

CFD STUDY OF THE ROTOR-STATOR INTERACTION IN A CENTRIFUGAL PUMP WITH DIFFUSER

ESTUDIO MEDIANTE CFD DE LA INTERACCION ROTOR-ESTATOR EN UNA BOMBA CENTRÍFUGA CON DIFUSOR

M.G. Coussirat^{a*}, A. Fontanals^b, A. Guardo^b

^a LAMA – Universidad Tecnológica Nacional, Fac.Reg.Mza., Rodríguez 273– (5500) Mendoza – Argentina

^b CDIF- Universidad Politécnica de Cataluña, Av Diagonal 641 - Barcelona – España

Recibido: 20/12/2012; aceptado: 12/03/2013

Una bomba centrífuga con difusor, trabajando en diseño óptimo es estudiada por modelado numérico (CFD) con el fin de identificar y estudiar la posible amplificación de fluctuaciones de presión dentro de la máquina (RSI). Se usan resultados numéricos previos, obtenidos en álabes aislados y cascadas de álabes fijos y móviles con el objeto de validar/calibrar los modelos para la turbulencia a utilizar, comparando con los de bases de datos experimentales. Este trabajo previo luego se aplica al estudio de la bomba con difusor, que servirá para futuros estudios de turbomáquinas trabajando bajo condiciones fuera de diseño en donde puede aparecer el fenómeno de cavitación.

Palabras clave: CFD, bomba centrífuga, alabes, modelado numérico, turbulencia, cavitación.

A centrifugal pump with diffuser, working at optimal design is studied by numerical modelling (CFD) in order to identify and study the possible amplification of pressure fluctuations within the machine (RSI). Previous numerical results obtained for isolated blades, and steady and moving blade cascades are used in order to validate/calibrate the available turbulence models. This previous work then is applied to study the centrifugal machine. The obtained knowledge will be useful for future studies of turbomachines working at off-design conditions, where cavitation could be appear.

Keywords: CFD, centrifugal pump, blades, numerical modeling, turbulence, cavitation.

I. INTRODUCCIÓN

Históricamente el diseño y cálculo de turbomáquinas hidráulicas (TMH) se ha basado más en la experimentación que en la teoría. Los modelos matemáticos clásicos que las representan, aunque completos, son difíciles de resolver debido a la geometría compleja de la máquina. Actualmente, el requerimiento conjunto de curvas de rendimiento muy suaves con grandes zonas de alto rendimiento y bajo nivel de vibraciones implica un cuidadoso diseño de la máquina. El carácter no estacionario y turbulento del flujo da lugar a fenómenos cíclicos de pulsaciones de presión, no siempre claramente interpretados y que conducen al fallo prematuro de la máquina. Debido al carácter cada vez más sofisticado de los diseños, los experimentos son muy costosos y las tendencias actuales en el diseño fluidodinámico implican el uso extensivo de la simulación numérica (CFD) aplicada al estudio y diseño de turbomáquinas. Dependiendo del diseño, uno de los fenómenos de recurrente aparición es la llamada Interacción Rotor Estator (RSI) consistente en pulsaciones de presión en la zona entre álabes fijos del estator y móviles del rotor. Un diseño defectuoso de la máquina implica que estas pulsaciones de cierta frecuencia y amplitud puedan excitar modos de vibraciones propios de la máquina, lo que puede

conducir al fallo por fatiga de la misma con consecuencias catastróficas para la instalación.

Actualmente existen muchos códigos numéricos, (CFD) del tipo multi-física, ya sea comerciales o del tipo "open source" disponibles. Estos códigos contienen esquemas de integración numérica para las ecuaciones de conservación de masa, de cantidad de movimiento (Navier-Stokes, NS) y de la energía. Para el caso de flujo turbulento, llegar a definir el modelo matemático que permita integrar las ecuaciones, implica el promediado temporal de las ecuaciones conservativas de masa, NS y energía usando una escala de tiempo adecuada (Reynolds Averaged Navier Stokes Equations, RANS). Esto permite explicitar, a escala de valores medios, los efectos de la turbulencia. La manifestación de estos efectos implica el "cierre" del sistema de ecuaciones. El modelado de la turbulencia se hace, generalmente, a través de ecuaciones de transporte dando lugar a modelos de tipo escalar relativamente simples que computan una viscosidad turbulenta isotrópica (eddy viscosity models, EVM) o bien, computan las componentes del tensor de tensiones turbulentas (Reynolds Stress Models, RSM). Existen opciones más sofisticadas para este "cierre" (DES y LES) o bien sin ningún tipo de "cierre", (DNS) pero debido al alto número de Reynolds de este tipo de problemas, éstos aún no son aplicables a estudios de

*e-mail:miguel.coussirat@frm.utn.edu.ar

diseños de modelos o prototipos industriales por su alto costo computacional (Coussirat 2003¹).

Las limitaciones actuales de estos códigos comerciales CFD provienen de su generalidad y es por ello que la obtención de resultados creíbles mediante su uso implica un trabajo de validación y calibrado importante. El principal objetivo de este trabajo es poder definir condiciones adecuadas de modelado detallado del flujo en el interior de TMH mediante CFD para estudiar en detalle la RSI, lo que permite la optimización de los diseños. En este trabajo se demuestra que la opción RANS+EVM utilizados criteriosamente a partir de cuidadosos estudios de sensibilidad, es adecuada sobre todo cuando se estudian TMH trabajando bajo condición de diseño óptimo.

Cuando la máquina trabaja fuera de diseño la opción RANS+EVM no es del todo adecuada, pero tampoco lo son las opciones RSM, DES, LES y DNS por su alto costo computacional. Dentro de este objetivo general, y mediante estudios de validación/calibración en sistemas más simples (álabes aislados y cascadas de álaves) se demuestra que es posible estudiar el fenómeno de RSI en detalle mediante RANS+EVM. El interés principal es la caracterización del flujo debido a la RSI en bombas, a partir del estudio de la influencia del modelado de la turbulencia en la predicción del fenómeno de RSI, evaluando el comportamiento de varios modelos de turbulencia. Para ello se han escogido bases de datos que implican la presencia de los distintos fenómenos que están presentes en la RSI tales como el crecimiento de capa límite y generación de estelas (BL/W) en álaves guía (flujo turbulento no estacionario sobre álaves aislados, Nakayama, 1985², Wang et al., 2004³, Ausoni et al., 2005⁴). En bombas, éstos se corresponden con los álaves situados corriente arriba de la zona en donde se produce la RSI. Luego, se estudiará un sistema de RSI simplificado consistente en una cascada lineal de álaves (rotor) interactuando con una única placa plana (estator) donde aparecen los efectos RSI consistentes en los llamados efectos potencial (por cambio de geometría) y de BL/W (Gete and Evans, 2003⁵).

Finalmente se estudia una bomba centrífuga (Tsukamoto et al., 1995⁶). Estas TMH presentan características constructivas que favorecen el desprendimiento de la capa límite en los álaves del rotor y por tanto la aparición de flujos en recirculación que activan más fuertemente la RSI. Se llevará adelante un estudio inicial de la máquina trabajando bajo condiciones de diseño. Como trabajo futuro se prevé el estudio para condiciones fuera de diseño con especial atención a las condiciones de carga parcial, que en este tipo de máquinas implica un flujo con grandes recirculaciones y posibles efectos de cavitación.

Todos los casos serán modelado mediante un código comercial de CFD (Ansys-Fluent 12.1). A partir de los resultados obtenidos y luego de una cuidadosa tarea de validación/calibración del código se estudió la estructura general del flujo. Se presentan a continuación los estudios de validación/calibración y el estudio del flujo con RSI en una bomba centrífuga.

II. METODOLOGIA, RESULTADOS OBTENIDOS

Metodología

Al seleccionar un modelo para la turbulencia existe un gran número de opciones, en donde la magnificación del mezclado debido a la turbulencia se representa a través de aumentar la viscosidad efectiva del fluido, suma de la viscosidad molecular y la debida al estado de turbulencia del flujo. Los más populares son los modelos del tipo EVM, en donde cierto número de ecuaciones, (Eq.) de transporte modelan esta magnificación del mezclado, e.g. modelo de 1 Eq. de Spalart Allmaras, de 2 Eq. $k-\epsilon$ y sus variantes, $k-\omega$ y sus respectivas variantes, (ver detalles en Coussirat 2003¹). Considerar el carácter vectorial de las tensiones turbulentas a través de modelar sus componentes mediante ecuaciones de transporte, RSM, implica un modelo más sofisticado y de mayor costo computacional. Otro tipo de consideraciones en cuanto al promediado temporal conduce a la opción LES/DES y el no promediado temporal implica la opción de no modelado de la turbulencia, sino su cálculo directo, DNS, todos éstos sumamente costosos desde el punto de vista del cálculo (ver e.g. Coussirat 2003¹, Durbin and Pettersson 2001⁷). En relación de los requerimientos computacionales necesarios para modelado de TMH, sólo la opción EVM es profundamente explorada, usándose la opción RSM o LES/DES como referencia comparativa en algunos casos. Para el modelado BL/W en perfiles aislados correspondientes a perfiles NACA de diferentes geometrías inmersos en túneles de viento/hidrodinámicos^{2,4}, se usaron las opciones indicadas en la Tabla 1.

TABLA 1: MODELOS PARA LA TURBULENCIA UTILIZADOS, (VER REFERENCIAS EN COUSSIRAT 2003¹)

Numero	Modelo de turbulencia
1	Spalart – Allmaras (S-A)
2	Standard $k-\epsilon$ (s-k- ϵ)
3	Realizable $k-\epsilon$ (r-k- ϵ)
4	Renormalization Group $k-\epsilon$ (RNG-k- ϵ)
5	Standard $k-\omega$ (s-k- ω)
6	Shear Stress Transport $k-\omega$ (SST-k- ω)
7	Reynolds Stress Model (RSM)
8	Large Eddy Simulation (LES)
9	Detached Eddy Simulation (DES)

Se consideran aquí geometrías bidimensionales (2D) y en todos los casos las condiciones de borde son: a) entrada: valor medio de velocidades y nivel de turbulencia; b) salida: condición Newman (outflow); c) bordes superior e inferior: no deslizamiento. Los esquemas de discretización en todos los casos son de 2^{do} orden, los residuos normalizados disminuyeron de 3 a 4 órdenes de magnitud y se realizó un estudio de sensibilidad de resultados al tamaño de celda de la malla (ver detalles en Coussirat et al., 2006⁸, Coussirat et al., 2008⁹).

Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos permiten ver que los valores de los coeficientes de presión, C_p y de las

velocidades, Figura 1, son bien capturados, aunque no puede decirse lo mismo de las fluctuaciones, Figura 2.

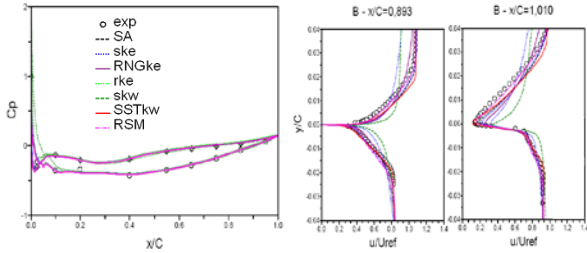


Figura 1. Resultados obtenidos (izq.: coef. C_p ; der.: veloc. medias BL/W, caso Nakayama et al., 1985². Nomenclatura: x/C distancia desde borde de ataque del perfil/cuerda, u/U_{ref} : valor local/valor corriente libre de la velocidad

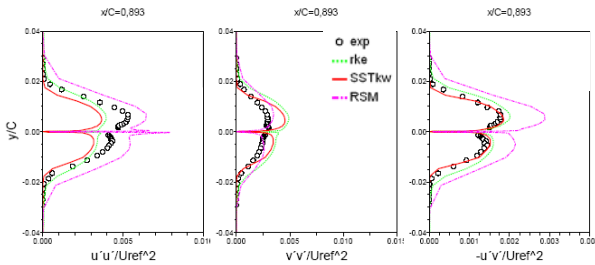


Figura 2. Resultados de fluctuaciones de velocidad con los modelos Realiz. $k-\epsilon$, SST $k-\omega$ y RSM, y valores exp. de Nakayama et al., 1985². Nomenclatura: $x'x'/U_{ref}^2$: valor local fluctuación /valor corriente libre de la velocidad

Aunque las fluctuaciones de las velocidades no son bien capturadas, su influencia respecto de las medias es de un bajo porcentaje, típico en capas límites no desprendidas, de allí el buen ajuste de los valores medios. El siguiente paso fue la verificación del correcto modelado de la frecuencia de desprendimiento de vórtices los que luego conforman la estela. Para ello se simularon casos no estacionarios y se comparó el número de Strohual, ver Tabla 2.

TABLA 2: FRECUENCIAS OBTENIDAS.
FRECUENCIA EXPERIMENTAL: 894 HZ, AUSONI ET AL., 2005⁴

Malla	1-2D	2-2D	3-2D	4-2D	5-2D	6-3D
Elements	55300	114500	76000	56800	96200	962000
y'	4	4	1	2	2	2
Model turbulento	Frecuencias (Hz)					
Spallart-Allmaras	925	952	939	937	930	946
s-k-ε	884	864	920	890	930	-
RNG-k-ε	886	891	927	920	943	-
r-k-ε	773	708	910	910	966	-
s-k-ω	889	911	838	894	893	-
SST-k-ω	929	909	965	950	970	-
SST-k-ω (transición)	938	933	933	944	961	-
RSM	892	910	926	919	845	946
DES	-	-	-	-	-	705
LES	-	-	-	-	933	973

Puede verse en la tabla que varios modelos tipo EVM aproximan bien el valor experimental. En el caso de un perfil NACA con borde de fuga truncado⁴, los datos de velocidades medias y frecuencias de desprendimiento son bien capturados, ver Figura 3, debido a que la intensidad de los vórtices se magnifica por dicho truncamiento.

A partir de la obtención de estos resultados promisorios para BL/W, se añade al modelado las siguientes dificultades: a) grupo de álabes (cascada) y b)

movimiento de la malla, Figura 4. Se pretende así modelar la RSI mediante la interacción de perfiles móviles y fijos, implementados a través de definir la movilidad de la cascada que se corresponde con el rotor, usando la base de datos experimentales de Gete and Evans, 2003⁵.

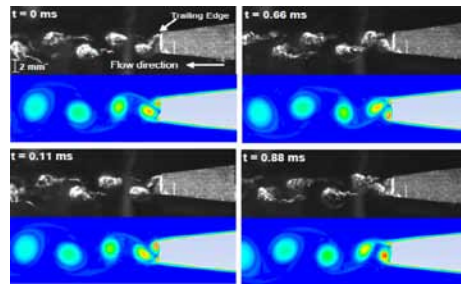


Figura 3. Vórtices desprendidos. Blanco y negro: flujo experimental, caso Ausoni et al. 2005⁴, color: resultados CFD de verticidad (rojo máximo, azul mínimo)

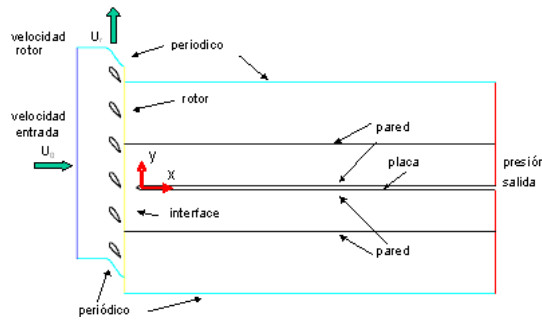


Figura 4. Configuración del dominio de cálculo RSI

Los resultados obtenidos muestran que dependiendo de la frecuencia de paso, f , de las estelas de los álabes de la cascada (rotor) sobre la placa plana se provocan diferentes modificaciones en la estructura de la capa límite de la placa plana (estator). La elevada energía turbulenta de la estela provoca aumentos de la velocidad media y la presión y de sus fluctuaciones en la capa límite de la placa plana cuando ésta coincide con aquellas, Figura 5. Los resultados muestran que la intensidad de la turbulencia en las estelas es función de la velocidad absoluta a la salida del flujo en la cascada, relacionada a su vez con f , por tanto, presenta diferentes patrones de comportamiento para cada condición de trabajo. Las bombas se diseñan para condiciones de trabajo específicas (condición de diseño), pero muchas veces a éstas se las hace trabajar fuera de este punto de diseño debido a requerimientos de explotación. Debe por tanto explorarse qué puede esperarse cuando se trabaja fuera de diseño a efectos de analizar posibles efectos perniciosos debido a la RSI. Para la cascada presentada se intenta esto, modificando la frecuencia de paso de los álabes, Figura 5.

Puede verse que el gradiente de presiones adverso que presenta el flujo en la cara de succión de los álabes genera desprendimiento de la capa límite, magnificando la creación de vórtices que viajarán corriente abajo. En este caso RANS+EVM determinan sólo cualitativamente las características de la estela y los

niveles de energía turbulenta que afectan a la capa límite sobre la placa plana. Resultados cuantitativos (ver Guardo et al., 2012¹⁰) sólo se obtienen mediante DES.

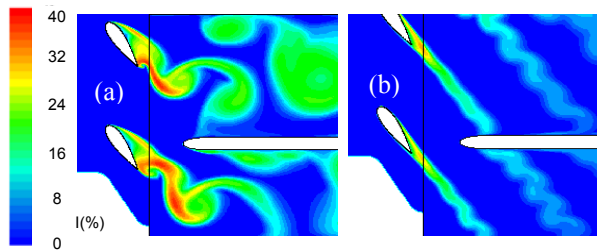


Figura 5. Resultados obtenidos de intensidad de turbulencia, I% : (a) $f=20\text{Hz}$, fuera de diseño y (b) $f=40\text{Hz}$, condición de diseño.

Cuando se trabaja en condiciones próximas a las de diseño ($f=40\text{Hz}$) los EVM tampoco pueden resolver cuantitativamente la creación de vórtices a la salida de la cascada y en la estela, ya que se predicen valores de intensidad de la turbulencia inferiores a los experimentales, confirmando algo ya observado en perfiles aislados con borde de salida afilado y bajo ángulos de incidencia pequeños (Coussirat et al. 2008⁹). Lo que si se ve mediante EVM es el complejo efecto potencial debido a la modificación de la geometría sobre la estela y sobre la capa límite que se desarrolla sobre la placa plana (Fontanals et al., 2010¹³). En estas condiciones (diseño) algunos modelos EVM (e.g. SST $k-\omega$) han presentado resultados similares a los obtenidos mediante DES para las velocidades y sus fluctuaciones. El desprendimiento de vórtices que da lugar a la estela, causa una serie de dificultades de modelado mediante EVM, asociadas con las pequeñas escalas de longitud relativa a la escala del pasaje de los álabes, (borde de fuga afilado del álabe), además de la escala temporal asociada a la formación, desprendimiento y disipación de vórtices que también es pequeña. La tendencia de los EVM para exagerar la coherencia del movimiento que surge del desprendimiento es marcada. Por este motivo es necesaria tanto una resolución espacial (mallado) como temporal muy fina para poder capturar las fluctuaciones de las escalas tanto energéticas como disipativas a medida que la estela evoluciona luego de producirse el desprendimiento de vórtices en el borde de fuga del álabe. A pesar de esto, se ha podido determinar, mediante transformada de Fourier de los valores del coeficiente de sustentación, C_L que las frecuencias características obtenidas en la placa y en los álabes de la cascada, recogen el efecto potencial debido al paso de los álabes y del flujo en la estela, de manera similar a lo mostrado para perfiles aislados (ver Tabla 2).

Todo el análisis de resultados presentado hasta el momento ha servido para conocer el comportamiento de los EVM disponibles y su aplicación al estudio de RSI en bombas, ya que su modelado implica una dificultad superior pues se incorpora dentro de la ecuación de conservación de cantidad de movimiento los términos de aceleración de Coriolis y centrípeta si se estudian las velocidades en los vanos entre álabes desde el punto de

vista relativo, sabiendo que en general los EVM no representan efectos de rotación. Hay diversos parámetros que afectan las pulsaciones de presión generadas por la RSI en bombas, los que pueden agruparse (Egusquiza, 2003¹¹) en: a) que afectan la estela, e.g., grueso de álabes en su borde de fuga; b) diferencias de velocidad entre la cara de succión y de presión (carga del álabe); c) punto de funcionamiento de la máquina (diseño o fuera de diseño), d) distancia entre rotor y estator (distribuidor), e) número de álabes del rotor y estator del difusor, f) diseño y forma de los álabes.

Se han aplicado aquí las mismas estrategias que en álabes aislados y cascadas, a efectos de obtener un conocimiento más profundo sobre el fenómeno de RSI en bombas con alta carga de álabes con condiciones de trabajo en el punto de diseño. Para este estudio se usa la base de datos de Tsukamoto et al., 1995⁶, ver Figura 6. Para definir condiciones de borde, iniciales y pasos de tiempo se han seguido las estrategias de validación/calibración ya presentadas, incluyendo un estudio de sensibilidad de malla con 6 mallas diferentes ($1 < y^+ < 200$), la más fina con aproximadamente 300.000 celdas de cálculo. Para este caso se han utilizado los modelos de turbulencia que se corresponden con los números del 1 al 7 de Tabla 1. Se han obtenido resultados numéricos para las fluctuaciones de presión en los vanos del estator, puntos señalados en rojo, ver Figura 6.

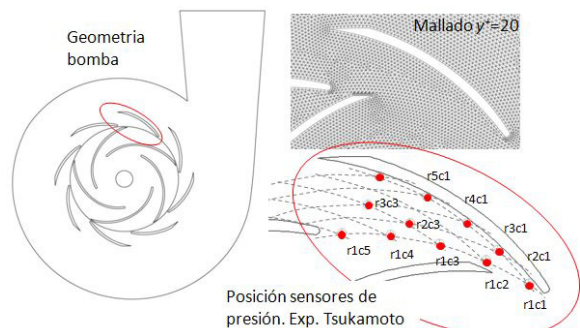


Figura 6. Configuración, caso Tsukamoto et al. 1.995⁶.

En la Figura 7 se presentan los mejores ajustes de la presión no estacionaria adimensional obtenidos, $\Delta\psi = 2\tilde{p}^*(\rho u_2^2)^{-1}$ versus el tiempo relativo del ciclo $t^* = t(T_i)^{-1}$, que corresponden con los EVM indicados en la Figura 7, siendo \tilde{p}^* la presión relativa periódica fluctuante en la posición $r_j c_j$; ρ la densidad del fluido, u_2 la velocidad tangencial de giro de la salida del rotor, t el tiempo instantáneo y T_i el período de paso de dos álabes del rotor. Puede verse que la tendencia general es capturada aunque los valores locales en muchos casos no son ajustados adecuadamente, pese a esto, es posible una descripción física cualitativa de los flujos complejos que se presentan en el rotor y el estator de la bomba debido a el efecto de RSI. Similares resultados se han obtenido en otras posiciones, (Fontanals, 2011¹²), para $\Delta\psi$. El modelo RSM da resultados un poco más

ajustados a los datos que los EVM pero requiere más recursos computacionales. No se ha utilizado DES/LES por su alto costo computacional en este caso.

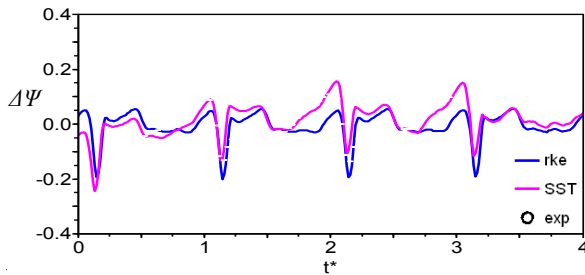


Figura 7. Presión no estacionaria adimensional en el punto r_{1c1} vs tiempo relativo del ciclo. Resultados obtenidos con Realiz. $k-\epsilon$ y SST $k-\omega$ frente a los valores experimentales de Tsukamoto et al. 1.995⁶

En la Figura 8 se muestran los campos de velocidades y presiones obtenidos, los que están asociados a las fluctuaciones de presión discutidas en la Figura 7.

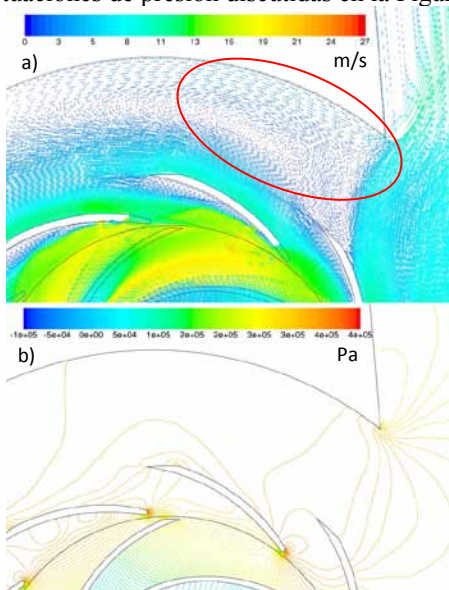


Figura 8. Resultados numéricos obtenidos con modelo Realiz. $k-\epsilon$ de campo de: a) velocidades absolutas; b) presiones relativas en el interior de la bomba.

Después del análisis de resultados se confirma que el uso de un solo modelo de turbulencia RANS+EVM no permite extraer conclusiones definitivas. Se muestra que a partir del análisis presentado es posible capturar tendencias del flujo en el interior de la máquina, si la tarea de validación y calibración de los modelos es cuidadosa. Esto permite por ejemplo, un rediseño de la geometría en función del comportamiento observado (e.g. una mejora de diseño de la geometría en la zona de recirculación, en donde el efecto de RSI es magnificado por la presencia de la lengüeta corta aguas, círculo rojo Figura 8a).

III. CONCLUSIONES

Como conclusión general, se observa que los valores medios de C_p y de velocidades en álabes y cascadas de álabes se capturan bien pero las fluctuaciones no. Para

el caso de bombas, tampoco se logra un buen modelado del detalle de las fluctuaciones de velocidad y presiones pero si se capturan tendencias. Por tanto, pese a que CFD permite una buena aproximación a los valores medios en todos los problemas, los fenómenos que dependen fuertemente de las fluctuaciones, tales como acoplamientos e interacciones fluido-estructura (lock-in o RSI), potencialmente peligrosos para el funcionamiento correcto de la máquina, se capturan aproximadamente aunque con buena tendencia. La captura de valores medios en forma adecuada y sin revisión detallada de la fenomenología relacionada con las fluctuaciones, no permite el adecuado diagnóstico en estos casos. Dentro de las opciones de modelado de flujo turbulento con aplicaciones a turbomáquinas, un sólo modelo turbulento no permite resultados concluyentes. Sin embargo la opción CFD, usada criteriosamente y a pesar de sus limitaciones, en una herramienta poderosa que permite complementar el diseño clásico ahorrando tiempos y costos de ensayos, además de la observación de tendencias que permiten ajustar el diseño de TMH de nueva generación.

IV. REFERENCIAS

1. Coussirat, M. "Theoretical/Numeric Study of flows with strong Streamlines Curvature", PhD. Thesis UPC, Spain, 2003.
2. Nakayama, A. Jour.Fluid Mech., **160**. 155-179 (1985).
3. Wang, H., Tsukamoto, H. Jour.Fl.Eng.**123**.737-747 (2001)
4. Auzoni, P., Farhat, M. Escaler, X, Egusquiza, E., Avellan, F. Jour.Fl. Eng.**129**,966-973 (2007).
5. Gete, Z., Evans, R. Jour.Fl.Struct.**17**.43-55 (2003).
6. Tsukamoto, H., Uno, M., Hamafuku, N., Okamura, T. The 2nd Joint ASME/JSME Fl.Eng.Conf. FED **216**.133-138 (1995).
7. Durbin, P.A., Pettersson, B.A. "Statistical theory and modeling for turbulent flows", Wiley & Sons, NY (2001).
8. Coussirat, M., Grau, J., Mateos, B., Fontanals, A. and Egusquiza, E., "Assessment of Turbulence Models for Unsteady Flow in Hydrofoils", IAHR Int. Meeting of WG on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, Spain, (2006).
9. Coussirat, M., Fontanals, A., Grau, J., Guardo, A., Egusquiza, E., "CFD Study of The Boundary Layer Influence on the Wake for Turbulent Unsteady Flow in Hydrofoils", IAHR 24th Sympos.Hydr.Mach.and Systems, Brazil, (2008).
10. Guardo A., Fontanals A., Coussirat M., Egusquiza E., "Detached Eddy Simulation Of The Rotor-Stator Interaction Phenomenon In A Moving Cascade Of Airfoils" , 26th IAHR Sympo.Hydr.Mach. and Systems, China, (2012).
11. Egusquiza E. "Comportament dinàmic de màquines hidràuliques". Edicions UPC, (2003).
12. Fontanals, A., Guardo, A., Coussirat, M., Egusquiza, E., "Numerical Study of the Fluid – Structure Interaction In the Diffuser Passage of a Centrifugal Pump", IV Int. Conf. Comput.Meth. for Coupled Problems in Science and Engineering, Coupled Problems (2011).
13. Fontanals, A., Coussirat, M., Guardo, A., Egusquiza, E. "Detailed Study of the Rotor-Stator Interaction Phenomenon in a Moving Cascade of Airfoils" . IAHR 25th Sympo.Hydr.Mach. and Systems, Romania, (2010)