ANEXO II: Ejemplo de Simulación de un Caso Bidimensional (Estudio de la Corriente de Salida del Rótor y Comparación de los Resultados Obtenidos Simulando el Difusor de Forma Aislada)

Para estudiar la interacción rotor-difusor en el plano del movimiento de giro se ha simulado un caso bidimensional, con el fin de cuantificar el grado de irregularidad de la corriente que abandona el rotor y ver cómo se modifica el comportamiento del difusor a causa del movimiento y el cambio continuo de la posición relativa entre los álabes del rotor y los del difusor.

Posteriormente se compararán los resultados con los obtenidos simulando tan sólo el difusor, lo que nos permitirá extrapolar las conclusiones al caso tridimensional, para el cual se simulará el difusor de forma aislada.

1 Descripción de la Geometría y Condiciones de Contorno

La figura AII.1 se representa esquemáticamente el volumen de control y las condiciones de contorno del caso simulado:



Fig. AII.1: Modelo de malla deslizante y condiciones de contorno

El proceso se consideró adiabático, considerando aire como fluido, luego en condiciones de incompresibilidad. Esta geometría no es igual a la del caso real. A parte de que se simula un caso bidimensional, el papel que aquí juega el estator lo jugarían los álabes directrices en el caso tridimensional. Los valores numéricos necesarios para la simulación se recogen en la siguiente tabla:

Número de álabes del rotor	32	Velocidad de giro	180 rpm
Número de álabes del difusor	32	Flujo másico	0,46875 Kg/s
Ángulo álabes del difusor	18°	Presión salida	101325 Pa
Diámetro salida rotor	1,22 m	Fluido	Aire
Diámetro salida difusor	1,5 m	Densidad	1,225 kg/m ³

Tabla AII.1: Geometría	у	propiedades	del	modelo

2 El Modelo de Malla Deslizante. Resultados Obtenidos

La idea es simular el movimiento entre el instante en el que un álabe **j** ocupa una posición determinada, como la que se muestra en la figura AII.1, y el instante en el que dicho álabe ocupa la posición del siguiente. Este intervalo de tiempo constituye el período en el cual se producen los cambios. A partir de ese instante la interacción rotor-estator vuelve a ser la misma.

El modelo de malla deslizante de FLUENT permite simular el movimiento relativo entre distintas zonas fluidas. Dado un paso de tiempo, se simula el movimiento de la zona fluida objeto de estudio y una vez alcanzadas las condiciones de convergencia deseadas, la malla móvil experimenta el desplazamiento correspondiente y pasa a resolverse el siguiente paso de tiempo.

El periodo completo se simuló en 10 intervalos, para cada uno de los cuales se realizó una simulación. En la consola de FLUENT se requiere introducir el paso de tiempo, que viene dado como sigue:

El rotor se mueve a una velocidad de n =180 rpm y posee 32 álabes por lo que, el período se completa cuando el rotor gira $\theta = \frac{360}{32} = 11,25^{\circ}$. Si queremos hacer 10 simulaciones, en cada una de ellas el rotor ha de moverse un ángulo $\theta_{j} = \frac{\theta}{10} = 1,125^{\circ}$, resultando el paso de tiempo:

$$t_{\theta} = \frac{1,125^{\circ}}{180 \frac{v_{\text{ueltas}}}{\min} \frac{1 \min}{60 \text{ s}} \frac{360^{\circ}}{1 v_{\text{uelta}}}} = 0,0104167 \text{ s}$$

Las siguientes colecciones de gráficas muestran los perfiles de velocidad (dirección y magnitud) y presión absoluta a la salida del rotor (entrada del difusor) en cada uno de los 10 instantes.



Perfiles del ángulo de la velocidad a la salida del rótor





Perfiles de presión absoluta a la salida del rótor









166



Perfiles del módulo de la velocidad a la salida del rótor





Si observamos las gráficas, tan sólo en los perfiles de presión se refleja claramente la interacción entre el rótor y el difusor. Los perfiles de velocidad, tanto ángulo como magnitud, se mantienen prácticamente iguales, pero trasladados en el espacio, moviéndose junto con los álabes del rótor. En los perfiles de presión el cambio es mucho más acusado, afectando directamente al rendimiento, que viene dado por:

$$\eta = \frac{\boldsymbol{p}_3 - \boldsymbol{p}_0}{\frac{1}{2}\rho \boldsymbol{c}_0^2}$$

y cuyos valores se recogen en la gráfica de la figura AII.2.



Fig. AII.2: Evolución del rendimiento del difusor, modelo de malla deslizante

Vemos que la variación es considerable a medida que los álabes del rotor avanzan. El valor medio es $\overline{\eta} = 0,612$ y el valor óptimo se obtiene para el instante $t_1 = t_0 + t_0 = t_0 + 0,0104167$ s aproximadamente, correspondiente al segundo paso. Las siguientes gráficas muestran los perfiles para dicho instante y el campo de velocidades:



Fig. AII.3: Perfiles de velocidad (ángulo y magnitud) y presión para el instante $t_1 = t_0 + 0,0104167 \ s$



Fig. AII.4: Campo de velocidades en el instante $t_1 = t_0 + 0,0104167$ s

La tabla AII.2 recoge los valores de velocidades y presiones a la entrada y salida del difusor, promediados espacialmente, para cada uno de los casos y el rendimiento obtenido a partir de los mismos.

	$ar{m{ ho}}_{_0}(m{Pa})$	$ar{m{p}}_{3}(m{P}m{a})$	$\bar{\alpha_0}(\circ)$	$\overline{c}_{_0}(m/s)$	$\bar{c}_{3}(m/s)$	η
t _o	101242.59	101325	15.402	12.43001	5.791427	0.871
$t_1 = t_0 + 0,0104167 \text{ s}$	101238.45	101325	15.532	12.3922	5.79188	0.920
$t_2 = t_1 + 0,0104167 \text{ s}$	101244.7	101325	15.514	12.4363	5.791814	0.848
$t_3 = t_2 + 0,0104167 \text{ s}$	101259.66	101325	15.448	12.50939	5.791362	0.682
$t_4 = t_3 + 0,0104167 \ s$	101277.93	101325	15.401	12.55929	5.790786	0.487
$t_5 = t_4 + 0,0104167 \text{ s}$	101291.95	101325	15.386	12.57538	5.78718	0.341
$t_6 = t_5 + 0,0104167 \text{ s}$	101295.27	101325	15.374	12.57031	5.787462	0.307
$t_7 = t_6 + 0,0104167 \ s$	101287.41	101325	15.306	12.55467	5.788232	0.389
$t_8 = t_7 + 0,0104167 \text{ s}$	101272.75	101325	15.296	12.52159	5.78934	0.544
$t_9 = t_8 + 0,0104167 \ s$	101255.52	101325	15.329	12.46013	5.790507	0.731

Nota: recordatorio de la nomenclatura usada: 0 = entrada del difusor, 3 = salida del difusor

Tabla AII.2: Resultados de las simulaciones 2D

La figura AII.5 indica cómo se produce la evolución de dichos valores medios de presión, velocidad a la entrada y rendimiento del difusor. En el caso de la velocidad, tanto dirección como magnitud, la variación es pequeña, mientras que la presión varia considerablemente, causando el cambio de rendimiento. La gráfica recoge también los valores medios temporales, denotado por una barra doble.



Fig. AII.5: Evolución de los valores medios de velocidad (ángulo y magnitud) y presión a la entrada del difusor, así como de rendimiento

3 Simulación del Difusor Aislado

A continuación se expondrán los resultados obtenidos simulando el difusor de forma aislada, es decir, de forma estacionaria, también en condiciones adiabáticas y de incompresibilidad (el fluido sigue siendo aire), pero sin considerar la interacción con el rótor, siendo conscientes de que se obvia toda la información que contiene la corriente a la salida del rótor. Esta pérdida de información ha de paliarse con la elección de la condición de contorno a la entrada del difusor.

El caso más asequible y sencillo que puede plantearse, como de mayor aplicación al caso tridimensional es el de un perfil de velocidad uniforme.

Para ello deben definirse el módulo y dirección. Mientras el módulo queda determinado por el flujo másico, para la dirección se presentan varias opciones:

- elegir el valor que se obtiene aplicando la teoría unidimensional para la cual se considera un número infinito de álabes,
- considerar el valor medio (espacial y temporal) obtenido en las simulaciones con el modelo de malla deslizante,
- considerar ángulos próximos al valor del ángulo de posicionamiento de los álabes del difusor.

Se simulará el difusor en régimen estacionario con cada una de estas opciones, pudiendo comparar los resultados correspondientes con los obtenidos al simular el movimiento empleando el modelo de malla deslizante.

3.1 Caso A: Simulación del difusor aislado usando valores teóricos correspondientes al caso de infinito número de álabes del rotor

La figura AII.6 representa el triángulo de velocidades correspondiente al caso de infinito número de álabes del rótor. Esto permite calcular exactamente las condiciones a la salida del mismo, quedando definida las condiciones a la entrada del difusor.

De la velocidad de rotación obtenemos el valor de la velocidad periférica:

$$n = 180 \text{ rpm}$$

 $u_0 = \frac{\pi Dn}{60} = \frac{\pi \cdot 1,22 \cdot 180}{60} = 11,49823 \frac{m}{s}$

El flujo másico es el mismo que en el caso de malla deslizante. A partir de su valor obtenemos el valor de la velocidad meridional:

$$\dot{m} = 0,46875 \frac{kg}{s} \rho = 1,225 \frac{kg}{m^3} A_0 = 0,11977 m^2$$

 $c_{m0} = \frac{\dot{m}}{\rho A} = \frac{0,46875}{1,225 \cdot 0,11977} = 3,195 m/s$



Fig. AII.6: Velocidad a la salida del rotor para el caso de infinitos álabes

definiendo así la dirección y el módulo de la velocidad a la entrada:

$$\alpha_{0} = \arctan \frac{c_{m0}}{u_{0}} = \arctan \frac{3,195}{11,49823} = 15,528^{\circ}$$
$$c_{0} = \sqrt{c_{m0}^{2} + u_{0}^{2}} = \sqrt{3,195^{2} + 11,49823^{2}} = 11,934 \text{ m/s}$$

Recordando la figura AII.5 o a la tabla AII.2 se tiene estos valores calculados son muy próximos a los promedios obtenidos simulando el movimiento.

Tomando estos valores teóricos, la situación quedaría como muestra la siguiente figura.



Fig. AII.7: Modelo y condiciones de contorno para el caso A

El campo de velocidades en el permanente, se ilustra en la figura AII8, así como el valor medio de presión a la entrada del difusor y del rendimiento obtenido.



Fig. AII.8: Distribución de velocidades y solución para el caso A

Volviendo a la figura AII.5, puede verse que el valor del rendimiento, es muy próximo al valor medio obtenido considerando la interacción rótor-difusor.

3.2 Caso B: Simulación del difusor aislado usando los valores medios obtenidos simulando el movimiento

A continuación se simulará el difusor aislado tomando los valores medios $\overline{\alpha_0}$ y $\overline{c_0}$ obtenidos en las simulaciones realizadas con el modelo de malla deslizante y recogidos en la figura AII.5. El modelo y las condiciones de contorno se representan en la figura AII9.



Fig. AII.9: Modelo y condiciones de contorno para el caso B

Los resultados para el campo de velocidades, el valor de presión absoluta a la entrada del difusor y el valor correspondiente para el rendimiento inferior, se ilustran en la figura AII.10.



Fig. AII.10: Distribución de velocidades y solución para el caso B

Como era de esperar, los resultados son casi iguales a los obtenidos en el caso B, al haber definido la condición de contorno con valores prácticamente idénticos. La semejanza en estos valores es muy indicativa de la validez que tiene considerar valores medios en la simulación de turbomáquinas.

3.3 Caso C: Simulación del difusor aislado usando perfiles de velocidad uniforme óptimos

Por *perfiles de velocidad uniforme óptimos* se hace referencia a perfiles de velocidad cuya dirección es próxima a la de la orientación de los álabes del difusor. Dado que los álabes del difusor están orientados 18°, se llevarán a cabo simulaciones usando ángulos para la velocidad de entrada próximos a este valor, concretamente:

 $\alpha_0 \in \{15^\circ, 16^\circ, 17^\circ, 18^\circ, 19^\circ, 20^\circ, 21^\circ\}$

Los valores del módulo de la velocidad se obtienen a partir del flujo másico y los valores del ángulo de entrada. Para el caso, por ejemplo de α_0 =18°, se tiene:

$$c_{m0} = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A_0} = \frac{0,46875}{1,225 \cdot 0,11977} = 3,195 \ \frac{m}{s}$$
$$c_0 = \frac{c_{m0}}{\sin\alpha_0} = \frac{3,195}{\sin18} = 10,34 \ \frac{m}{s}$$

La figura AII.11 recoge el modelo y las condiciones de contorno:



Fig. AII.11: Distribución de velocidades y solución para el caso B

En principio, no puede asegurarse que se alcance el mayor rendimiento para un ángulo de velocidad de entrada igual a la orientación de los álabes del difusor. La siguiente tabla recoge los valores alcanzados en las simulaciones para cada uno de los ángulos.

α ₀ (°)	c₀ (m/s)	p₀ (Pa)	p₃ (Pa)	η
15	12.344	101266.94	101325	0.622
16	11.591	101273.27	101325	0.629
17	10.928	101279.13	101325	0.627
18	10.339	101284.60	101325	0.617
19	9.813	101289.68	101325	0.599
20	9.341	101294.39	101325	0.573
21	8.915	101298.70	101325	0.540

Tabla AII.3: Resultados de las simulaciones para el caso C

El valor de rendimiento máximo obtenido se corresponde a un ángulo próximo a 16°, siendo este par de valores prácticamente igual al obtenido según la teoría unidimensional, $\alpha_0 = 15,528^\circ$ (para el cual se obtenía un valor de rendimiento $\eta = 0,6265$) y al del caso de malla deslizante, $\overline{\alpha_0} = 15,4^\circ$ ($\eta = 0,6259$).

En la figura AII.12 se aprecia la evolución del rendimiento para el rango de ángulos simulados, mientras que la figura AII.13 compara los valores de rendimiento obtenidos por todos los métodos usados: simulación de la geometría completa usando el modelo de malla deslizante, valor medio para dichas simulaciones y los casos A, B y C.



Fig. AII.12: Rendimiento en función del ángulo de la velocidad a la entrada. Caso C



Fig. AII.13: Comparación de los rendimientos obtenidos por todas las vías

4 Conclusiones

A la vista de los resultados mostrados en la figura AII.13, se llega a la conclusión de que simulando el difusor con perfiles de velocidad uniforme a la entrada, los rendimientos quedan muy próximos al valor medio cuando se simula la interacción rótor-difusor. El rendimiento máximo se obtiene para un ángulo próximo a 16° (aproximadamente 16,5° interpolando), ligeramente mayor al valor al que se llega por medio de la teoría unidimensional, siendo ambos valores, no obstante, muy parecidos.

Si los resultados son extrapolables al caso tridimensional, puede esperarse que simulando el difusor aisladamente y usando condiciones de contorno de velocidad uniforme definidas en la forma que ha sido expuesta en este anexo, el rendimiento máximo alcanzado esté muy próximo al rendimiento que se obtendría simulando la interacción del rótor con el difusor.