuye en



la base, pero no en la zona de punta, donde cada vez se aprecia una mayor interacción, tanto en zona de máximos (succión) como en la zona de mínimos (presión). Sobre esta variable, además, se ha constatado que el efecto de interacción queda mucho más visible en la propia distribución tangencial que en las estelas, las cuales aparecen más como una discontinuidad entre caras de presión y succión que como estelas bien definidas (ésta es una notable diferencia con las distribuciones de la componente axial en figuras anteriores).

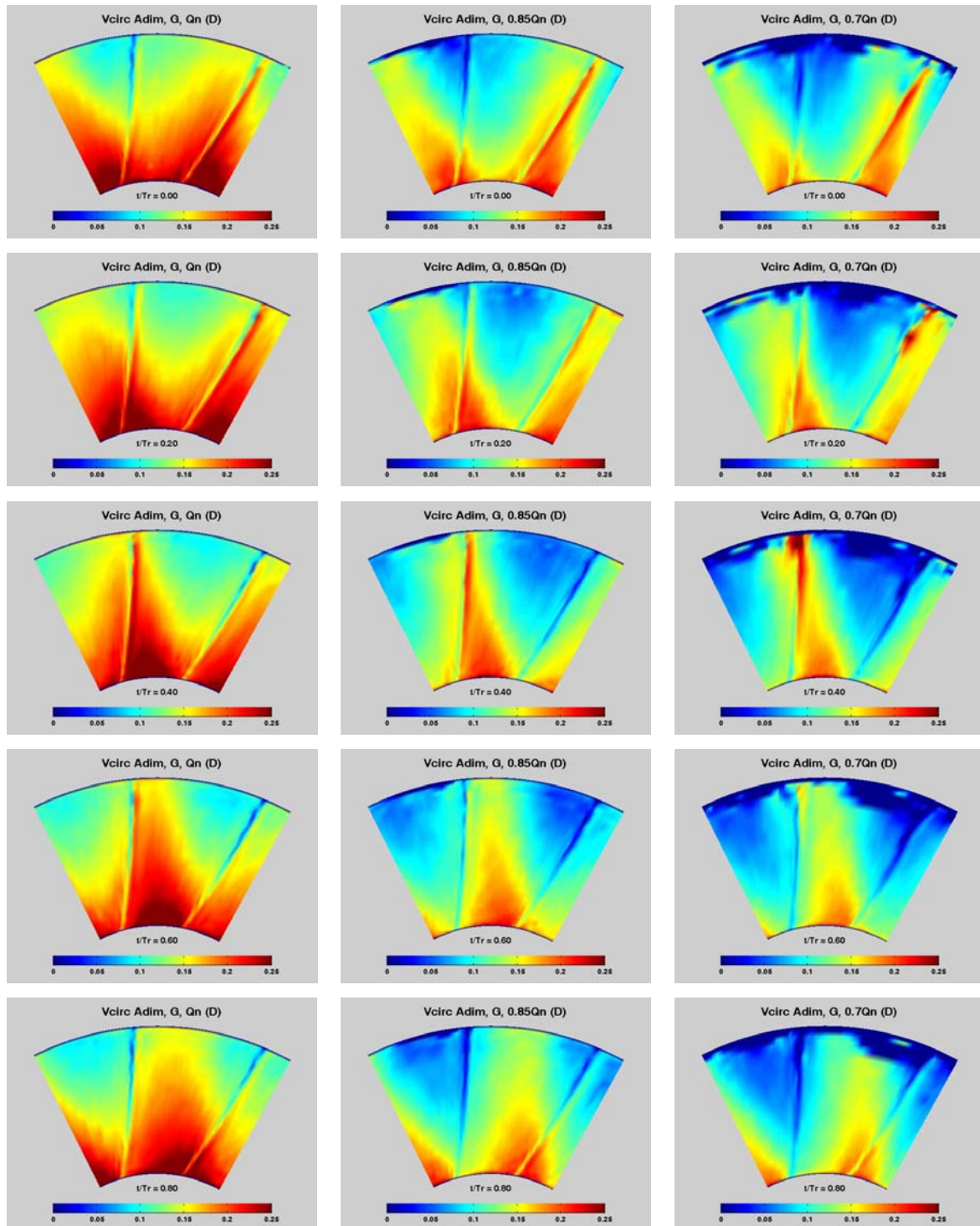


Fig.7.30. Mapas instantáneos de la componente circunferencial de la velocidad adimensionalizada en la zona haces (D). Configuración con gap inferior. Comparativa entre caudales.



En la zona tras el rodete (figura 7.31), la componente circunferencial es muy uniforme, salvo por la lógica presencia de las estelas del rotor. A caudal nominal, destacan los mínimos tanto en las secciones de cubo como punta (se combina el déficit de la estela con las capas límite), así como la existencia de esas “estelas fantasma”, cuyo origen ya se discutió sobre la figura 7.29. A caudales bajos, disminuyen de forma importante los valores de la distribución en la zona de cubo (se amplía mucho la franja circunferencial de color azul claro).

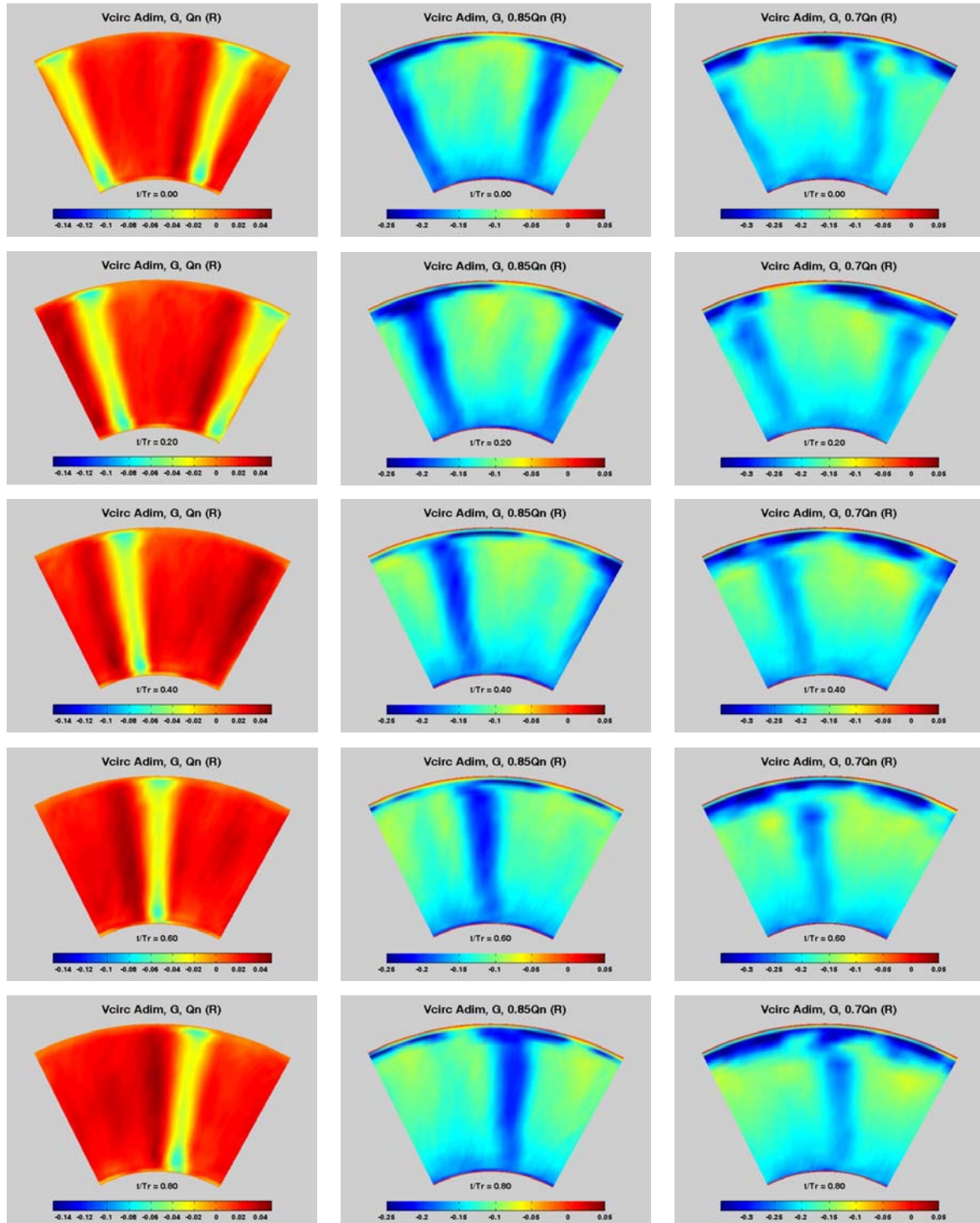


Fig. 7.31. Mapas instantáneos de la componente circunferencial de la velocidad adimensionalizada en la zona aguas abajo del rodete (R). Configuración con gap inferior. Comparativa entre caudales.



El estudio de las componentes de la velocidad se completa con la inclusión indirecta de la componente radial a partir del ángulo azimutal de la corriente. La figura 7.32 muestra la evolución entre haces de dicho ángulo para la configuración de separación máxima entre coronas. Para la situación de caudal nominal, en  $t/T_R=0.0$ , el álabe bloquea con su presencia justo entre las estelas de las directrices capturadas por los dos sectores de la ventana. Como ya se ha visto en otras representaciones, el bloqueo no sigue una dirección radial, puesto que el borde de ataque de los álabes no es radial. En ese instante, el bloqueo se inicia en la base en la zona de presión de la estela y concluye en la punta en la cara de succión de la estela contigua. En la figura 7.31 del capítulo previo, se analizó la estructura promediada de doble célula del flujo radial secundario, generada a partir del paso de flujo por los canales de directriz. El efecto no estacionario de paso de los álabes va a modificar esta estructura desde  $t/T_R=0.0$  a  $t/T_R=1.0$ , alterando el tamaño y la forma de esas células. Así, en  $t/T_R=0.0$ , la célula que gira en sentido horario (la pequeña en azul de la figura 6.16), se ve arrinconada en la zona de cubo en la cara de succión de la directriz de la izquierda. Conforme pasa el bloqueo del álabe en los instantes siguientes, la célula comienza a disponer de más espacio para desarrollarse, llegando a un máximo en  $t/T_R=0.6$ : la zona de flujo secundario ascendente de la estela de la derecha (asociado a la otra celda), tan extenso en el inicio en  $t/T_R=0.0$ , se ve ahora muy reducido, ocupando tan sólo la parte final en la punta. En ese instante, la celda horaria es claramente predominante en el flujo entre haces. Lógicamente, lo que se establece es un juego entre ambas células, de forma que según interactúe con ellas el bloqueo del álabe que está pasando, una aumenta y la otra disminuye o viceversa. En  $t/T_R=0.8$ , el canal entre directrices se encuentra libre de la presencia de un álabe que bloquee aguas abajo, por lo que el flujo se torna muy uniforme radialmente a todo el canal de estator. La reducción de caudal va a intensificar estos efectos, comenzando a jugar un papel importante el progresivo desarrollo que sufre la capa límite en la punta según se va a carga parcial de funcionamiento.

La figura 7.33 recoge el ángulo azimutal en la zona tras el rotor. No se aprecia una excesiva interacción entre las estelas previas y las que en primer término se ven girar, asociadas al paso de álabe. En todo caso, para caudal nominal, sí se establece una relación entre la intensidad de los máximos en la zona del cubo y la posición fija de las estelas aguas arriba. Así, en el instante inicial,  $t/T_R=0.0$ , el valor máximo sufre un leve decaimiento al pasar frente a la posición de una estela del estator. En los instantes sucesivos, ese máximo se recupera, volviendo a debilitarse cuando interseca con la estela contigua del estator en  $t/T_R=0.6$ . En realidad, es para ese instante cuando el valor es claramente mínimo, pues es ahí exactamente donde se corta con la estela del estator. En  $t/T_R=0.8$  comienza a recuperarse, del mismo modo que lo hacía previamente en  $t/T_R=0.0$ . Efectivamente, en los instantes  $t/T_R=0.2$  y  $t/T_R=0.4$ , coincidiendo con la zona central de un canal del estator, la intensidad es máxima. También los valores mínimos, asociados a la otra cara de los álabes, se comportan de forma similar, suavizándose al coincidir con estelas del estator y aumentando cuando viaja la estela del rotor frente al canal de las directrices. Respecto a la variación de caudal, la escala empleada no permite analizar con claridad efectos de interacción entre haces aguas abajo, si bien análisis previos apuntan siempre que a caudales menores, el modelo no capta efectos de interacción. Más aún si es en la zona aguas debajo del rodete y para variables secundarias. Sin embargo, esa escala sí permite observar cómo el flujo secundario tras los álabes, aumenta notablemente al reducir el caudal. Las estelas del rotor engruesan de forma importante y la consecuencia directa es la formación de una zona de flujo secundario ascendente (según la dirección radial) muy importante, así como de otra



zona secundaria más tenue, paralela a la primera, compensadas ambas por la existencia de un flujo de retorno radial en el resto de cada canal de rotor. En el caso extremo del 70% de caudal nominal, la distribución del flujo radial ofrece valores muy importantes, indicando cuán desordenado comienza a ser el patrón de flujo de la máquina.

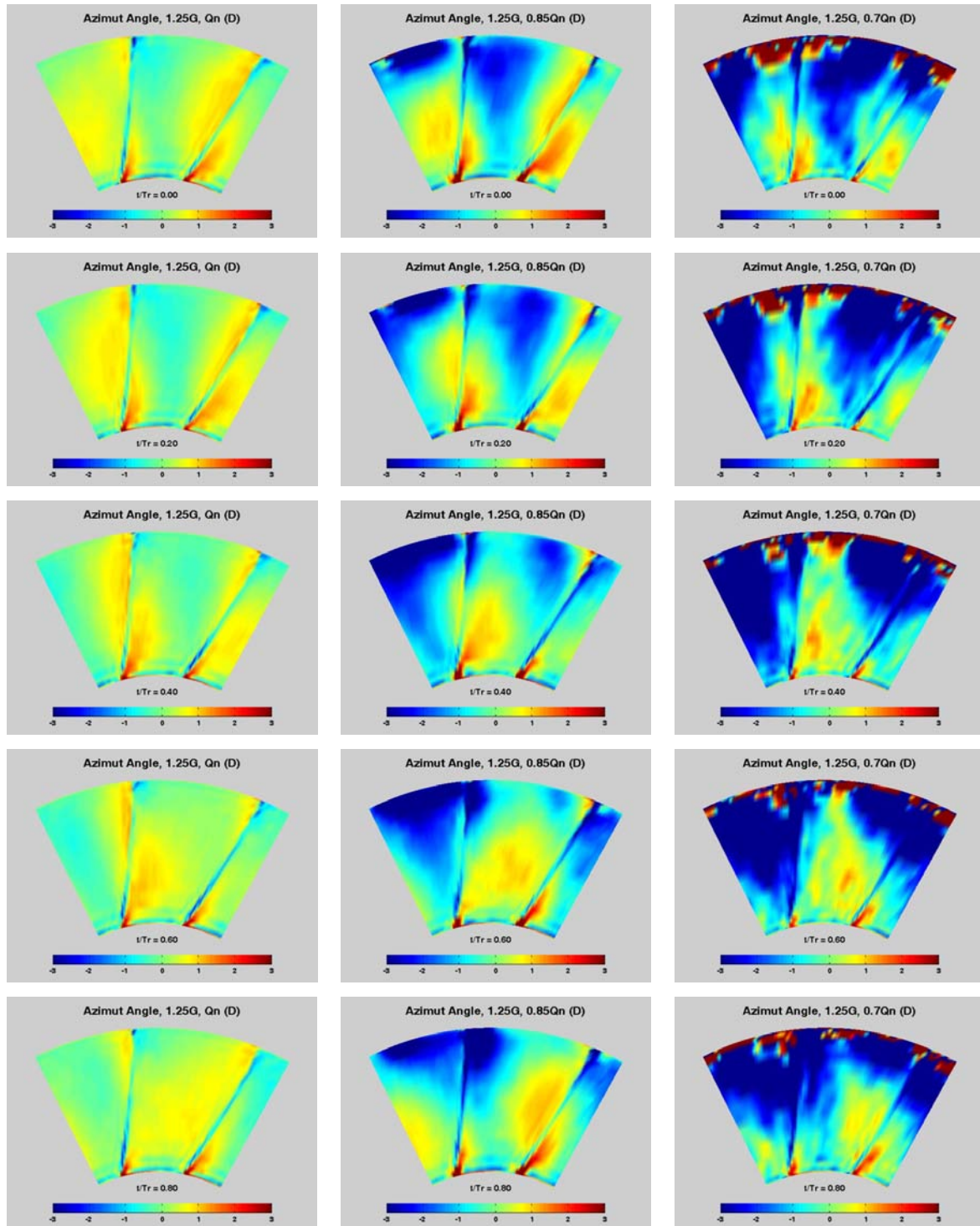


Fig. 7.32. Mapas instantáneos del ángulo azimutal de la velocidad adimensionalizada en la zona entre haces (D). Configuración con gap superior. Comparativa entre caudales.

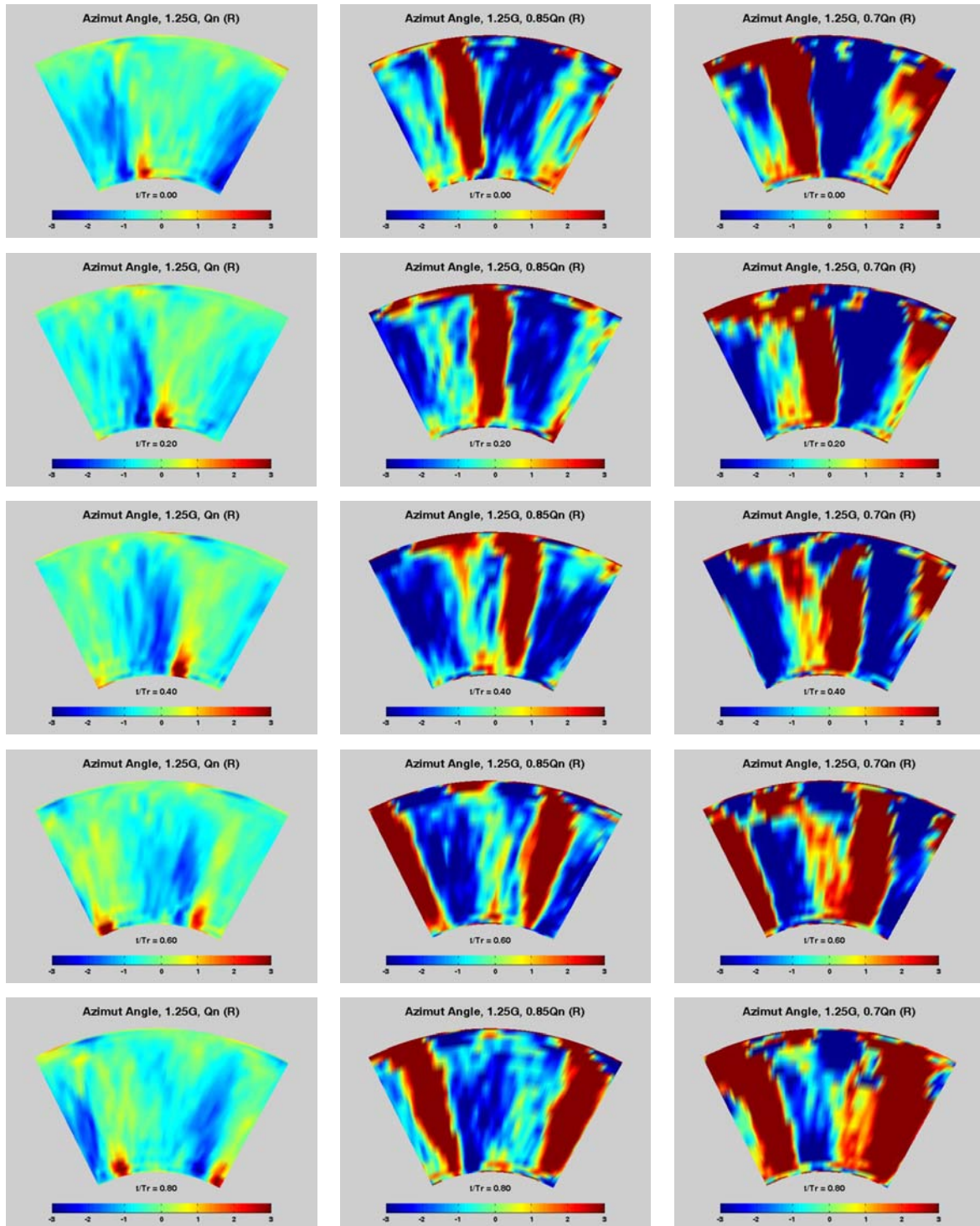


Fig. 7.33. Mapas instantáneos del ángulo azimutal de la velocidad adimensionalizada en la zona aguas abajo del rodete (R). Configuración con gap superior. Comparativa entre caudales.

Se concluye esta sección con el análisis de la vorticidad en los dos sectores de estudio, nuevamente para el *gap* inferior. En la figura 7.34 se muestra entre haces y en la figura 7.35 tras el rodete. En esta primera figura, se puede apreciar de una manera muy leve el paso de los álabes, mientras que en el caso de *gap* superior (no mostrado aquí), ni siquiera se observa. Bajo el prisma de esta variable, los efectos de interacción no son importantes: no se tiene aquella variación radial sobre las estelas que se observó



en la figura 7.28 sobre la componente axial de la velocidad, ni aparecen efectos potenciales de bloqueo. Curiosamente, la reducción de caudal hace reducir la vorticidad de las estelas, aumentando como contrapartida la vorticidad asociada a la capa límite en la punta.

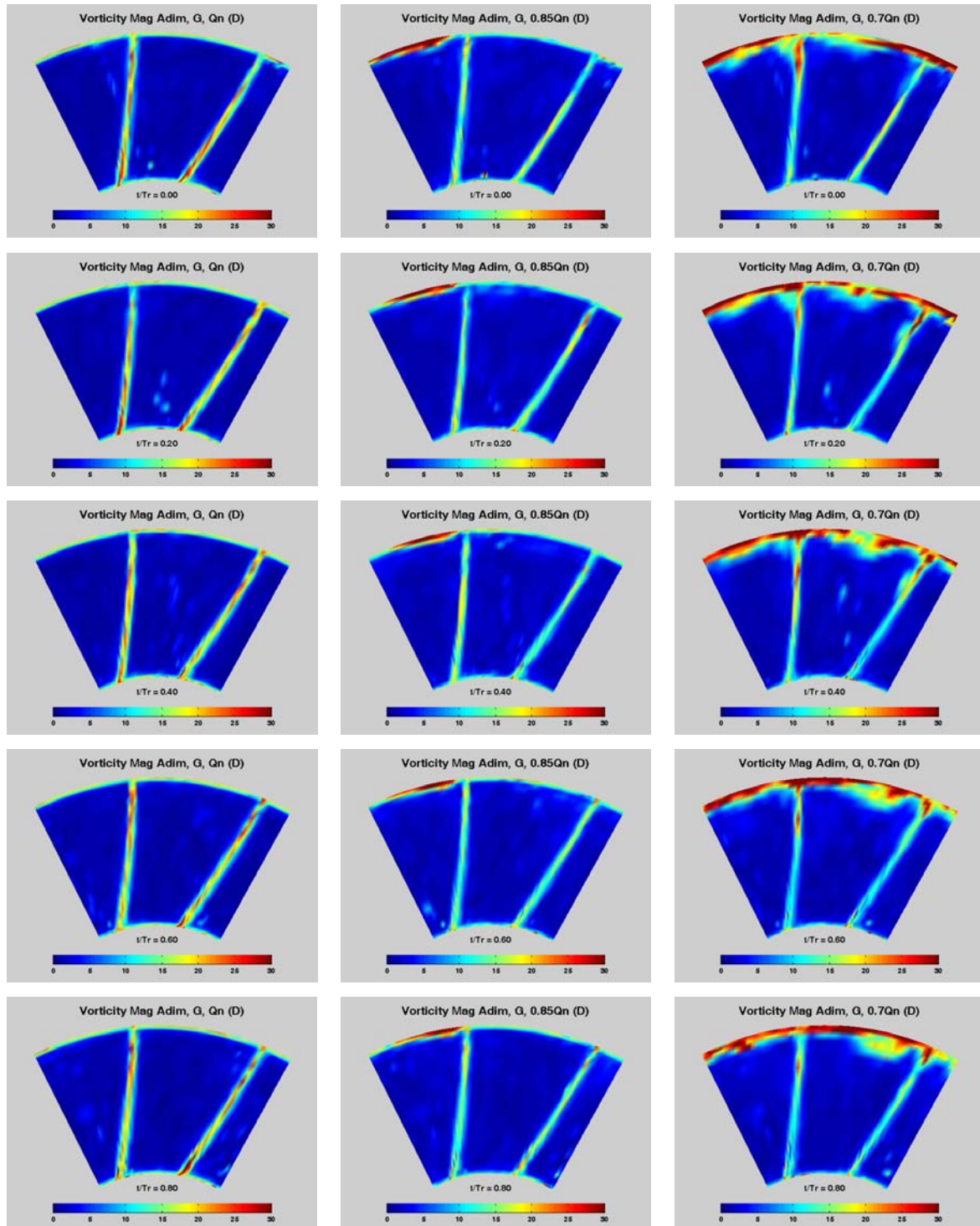


Fig. 7.34. Mapas instantáneos de la vorticidad adimensionalizada en la zona entre haces (D). Configuración con gap inferior. Comparativa entre caudales.

Tras el rotor, la vorticidad a caudal nominal experimenta un fenómeno similar al observado con el ángulo azimutal en esa misma posición. Al enfrentarse las estelas de





los álabes con los residuos de la vorticidad desprendida desde los perfiles del estator, aquellas sufren un decaimiento en su intensidad ( $t/T_R=0.2$  –estela de la izquierda- y  $t/T_R=0.8$  –estela de la derecha-). En las zonas de no interacción ( $t/T_R=0.4$  y  $t/T_R=0.6$ ), los valores en el cubo son máximos. A caudales inferiores, salvo el ya discutido desplazamiento de los máximos de las estelas según la dirección radial, la visión no estacionaria de los campos instantáneos no aporta información adicional a este análisis.

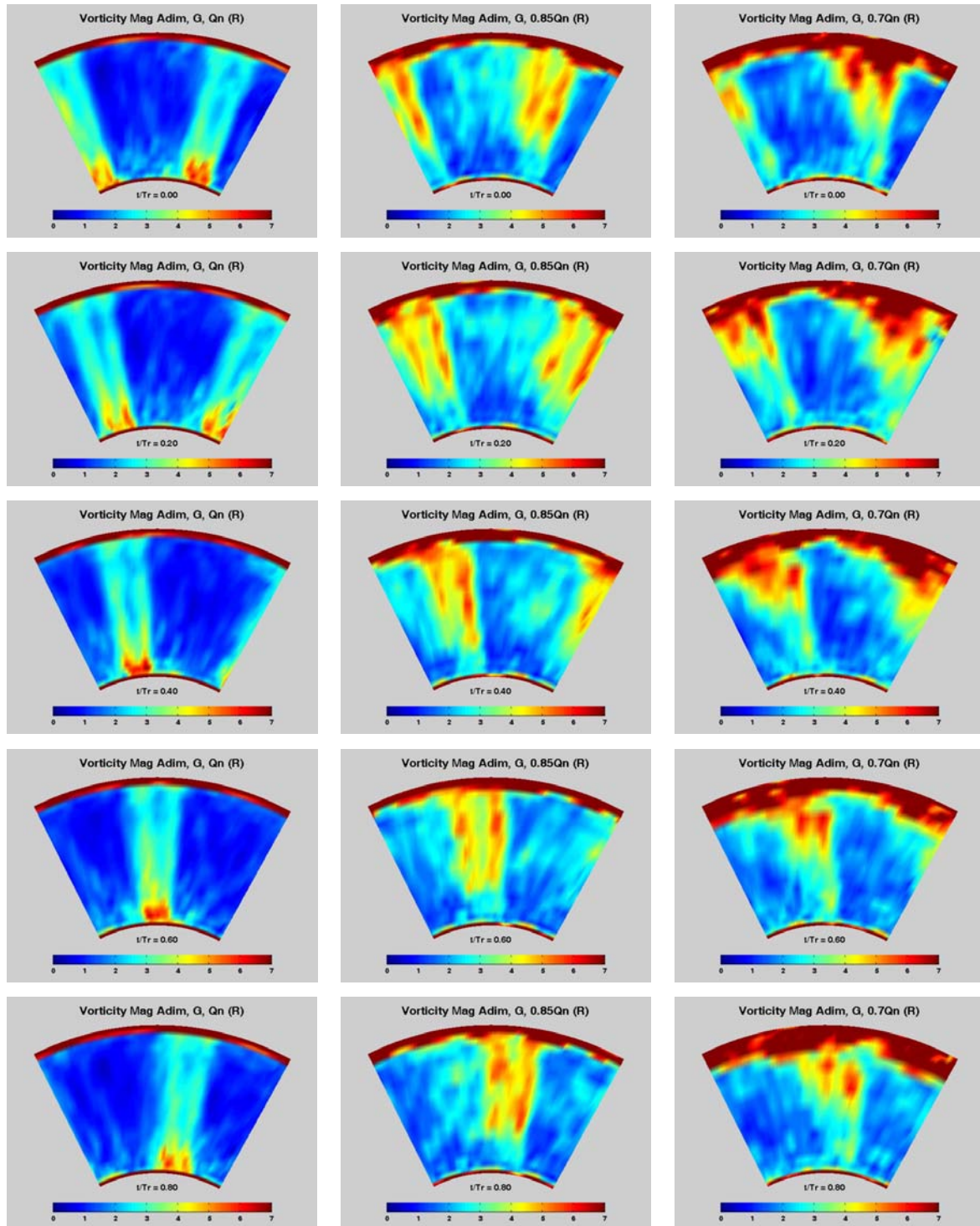


Fig. 7.35. Mapas instantáneos de la vorticidad adimensionalizada en la zona aguas abajo del rodete (R). Configuración con gap inferior. Comparativa entre caudales.



### Marco de referencia del rotor

La secuencia de 26 pasos temporales en el marco de referencia absoluto se convierte en una secuencia de 18 para el marco relativo. Se han tomado también en este caso cinco mapas instantáneos intermedios del paso de directriz sobre canal de estator, correspondientes a  $t/T_S=0.000$ ;  $t/T_S=0.176$ ;  $t/T_S=0.412$ ;  $t/T_S=0.588$  y  $t/T_S=0.824$ . Con esta construcción se pretende mostrar los resultados previos para el marco de referencia del rotor, teniendo en mente que los efectos analizados con anterioridad para cada figura siguen siendo válidos ahora. Sólo se pretende introducir un nuevo punto de vista al estudio, con la inclusión de estos mapas en este apartado.

Se van a incluir las componentes axial y circunferencial de la velocidad y se van a obviar la vorticidad relativa, cuyo valor medio ya se observó que era prácticamente nulo sobre los mapas promediados del capítulo anterior, y el ángulo azimutal de la corriente, éste último por agilizar la exposición de resultados. Con la estructura ya habitual, las figuras 7.36 y 7.37 analizan la componente axial entre haces y tras el rotor. Sobre la figura 7.36, en realidad, poco se puede añadir, pues los efectos no estacionarios incluidos en ella ya se han discutido antes, a propósito de la figura 7.28. Por el contrario, sí conviene repasar la figura 7.37, sobre la cual se ha ajustado la escala de forma más óptima. De hecho, la escala de la figura 7.29 fue establecida en su rango de valores con el objeto de hacer una comparación más clara con las medidas experimentales. Desafortunadamente, el modelo numérico no presenta un rango tan dispar como el experimental, así que una compactación de la escala va a permitir una mejor visualización de los fenómenos que están aconteciendo en la ventana de estudio. A caudal nominal, en  $t/T_S=0.176$ , se distinguen hasta tres estelas del estator en segundo plano con respecto a las estelas, ahora fijas, de los álabes. En ese instante se observa muy claramente cómo las estelas residuales (en amarillo claro) aparecen o quedan ocultas al pasar entre las estelas del rotor, más relevantes ahí. Se nota que la modelización de la turbulencia utilizada, pero sobre todo la modesta discretización circunferencial introducida, son dos claras fuentes de difusión numérica, culpable de calcular unas estelas de directriz particularmente anchas. Nótese cómo daría a engaño pensar que las “bandas” transversales rojas de mayor velocidad son las estelas de la directriz. Sin embargo, por el ancho que ocupan, lo parecerían perfectamente.

Por otro lado, la animación completa del mapa de velocidad es capaz de mostrar cómo las estelas de directriz, al cruzarse con las del rotor, inducen a que éstas serpenteen y oscilen en toda su envergadura. Este efecto se intuye al comparar, por ejemplo, la estela del álabe de la izquierda en  $t/T_S=0.000$ , con esa misma estela en  $t/T_S=0.588$ . El lector puede observar cómo la curvatura de la estela del álabe ha cambiado de sentido de un instante a otro. Por tanto, de forma continua, las estelas del rotor oscilan por interacción con las estelas residuales: un nuevo efecto de interacción no estacionario que no es observable desde el punto de referencia fijo pero que queda patente en el marco relativo. A caudales inferiores, no se observa esta oscilación inducida sobre las estelas de los álabes, básicamente porque tampoco se observa el paso de las estelas residuales generadas en el estator; a estos caudales más inferiores, el desorden inherente del flujo al estar trabajando en puntos fuera del diseño, unido a la grosera discretización utilizada, elimina por completo todo efecto asociado a la presencia de estelas del estator aguas abajo del rodete del ventilador.

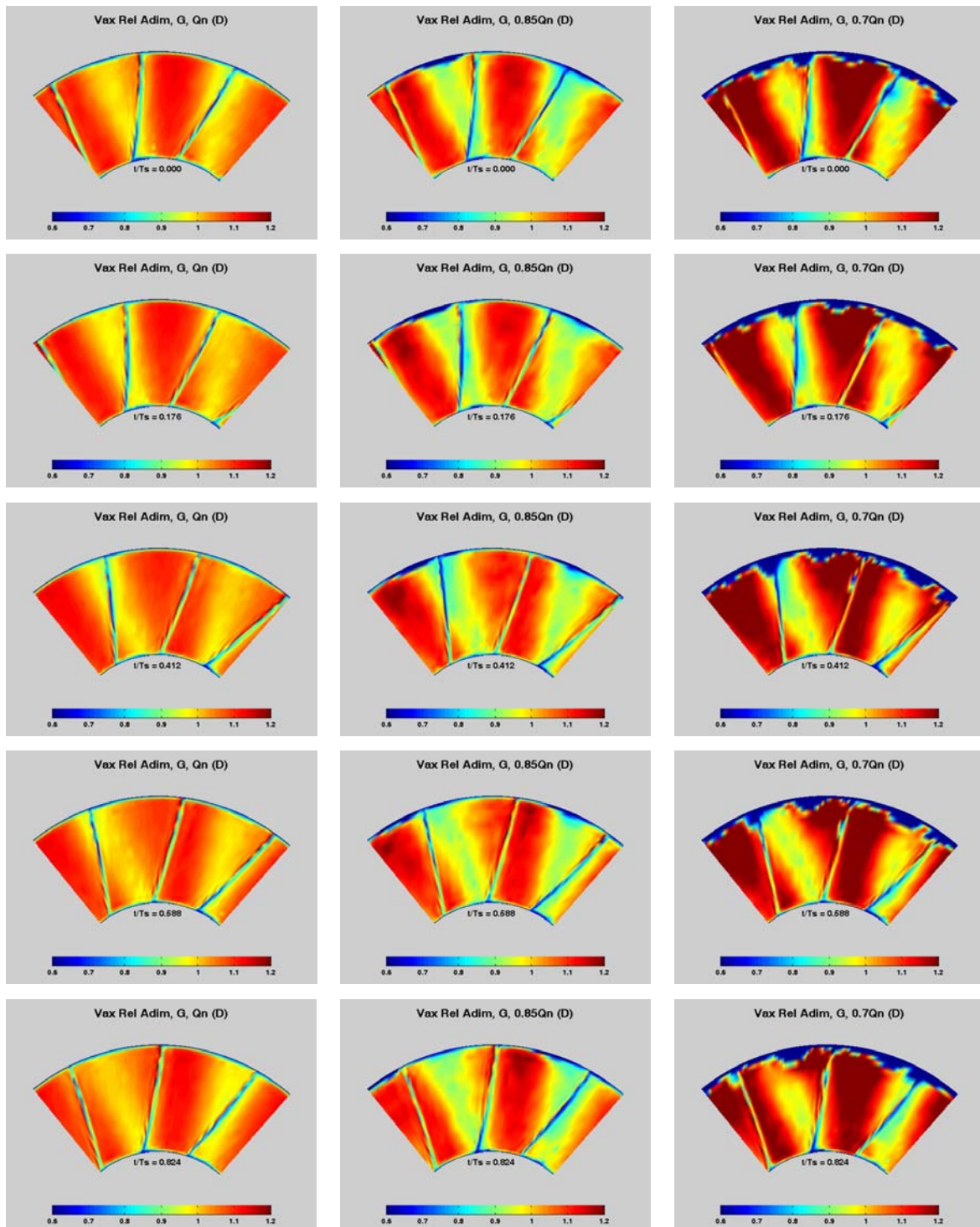


Fig. 7.36. Mapas instantáneos de la componente axial adimensionalizada de la velocidad relativa en la zona entre haces ( $D$ ). Configuración con gap inferior. Comparativa entre caudales.

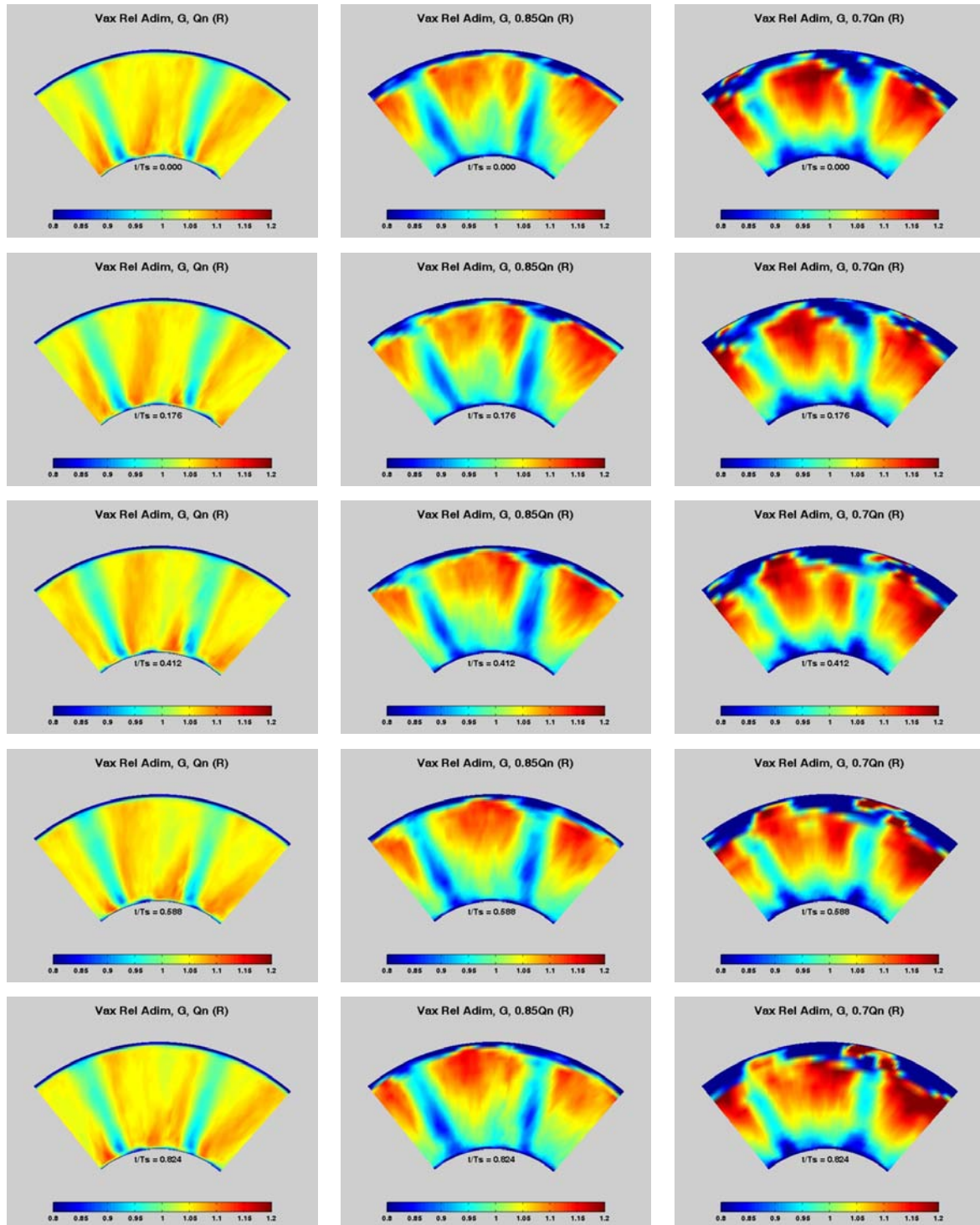


Fig. 7.37. Mapas instantáneos de la componente axial adimensionalizada de la velocidad relativa en la zona aguas abajo del rodete (R). Configuración con gap inferior. Comparativa entre caudales.

Las figuras 7.38 y 7.39 muestran finalmente la componente circunferencial de la velocidad relativa entre haces y tras rotor. Al igual que en la componente axial, la figura entre haces no aporta información nueva; sin embargo, bajo el prisma relativo, sí se puede observar de nuevo sobre las estelas de los álabes en el sector (R), una ondulación radial producida por el estator (figura 7.39). Perfectamente observable en la animación



de los mapas instantáneos, el lector tendrá que intuirlo a partir de fotos fijas, en este caso, sobre la estela de la derecha en  $t/T_S=0.000$  y  $t/T_S=0.412$ .

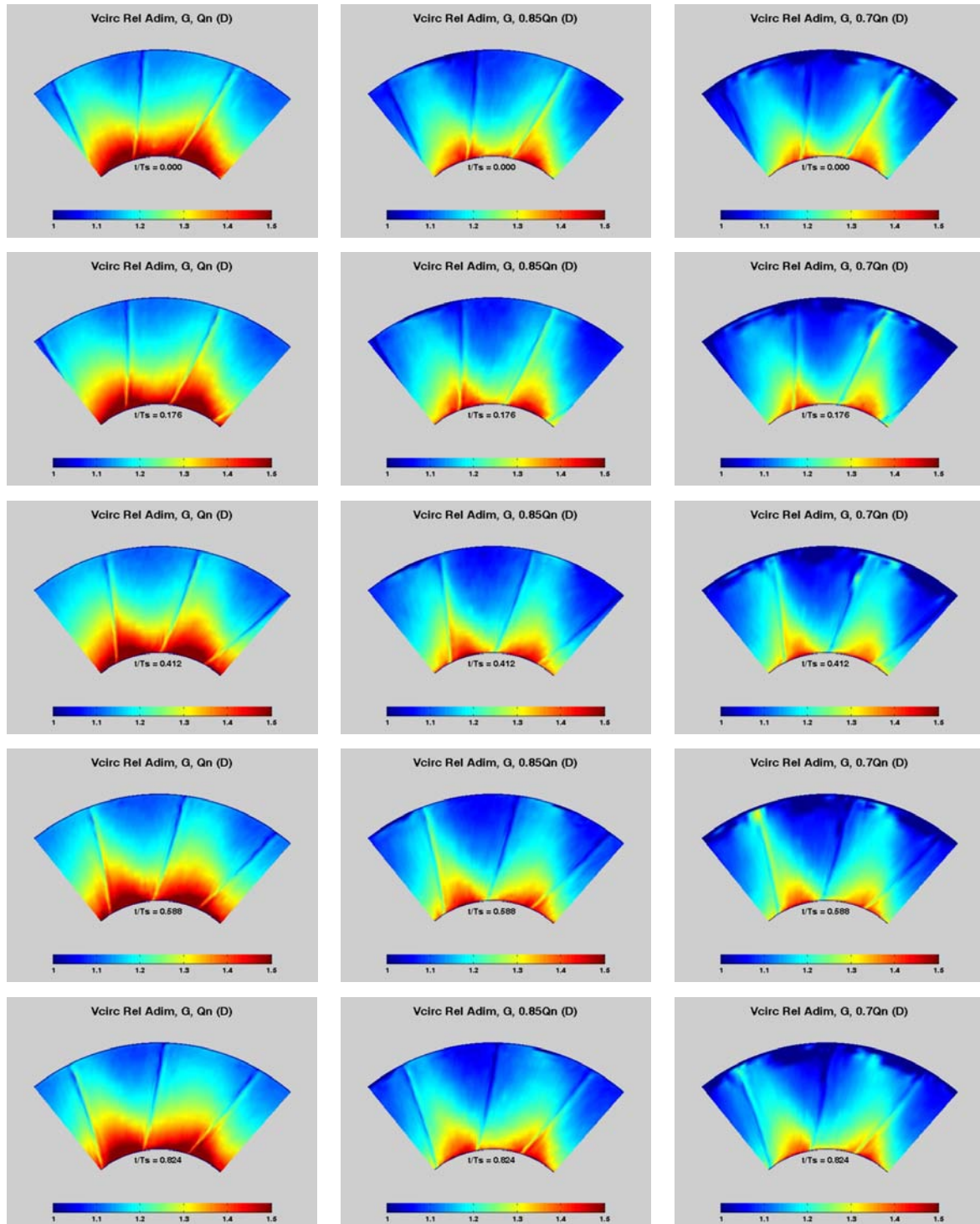


Fig. 7.38. Mapas instantáneos de la componente circunferencial adimensionalizada de la velocidad relativa en la zona entre haces (D). Configuración con gap inferior. Comparativa entre caudales.

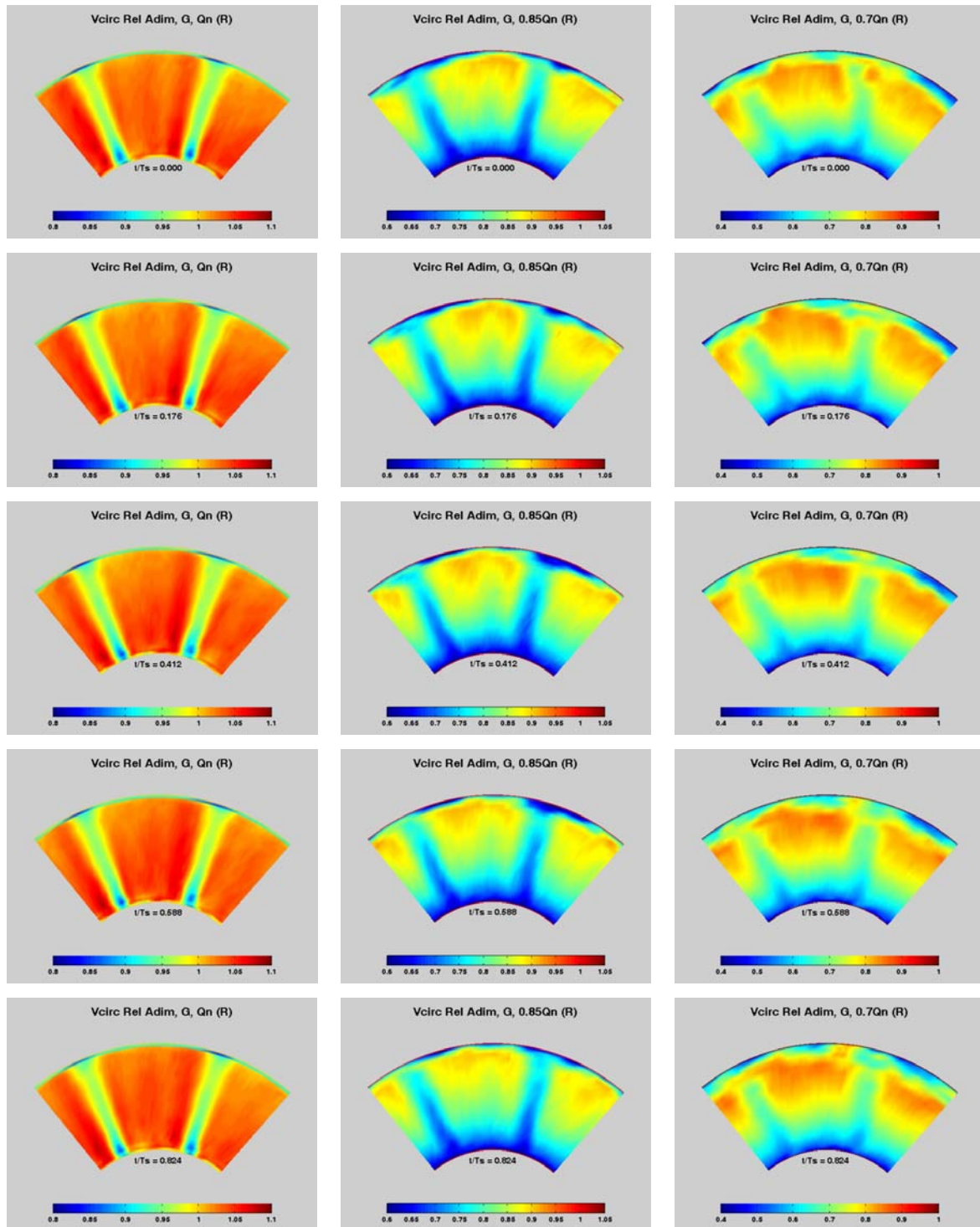


Fig. 7.39. Mapas instantáneos de la componente circunferencial adimensionalizada de la velocidad relativa en la zona aguas abajo del rodete (R). Configuración con gap inferior. Comparativa entre caudales.



### 7.3.3.2.- Representaciones temporales.

#### Mapas angulares

Como ya se ha visto con las representaciones temporales del modelo bidimensional, este tipo de gráficos permite observar la evolución de las distribuciones de velocidad en un punto de forma más compacta a como se ha estado haciendo hasta ahora con los mapas instantáneos en los sectores de medida. Así, a costa de sacrificar todas las posiciones radiales, se introduce el eje de tiempos para una única posición radial del modelo tridimensional, en este caso, la posición central. Evidentemente, se podrían haber obtenido gráficas también para otras posiciones radiales (base y punta, por ejemplo), o haberlas ejecutado también para el marco de referencia relativo, pero eso hubiera significado incluir un número excesivamente grande de figuras. En aras de una mayor brevedad en la explicación, sólo se representan aquí resultados en el marco absoluto en el *midspan*. Su objeto es poder plantear una comparativa con lo que el modelo bidimensional ofrecía a caudal nominal en esta misma sección, además de recoger el patrón de estelas y de la interacción a caudales inferiores al nominal, para ambos *gaps* de estudio.

Las figuras 7.40 y 7.41 analizan la componente axial de la velocidad en la posición radial media de los dos sectores habituales. Los principales rasgos de estos mapas, así como las causas que los determinan, ya han sido discutidos en ocasiones precedentes y no se repetirán aquí. Respecto a la figura 7.40, sobre las estelas de las directrices se observa siempre el efecto no estacionario de interacción con el efecto de bloqueo del rotor, que en los sectores temporales viajaba radialmente a lo largo del tiempo. En efecto, siguiendo el eje de tiempos, se aprecian esos mínimos de velocidad en la intersección de las estelas con el efecto transversal del bloqueo. Por otro lado, comparando los resultados a caudal nominal con los de la figura 7.22 en la zona central, se observa un perfecto acuerdo entre ambos, si bien las estelas de directriz son menos pronunciadas en el caso 2D. Se recomienda al lector que en este punto establezca paralelismos con los resultados bidimensionales previos.

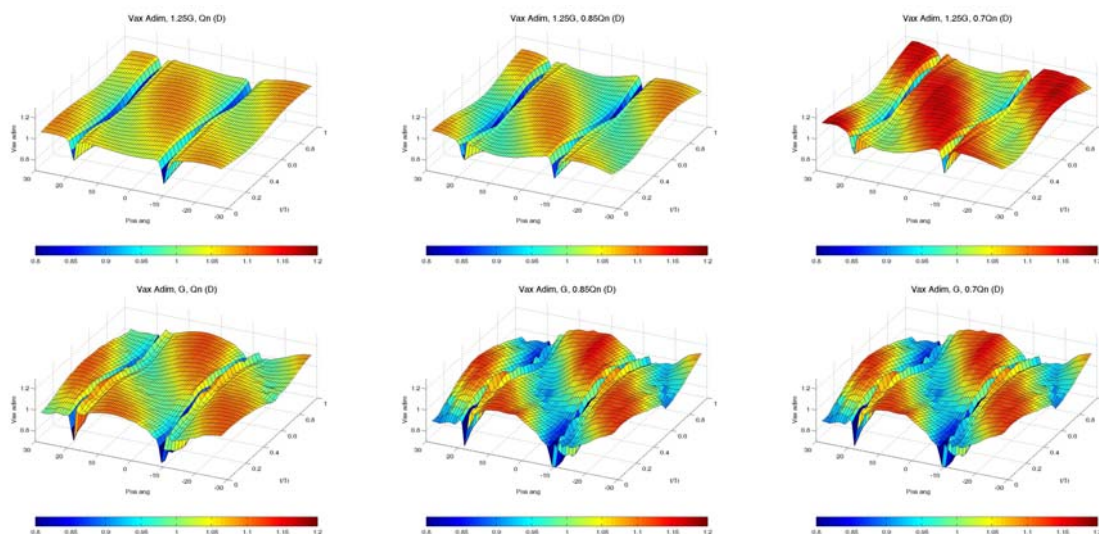


Fig. 7.40. Representación temporal de la componente axial de la velocidad adimensionalizada entre haces (D) para los tres caudales de estudio. Comparativa entre *gaps*.

La figura 7.41 muestra resultados tras el rotor. El grado de acuerdo entre estos resultados y los del modelo bidimensional ya no es tan fino como en la figura precedente. Sin embargo, sí que estos resultados están muy ajustados a los obtenidos experimentalmente como se ha podido comprobar antes. A caudal nominal, se observa de forma leve la huella dejada por dos estelas de estator (paralelas al eje de tiempos), aproximadamente en  $Pos\ ang = -10^\circ$  y  $Pos\ ang = 20^\circ$ , y con un ancho muy importante, como ya se discutió en la figura 7.37.

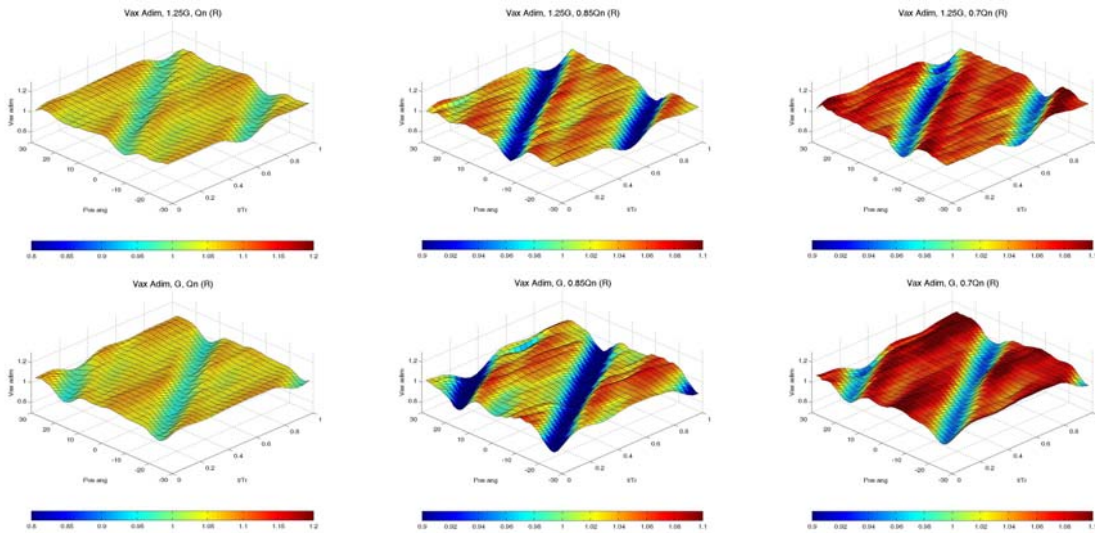


Fig. 7.41. Representación temporal de la componente axial de la velocidad adimensionalizada aguas abajo del rodete (R) para los tres caudales de estudio. Comparativa entre gaps.

La componente circunferencial se introduce ahora a través de las figuras 7.42 y 7.43. Entre haces, se observa muy bien el efecto de interacción no estacionaria entre las estelas del estator en su cara de succión y el efecto de bloqueo de los álabes. En estas representaciones se hace particularmente patente en las figuras del gap inferior a caudales del 85% y 70% del nominal: zona de intersección de  $Pos\ Ang=10^\circ$  y  $t/T_R=0.4$ .

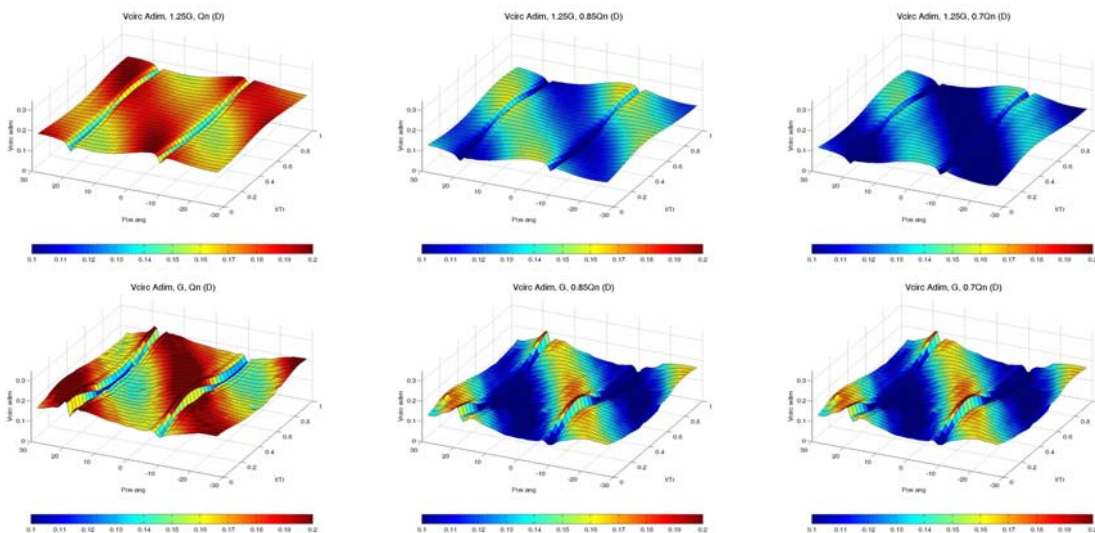


Fig. 7.42. Representación temporal de la componente circunferencial de la velocidad adimensionalizada entre haces (D) para los tres caudales de estudio. Comparativa entre gaps.





Tras el rotor (figura 7.43), la componente circunferencial siempre es muy uniforme tangencialmente. Las estelas del rotor son completamente rectas y no sufren desplazamientos ni correcciones de trayectoria, como si se intuía en la componente axial, sobre todo a *gap* inferior (figura 7.41, caudal nominal) –el mismo efecto que se discutió en la figura 7.37–.

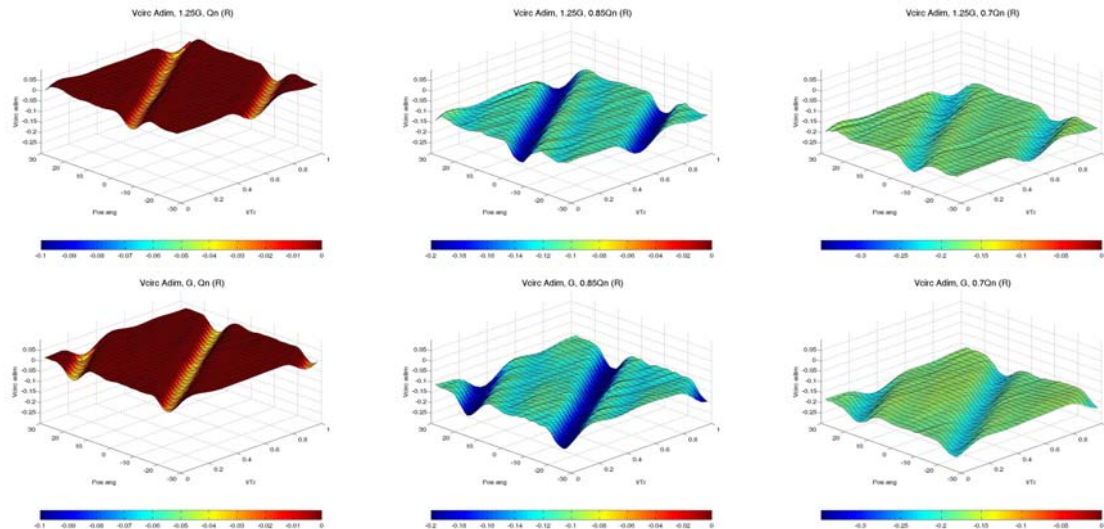


Fig. 7.43. Representación temporal de la componente circunferencial de la velocidad adimensionalizada aguas abajo del rodete (R) para los tres caudales de estudio. Comparativa entre gaps.

Para concluir con este apartado se introducen también las representaciones de vorticidad. Para una mejor visualización de los máximos en la zona entre haces, se ha cambiado el punto de vista que se había venido empleado sistemáticamente en el resto de figuras (figura 7.44). Nótese cómo en las figuras del *gap* inferior, aparece un leve rastro de bloqueo del rotor, pero tal y como se había discutido sobre la figura 7.34, no se observan efectos de interacción no estacionaria.

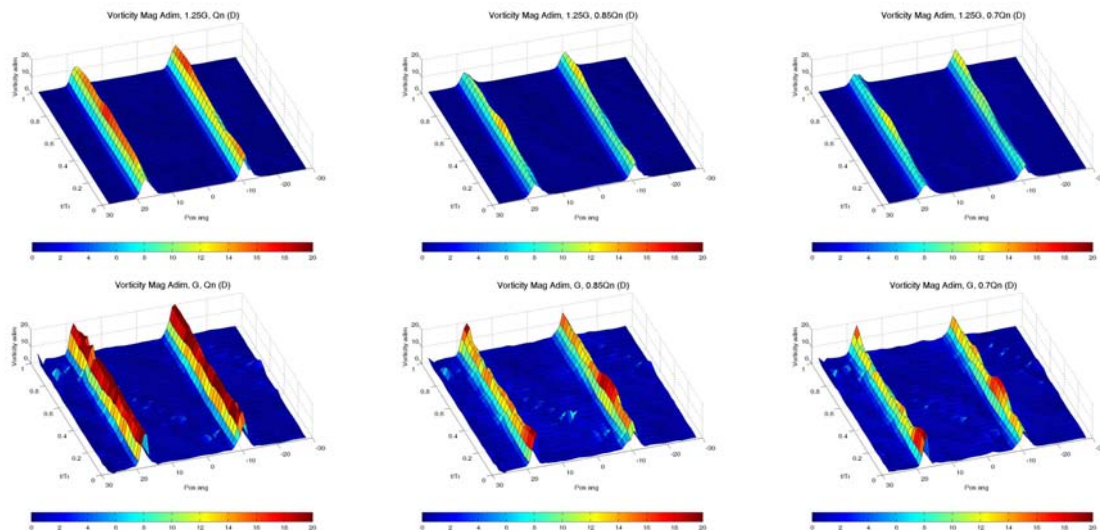


Fig. 7.44. Representación temporal de la magnitud de la vorticidad adimensionalizada entre haces (D) para los tres caudales de estudio. Comparativa entre gaps.

La figura 7.45 pone de manifiesto el desplazamiento radial que se observó en la vorticidad tras el rotor en la figura 7.35. La estela del rotor aparece doble, con máximos de la magnitud de la vorticidad asociados a cada cara de los álabes, como ya es conocido. En el análisis de la figura 7.35, se vio además un efecto de interacción no estacionaria con las estelas residuales del estator a caudal nominal, justo en la zona de base. Aquí se resume el comportamiento en el *midspan*, por lo que es lógico que no se vean repuntes ni decaimientos de los valores de vorticidad a lo largo del tiempo. En el resto de caudales, no se observaron entonces (figura 7.35) efectos no estacionarios y tampoco se aprecia nada reseñable a ese respecto ahora.

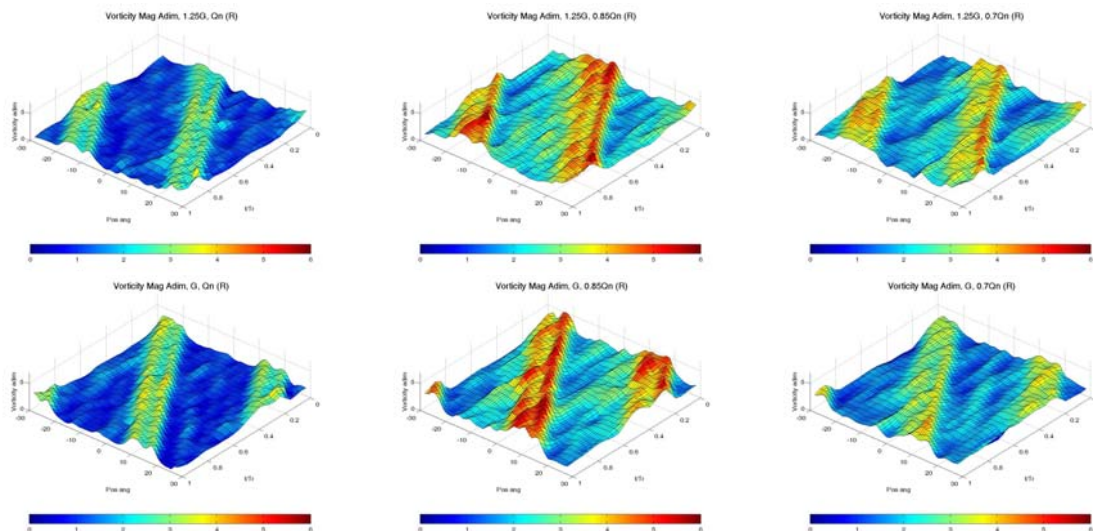


Fig. 7.45. Representación temporal de la magnitud de la vorticidad adimensionalizada aguas abajo del rodete (R) para los tres caudales de estudio. Comparativa entre gaps.

### Mapas radiales

En el modelo tridimensional es posible construir otra serie de gráficos temporales, sustituyendo esta vez todas las posiciones angulares por el eje de tiempos. En este caso, se elige una posición angular arbitraria y se observa la evolución radial de las diversas variables a lo largo del tiempo. No se han incluido aquí todas las figuras obtenidas por razones obvias de espacio y brevedad expositiva (ver Anexo V); simplemente se incluyen en la figura 7.46 algunos ejemplos de ese tipo de representación. En particular, se tiene la componente axial y tangencial de la velocidad entre haces (se ha elegido una posición tal que no coincide con ninguna estela de directriz), donde se observa el paso del efecto del bloqueo del rotor; y la vorticidad aguas abajo del rotor, en la que se ha capturado el paso de la estela del álabe.

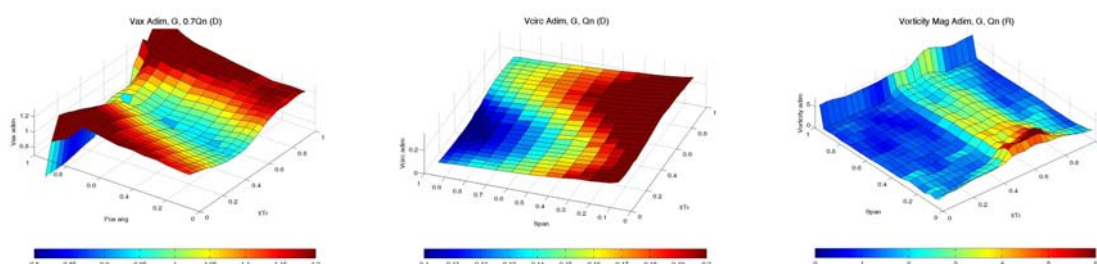


Fig. 7.46. Algunos ejemplos de mapas radiales: Componentes axial y tangencial de la velocidad en la zona entre haces (D) y mapa de la vorticidad en la zona aguas abajo del rodete (R).



### 7.3.3.3.- Análisis de fuerzas. Modelo tridimensional.

Para completar la revisión del modelo numérico, se introduce en ese último apartado la caracterización de los esfuerzos que se originan sobre los álabes y las directrices. El objeto se centra en reflejar el carácter no estacionario de las fuerzas generadas y cómo su variación queda íntimamente ligada a las frecuencias de rotación características de los álabes. Asimismo, se pretende conocer el orden de magnitud de esos esfuerzos, para estimar a continuación el rendimiento hidráulico que presenta la soplante. La relación entre la potencia hidráulica calculada por el modelo y los esfuerzos, interpretados como potencia mecánica a desarrollar, será el método presentado para la estimación global del rendimiento.

En el apartado 7.3.2.2 ya se mostraron las evoluciones temporales de las distribuciones de presión sobre los perfiles, con el objeto de cuantificar los esfuerzos en la etapa y ver su relación con los mapas instantáneos de velocidad. Esas distribuciones se obtuvieron a partir de los resultados del modelo bidimensional.

A continuación se van a presentar datos extraídos del modelo tridimensional, para poder analizar variaciones radiales continuas en los esfuerzos sobre el rotor y sobre el estator. Se ha empleado un método similar al caso 2D, tomando las presiones en álabes y directrices de forma ordenada, por posiciones radiales. A partir de esos datos en cada sección, la fuerza es integrada en cada radio. Al mismo tiempo, también es posible determinar una fuerza global para todo el álabe o directriz a partir de la composición de las fuerzas en cada sección radial. Al final, se trata de capturar las variaciones temporales en los esfuerzos tanto en rotor como en estator.

La figura 7.47, por ejemplo, recoge la variación de la fuerza total sobre un álabe del rodete (magnitud de la fuerza) y también sobre una de las directrices del estator. Como siempre, las variaciones para uno u otro perfil son periódicas en función de la frecuencia con la que interactúan con los elementos de su corona complementaria. De esta forma, la oscilación de la fuerza sobre el álabe es periódica a paso de directriz (escala de tiempos de  $t/T_S=0.0$  a  $t/T_S=1.0$ ), mientras que sobre la directriz lo es a paso de álabe (escala de  $t/T_R=0.0$  a  $t/T_R=1.0$ ). Ambas gráficas de la figura 7.47 recogen la fuerza total y sus componentes de origen viscoso ( $\tau = \mu\dot{\gamma}$ ) y de presión. Sobre el eje de ordenadas de la derecha se leen los valores correspondientes al término de cortadura por fricción con los álabes, claramente de un orden muy inferior a los de presión (de hecho, las curvas de valor total y componente de presión aparecen prácticamente superpuestas). Conviene destacar dos apreciaciones adicionales sobre ambas representaciones; por un lado los valores medios de las fuerzas, cifrados en unos 75 N para cada álabe de los 9 del rotor y en unos 30 N para cada directriz; y por otro lado, el valor de las oscilaciones, que son de tan sólo un 1 a 2% para los álabes (1 N de oscilación), mientras que para las directrices rondan entre el 20 y el 40% (hasta 10 N sobre 25 de oscilación). Evidentemente, las mayores oscilaciones van ligadas al caso en que ambos haces se encuentran más próximos entre sí.

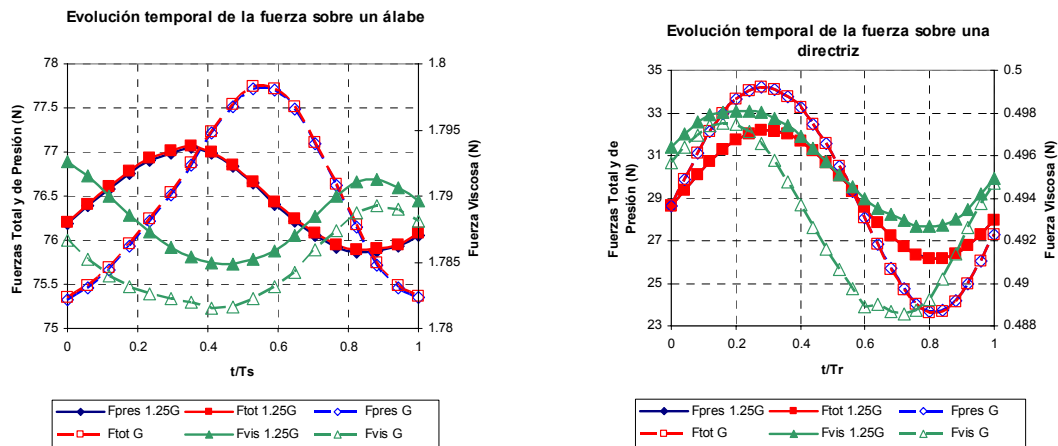


Fig. 7.47. Evolución temporal de las fuerzas totales de presión y de origen viscoso sobre un álabe y una directriz. Comparativa entre gaps. Caudal nominal

La observación de estos valores globales de fuerzas, muestra efectivamente cómo varían los esfuerzos de origen fluidodinámico sobre los álabes y directrices. Y habiendo observado, a su vez, cómo las distribuciones de presión (incluso ya promediadas) difieren notablemente entre secciones, se ha ampliado el análisis de las fuerzas para recoger no sólo valores globales, sino también distribuciones radiales. Siguiendo procedimientos análogos a los empleados en la bibliografía consultada, se van a presentar los resultados de la fuerza, adimensionalizada por un coeficiente definido por la expresión:  $C_f = \frac{1}{2} \rho \cdot W_m(r)^2 \cdot c(r) \cdot \Delta r$ . Este coeficiente, con dimensiones de fuerza, incluye la cuerda de los perfiles en cada radio considerado ( $c$ ), la diferencia entre radios ( $\Delta r$ ) -la envergadura dividida en 21 posiciones- y el valor de la velocidad relativa del flujo en el canal del perfil en el punto de curvatura media, también función de cada radio ( $W_m$ ).

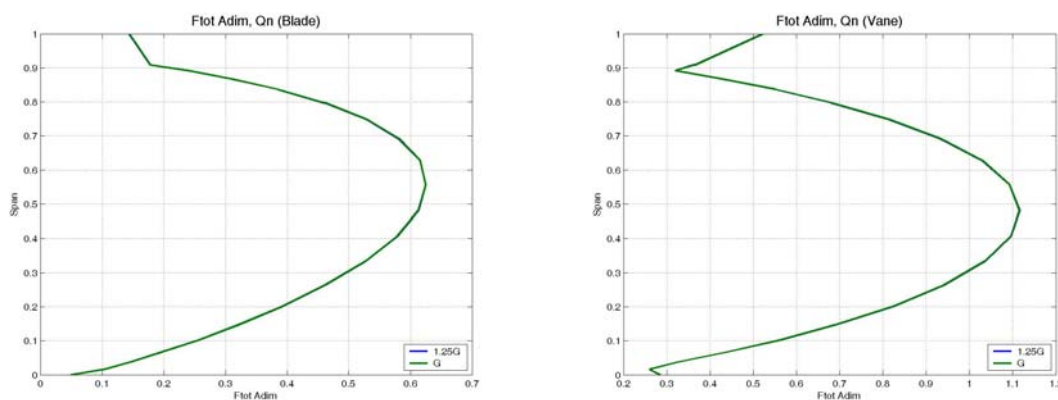


Fig. 7.48. Distribución radial media sobre un álabe y una directriz de la fuerza adimensionalizada. Comparativa entre gaps. Caudal nominal.

Sobre la figura 7.48 se recogen las distribuciones radiales de la fuerza total, promediadas en el tiempo, tanto para un álabe como para un directriz, ya adimensionalizada por el coeficiente  $C_f$ . Cada gráfica incluye asimismo las dos



configuraciones de separación entre haces, pero no hay diferencias sobre el valor medio, pues ambas curvas se superponen (tal y como se puede intuir con las medias de las oscilaciones de la figura 7.47). Nótese cómo los valores de las fuerzas son máximos, tanto en álabes (*blade* en la figura) como en directriz (*vane*), en la zona del *midspan*.

En la figura 7.49 se incluye la evolución temporal de las componentes axial y tangencial de la fuerza sobre álabes y directrices, adimensionalizadas por  $C_f$ . La componente radial es prácticamente despreciable, por cuanto los perfiles apenas presentan proyección radial de su superficie. De esta forma, los esfuerzos radiales sobre la máquina tendrán origen exclusivamente mecánico como consecuencia de la fuerza centrípeta inercial por el giro de los álabes.

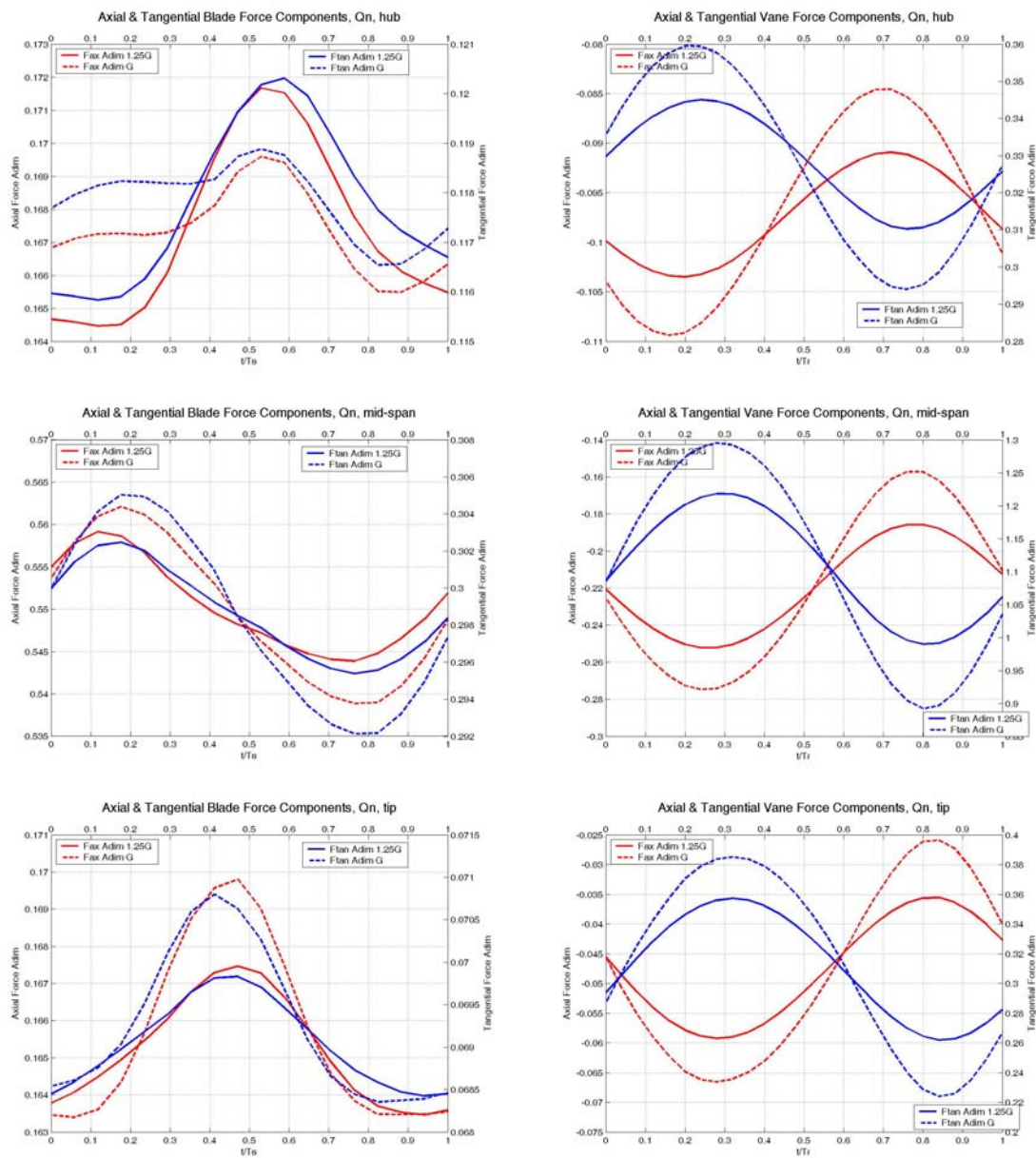


Fig. 7.49. Evolución temporal de las componentes axial y tangencial de la fuerza sobre un álabes y una directriz en las secciones de base, media y punta. Comparativa entre gaps. Caudal nominal.



En cada gráfico se comparan los dos *gaps* de estudio, resultando siempre una mayor oscilación para la separación inferior (líneas a trazos), salvo en la sección de la base. Sin embargo, el mayor esfuerzo recae en la zona central (como se vio en la figura 7.48), por lo que la fuerza global presenta ese comportamiento (figura 7.51). Sobre los álabes, la fuerza axial y la fuerza tangencial son del mismo orden de magnitud, estando además en fase, si bien es algo más pequeña en todas las secciones la componente tangencial. Por el contrario, en el estator, las fuerzas axial y tangencial se encuentran completamente desfasadas en el tiempo de paso de álabe. Además, la componente tangencial tiene mucha mayor importancia que la componente axial como se desprende de los valores de las gráficas en todas las secciones. Por tanto, el paso de los álabes, juega un papel muy importante sobre el valor de la fuerza sobre cada directriz, puesto que la componente tangencial oscilará como consecuencia del paso de álabe (modifica e interactúa con el carga aerodinámica de las directrices –apartado 7.2.1.1).

Resaltar que respecto a esas oscilaciones de la componente tangencial de la fuerza sobre directrices; si se calculan por secciones los porcentajes de variación de la señal respecto de su valor medio, se obtienen para el *gap* inferior, variaciones del 12.5% en la base, 18% en el medio y 26% en la punta. Esto significa que aunque el valor de la fuerza sea mayor en la zona central, las oscilaciones son mayores conforme la posición radial se acerca más a la punta, en perfecta concordancia a lo predicho por el modelo bidimensional (figura 7.19).

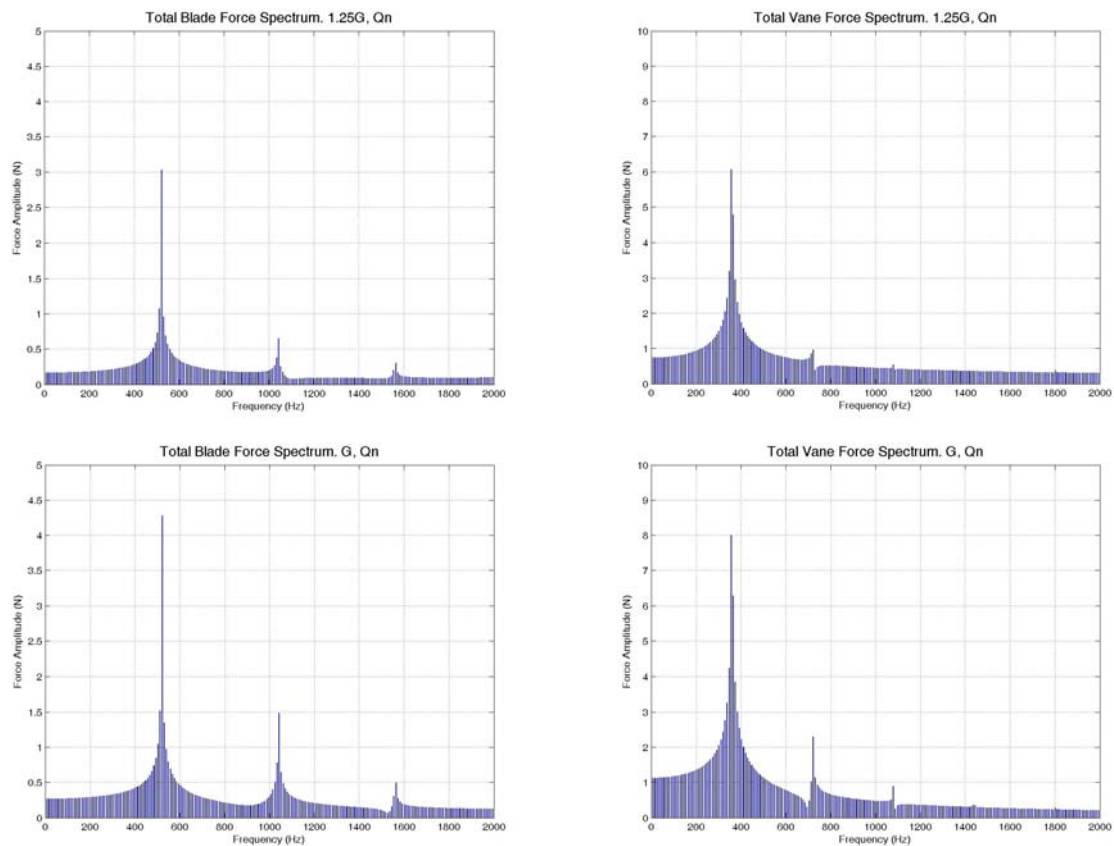


Fig. 7.50. Espectro de la fuerza total en un álabe y una directriz. Comparativa entre *gaps*. Caudal nominal.



Como punto final a este apartado, se muestran en la figura 7.51, las señales temporales a las que se les ha hecho el tratamiento frecuencial (figura 7.50). Se han adimensionalizado en esta ocasión con el coeficiente  $C_f$ . Además, se incluye la evolución del rendimiento hidráulico —gráfica inferior-, calculado a partir de la relación entre la potencia hidráulica (caudal e incremento de presión calculado por el modelo) y de la integración del producto entre fuerza tangencial global por la velocidad de giro en cada radio. Su valor medio ronda el 88%, perfectamente asumible y comparable a lo prefijado en el diseño de la máquina.

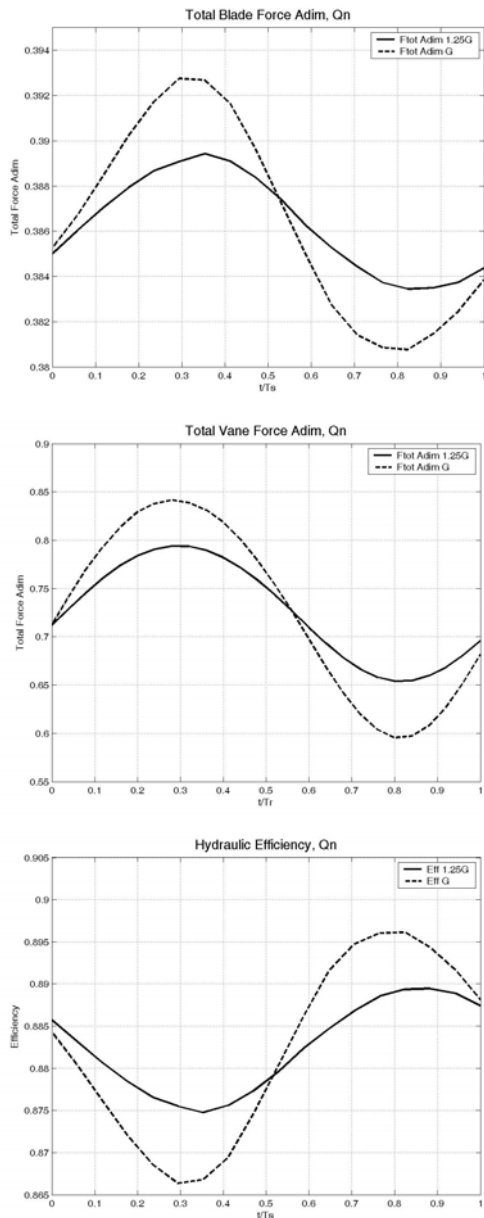


Fig. 7.51. Evolución temporal de la fuerza total adimensionalizada en álabes y directriz. Variación del rendimiento del rotor. Comparativa entre gaps. Caudal nominal.

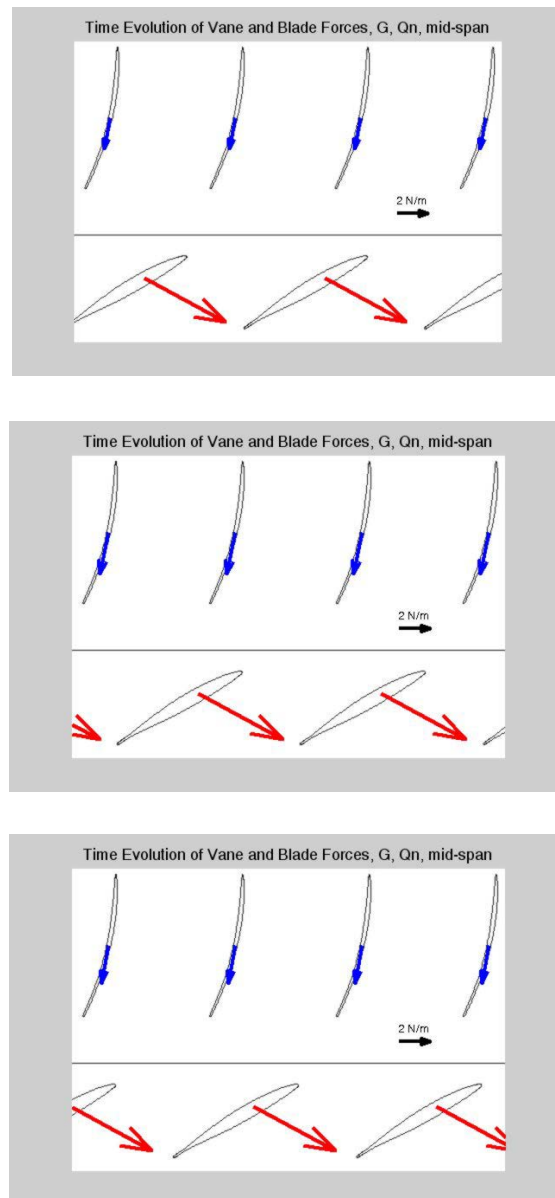


Fig. 7.52. Evolución temporal de las fuerzas sobre los haces en la zona media.



Se han generado una serie de animaciones de la evolución de las fuerzas (en magnitud y dirección) a lo largo del tiempo y en cada sección. Se recoge en la figura 7.52 una breve evolución de esas fuerzas en la sección media. Nótese cómo a pesar del movimiento de los álabes, la oscilación de las fuerzas sobre ellos es muy tenue (apenas 2%); mientras que en las directrices sí se aprecia una mayor variación de las fuerzas – compárese la figura central con sus compañeras-.

#### **7.4.- CONCLUSIONES**

Se han observado y analizado los efectos no estacionarios, tanto experimental como numéricamente, de la interacción entre el estator y el rotor en un ventilador axial de una única etapa.

En este capítulo se han analizado efectos instantáneos, asociados a las posiciones relativas que los diversos elementos constitutivos de la etapa van adoptando a lo largo del tiempo. Aprovechando la periodicidad de los fenómenos inherentes al flujo, ha bastado con observar varias posiciones intermedias a lo largo del recorrido de un álabe por su canal de rotor, para entender por completo los fenómenos no estacionarios existentes en el marco de referencia absoluto. Se ha realizado un tratamiento análogo para el marco relativo, a partir de la frecuencia característica de paso de directriz.

Con estas bases, se presentaron inicialmente los resultados experimentales instantáneos obtenidos tanto con una campaña de medidas de fluctuación de presión en la carcasa de la máquina, como con la metodología de anemometría térmica. Las medidas de fluctuación se plantearon como un punto de partida hacia el posterior análisis numérico de esfuerzos en los perfiles, sobre todo a nivel frecuencial. La construcción de mapas temporales ha servido para adivinar pequeños detalles sobre el flujo secundario en el huelgo radial de la soplante, si bien no se ha adentrado ni extendido su estudio al no ser éste el objeto de esta tesis. En segundo lugar, las medidas con hilo caliente permitieron construir el marco instantáneo de la interacción. Como se comentó, el acuerdo entre sus resultados y los del modelo numérico tridimensional que se detallan al final del capítulo fue bueno, si bien se ha observado cierta falta de discretización circunferencial tanto en el modelo (estelas excesivamente difuminadas numéricamente aguas abajo), como en la rejilla experimental de tomas de datos (estelas no demasiado estilizadas); no así en las discretizaciones temporales empleadas, suficientemente finas. Como es sabido por el lector, un aumento de ambas discretizaciones suponía un esfuerzo extraordinario, tanto computacional como operativamente, en el caso de las medidas experimentales, por lo que las decisiones adoptadas se han situado en el límite de lo asumible. También se presentaron mapas espacio-temporales en los que se captaron con nitidez las morfologías de las estelas, empleándose además este tipo de representaciones para abordar el análisis del modelo de turbulencia empleado. Así, se discutió el modelo de turbulencia más óptimo para la simulación, resultando el modelo LES la elección más apropiada para una mejor captura y caracterización de las estelas.

La parte numérica comenzó a ser tratada mediante el modelo numérico bidimensional, estudiando el flujo álabe a álabe y sus características instantáneas. Se observaron importantes fluctuaciones de las cargas aerodinámicas de los perfiles en función de la posición relativa que van ocupando los haces en el tiempo. Se llevó a cabo





un estudio de diversas secciones, para comprender la estructura del flujo a lo largo de la envergadura de la máquina. La forma en que las estelas de las directrices quedan condicionadas por el bloqueo del rotor aguas abajo y cómo fluctúan por su presencia pudo ser ya constatada a partir de esta modelización. Se introdujeron los mapas temporales tridimensionales como una herramienta más compacta sobre la que analizar la evolución y morfología de las estelas y de los efectos potenciales a lo largo del tiempo.

Se finalizó el estudio con el análisis de los resultados numéricos tridimensionales. Sobre la representación sectorial en diversos instantes, se localizaron diversos efectos instantáneos de interacción entre rotor y estator de cierta relevancia, entre los que destacan: el desplazamiento radial de la interacción entre estelas de estator y bloqueo de los álabes (figura 7.28); retraso del paso de la zona de bloqueo en la zona de punta (figura 7.28); fuerte interacción de la zona de punta de las estelas de directriz con el bloqueo, sobre todo a bajos caudales y mínima separación entre coronas (figuras 7.30 y 7.38); u ondulaciones de las estelas de los álabes al interactuar con los residuos estelares provenientes del estator (figuras 7.37 y 7.39). A continuación, se recogieron las evoluciones temporales de los esfuerzos en álabes y directrices, con el objeto de caracterizar las frecuencias de excitación de las interacciones.

En definitiva, se puede decir que este capítulo ha abordado el estudio de aquellos tipos de fenomenología que el flujo promedio (ya sea en el marco relativo, ya sea en el absoluto) es incapaz de describir. Las medidas experimentales han validado y mostrado fenómenos que eran observables sobre el modelo numérico, completando el análisis global de la interacción iniciado en el capítulo 6. El último esfuerzo de este trabajo se centrará ahora en determinar y caracterizar las fuentes de la interacción, una vez completada y entendida cómo es la interacción y que mecanismos la gobiernan. Y de eso trata el último capítulo de esta tesis, capítulo 8, en el que se aborda el análisis determinista del flujo y la determinación de las fuentes de interacción rotor-estator.

