

4.3.2.4.- ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez hemos examinado la validez de los resultados en el apartado anterior, vamos a aplicar ahora la misma metodología para resolver diversos casos.

Se resolverán casos tanto de compresores como de turbina, y aplicados tanto a escalonamientos aislados como escalonamientos múltiples. Aplicaremos además las diferentes leyes torsionales para ver su efecto sobre los resultados.

Hay que indicar que la ley torsional aplicada se considera la misma para todos los escalonamientos (en el caso de resolución de escalonamientos múltiples).

Las variables que se introducen en los diferentes casos para la resolución de los mismos son:

- radios de raíz y de cabeza a la entrada
- densidad de entrada
- velocidad axial de entrada
- número de etapas de que consta el escalonamiento
- temperatura de entrada
- ancho de los álabes (cuando se resuelve mediante el disco actuador es necesario indicar la distancia entre el plano del “disco” y los planos de entrada y salida, es decir, indicar el ancho de los álabes)
- velocidad de giro
- relación calores específicos
- constante R
- trabajo de cada escalonamiento
- velocidad tangencial a la salida del estator
- rendimiento total a total

Una vez resuelto, los resultados que obtendremos de los distintos casos serán:

- velocidad de entrada – velocidad de salida
- ángulos en rotor y estator
- coeficientes (grado de reacción, coeficiente de carga y coeficiente de flujo)
- número de Mach

Hay que indicar que en el caso de que alguna de las variables de entrada dependa del radio (como ocurrirá generalmente con el trabajo del escalonamiento y la velocidad tangencial), en vez de dar la distribución radial completa se dará el valor de las mismas en tres radios, que serán el radio de raíz, el radio medio y el radio de cabeza.

Empezaremos resolviendo escalonamientos de turbina, tanto simples como múltiples.

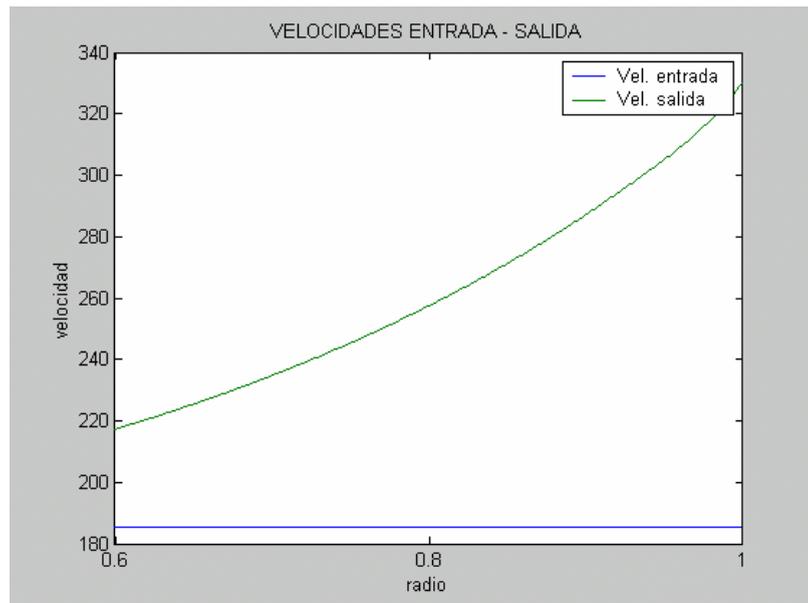
- Turbina

- Escalonamiento simple. Ley torbellino fijo

Datos de diseño de entrada:

Radio raíz entrada = 0.6 m	Densidad entrada = $0.428 \text{ kg} / \text{m}^3$
Radio cabeza entrada = 1.0 m	Veloc. entrada = 185 m/seg
Número de etapas = 1	Temperatura entrada = 1300 K
Álabes (d. plano) = 0.025 m	Velocidad rotación = 400.0 seg^{-1}
$C_p/C_v = 1.40$	$R = 287.0 \text{ J/kg K}$
Wescal = (72000, 128000, 200000) J/kg	ct2E = (240, 320, 400) m/seg
Rendimiento total a total = 92.0 %	

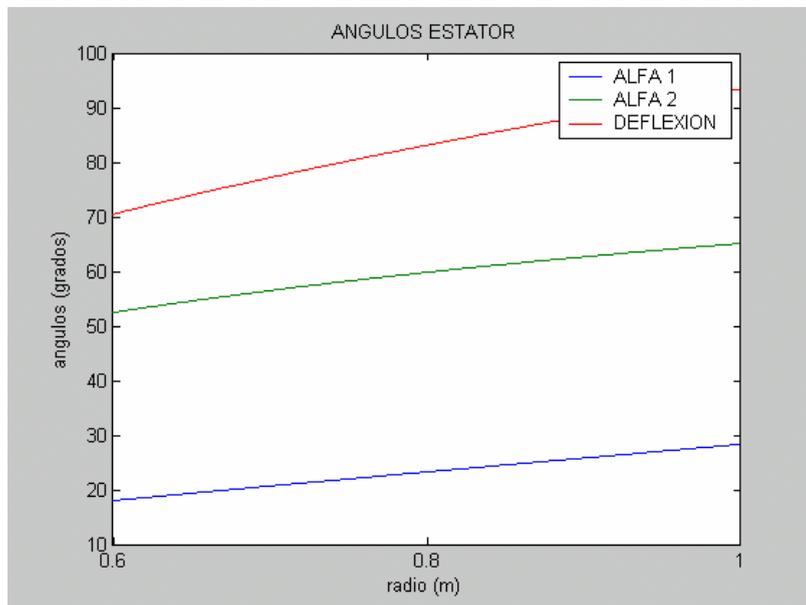
La ley torsional viene reflejada por la expresión $c_q = k * r$.



(Figura 4.1.A)

En la resolución del flujo meridional compresible nos encontraremos que, debido a los cambios de densidad, las velocidades experimentan también un salto entre la entrada y la salida.

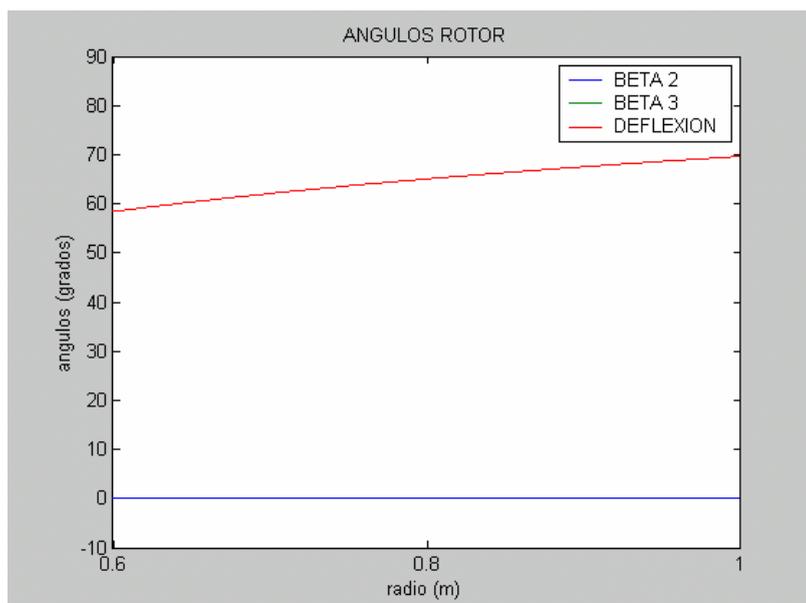
Si nos fijamos en la grafica anterior vemos que se produce un aumento de la velocidad axial a la salida (como era de esperar en turbinas). La magnitud del salto dependerá de diversos factores y no es el hecho que nos interesa aquí. Sin embargo, si es interesante ver como, la velocidad a la salida no es constante, produciéndose una gran variación con el radio. Recordamos, que en el problema incompresible resuelto con esta ley ocurría este mismo fenómeno.



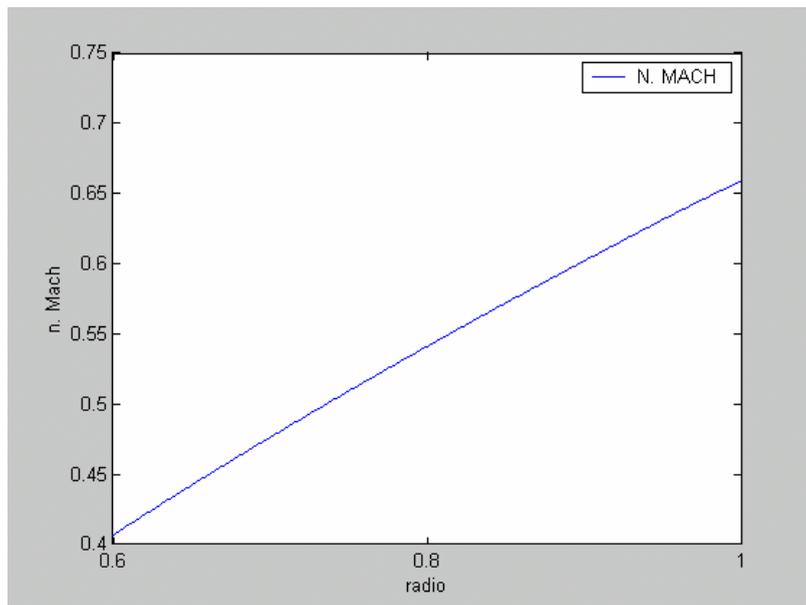
(Figura 4.1.B)

En este caso concreto, vemos como la variación de los ángulos con el radio en el estator es apreciable, alcanzándose valores en la deflexión elevados.

Por el contrario, en el rotor, la variación con el radio es más moderada alcanzándose además valores mas pequeños de deflexión.



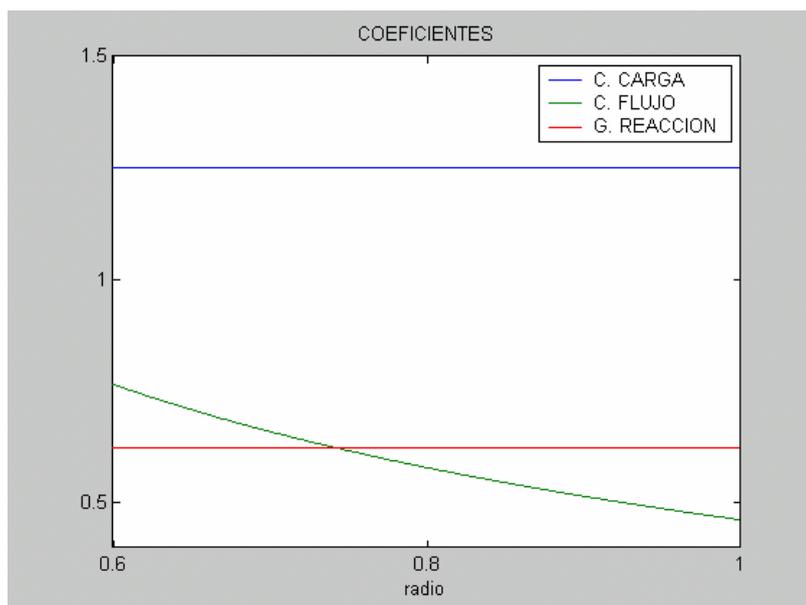
(Figura 4.1.C)



(Figura 4.1.D)

Si nos fijamos en el número de Mach, vemos que este sufre una gran variación con el radio, aumentando desde los radios de raíz a los radios de cabeza.

En la gráfica de los coeficientes, podemos observar un hecho destacable. Se observa que con esta ley, el grado de reacción y el coeficiente de carga se mantienen constantes al igual que ocurría en el caso incompresible.



(Figura 4.1.E)

Siguiendo con escalonamientos simples, vamos a ver ahora los resultados obtenidos después de aplicar la ley torsional velocidad tangencial constante.

- Escalonamiento simple. Ley velocidad tangencial constante

Datos de diseño de entrada:

Radio raíz entrada = 0.4 m

Densidad entrada = 0.8 kg/m^3

Radio cabeza entrada = 0.8 m

Veloc. entrada = 160 m/seg

Número de etapas = 1

Tra entrada = 1100 K

Álabes (d. plano) = 0.025 m

Velocidad rotación = 220.0 seg^{-1}

$C_p/C_v = 1.40$

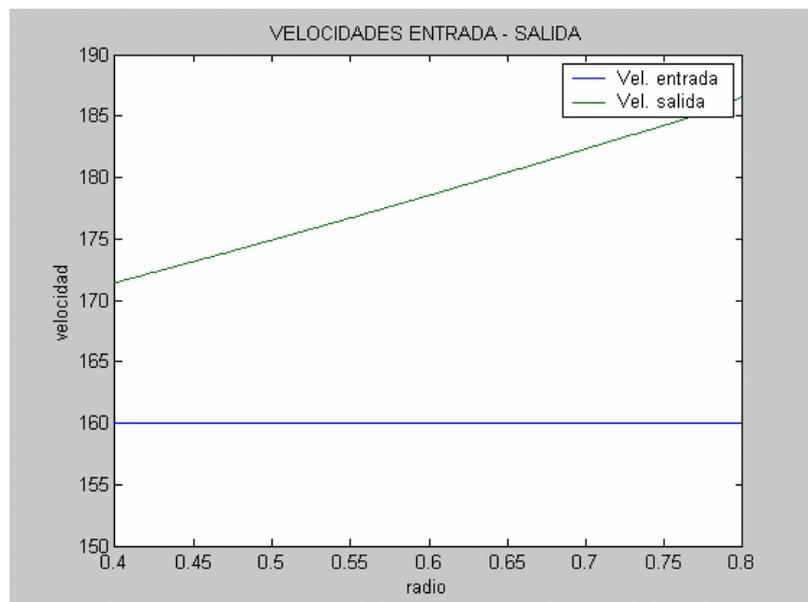
$R = 287.0 \text{ J/kg K}$

Wescal = (26400, 39600, 52800) J/kg

ct2E = (250, 250, 250) m/seg

Rendimiento total a total = 92.0 %

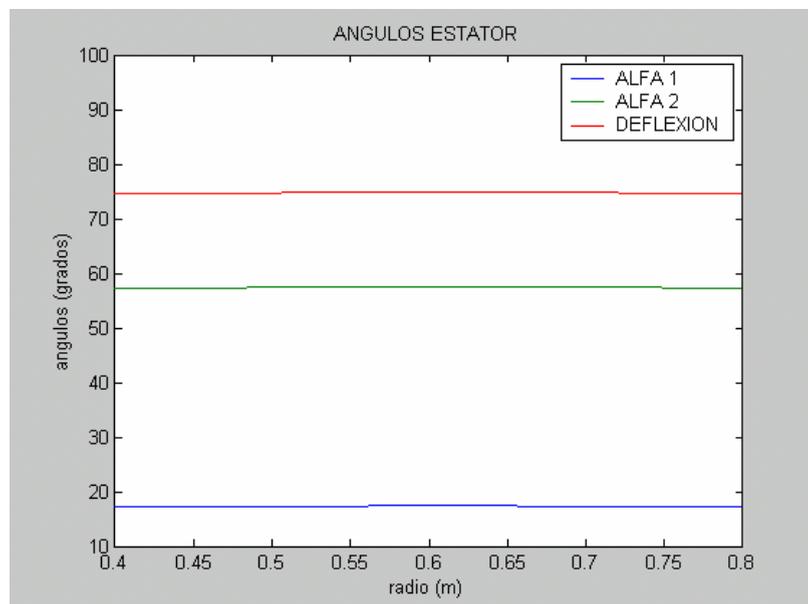
Con esta ley tenemos $c_q = k$.



(Figura 4.2.A)

Si nos fijamos ahora en el perfil de salida de la velocidad axial, vemos que también sufre una variación notable con el radio, aunque en menor medida que en el caso anterior. Podemos recordar, como esto también resultaba en la resolución de flujos incompresibles.

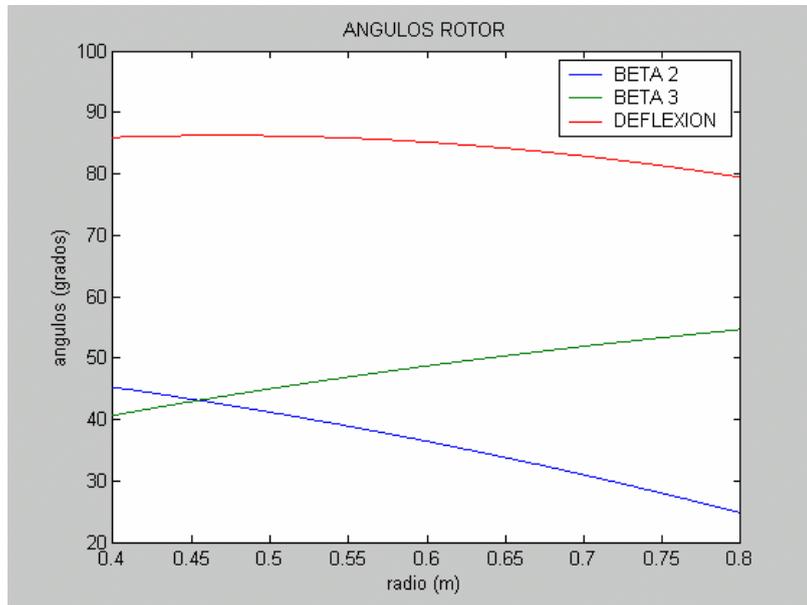
Al igual que este hecho, nos encontraremos muchas similitudes entre ambos tipos de problemas.



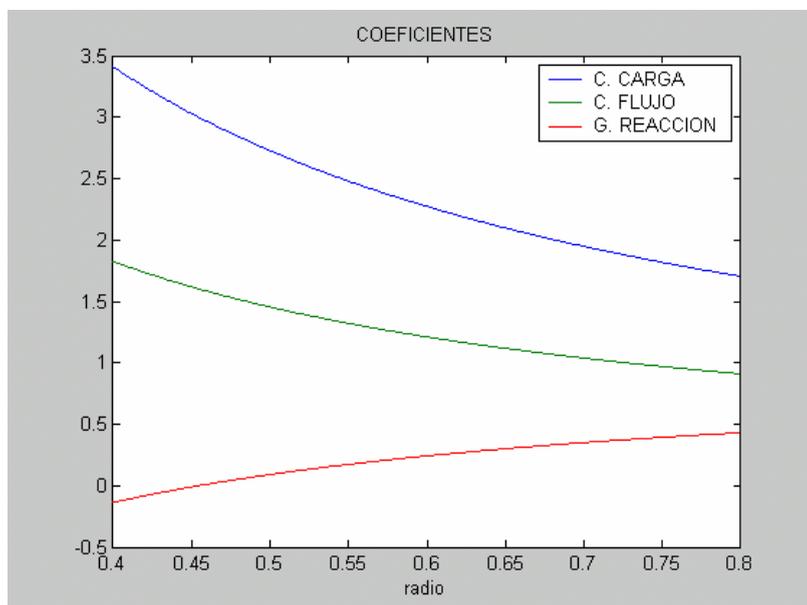
(Figura 4.2.B)

Podemos corroborar, como esta ley mantenía prácticamente constante los ángulos del estator con el radio.

Además, la deflexión en este caso, adopta un perfil muy poco variable con el radio, aunque no así los ángulos de entrada y salida.

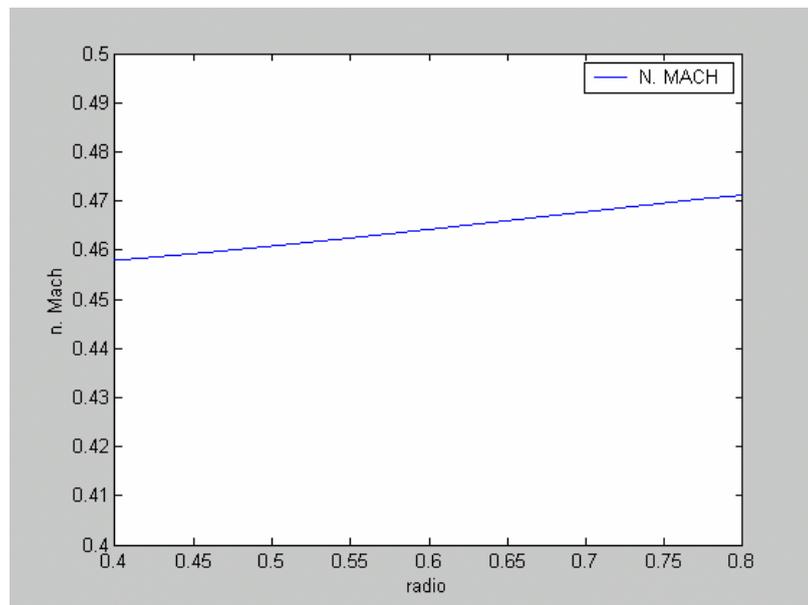


(Figura 4.2.C)



(Figura 4.2.D)

Si nos fijamos en la figura del número de Mach, vemos como este apenas sufre variación con el radio. Esto será una constante con esta ley, aunque no se cumplirá en las demás.



(Figura 4.2.E)

Aplicamos ahora la ley torbellino mixto, analizando los resultados obtenidos.

- Escalonamiento simple. Ley torbellino mixto

Datos de diseño de entrada:

Radio raíz entrada = 0.4 m

Densidad entrada = 0.675 kg/m^3

Radio cabeza entrada = 1.0 m

Veloc. entrada = 100 m/seg

Número de etapas = 1

Tra entrada = 1000 K

Álabes (d. plano) = 0.025 m

Velocidad rotación = 150.0 seg^{-1}

$C_p/C_v = 1.40$

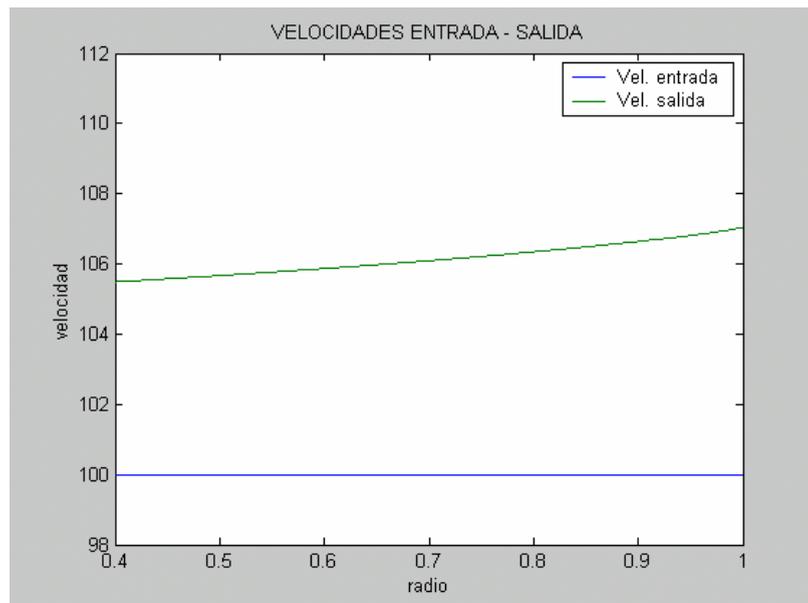
$R = 287.0 \text{ J/kg K}$

Wescal = (18720, 20424, 23072) J/Kg

ct2E = (216, 157.2, 133.2) m/seg

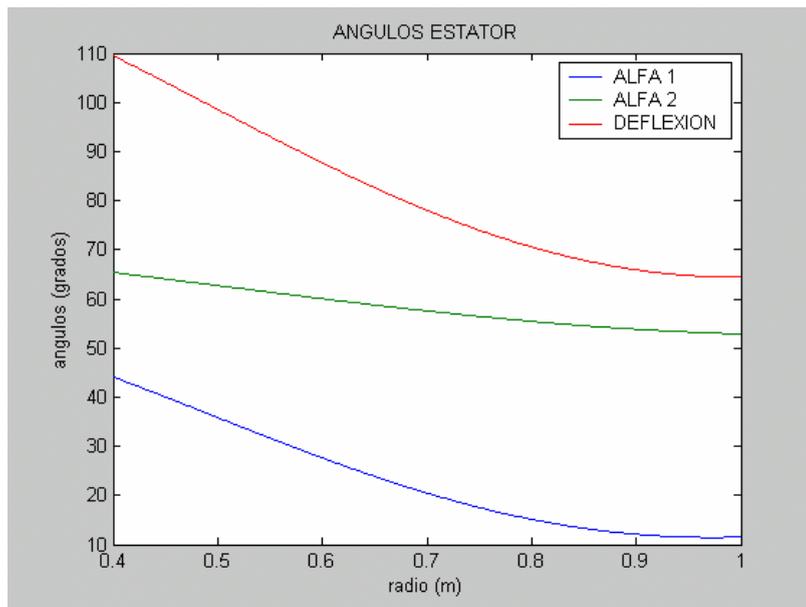
Rendimiento total a total = 92.0 %

Con esta ley torsional la relación entre el radio y la velocidad tangencial viene dada por la expresión $c_q = a * r + b / r$.



(Figura 4.3.A)

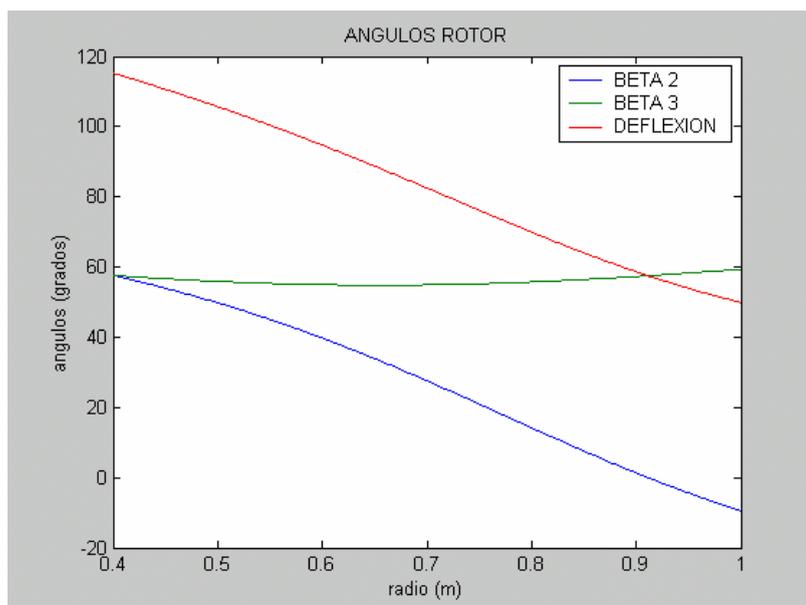
Observando los resultados obtenidos para la velocidad comprobamos como el perfil sufre sólo una pequeña variación con el radio. Si recordamos, esta ley se puede considerar como una “mezcla” de las leyes torbellino libre y solid body. Viendo por tanto el perfil de salida de la velocidad axial, podemos comprobar que este caso concreto tiende más al torbellino libre, cuya ley mantenía prácticamente constante el perfil de velocidad con el radio. Este último hecho, lo comprobaremos posteriormente.



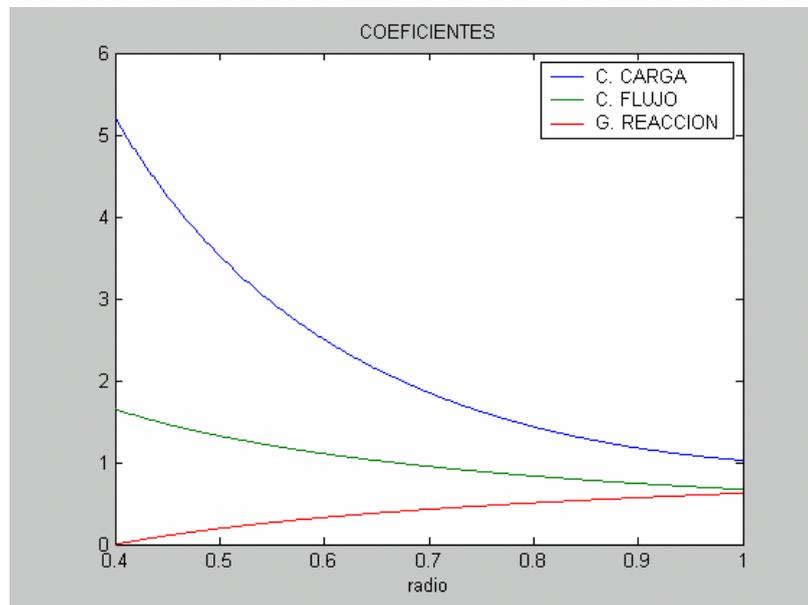
(Figura 4.3.B)

Fijándonos en los ángulos de entrada y salida del estator, vemos que éstos son muy variables, provocando por lo tanto variaciones apreciables de la deflexión.

En el rotor, a pesar de la poca variación del ángulo de salida con el radio, la gran variación que sufre el ángulo relativo a la entrada provoca una deflexión muy variable y con valores elevados sobre todo en la zona del radio de raíz.

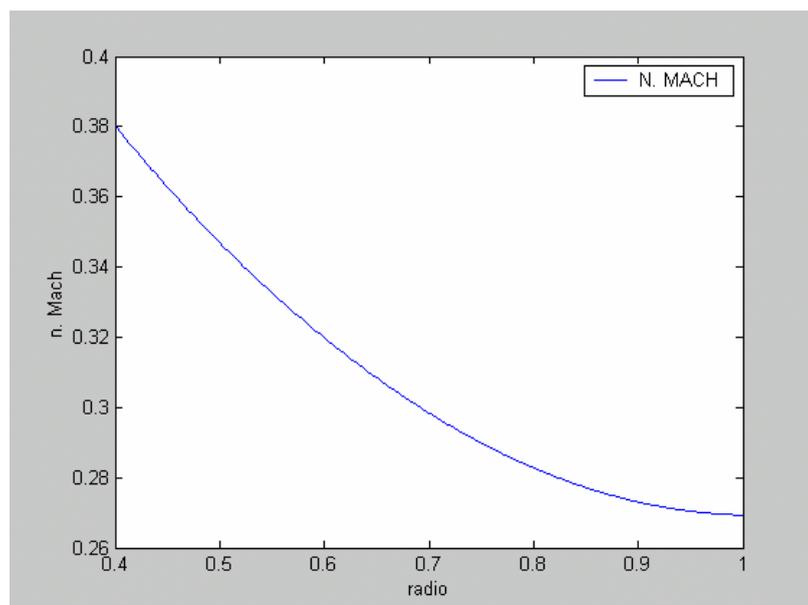


(Figura 4.3.C)



(Figura 4.3.D)

Como comentamos anteriormente, en este caso concreto, la ley torbellino mixto usada tendría de forma apreciable a la ley torbellino libre. Esto provocará que los coeficientes varíen notablemente con el radio, como ocurre cuando se aplica la ley torsional del torbellino libre.



(Figura 4.3.E)

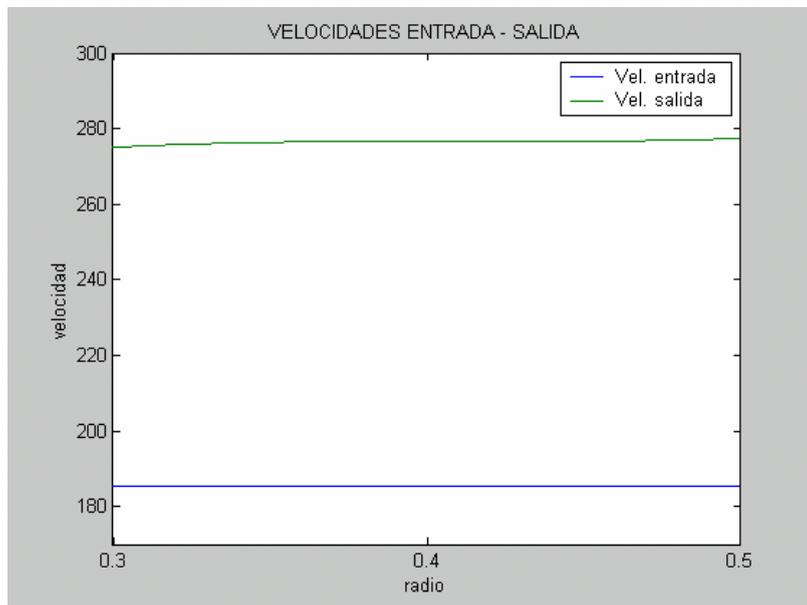
A diferencia de casos anteriores, vemos que el número de Mach varía ahora de forma inversa, alcanzando su valor máximo en el radio de raíz, al contrario de como ocurría anteriormente.

- Escalonamiento simple. Ley torbellino libre

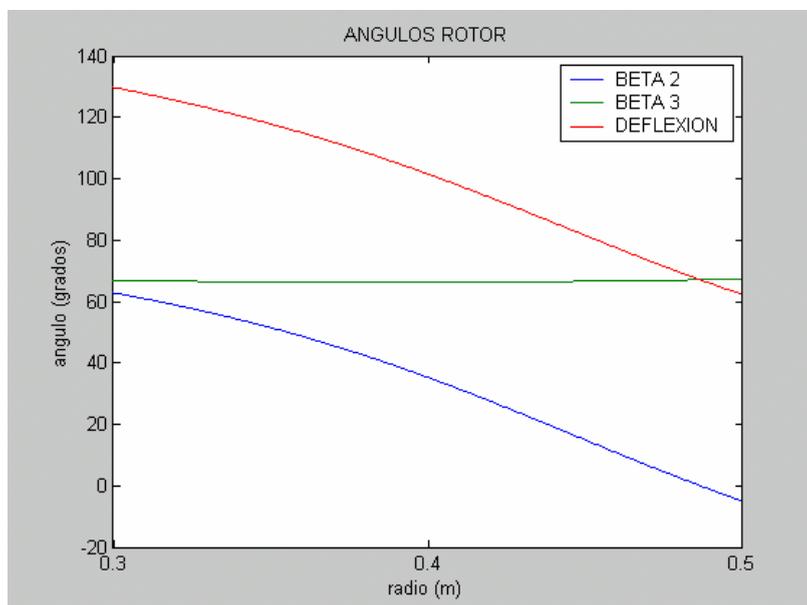
Datos de diseño de entrada:

Radio raíz entrada = 0.3 m	Densidad entrada = 0.4288 kg/m^3
Radio cabeza entrada = 0.5 m	Veloc. entrada = 185.56 m/seg
Número de etapas = 1	Temperatura entrada = 1300 K
Álabes (d. plano) = 0.025 m	Velocidad rotación = 680.0 seg^{-1}
$C_p/C_v = 1.40$	$R = 287.0 \text{ J/kg K}$
Wescal = (150942, 150942, 150942) J/kg	ct2E = (539, 404, 323.5) m/seg
Rendimiento total a total = 92.0 %	

Examinando la ley torbellino libre, se comprueba como la velocidad axial a la salida sufre pequeñas variaciones con el radio, resultado que también se había obtenido al resolver el flujo incompresible.

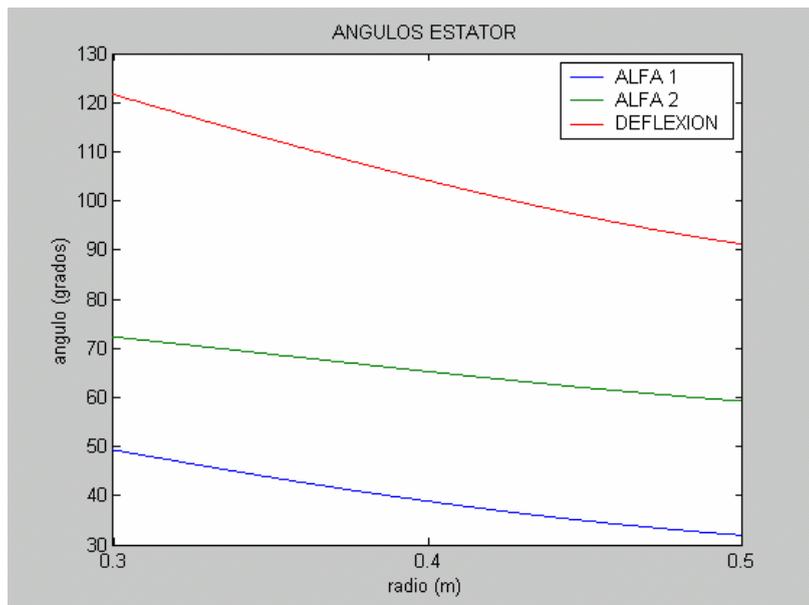


(Figura 4.4.A)

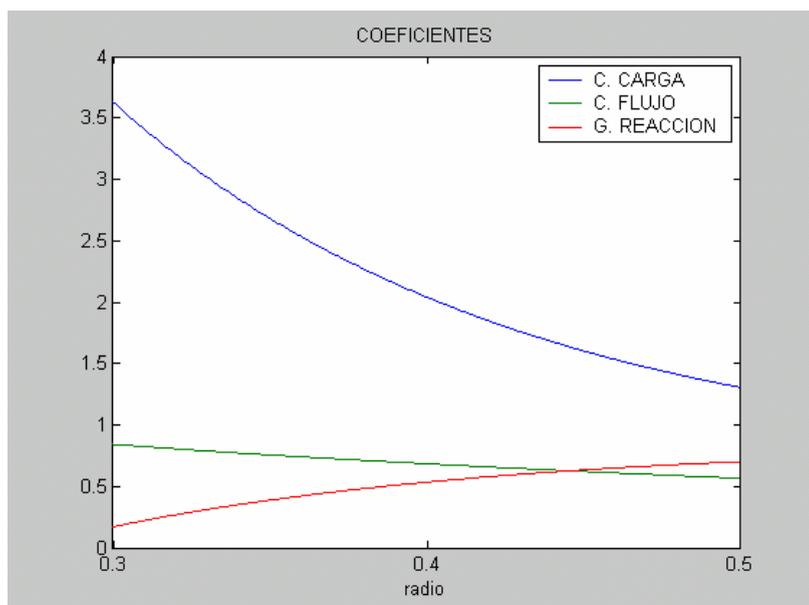


(Figura 4.4.B)

Vemos, como una constante con esta ley, una variación importante de la deflexión con el radio tanto en rotor como estator. Además se alcanzan en la zona de raíz valores muy elevados.

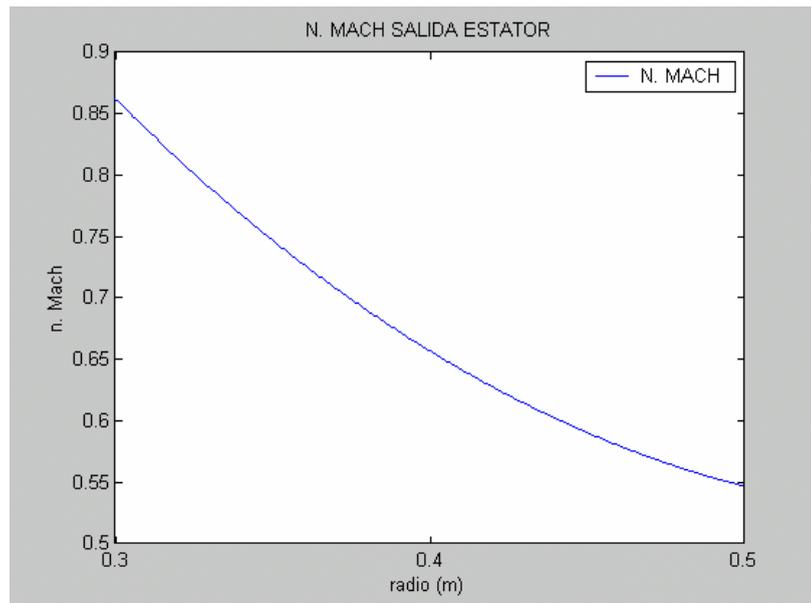


(Figura 4.4.C)



(Figura 4.4.D)

Se observa que con esta ley, la tendencia del número de Mach es también el alcanzar su máximo en los radios de raíz. Esto se producía también en el caso anterior, con la ley torbellino mixto, lo cual es otro factor para considerar que aquel caso tendía más al torbellino libre que al torbellino fijo.



(Figura 4.4.E)

Una vez que hemos examinados distintos casos de escalonamientos aislados con distintas leyes, vamos a analizar ahora escalonamientos múltiples. Más concretamente, se resolverán casos con dos y tres escalonamientos. Como comentamos anteriormente, se toman las mismas leyes torsionales para todos los escalonamientos.

Examinaremos de nuevo las distintas leyes torsionales y podremos ver como los resultados siguen en la línea de los mostrados anteriormente.

- Escalonamiento múltiple. Ley torbellino mixto

Datos de diseño de entrada:

Radio raíz entrada = 0.4 m

Densidad entrada = 0.375 kg/m^3

Radio cabeza entrada = 0.8 m

Veloc. entrada = 200 m/seg

Número de etapas = 2

Temperatura entrada = 1300 K

Álabes (d. plano) = 0.025 m

Velocidad rotación = 200.0 seg^{-1}

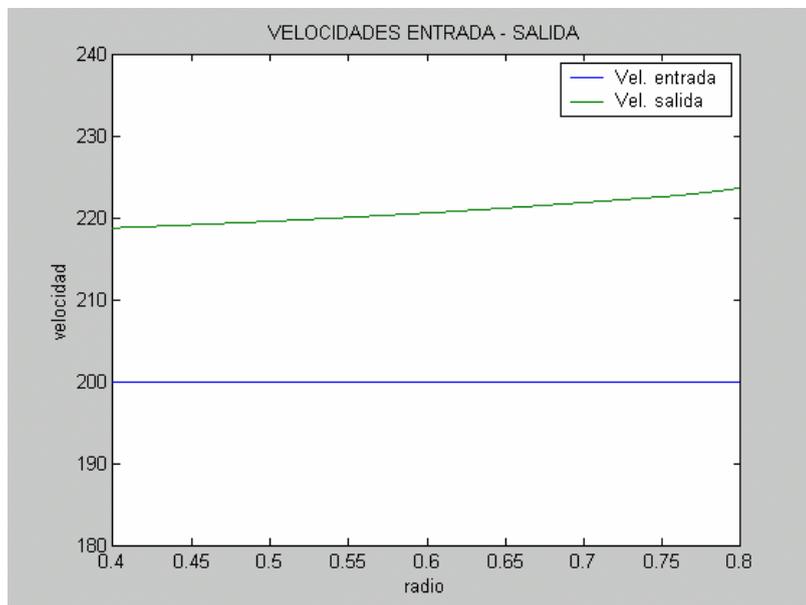
$C_p/C_v = 1.40$

$R = 287.0 \text{ J/kg K}$

Wescal = (18720, 20424, 23072) J/Kg

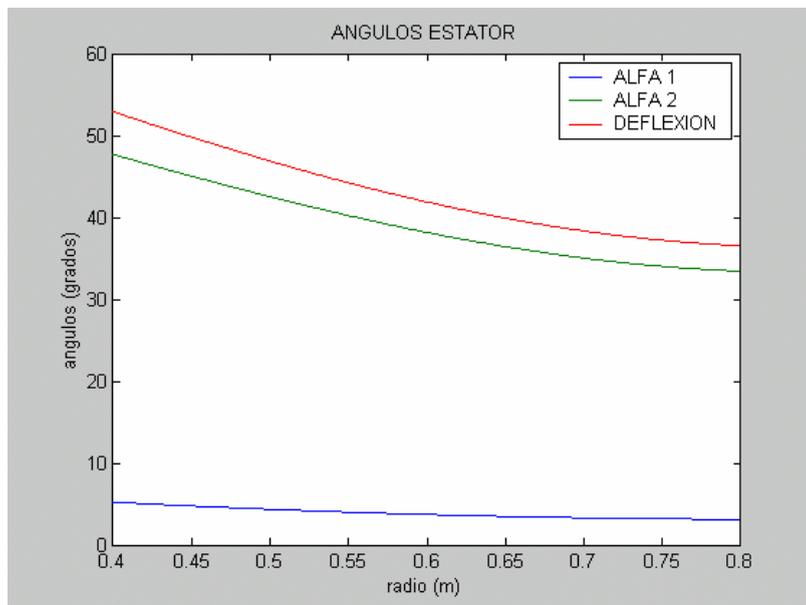
ct2E= (216, 157.2, 133.2) m/seg

Rendimiento total a total = 92.0 %



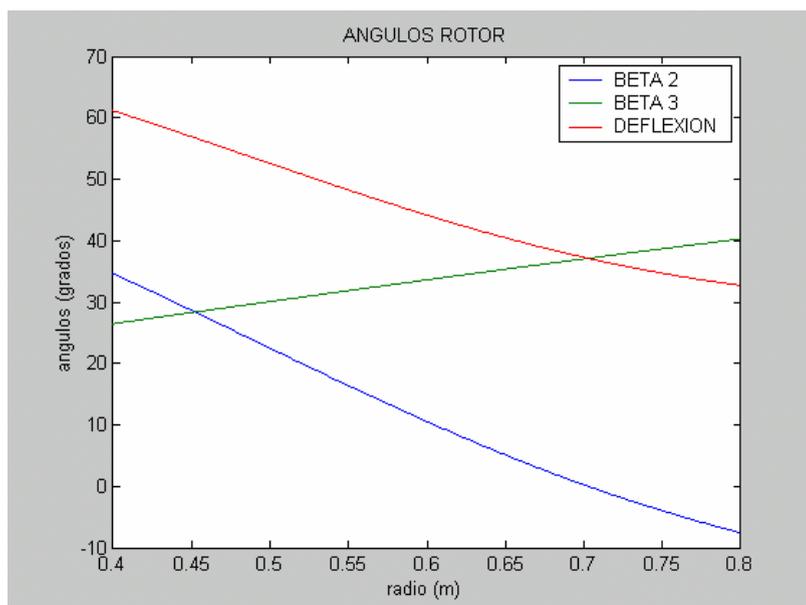
(Figura 4.5.A)

De nuevo nos encontramos con un cambio moderado del perfil de la velocidad con esta ley. Independientemente del salto sufrido, la tendencia es a encontrar los valores máximos en los radios de cabeza.

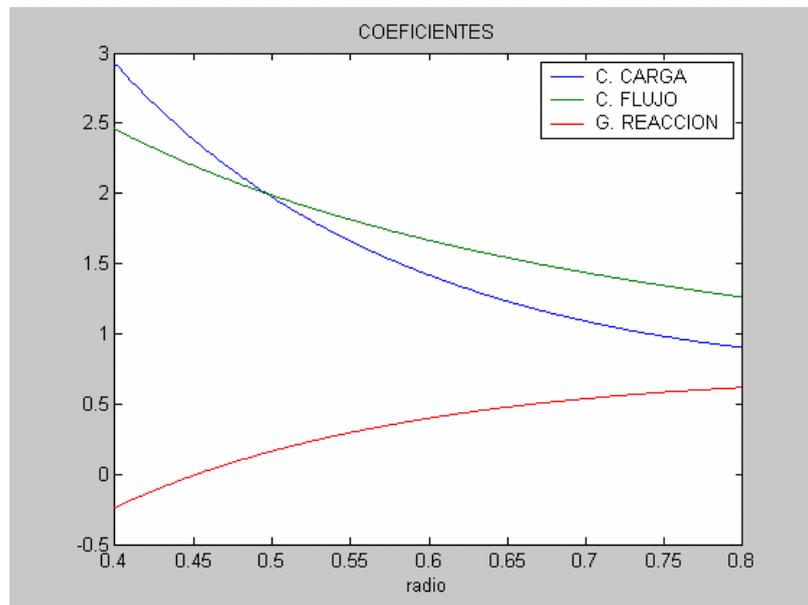


(Figura 4.5.B)

Para este escalonamiento múltiple los valores de la deflexión son menores y menos variables.

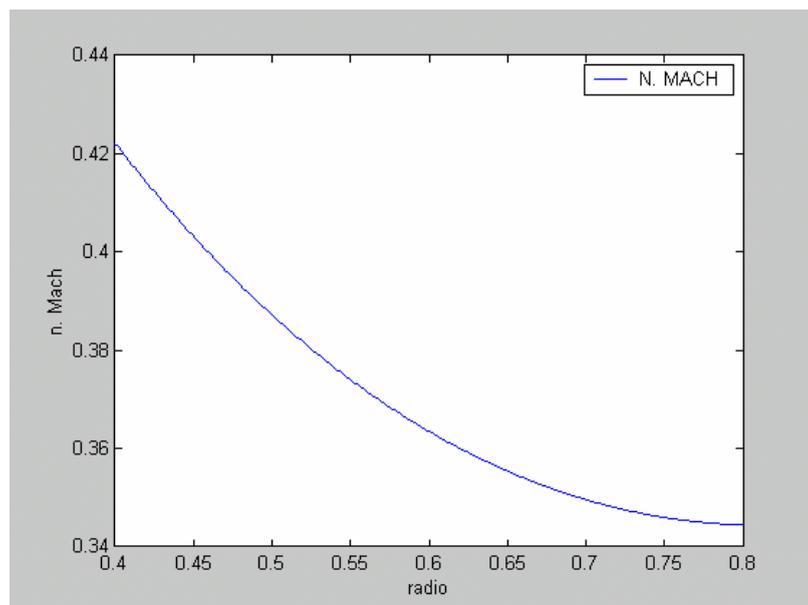


(Figura 4.5.C)



(Figura 4.5.D)

La tendencia del número de Mach también se confirma, alcanzando su máximo en el radio de raíz. También se puede apreciar, no obstante, que la variación que sufre con el radio no es muy elevada., y nos encontramos por lo tanto muy por debajo de alcanzar condiciones críticas.



(Figura 4.5.E)

- Escalonamiento múltiple. Ley torbellino fijo

Datos de diseño de entrada:

Radio raíz entrada = 0.4 m

Densidad entrada = 0.875 kg/m^3

Radio cabeza entrada = 0.8 m

Veloc. entrada = 200 m/seg

Número de etapas = 2

Temperatura entrada = 1300 K

Álabes (d. plano) = 0.025 m

Velocidad rotación = 200.0 seg^{-1}

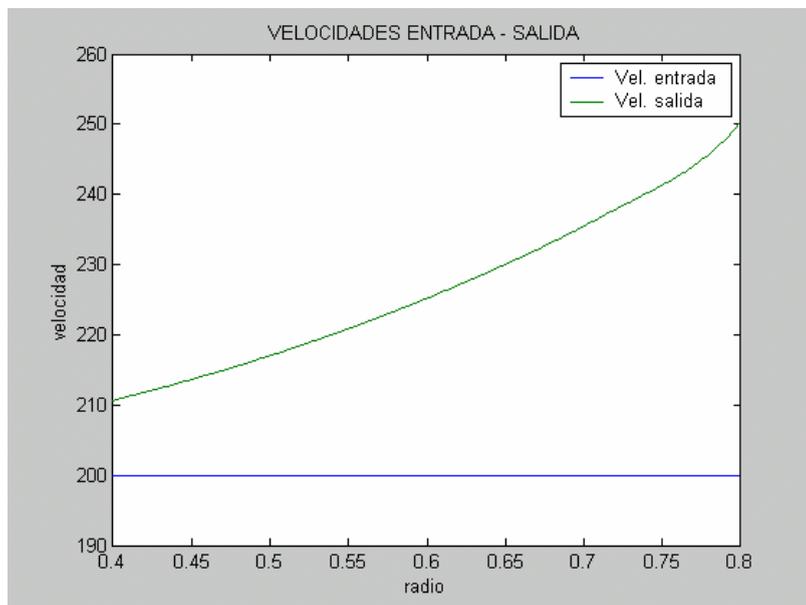
Cp/Cv = 1.40

R = 287.0 J/kg K

Wescal = (11200, 25200, 44800) J/Kg

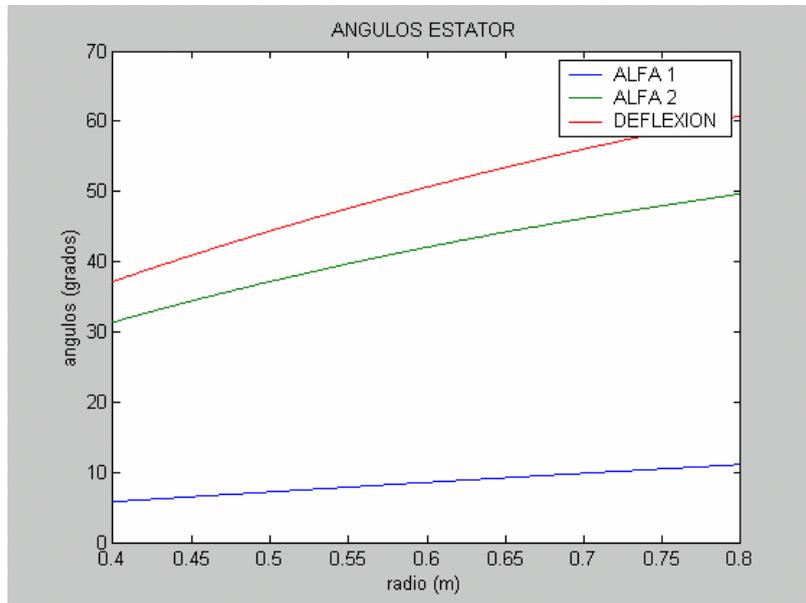
ct2E= (120, 180, 240) m/seg

Rendimiento total a total = 92.0 %

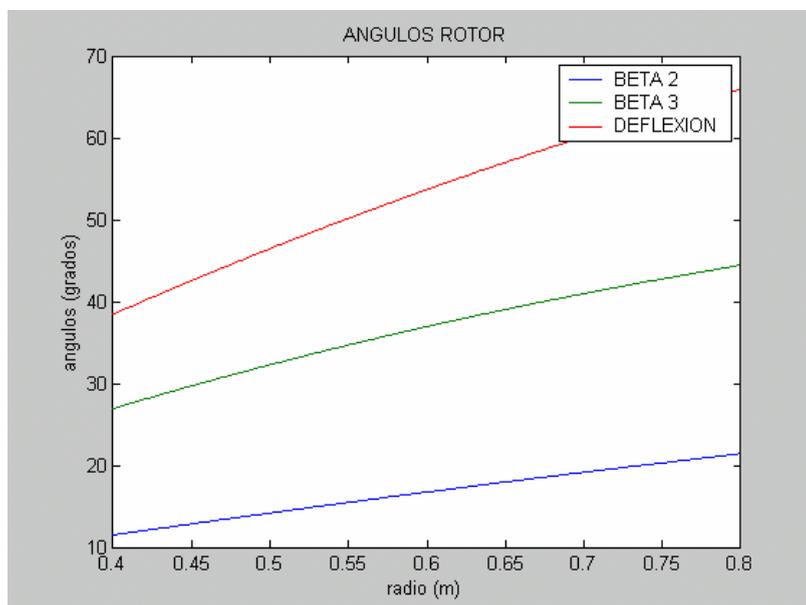


(Figura 4.6.A)

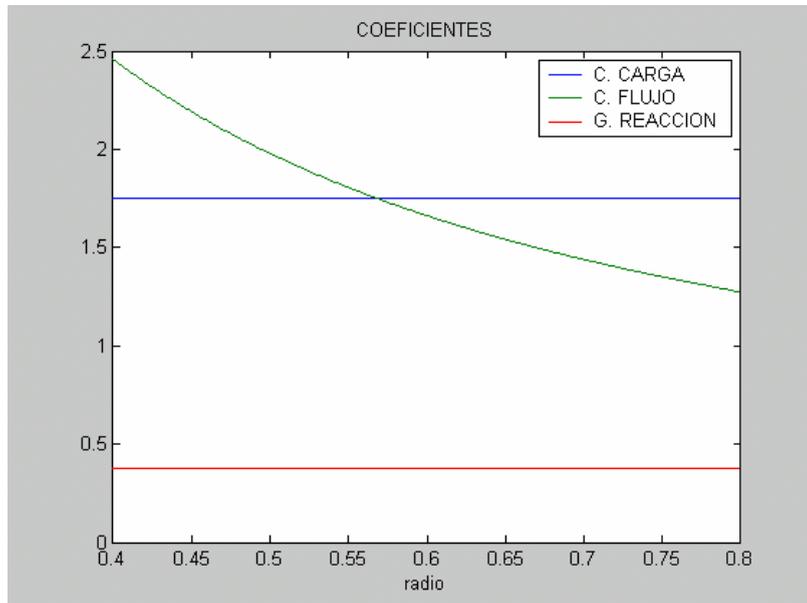
Esta ley, volvemos a comprobar, es la que produce unas mayores variaciones del perfil de la velocidad. Nos encontramos por tanto con unas elevadas diferencias de velocidad entre los radios superiores e inferiores, no siendo un factor interesante, ya que siempre se intenta mantener la velocidad axial lo mas constante posible.



(Figura 4.6.B)

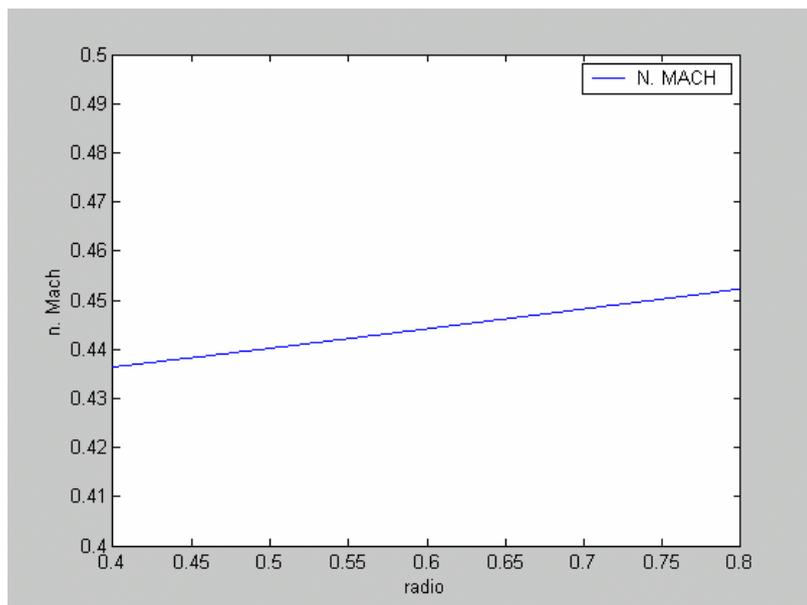


(Figura 4.6.C)



(Figura 4.6.D)

En esta última gráfica, de nuevo se comprueba otra constante de esta ley, como es la constancia del grado de reacción y del coeficiente de carga. Este resultado es compartido con la solución de flujos incompresibles.



(Figura 4.6.E)

Si observamos el número de Mach, vemos que en este caso es prácticamente constante, a diferencia de cuando se resolvió un escalonamiento aislado en el cual se producía una gran variación. Por tanto, no se pueden sacar conclusiones generales para la tendencia del número de Mach.

- Escalonamiento múltiple. Ley velocidad tangencial constante

Datos de diseño de entrada:

Radio raíz entrada = 0.4 m

Densidad entrada = 0.875 kg/m^3

Radio cabeza entrada = 0.8 m

Veloc. entrada = 200 m/seg

Número de etapas = 2

Temperatura entrada = 1300 K

Álabes (d. plano) = 0.025 m

Velocidad rotación = 200.0 seg^{-1}

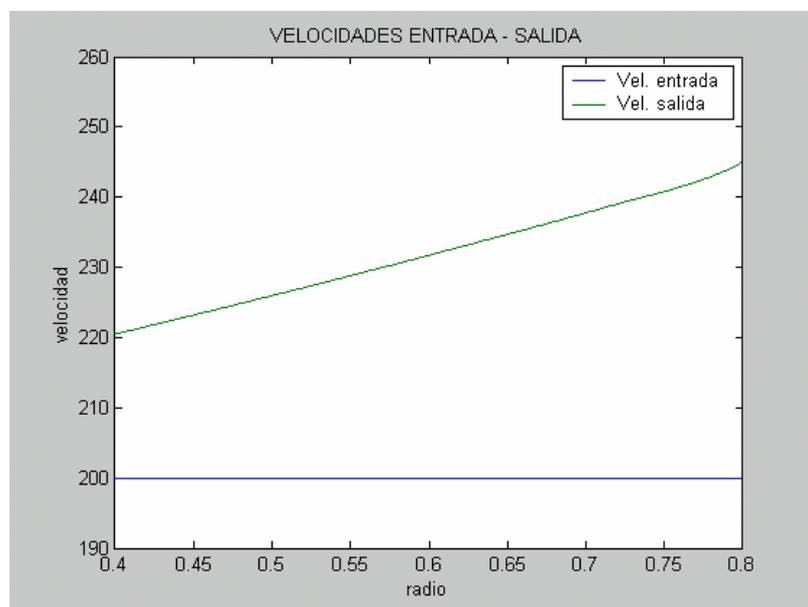
$C_p/C_v = 1.40$

$R = 287.0 \text{ J/kg K}$

Wescal = (20400, 30600, 40800) J/Kg

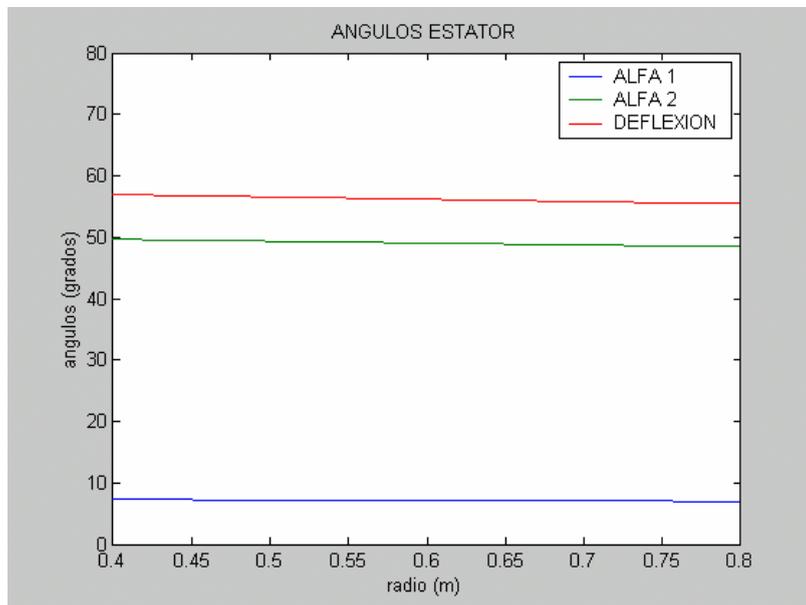
ct2E = (230, 230, 230) m/seg

Rendimiento total a total = 92.0 %



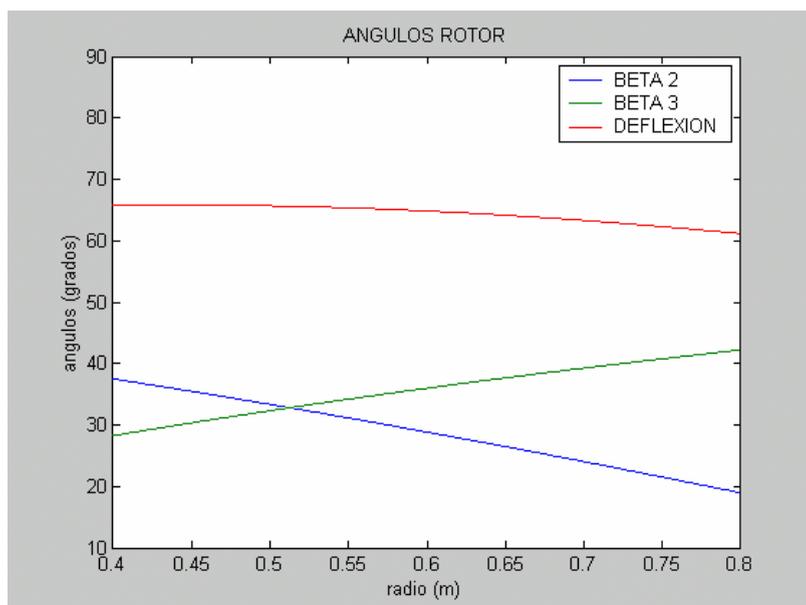
(Figura 4.7.A)

La variación moderada del perfil, la consideramos como una constante de esta ley, que se corrobora tanto en flujo compresible como incompresible.

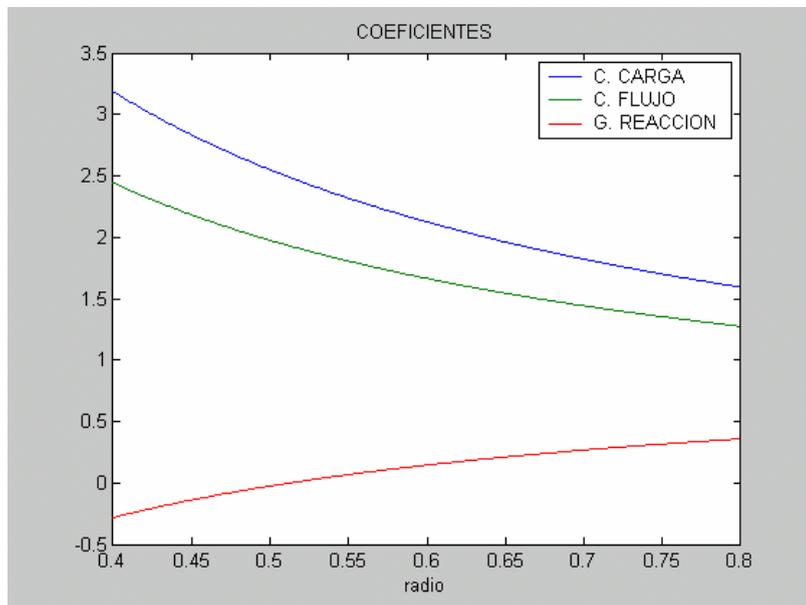


(Figura 4.7.B)

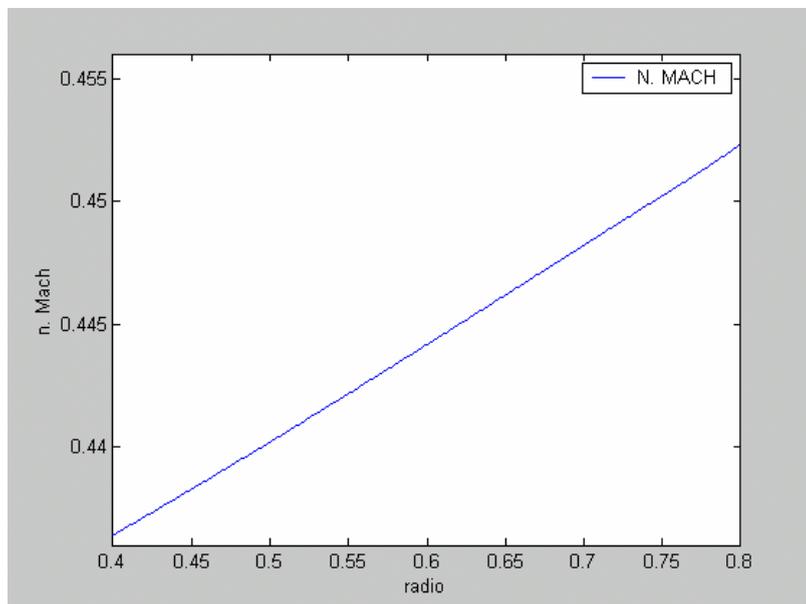
Al igual que en el caso anterior, la deflexión en rotor y estator sigue manteniéndose en valores prácticamente constantes, sufriendo el perfil pequeñas variaciones con el radio.



(Figura 4.7.C)



(Figura 4.7.D)



(Figura 4.7.E)

Sin embargo, en este caso, al igual que cuando se resolvió un escalonamiento simple, el número de Mach permanece prácticamente constante y además en valores

muy pequeños. Por tanto, para esta ley, podíamos considerarlo como una constante. Se podrá comprobar con los casos posteriores.

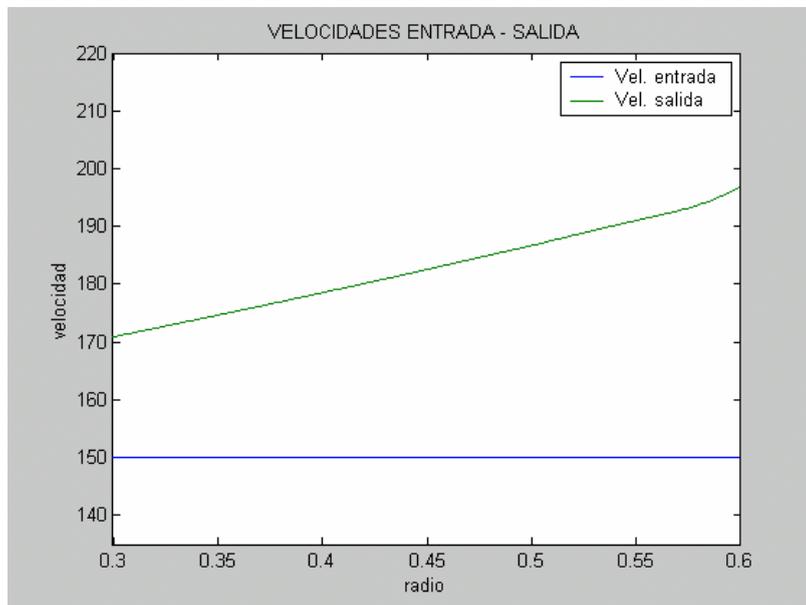
Para terminar de examinar el flujo compresible a través de turbinas y antes de analizar casos de compresores vamos a resolver por último distintos casos para escalonamientos con tres etapas. Podremos comprobar como se cumplen las afirmaciones vertidas anteriormente.

- Escalonamiento múltiple. Ley velocidad tangencial constante

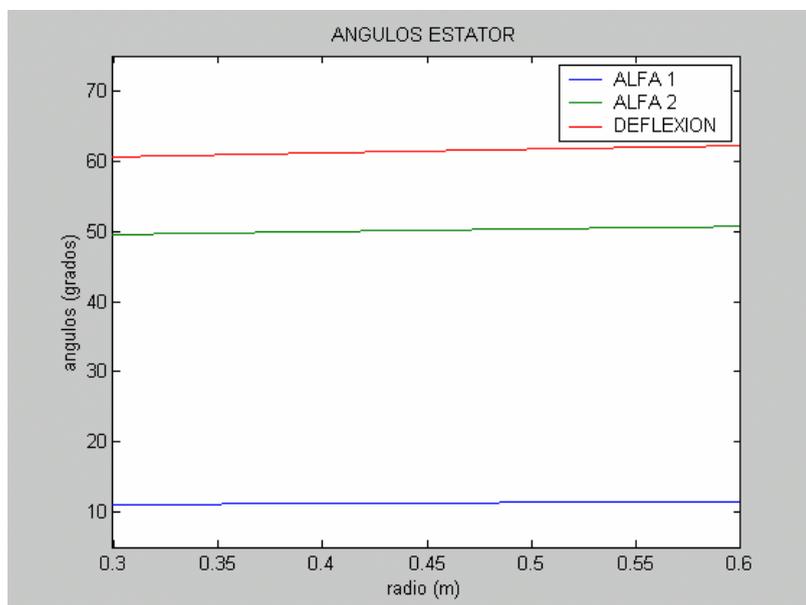
Datos de diseño de entrada:

Radio raíz entrada = 0.3 m	Densidad entrada = 0.775 kg/m^3
Radio cabeza entrada = 0.6 m	Veloc. entrada = 150 m/seg
Número de etapas = 3	Temperatura entrada = 1300 K
Álabes (d. plano) = 0.025 m	Velocidad rotación = 300.0 seg^{-1}
$C_p/C_v = 1.40$	$R = 287.0 \text{ J/kg K}$
Wescal = (18900, 28350, 37800) J/Kg	ct2E= (180, 180, 180) m/seg
Rendimiento total a total = 92.0 %	

En este caso nos encontramos con la ley $c_q = k$.



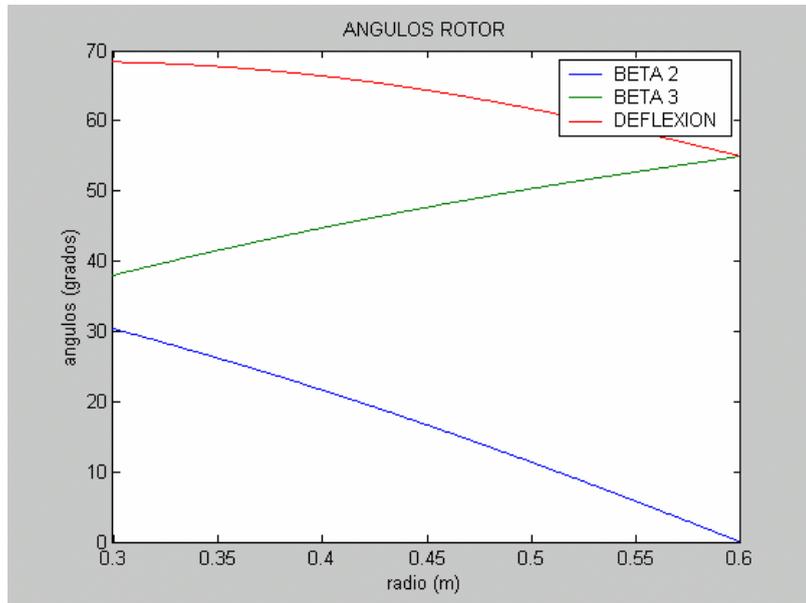
(Figura 4.8.A)



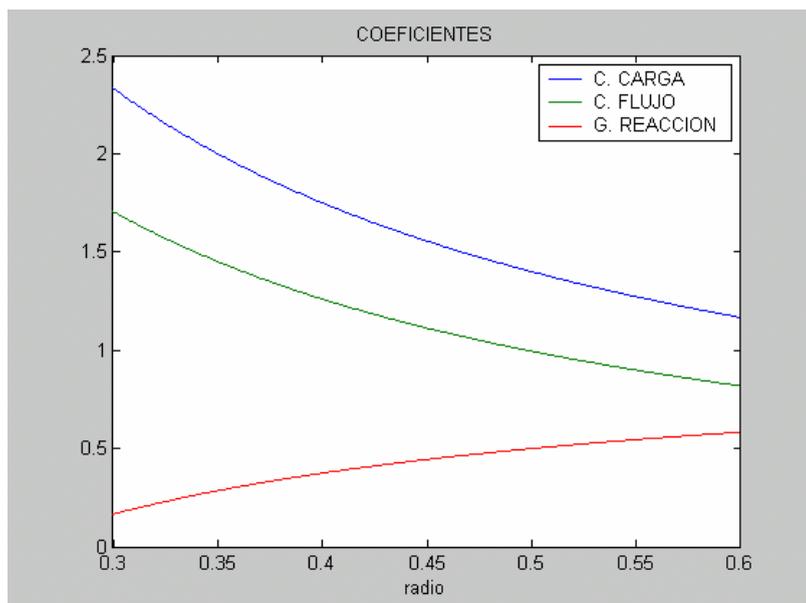
(Figura 4.8.B)

Si comparamos los ángulos obtenidos, con los resultados obtenidos para el caso de dos escalonamientos (figuras 4.7.B y 4.7.C) comprobamos como se

confirma que en el estator, las variaciones sufridas por los ángulos son mínimas y por tanto la variación de la deflexión con el radio también es pequeña.

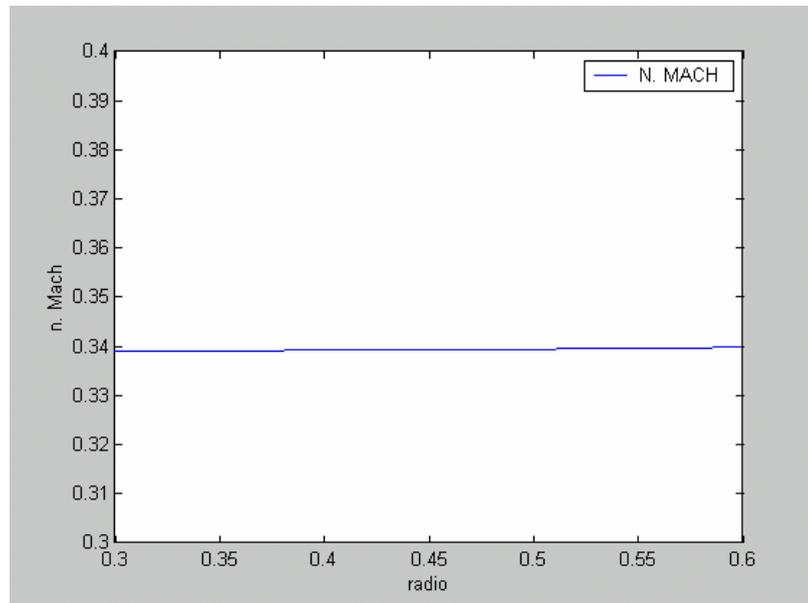


(Figura 4.8.C)



(Figura 4.8.D)

Nuevamente se confirma que el número de Mach varía muy poco con el radio, como ocurría también en los casos anteriores resueltos con esta ley (figura 4.7.E).



(Figura 4.8.E)

- Escalonamiento múltiple. Ley torbellino fijo

Datos de diseño de entrada:

Radio raíz entrada = 0.6 m

Densidad entrada = $0.8 \text{ kg} / \text{m}^3$

Radio cabeza entrada = 1.0 m

Veloc. entrada = 180 m/seg

Número de etapas = 3

Temperatura entrada = 1300 K

Álabes (d. plano) = 0.025 m

Velocidad rotación = 250.0 seg^{-1}

$C_p/C_v = 1.40$

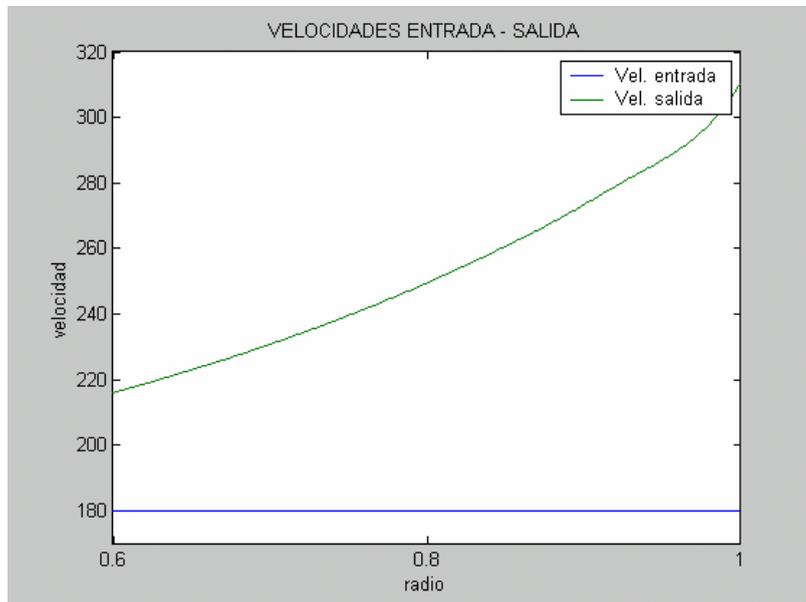
$R = 287.0 \text{ J/kg K}$

Wescal = (25200, 44800, 70000) J/Kg

ct2E = (108, 144, 180) m/seg

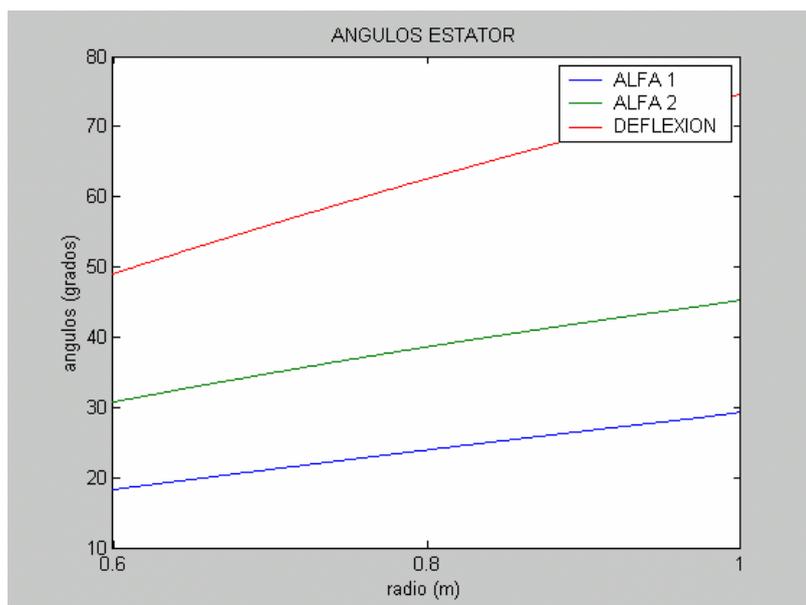
Rendimiento total a total = 92.0 %

La ley torbellino fijo viene caracterizada por $c_q = k * r$.

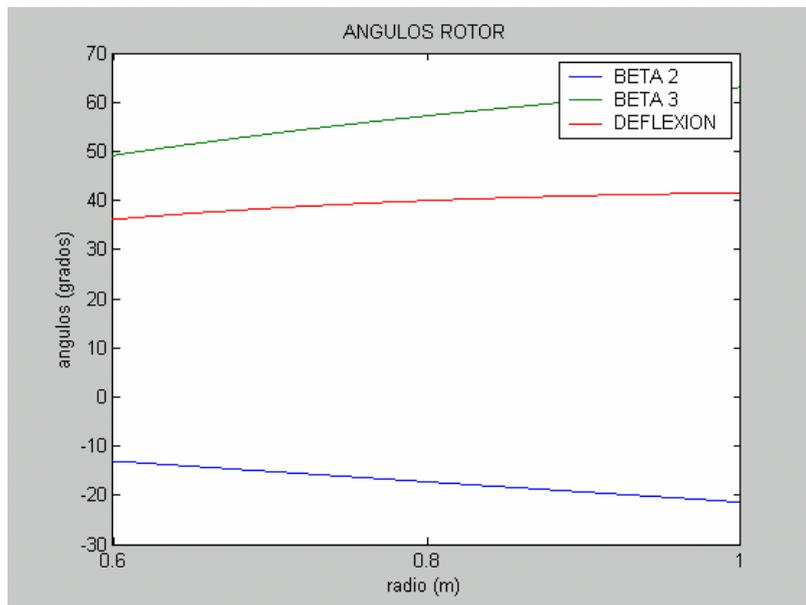


(Figura 4.9.A)

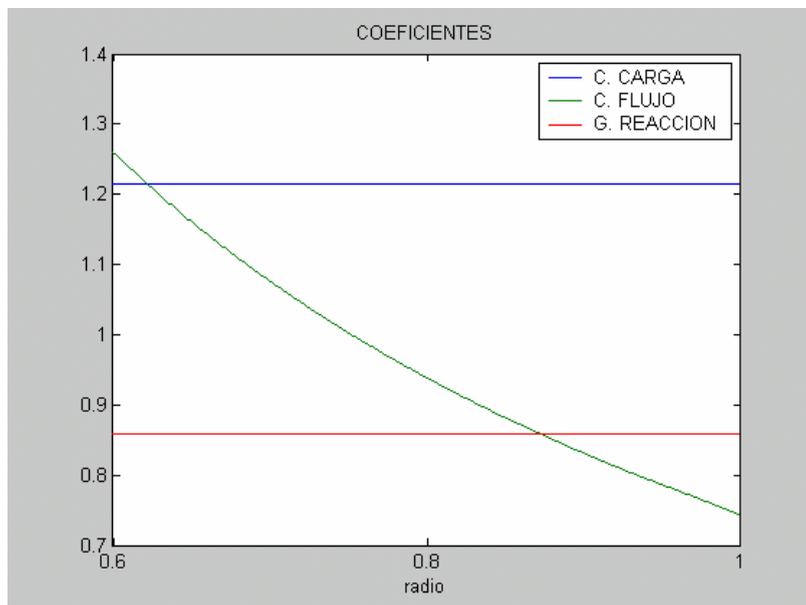
La velocidad axial a la salida sufre unas variaciones muy notables con el radio. Esto se ha confirmado como una constante de esta ley tanto en el caso de flujo incompresible como en el de flujo compresible. También con independencia del número de escalonamientos que se resuelvan.



(Figura 4.9.B)

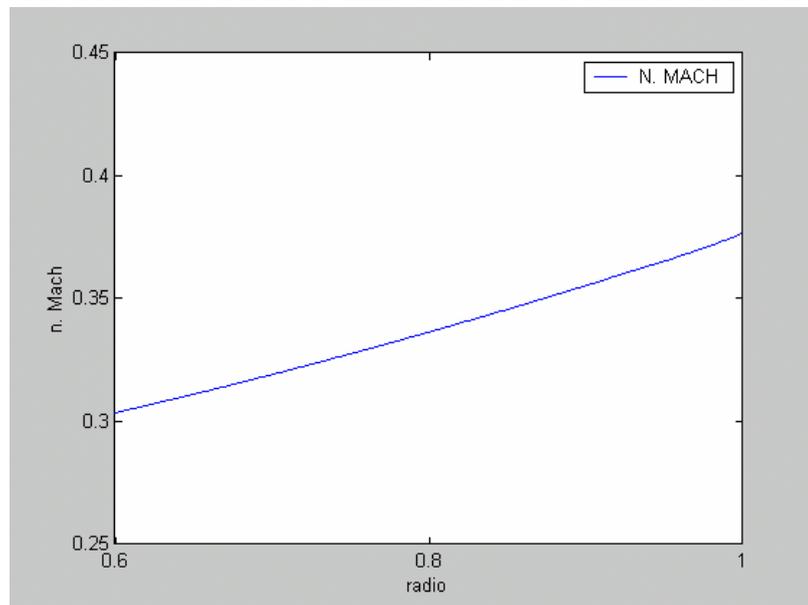


(Figura 4.9.C)



(Figura 4.9.D)

Como otra constante de esta ley, examinando la figura de los coeficientes, tenemos la constancia con el radio tanto del coeficiente de carga como del grado de reacción.



(Figura 4.9.E)

Para terminar el análisis del flujo compresible a través de turbinas examinamos un escalonamiento múltiple con tres etapas aplicando la ley torbellino mixto, $c_q = a * r + b / r$.

Podemos comprobar como los resultado obtenidos son similares a los obtenidos con anterioridad, pudiéndose por tanto sacar las mismas conclusiones que anteriormente.

- Escalonamiento múltiple. Ley torbellino mixto

Datos de diseño de entrada:

Radio raíz entrada = 0.4 m

Radio cabeza entrada = 0.8 m

Número de etapas = 3

Álabes (d. plano) = 0.025 m

$C_p/C_v = 1.40$

Wescal = (8280, 10908, 15480) J/kg

Rendimiento total a total = 92.0 %

Densidad entrada = $0.775 \text{ kg} / \text{m}^3$

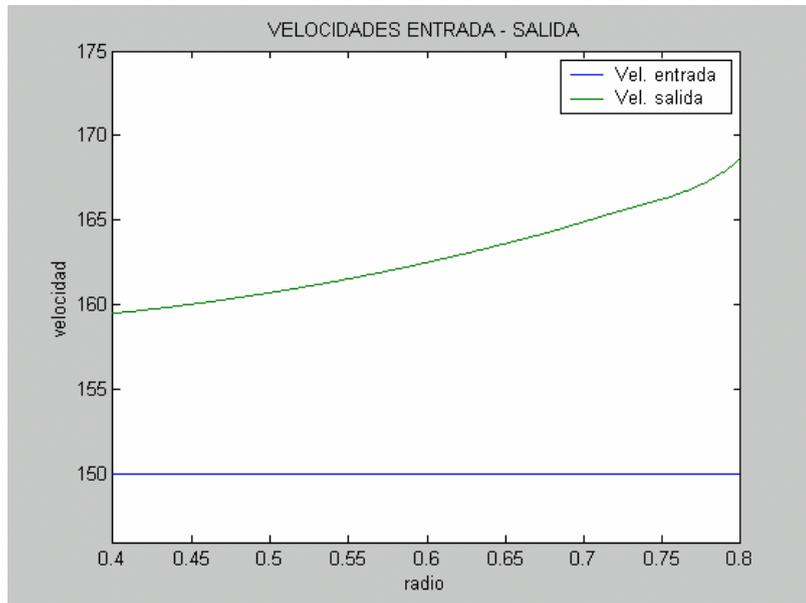
Veloc. entrada = 150 m/seg

Temperatura entrada = 1200 K

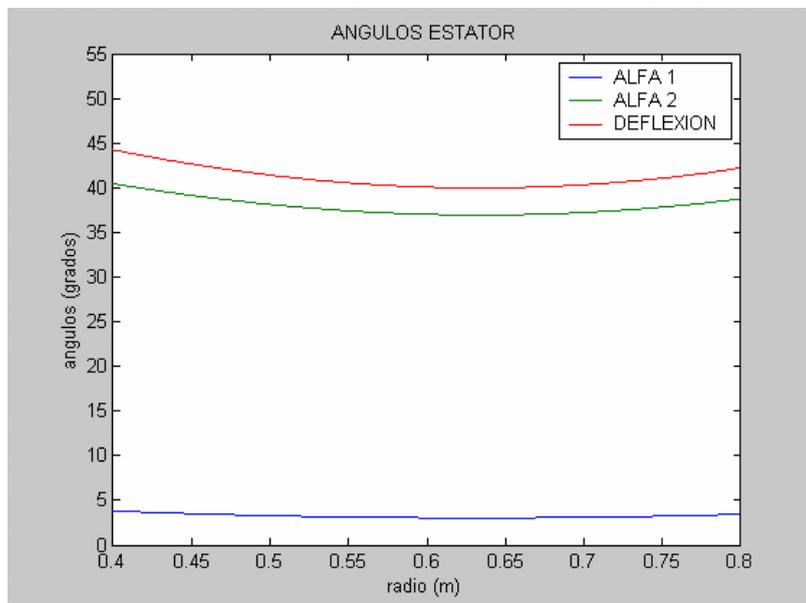
Velocidad rotación = 150.0 seg^{-1}

$R = 287.0 \text{ J/kg K}$

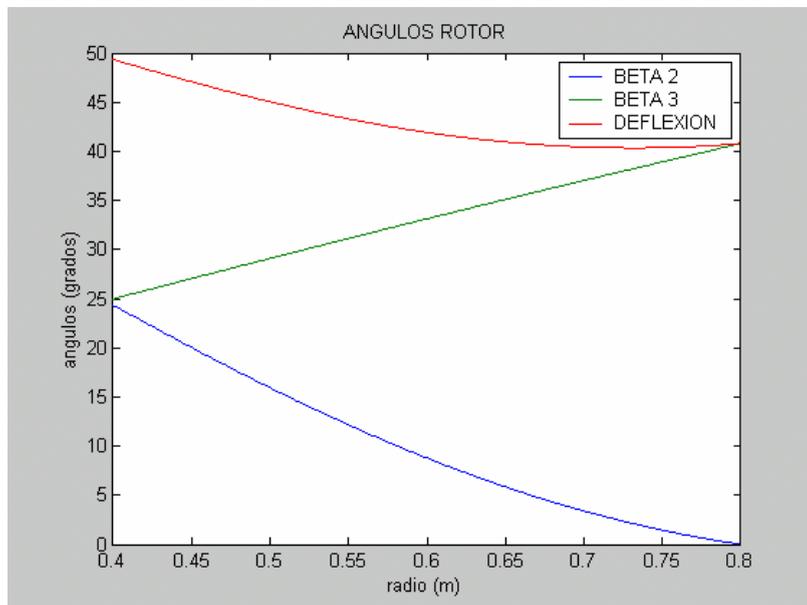
ct2E = (128, 113.2, 120) m/seg



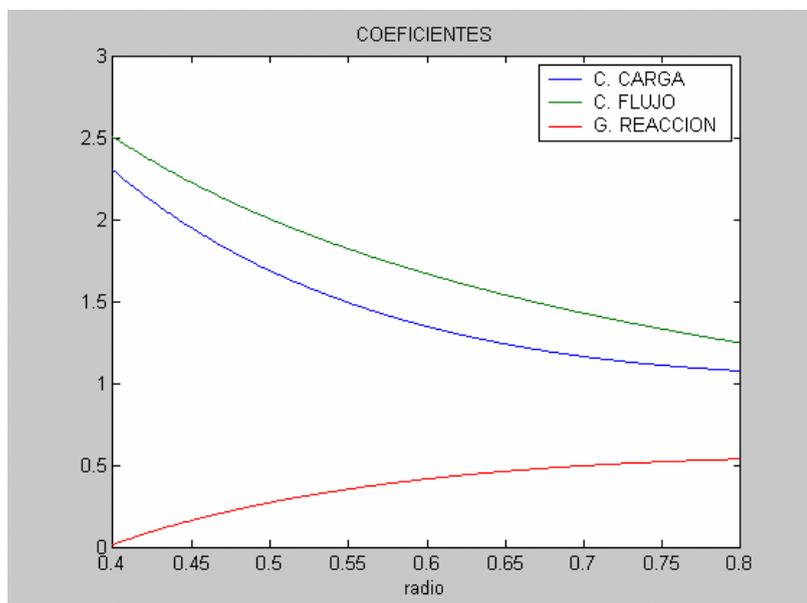
(Figura 4.10.A)



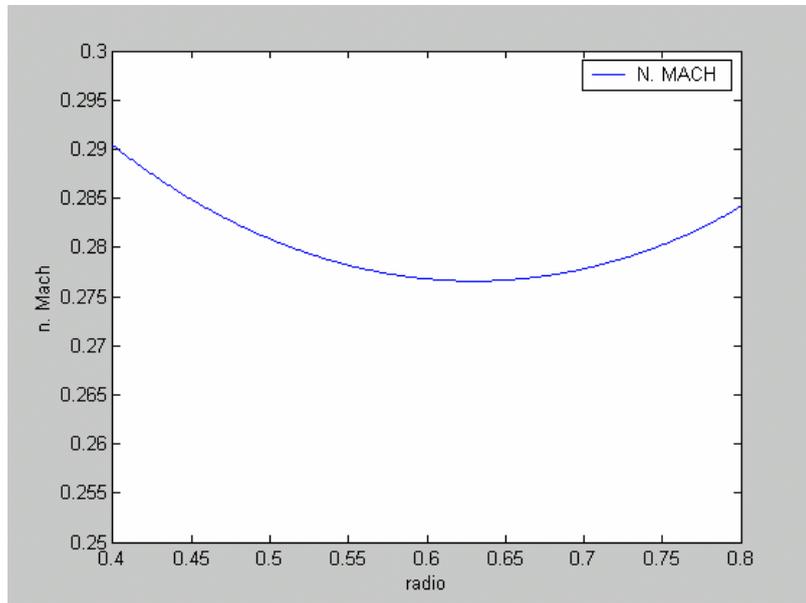
(Figura 4.10.B)



(Figura 4.10.C)



(Figura 4.10.D)



(Figura 4.10.E)

Una vez examinado el flujo compresible a través de turbinas vamos a analizar seguidamente la evolución a través de compresores.

De nuevo, al igual que sucedía para el caso de flujo incompresible, los resultados serán muy similares entre turbinas y compresores, creando las diferentes leyes torsionales efectos similares en ambos.

Se resolverán por tanto, diversos casos de flujos que evolucionan a través de compresores aplicando distintas leyes torsionales. Se examinarán escalonamientos con distintas etapas (una, dos y tres).

- Escalonamiento múltiple. Ley torbellino fijo

Datos de diseño de entrada:

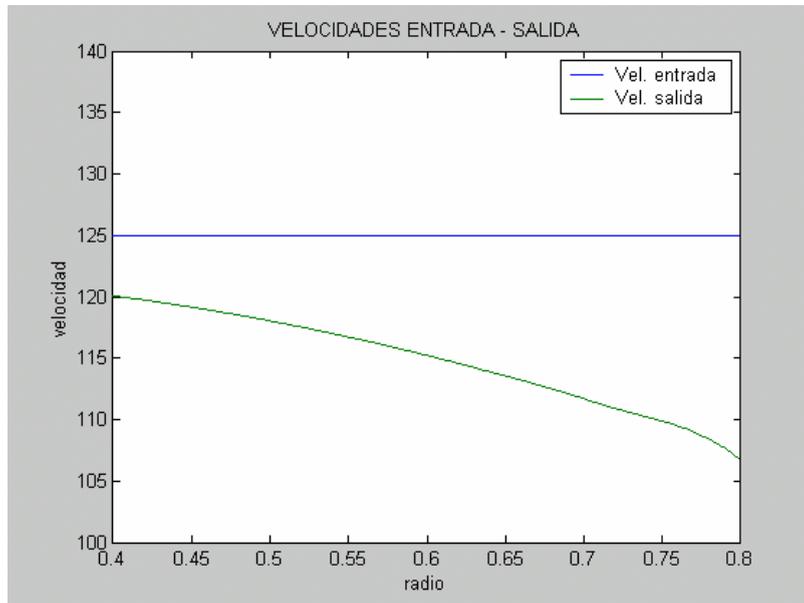
Radio raíz entrada = 0.4 m	Densidad entrada = 0.8 kg/m^3
Radio cabeza entrada = 0.8 m	Veloc. entrada = 125 m/seg
Número de etapas = 1	Temperatura entrada = 1200 K
Álabes (d. plano) = 0.025 m	Velocidad rotación = 425 seg^{-1}
$C_p/C_v = 1.40$	$R = 287.0 \text{ J/kg K}$
Wescal = (17000, 35700, 68000) J/kg	ct2E = (50, 70, 100) m/seg
Rendimiento total a total = 92.0 %	

Resolvemos en primer un escalonamiento simple con la ley torbellino fijo, con la cual tenemos una relación entre el radio y la velocidad tangencial de la forma $c_q = k * r$.

En el caso de compresores que estamos analizando ahora, si examinamos los resultados obtenidos de la velocidad nos encontraremos ahora que la velocidad de salida es menor que la entrada. Esto es debido al aumento de densidad que se produce en el fluido a su paso por el compresor. Al igual que en el caso de turbinas, no nos interesa en este estudio el valor del salto producido en la velocidad de salida respecto a la de entrada, y que depende fundamentalmente de los valores introducidos para la resolución de los diferentes casos.

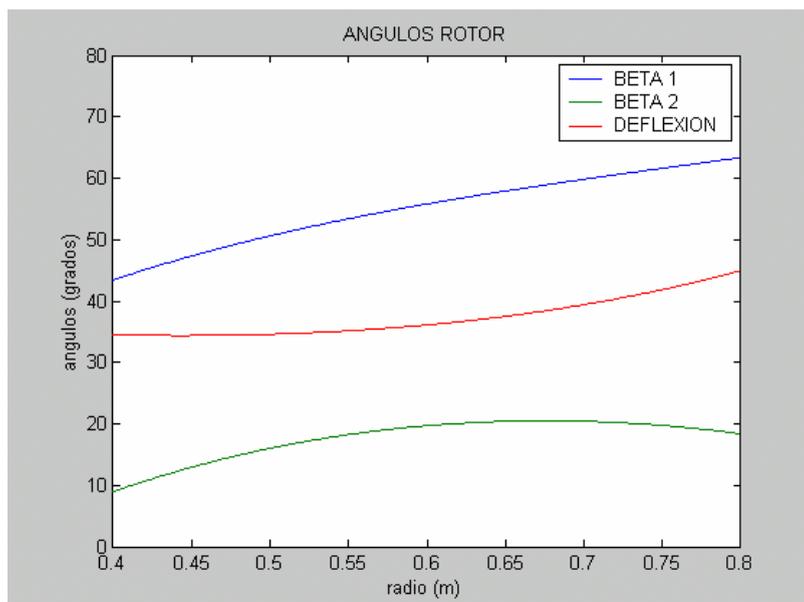
Si es de nuestro interés, al igual que en los análisis anteriores, la tendencia que tiene con el radio.

Este hecho es también aplicable a los demás parámetros objeto de discusión.



(Figura 4.11.A)

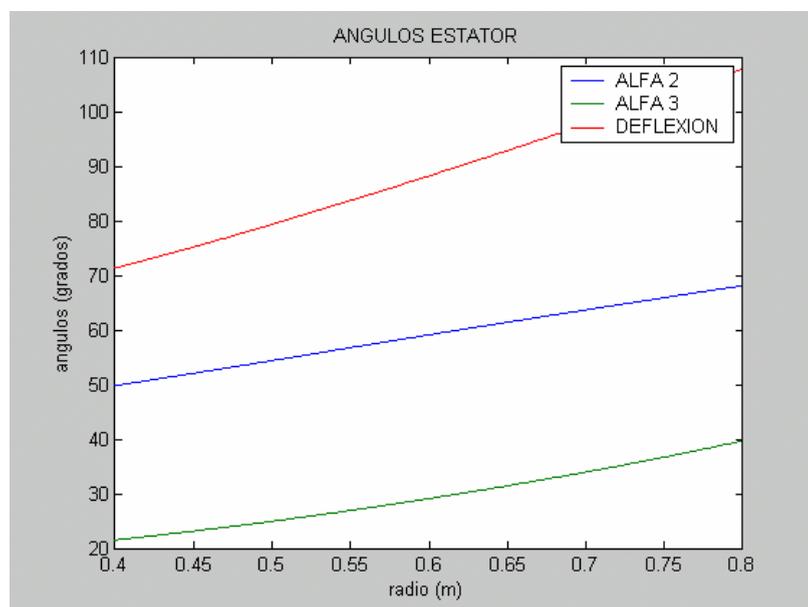
Para compresores, se observa al igual que para turbinas, como la ley torbellino fijo provoca que la velocidad de salida sufra variaciones importante con el radio. Podemos ver como en los radios de cabeza es donde se producen las mayores variaciones.



(Figura 4.11.B)

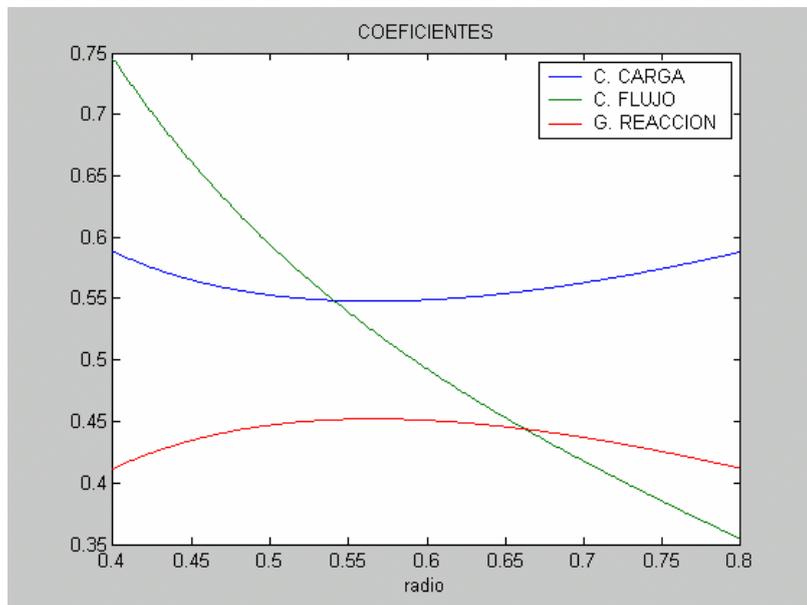
En el caso de la deflexión, en general, para compresores obtendremos valores de ésta mas pequeños que para turbinas.

Por otro lado, nos encontramos al igual que en casos anteriores con esta ley (figuras 4.9.B y 4.9.C) como la deflexión en el rotor adopta valores muy pocos variables con el radio mientras que en el estator la variación de la misma con el radio es muy fuerte.

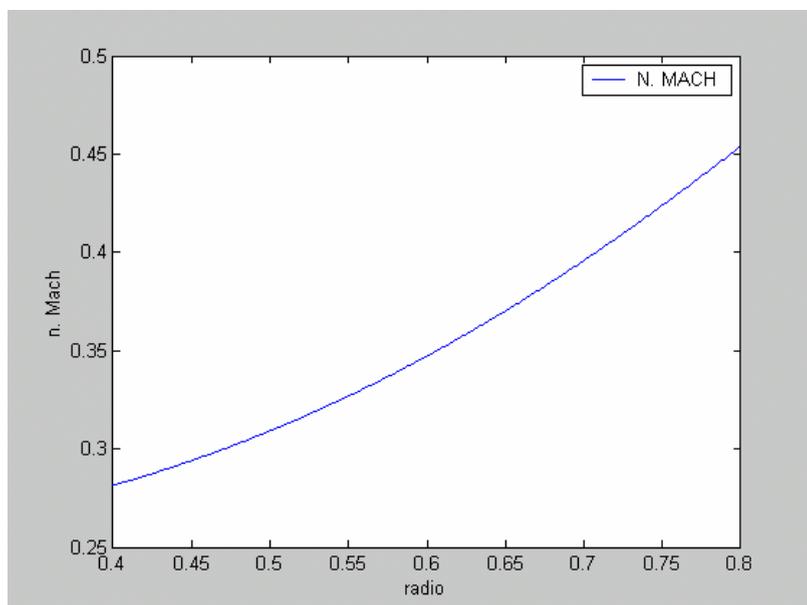


(Figura 4.11.C)

Al examinar los coeficientes vemos que, lo que era una constante de esta ley como era la constancia del grado de reacción y del coeficiente de carga, no se cumple. Hay que notar no obstante que los valores de los mismos en los extremos son coincidentes y es en la zona media donde difieren los valores.



(Figura 4.11.D)



(Figura 4.11.E)

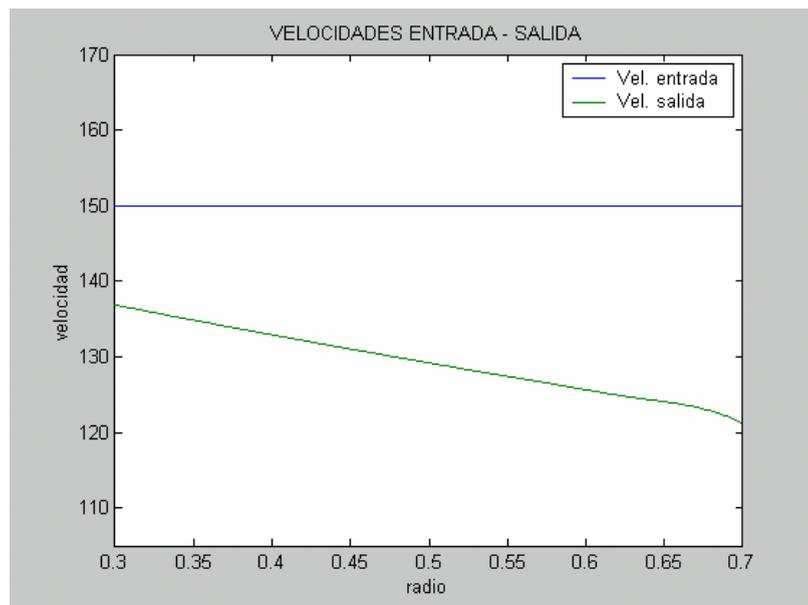
- Escalonamiento múltiple. Ley velocidad tangencial constante

Datos de diseño de entrada:

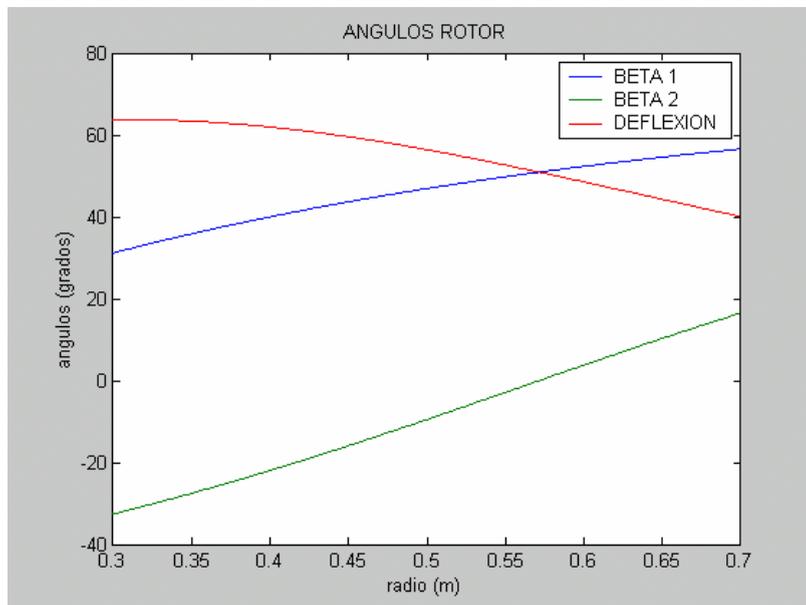
Radio raíz entrada = 0.3 m	Densidad entrada = 0.8 kg/m^3
Radio cabeza entrada = 0.7 m	Veloc. entrada = 150 m/seg
Número de etapas = 2	Temperatura entrada = 1200 K
Álabes (d. plano) = 0.025 m	Velocidad rotación = 350 seg^{-1}
$C_p/C_v = 1.40$	$R = 287.0 \text{ J/kg K}$
$W_{\text{escal}} = (19425, 32375, 45325) \text{ J/kg}$	$ct_{2E} = (15, 15, 15) \text{ m/seg}$
Rendimiento total a total = 92.0 %	

Ahora nos encontramos que $c_q = k$

En este caso de escalonamiento con dos etapas y ley torsional “velocidad tangencial constante”, se observa que el perfil de la velocidad axial varía con el radio, aunque al igual que en otros casos de esta ley torsional, la variación es moderada.

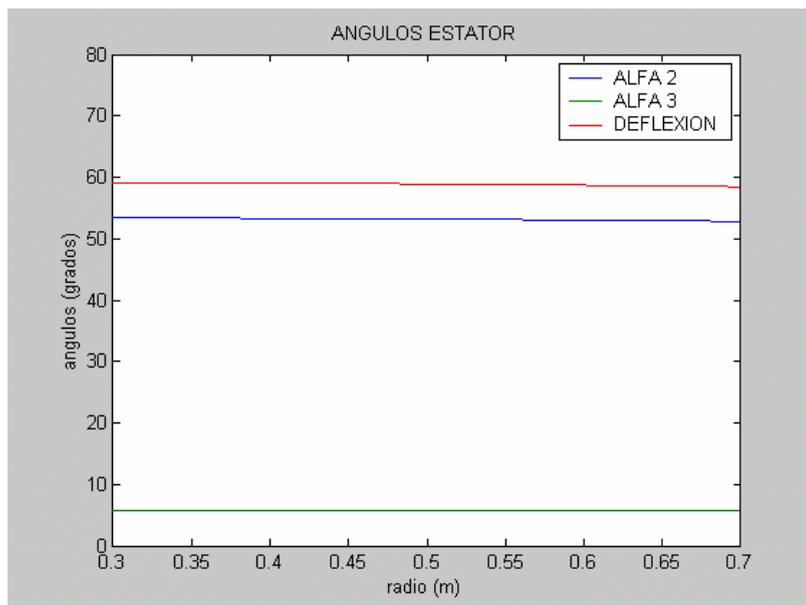


(Figura 4.12.A)

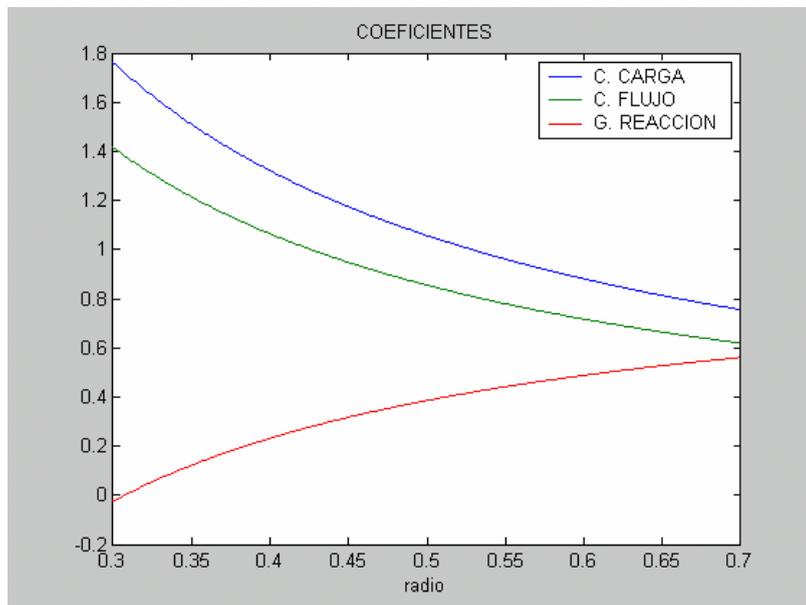


(Figura 4.12.B)

Nuevamente los ángulos en el estator sufren variaciones mínimas con el radio, lo que lleva a una deflexión prácticamente constante con el radio.

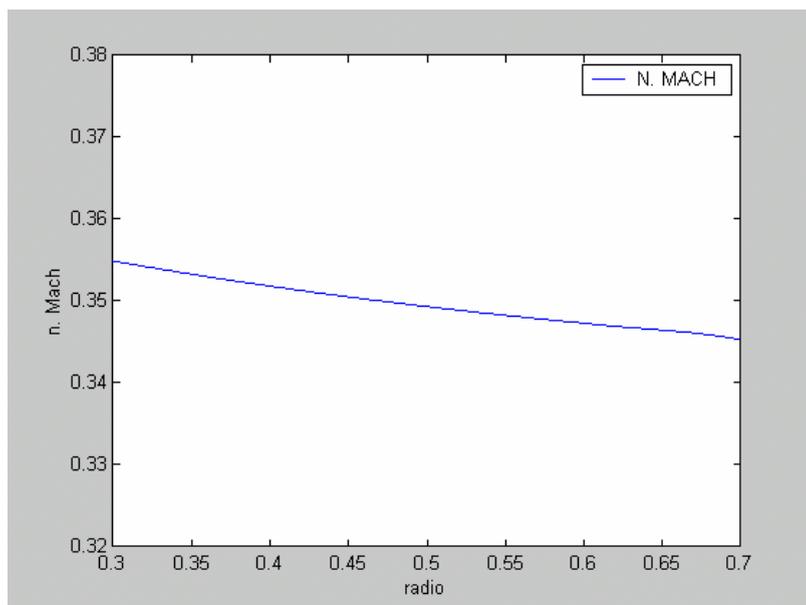


(Figura 4.12.C)



(Figura 4.12.D)

Para compresores y con esta ley se obtiene un número de Mach que varía mínimamente con el radio. Este mismo resultado se alcanzó también en la resolución de turbinas.



(Figura 4.12.E)

A continuación analizamos un escalonamiento múltiple de compresor con dos etapas para la ley torsional torbellino libre.

- Escalonamiento múltiple. Ley torbellino libre

Datos de diseño de entrada:

Radio raíz entrada = 0.4 m

Densidad entrada = 0.7 kg/m^3

Radio cabeza entrada = 0.8 m

Veloc. entrada = 100 m/seg

Número de etapas = 2

Temperatura entrada = 1300 K

Álabes (d. plano) = 0.025 m

Velocidad rotación = 400 seg^{-1}

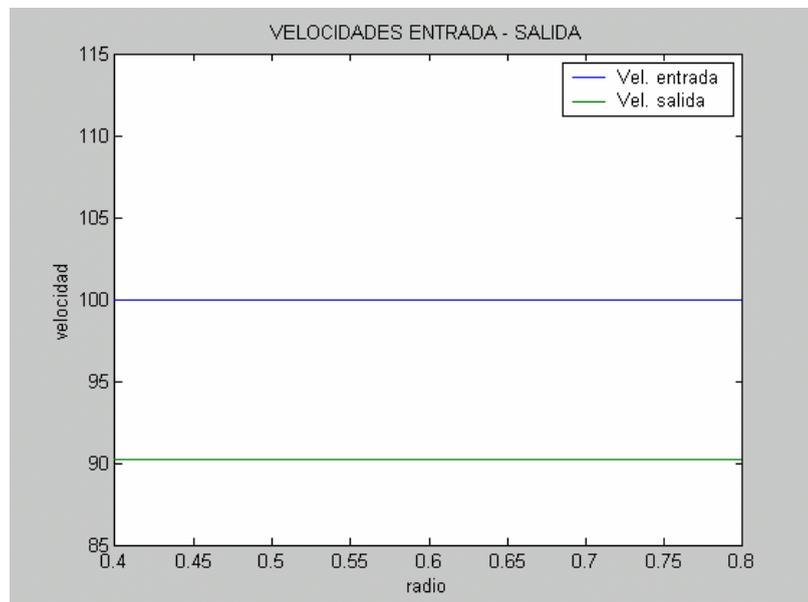
$C_p/C_v = 1.40$

$R = 287.0 \text{ J/kg K}$

Wescal = (24000, 24000, 24000) J/kg

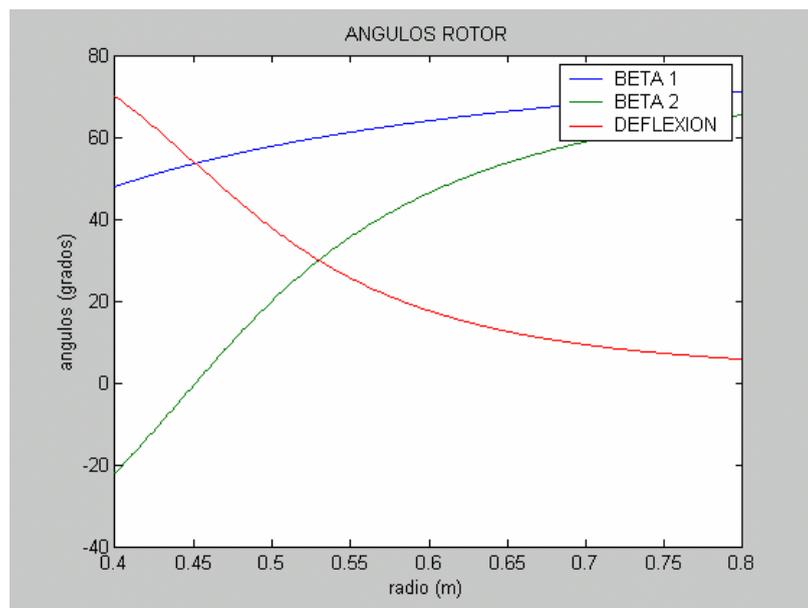
ct2E = (50, 35, 25) m/seg

Rendimiento total a total = 92.0 %



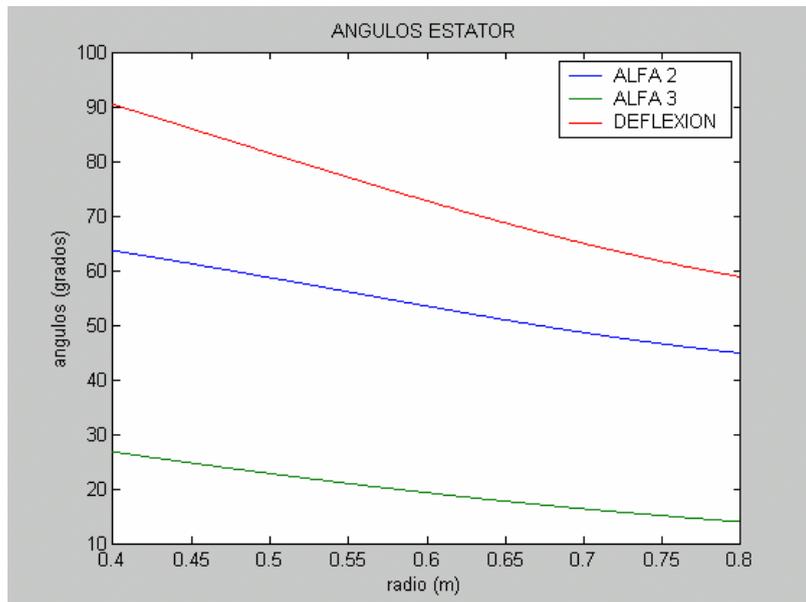
(Figura 4.13.A)

Como constante de esta ley, volvemos a obtener (ahora para compresores y compresible), un perfil de la velocidad a la salida invariable con el radio. Este hecho se ha podido ir constatando en los diferentes casos resueltos con anterioridad.



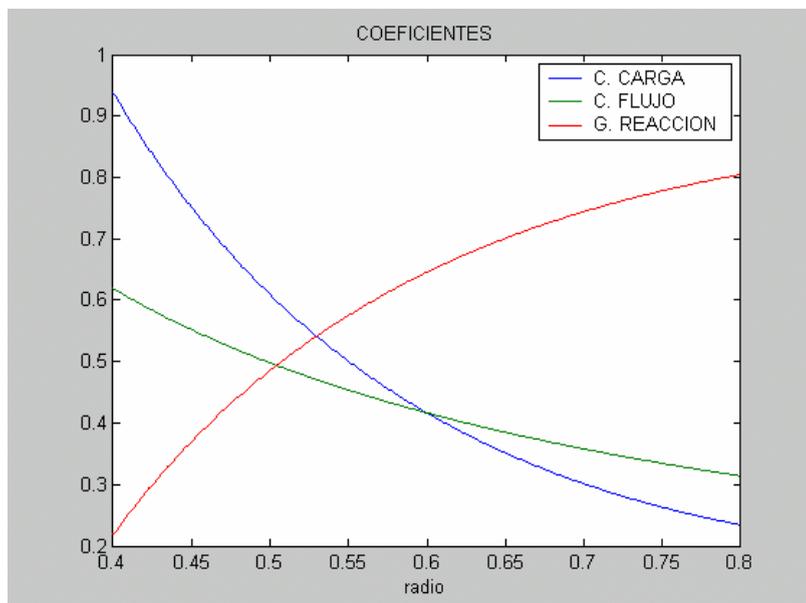
(Figura 4.13.B)

Inspeccionando los resultados obtenidos de los ángulos, se corrobora que esta ley torsional es la que produce una deflexión mas variable con el radio. Se puede observar la gran diferencia existente entre los valores que adopta ésta en los radios de raíz y de cabeza.

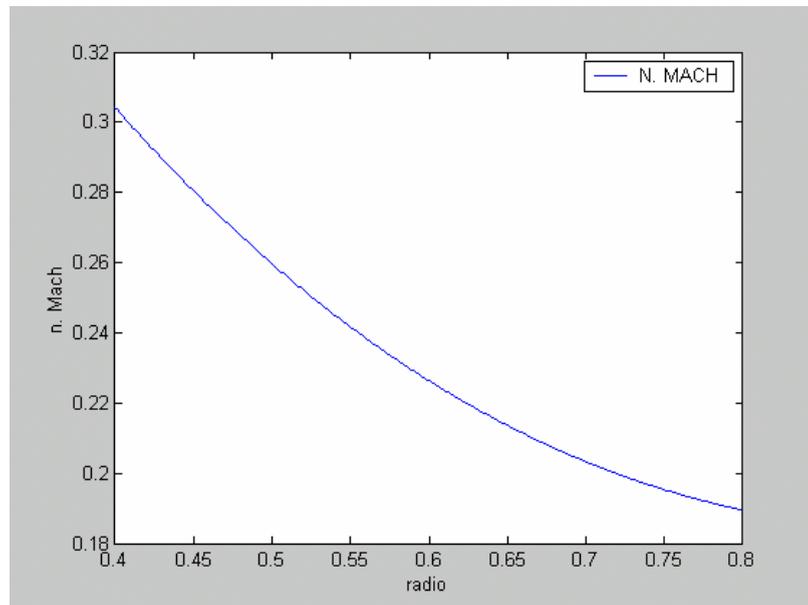


(Figura 4.13.C)

El grado de reacción, de igual forma, sufre también variaciones muy bruscas en su perfil.



(Figura 4.13.D)



(Figura 4.13.E)

Continuamos nuestro análisis con un escalonamiento múltiple con dos etapas siguiendo la ley torbellino mixto, $c_q = a * r + b / r$.

Los resultados obtenidos son similares a los encontrados en casos anteriores.

- Escalonamiento múltiple. Ley torbellino mixto

Datos de diseño de entrada:

Radio raíz entrada = 0.4 m

Radio cabeza entrada = 1 m

Número de etapas = 2

Álabes (d. plano) = 0.025 m

$C_p/C_v = 1.40$

Wescal = (32760, 50967, 76950) J/kg

Rendimiento total a total = 92.0 %

Densidad entrada = 0.8 kg/m^3

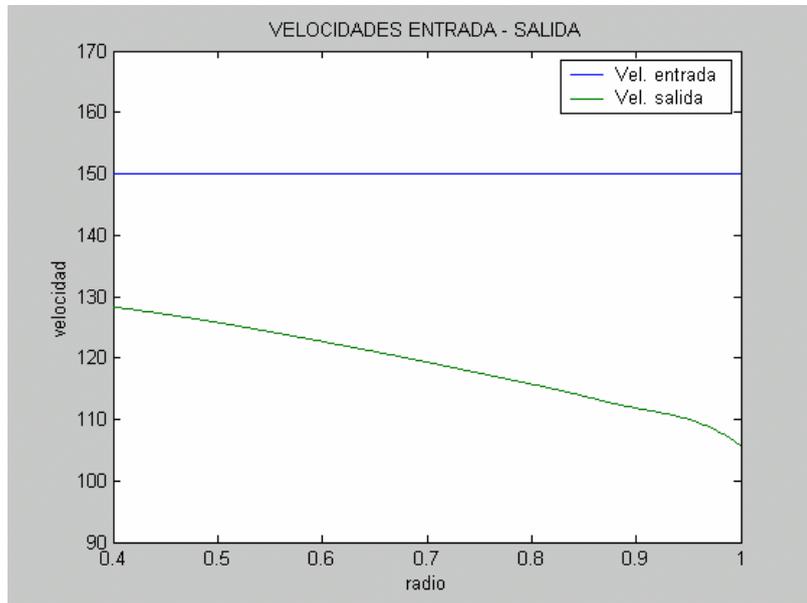
Veloc. entrada = 150 m/seg

Temperatura entrada = 1200 K

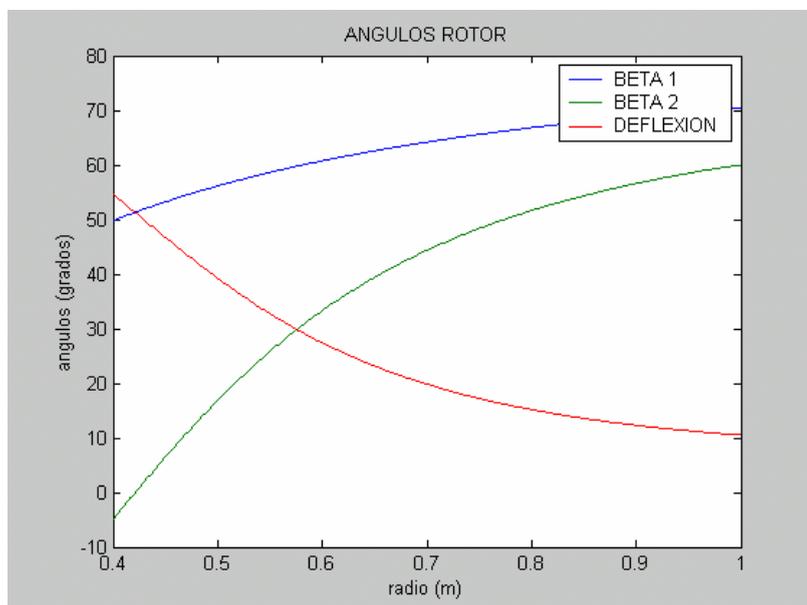
Velocidad rotación = 450 seg^{-1}

$R = 287.0 \text{ J/kg K}$

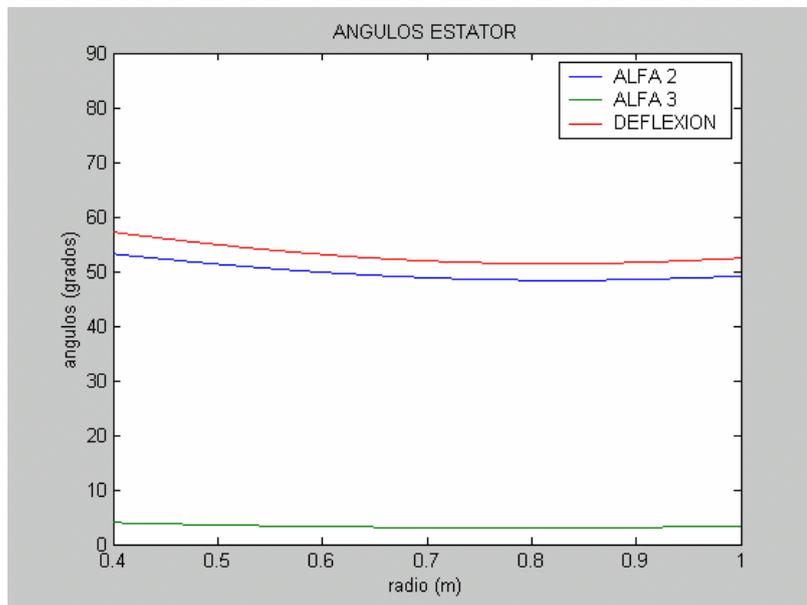
ct2E = (10, 8, 9) m/seg



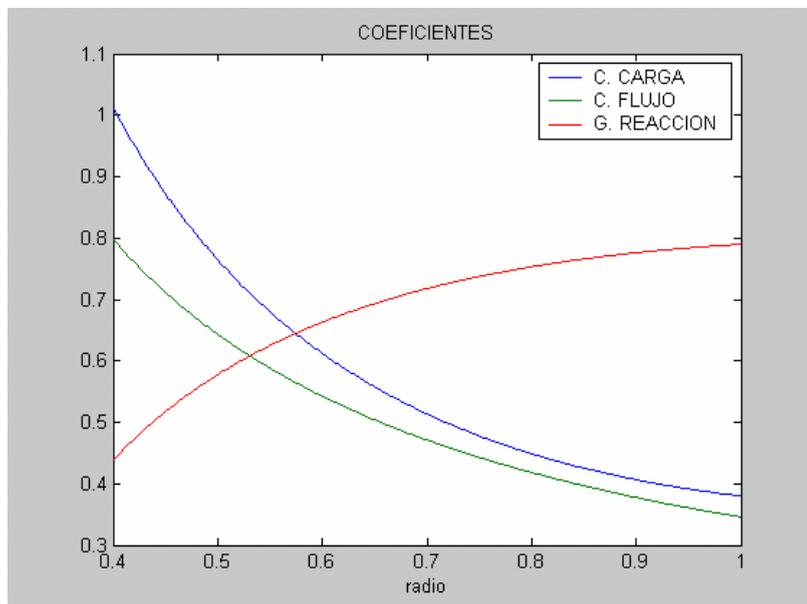
(Figura 4.14.A)



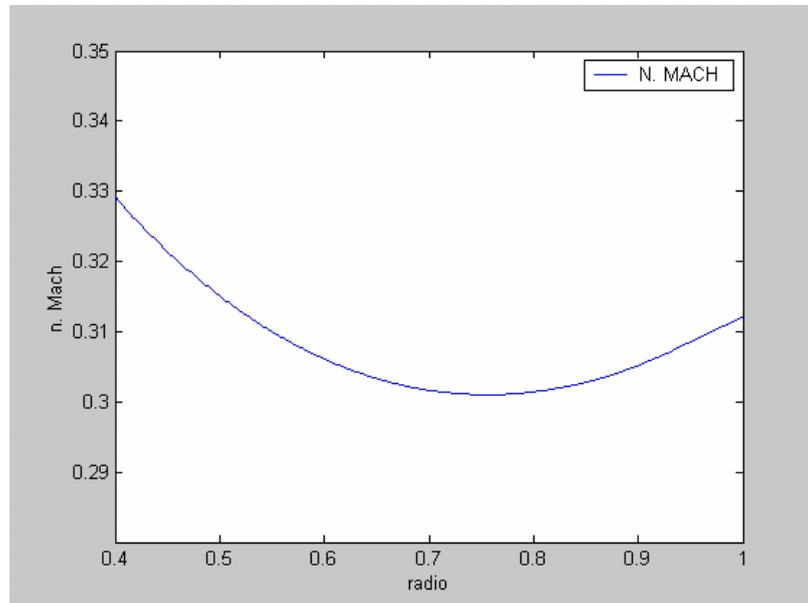
(Figura 4.14.B)



(Figura 4.14.C)



(Figura 4.14.D)



(Figura 4.14.E)

- Escalonamiento múltiple. Ley torbellino fijo

Datos de diseño de entrada:

Radio raíz entrada = 0.3 m

Radio cabeza entrada = 0.7 m

Número de etapas = 2

Álabes (d. plano) = 0.025 m

$C_p/C_v = 1.40$

Wescal = (7650, 17850, 35700) J/kg

Rendimiento total a total = 92.0 %

Densidad entrada = 0.8 kg/m^3

Veloc. entrada = 100 m/seg

Temperatura entrada = 1200 K

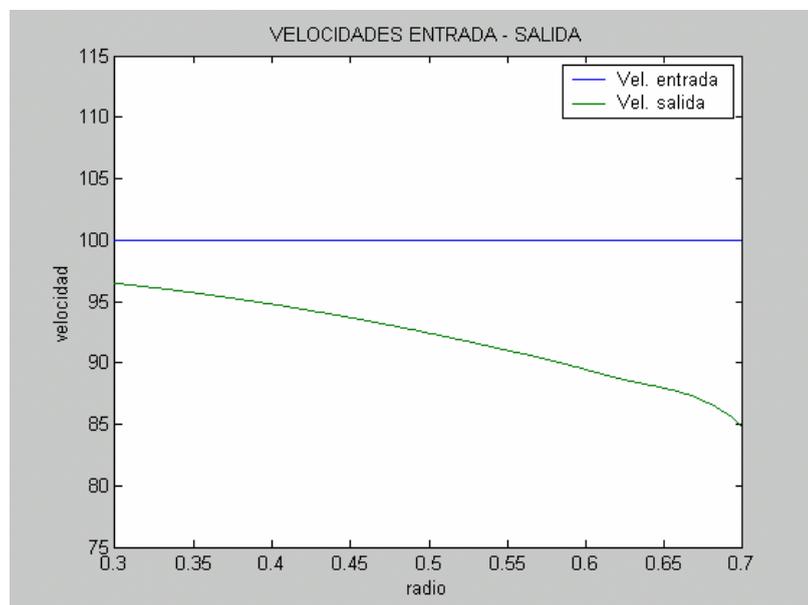
Velocidad rotación = 340 seg^{-1}

$R = 287.0 \text{ J/kg K}$

ct2E = (25, 35, 50) m/seg

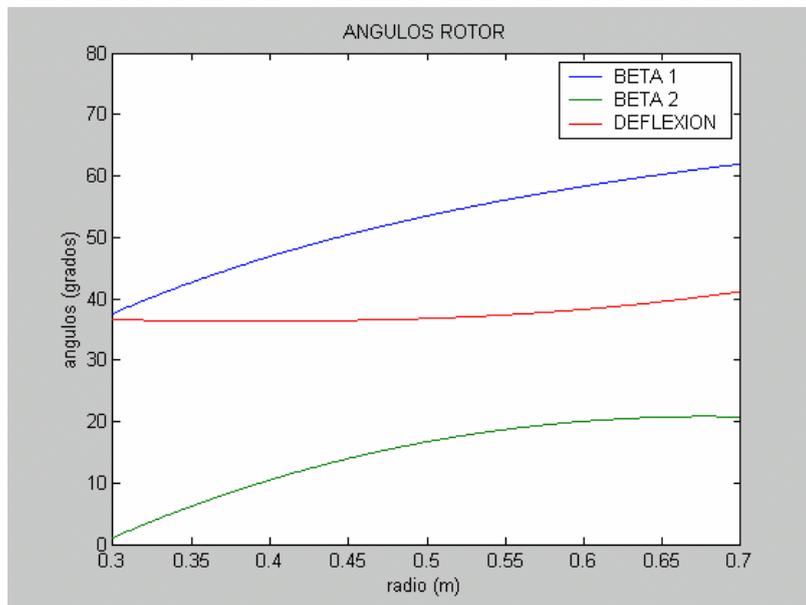
Examinamos ahora la evolución de un flujo a través de un compresor con dos etapas.

El perfil de velocidad obtenido sigue la misma tendencia que el obtenido con esta misma ley al resolver otros casos.

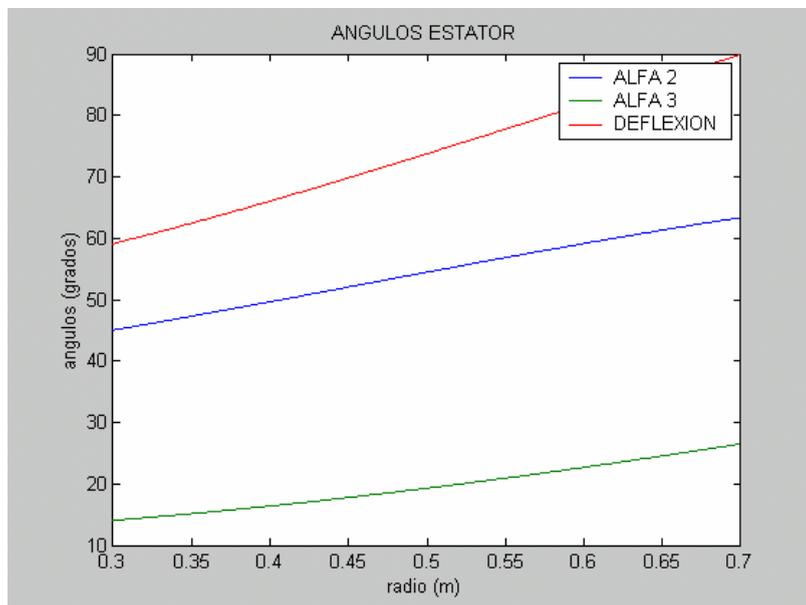


(Figura 4.15.A)

Lo mismo ocurre con los valores de la deflexión obtenidos, donde de nuevo se obtiene para esta ley una deflexión poco variable con el radio en el rotor y muy variable, por el contrario, en el estator.

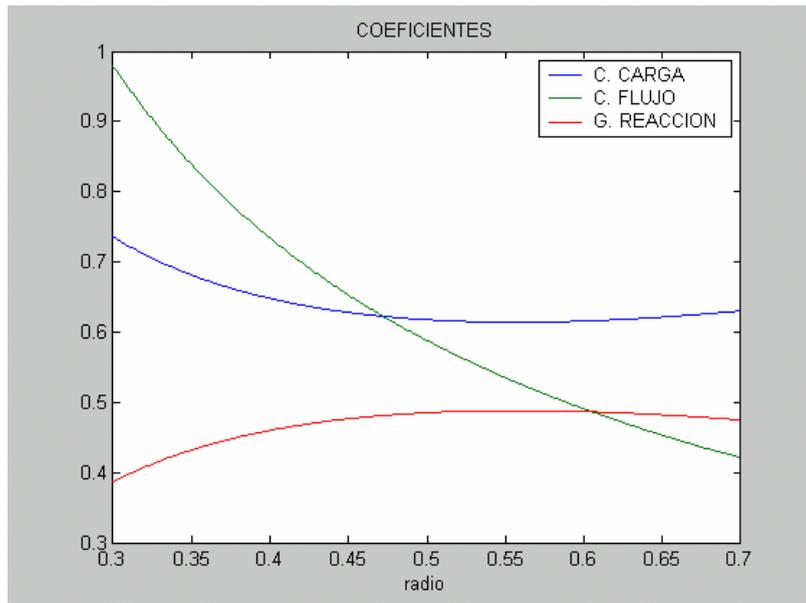


(Figura 4.15.B)

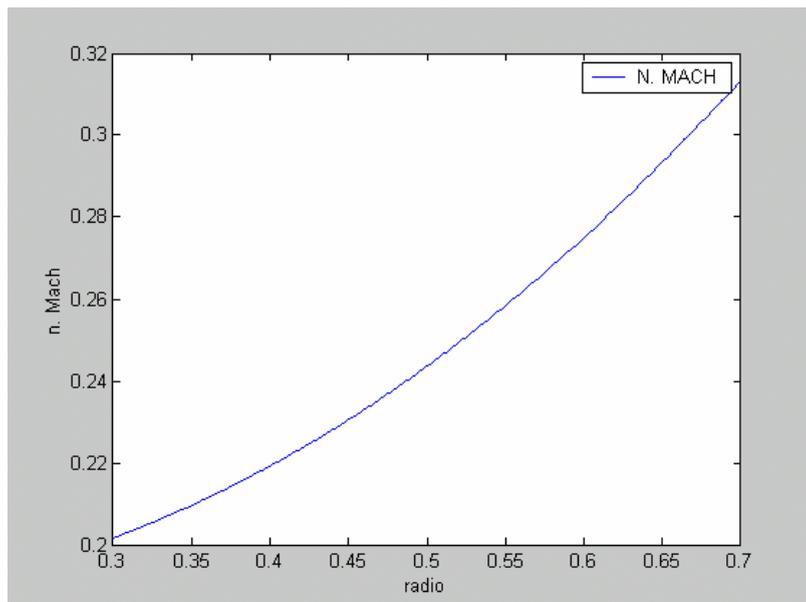


(Figura 4.15.C)

Un hecho resaltable, que se comentó con anterioridad (figura 4.11.D), es que en compresores y flujo compresible, el grado de reacción y el coeficiente de carga no son constantes con el radio como se había obtenido en todos los casos restantes de esta ley. En este caso, ambos se mantienen poco variables en la zona alta, sufriendo las variaciones importantes en la zona del radio de raíz.



(Figura 4.15.D)



(Figura 4.15.E)

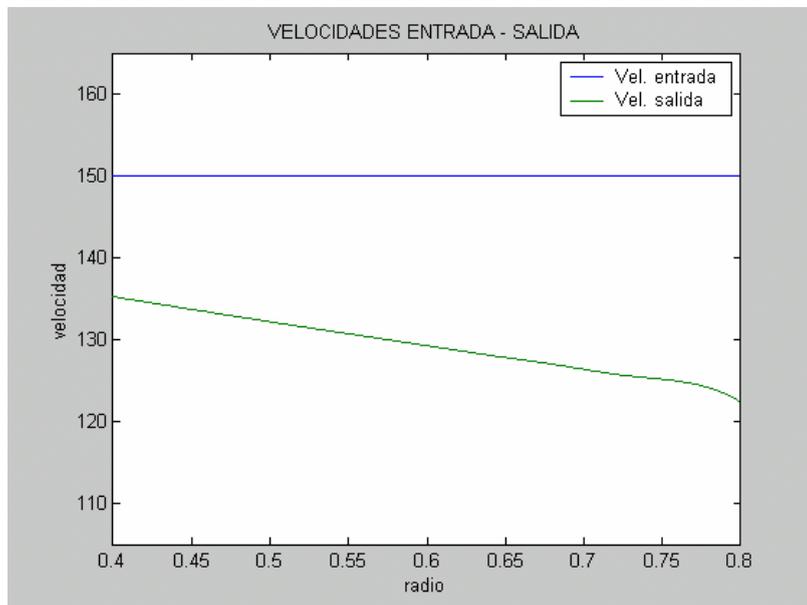
Para terminar el análisis de flujos compresibles en compresores, mostramos a continuación los resultados obtenidos para dos escalonamientos múltiples con tres etapas, siguiendo la ley torsional de “velocidad tangencial constante” en el primer caso y la de “torbellino libre” en el segundo.

Los resultados de ambas resultan coincidentes con los obtenidos en los análisis anteriores con estas leyes, pudiéndose por tanto verter las mismas conclusiones.

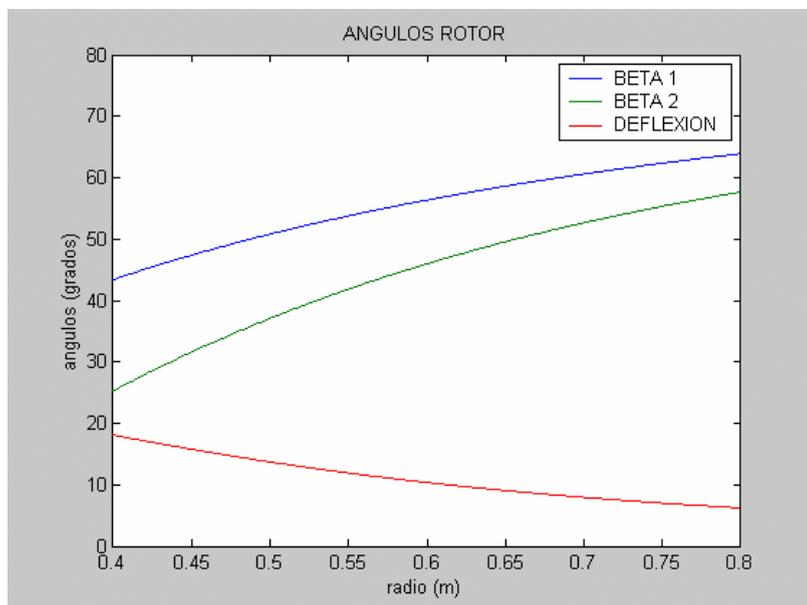
- Escalonamiento múltiple. Ley velocidad tangencial constante

Datos de diseño de entrada:

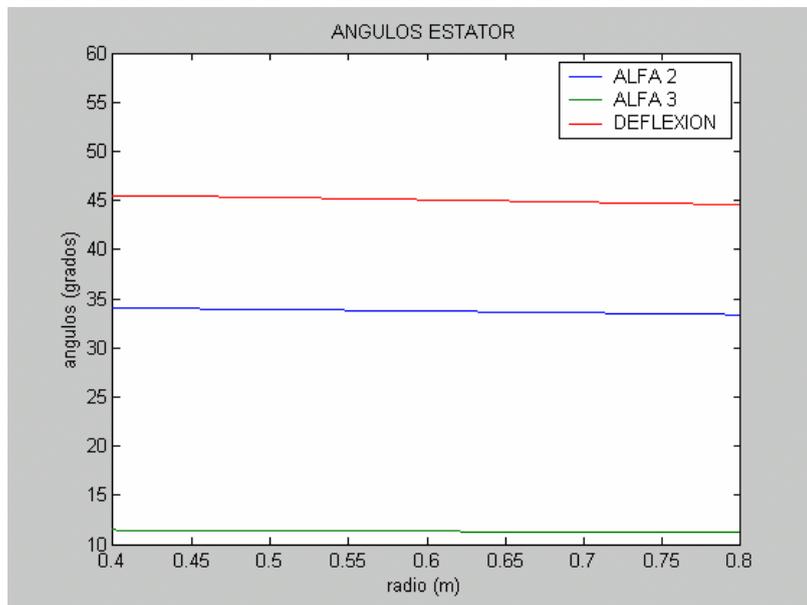
Radio raíz entrada = 0.4 m	Densidad entrada = $0.7 \text{ kg} / \text{m}^3$
Radio cabeza entrada = 0.8 m	Veloc. entrada = 150 m/seg
Número de etapas = 3	Temperatura entrada = 1000 K
Álabes (d. plano) = 0.025 m	Velocidad rotación = 425 seg^{-1}
$C_p/C_v = 1.40$	$R = 287.0 \text{ J/kg K}$
Wescal = (11900, 17850, 23800) J/kg	ct2E = (30, 30, 30) m/seg
Rendimiento total a total = 92.0 %	



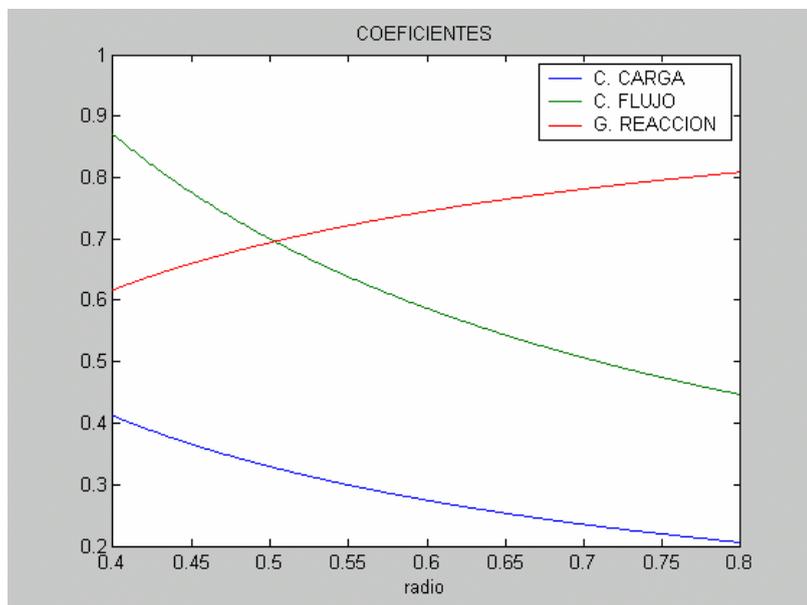
(Figura 4.16.A)



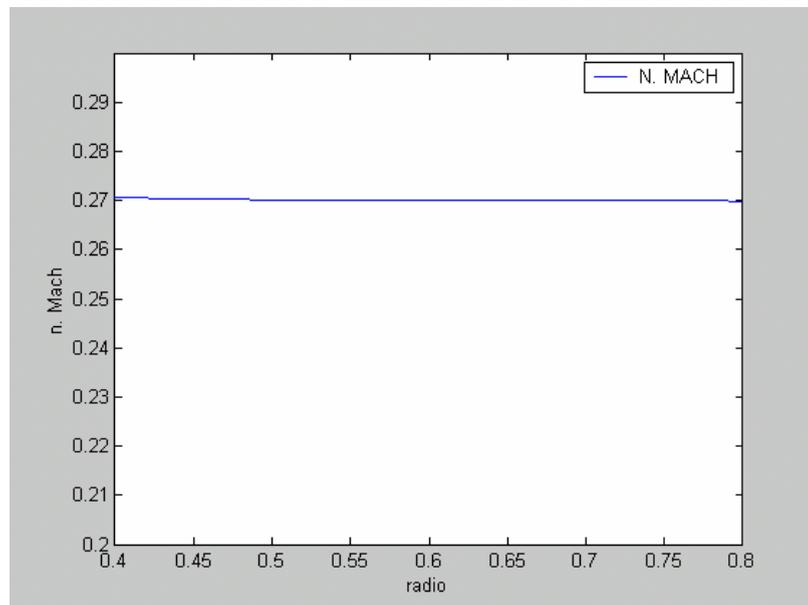
(Figura 4.16.B)



(Figura 4.16.C)



(Figura 4.16.D)



(Figura 4.16.E)

- Escalonamiento múltiple. Ley torbellino libre

Datos de diseño de entrada:

Radio raíz entrada = 0.3 m

Radio cabeza entrada = 0.7 m

Número de etapas = 3

Álabes (d. plano) = 0.025 m

$C_p/C_v = 1.40$

Wescal = (17000, 17000, 17000) J/kg

Rendimiento total a total = 92.0 %

Densidad entrada = 0.6 kg/m^3

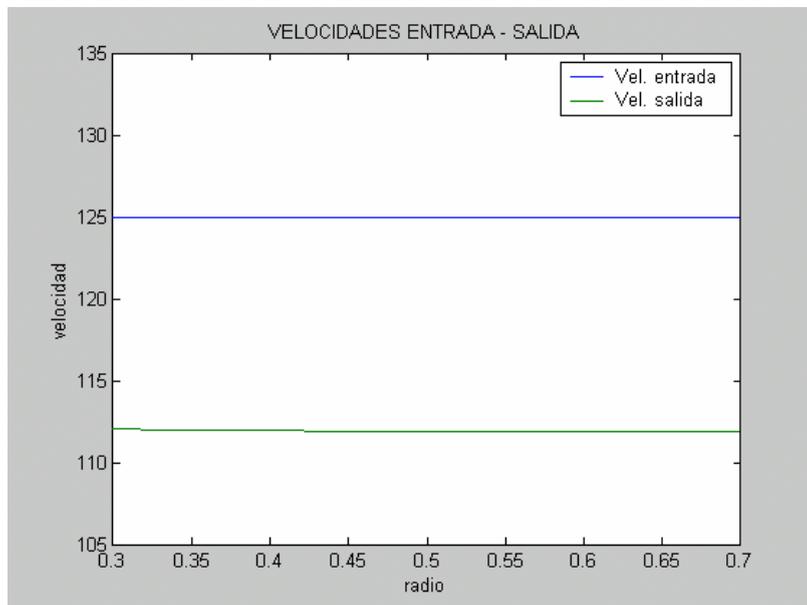
Veloc. entrada = 125 m/seg

Temperatura entrada = 1300 K

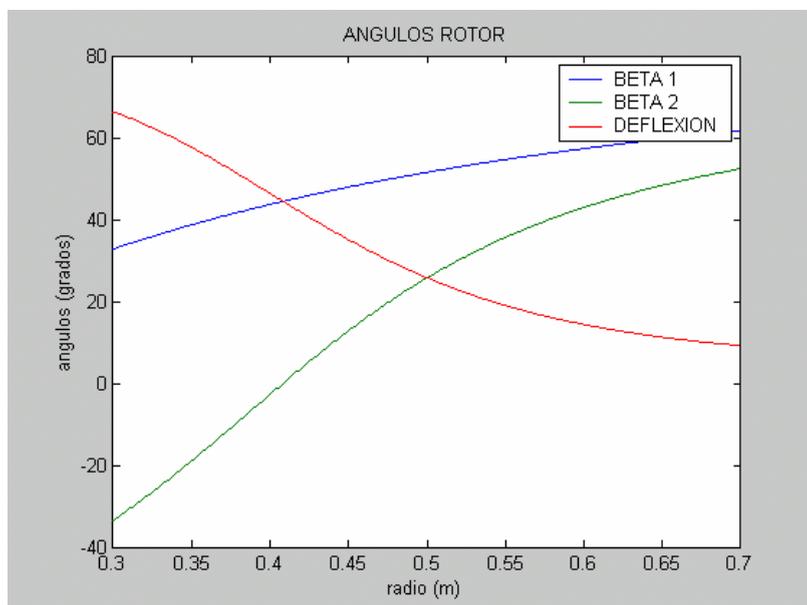
Velocidad rotación = 350 seg^{-1}

$R = 287.0 \text{ J/kg K}$

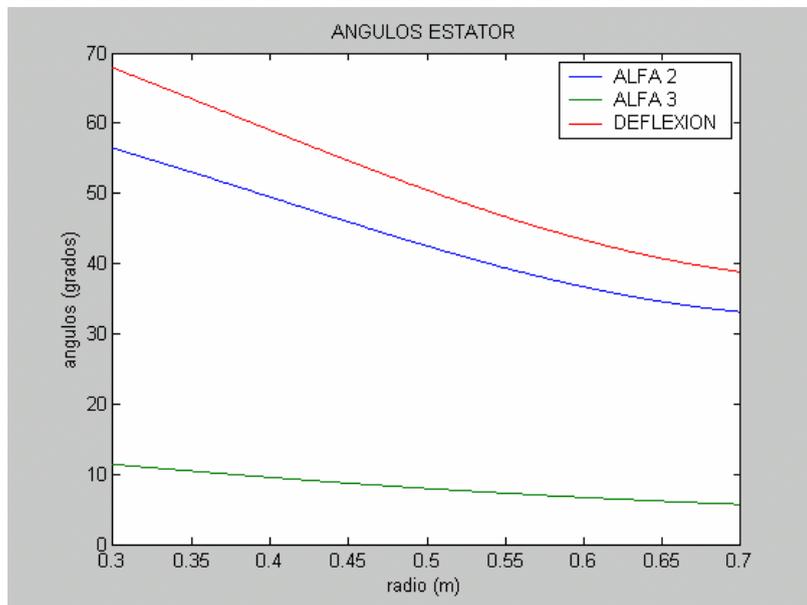
ct2E = (25, 17.5, 12.5) m/seg



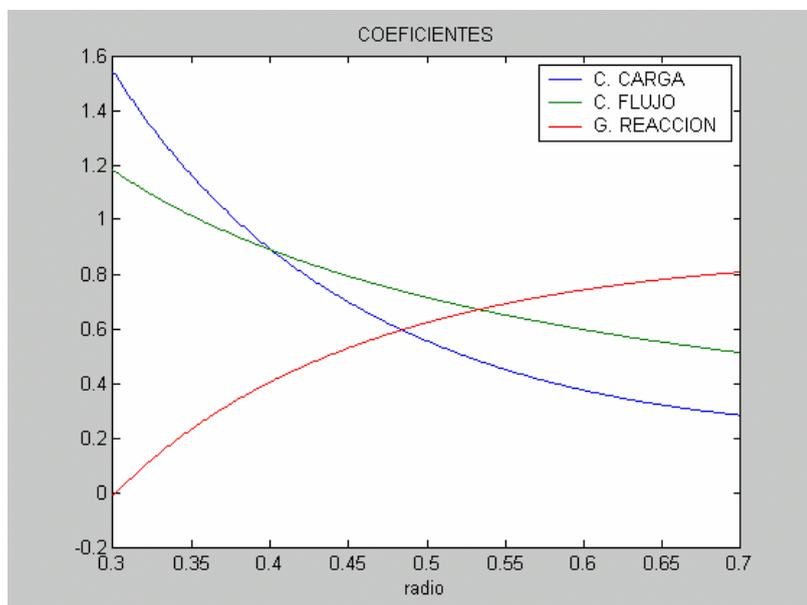
(Figura 4.17.A)



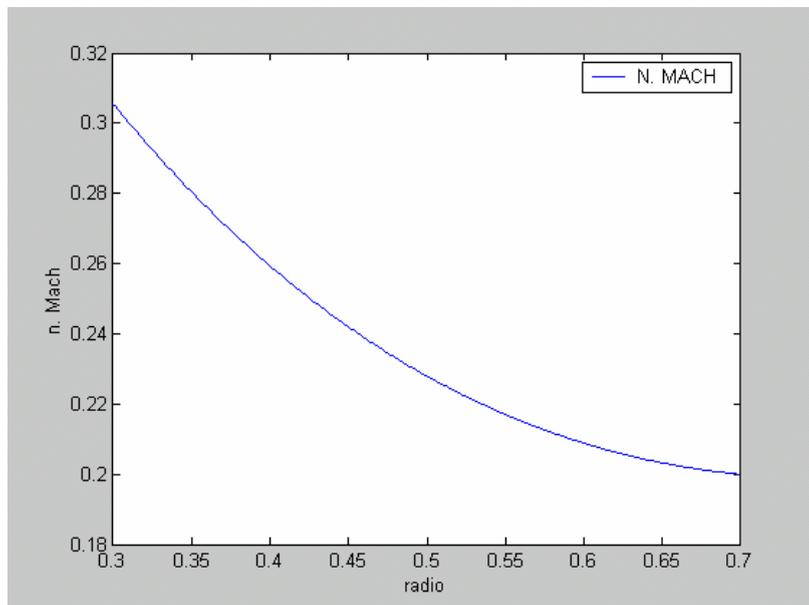
(Figura 4.17.B)



(Figura 4.17.C)



(Figura 4.17.D)



(Figura 4.17.E)