

4.3.1.7.- ANÁLISIS RESULTADOS

A continuación mostramos los resultados obtenidos al aplicar tanto la teoría del equilibrio radial simplificado como del disco actuador a flujos incompresibles. Estas se aplicarán tanto a compresores (o ventiladores en el caso incompresible) como a turbinas y además se aplicarán tanto en escalonamientos aislados como en escalonamientos múltiples.

Además se mostrarán los resultados para las diferentes leyes torsionales, para analizar el efecto de las mismas sobre los triángulos de velocidades.

Las variables introducidas para la resolución de los diferentes casos son las siguientes:

- r_h y r_t , corresponden a los radios de raíz y de cabeza respectivamente
- C_x , es la velocidad axial a la entrada
- c_{q1} y c_{q2} , son las velocidades tangenciales a la entrada y a la salida respectivamente
- x_{LE} , x_{AD} y x_{TE} , son las posiciones de los diferentes planos usados cuando resolvemos mediante la teoría del disco actuador. x_{AD} representa la posición del “disco actuador”, mientras que x_{LE} y x_{TE} representan las posiciones de los planos de entrada y salida respectivamente
- Ω , velocidad de giro

En la resolución de diferentes casos nos podremos encontrar que algunas de las variables introducidas no sean constantes con el radio, como por ejemplo las velocidades axiales o tangenciales. En dichos casos, en vez de introducir la distribución radial completa de dicha variable, se introducirá el valor de la misma en tres radios diferentes, que serán el radio de raíz, el radio medio y el radio de cabeza.

a) Ventiladores

Empezaremos examinando flujos a través de ventiladores. En primer lugar estudiaremos escalonamientos aislados para posteriormente tratar escalonamientos múltiples. Aplicaremos ambas teorías (equilibrio radial simplificado y disco actuador) con diferentes leyes torsionales sobre los escalonamientos aislados para observar cual es el efecto de las mismas sobre la velocidad axial de entrada, coeficientes y demás parámetros.

- Estator. Torbellino libre

$$r_h = 0.4$$

$$r_t = 0.8$$

$$C_x = 100$$

$$c_{q1} = 0$$

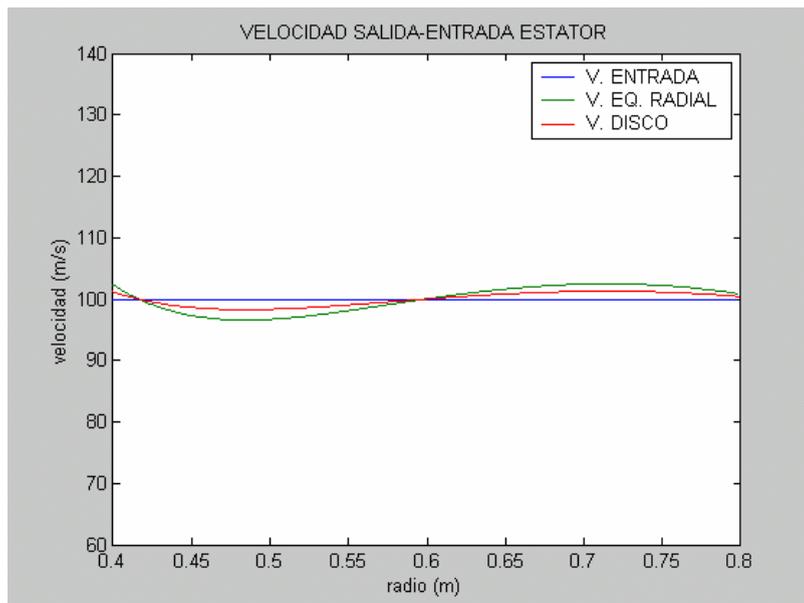
$$c_{q2} = (200,133.3,100)$$

$$x_{LE} = 0.025$$

$$x_{AD} = 0.05$$

$$x_{TE} = 0.075$$

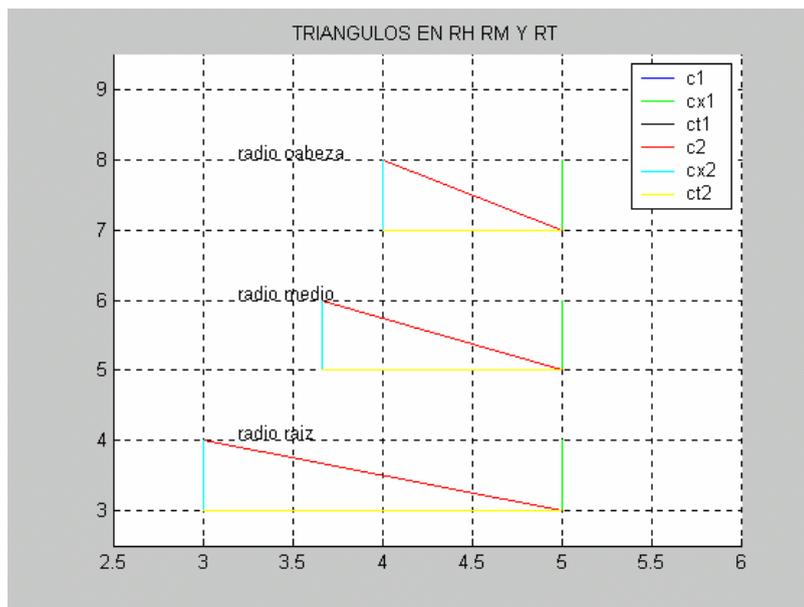
La ley torsional seguida es la de torbellino libre. Por tanto, nos encontraremos con una relación entre las componentes tangenciales de la velocidad y el radio de la forma $c_q = k / r$.



(Figura 4.1.a)

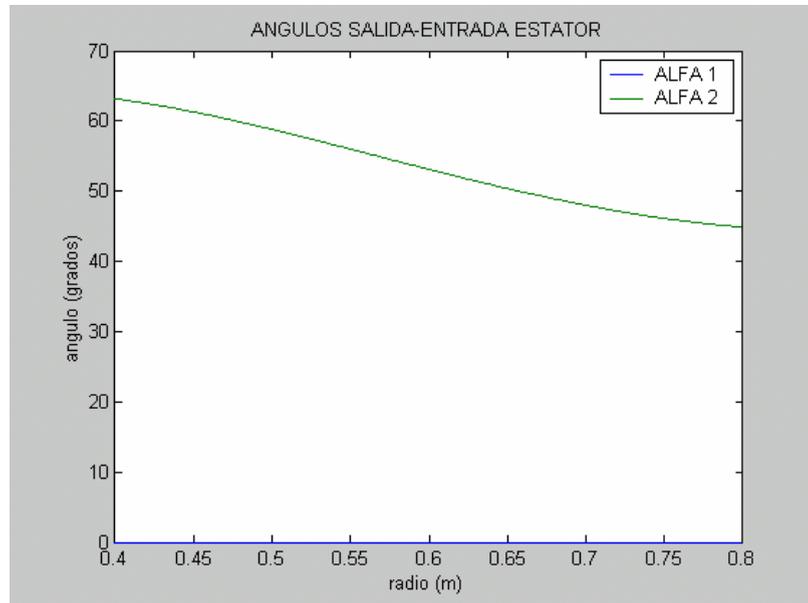
Si observamos el perfil de la velocidad axial obtenido (figura 4.1.a), podemos comprobar como con la ley “torbellino libre” la velocidad axial tiende a mantenerse constante, produciéndose pequeñas variaciones del perfil a la salida con respecto al de entrada. Podemos observar también, como mediante la teoría del equilibrio radial simplificado las variaciones de la velocidad son mayores que mediante la teoría del disco actuador.

Con esta ley, las componentes tangenciales son inversamente proporcionales al radio, con lo cual, como observamos en la figura de los triángulos de velocidades, las componentes tangenciales son mayores en los radios de raíz.



(Figura 4.1.b)

Hay que indicar que en la representación de los triángulos de velocidades todas las magnitudes se encuentran referidas a la velocidad de entrada axial (esto será válido para todas las representaciones de los triángulos de velocidades).



(Figura 4.1.c)

Siguiendo con un estator de ventilador aislado, aplicamos ahora la ley “torbellino fijo”. De nuevo resolvemos mediante las dos teorías.

- **Estator. Torbellino fijo**

$$r_h = 0.4$$

$$r_t = 1$$

$$C_x = 100$$

$$c_{q1} = 0$$

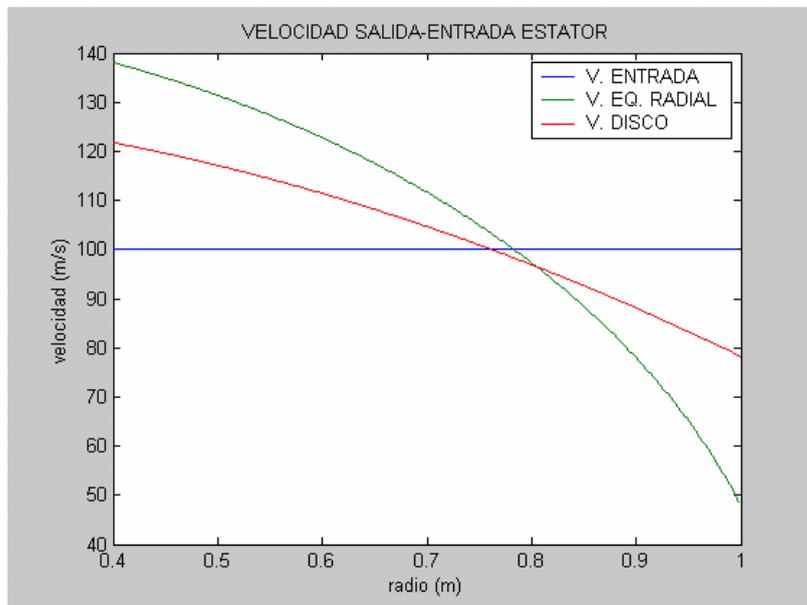
$$c_{q2} = (40, 70, 100)$$

$$x_{LE} = 0.025$$

$$x_{AD} = 0.05$$

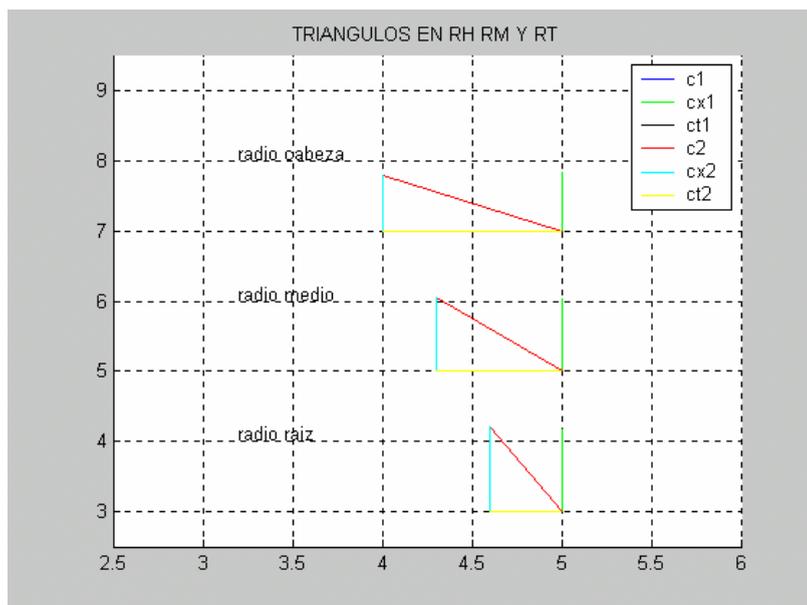
$$x_{TE} = 0.075$$

Ahora nos encontramos con una relación del tipo $c_q = k * r$.



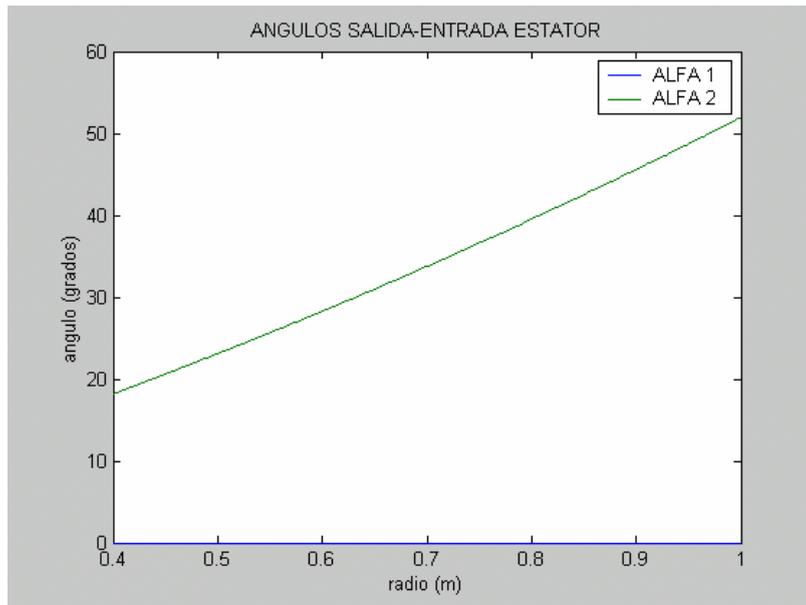
(Figura 4.2.a)

Para esta ley la velocidad axial de salida sufre un cambio brusco respecto a la uniforme de entrada, siendo mayor la variación en los radios superiores. Observamos como mediante el “disco actuador” el salto es menor que con el equilibrio radial simplificado.



(Figura 4.2.b)

Con esta ley, a diferencia de la anterior, la velocidad tangencial de salida crece de forma proporcional al radio, siendo por tanto mayor en los radios superiores. El ángulo de salida, obviamente, también sigue la misma tendencia.

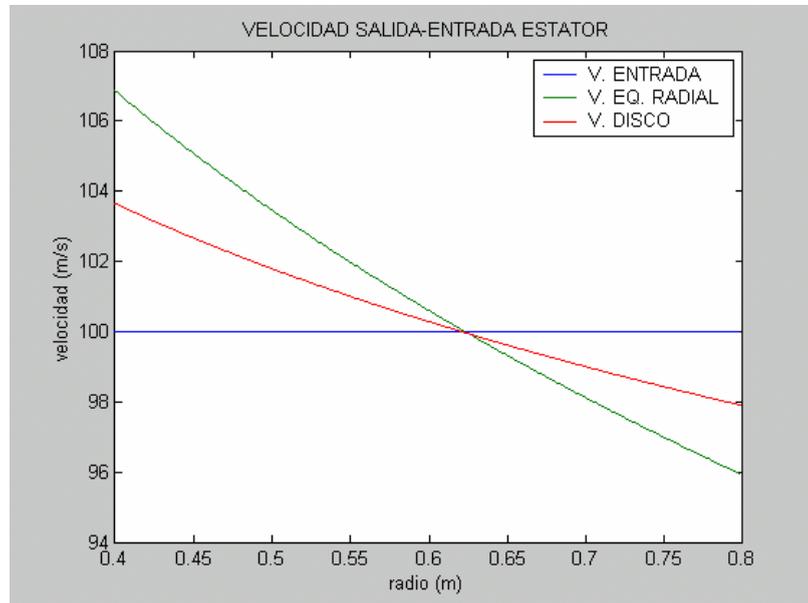


(Figura 4.2.c)

Seguidamente se muestran los resultados de aplicar la ley torsional “velocidad tangencial constante” mediante equilibrio radial simplificado y disco actuador. Como su nombre indica, esta ley mantiene la componente tangencial constante con el radio, $c_q = k$.

- **Estator. Velocidad tangencial constante**

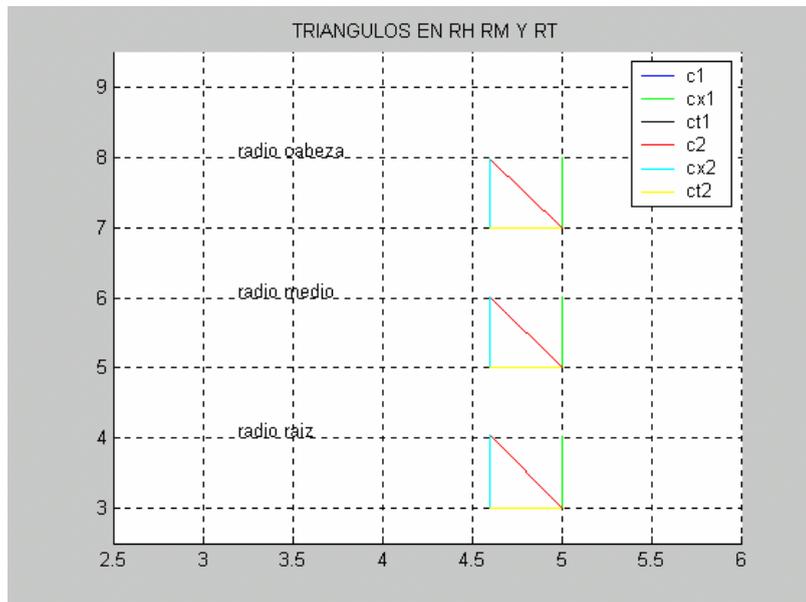
| | | |
|------------------|-----------------------|------------------|
| $r_h = 0.4$ | $r_t = 1$ | $C_x = 100$ |
| $c_{q1} = 0$ | $c_{q2} = (40,40,40)$ | |
| $x_{LE} = 0.025$ | $x_{AD} = 0.05$ | $x_{TE} = 0.075$ |



(Figura 4.3.a)

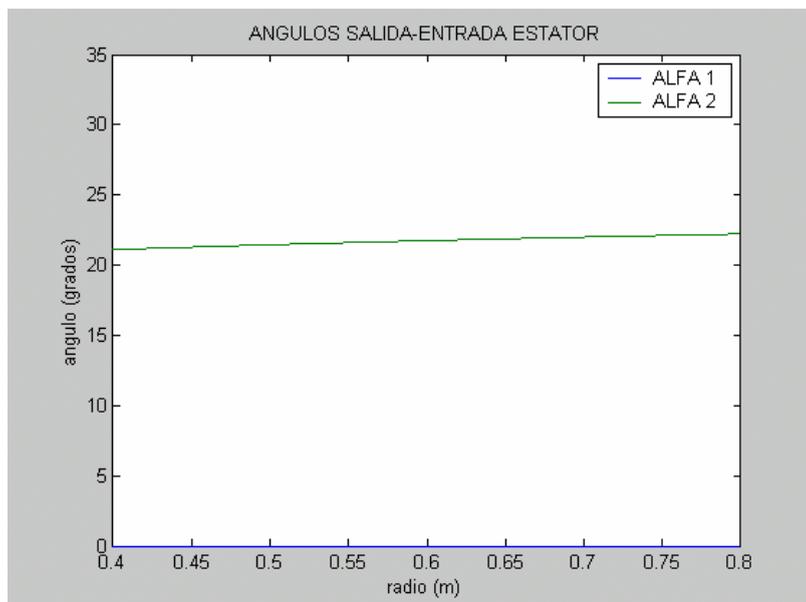
De nuevo se observa un cambio de la velocidad axial a su paso por el estator, siendo de nuevo la variación sufrida menor si la calculamos mediante el disco que mediante el equilibrio radial simplificado. Esta diferencia entre la solución obtenida en los dos métodos será una constante en todos los casos analizados.

Además, si comparamos la figura (4.3.a) con la figura (4.2.a), vemos que con esta ley torsional el cambio sufrido por la velocidad axial es menor que en el caso del torbellino fijo, donde la variación era muy importante.



(Figura 4.3.b)

Como se comentó anteriormente, la velocidad tangencial permanece constante con el radio y por lo tanto, como la variación de la velocidad axial no era muy importante, el ángulo de salida sufrirá pequeñas variaciones con el radio como se observa en la siguiente figura.



(Figura 4.3.c)

Aplicaremos ahora la ley “torbellino mixto”, donde cabe esperar una “mezcla” entre los resultados obtenidos para “torbellino libre” y “torbellino fijo” debido a que estas dos últimas se pueden considerar como casos particulares de la primera.

- **Estator. Torbellino mixto**

$$r_h = 0.3$$

$$r_t = 0.7$$

$$C_x = 250$$

$$c_{q1} = 0$$

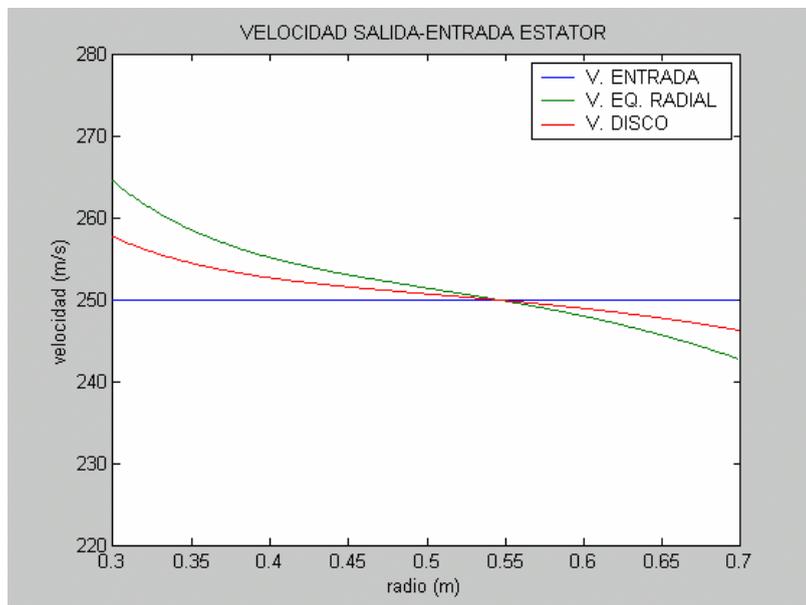
$$c_{q2} = (181.6, 125, 106.4)$$

$$x_{LE} = 0.025$$

$$x_{AD} = 0.05$$

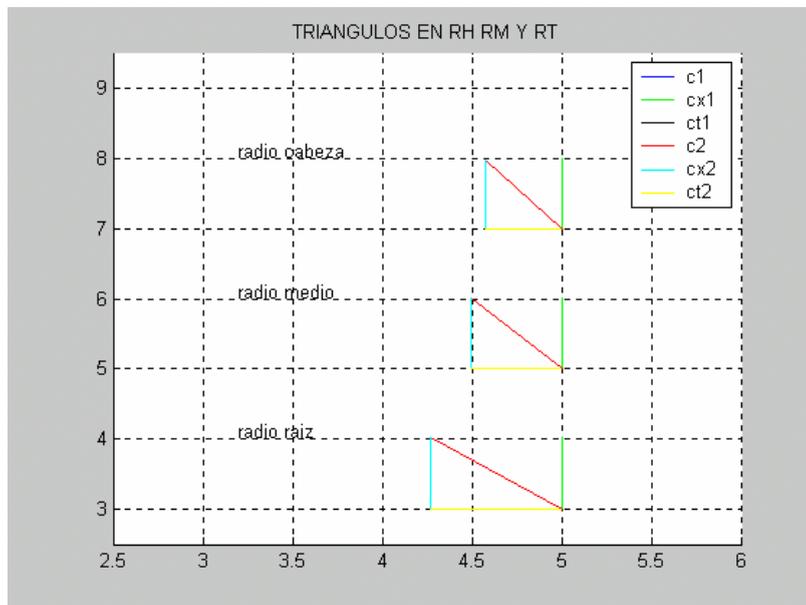
$$x_{TE} = 0.075$$

En este caso, la relación entre la velocidad tangencial y el radio será de la forma $c_q = a * r + b / r$.



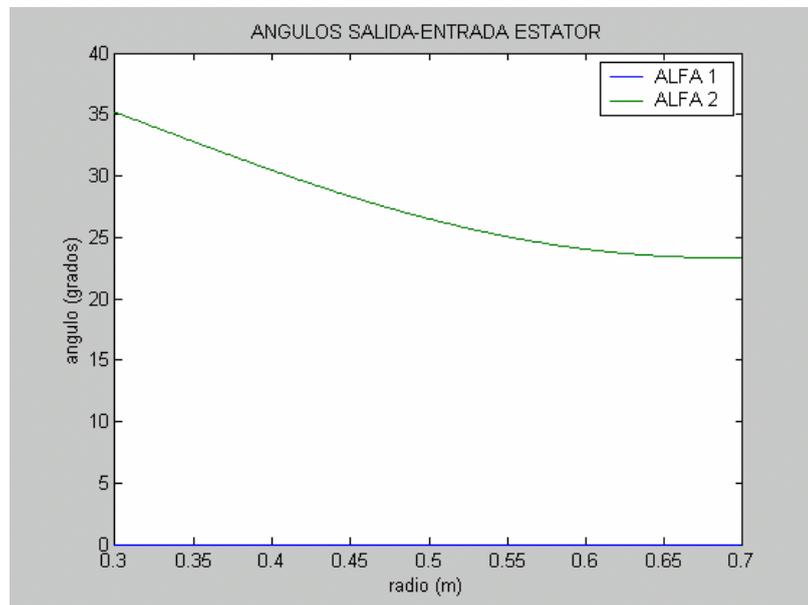
(Figura 4.4.a)

Se observa, como el cambio de la velocidad no es tan brusco como en el “torbellino fijo” ni tan pequeño como en el “torbellino libre”. Hay que hacer notar que el mayor o menor acercamiento a una de las dos leyes dependerá de las constantes que se hayan tomado para definir las velocidades tangenciales.



(Figura 4.4.b)

En este caso, para los valores de las constantes tomados, si observamos la tendencia de las componentes tangenciales, podemos decir que tiende más a la ley torbellino libre que a la ley torbellino fijo.



(Figura 4.4.c)

Una vez analizado el efecto de las diferentes leyes sobre un estator de ventilador aislado veamos cual es el efecto de las mismas sobre un rotor aislado. Comentar que muchos de los efectos vistos sobre el estator se repetirán en el rotor.

- **Rotor. Torbellino libre**

$$r_h = 0.4$$

$$r_t = 0.8$$

$$C_x = 100$$

$$c_{q1} = (50,35,25)$$

$$c_{q2} = (200,133.3,100)$$

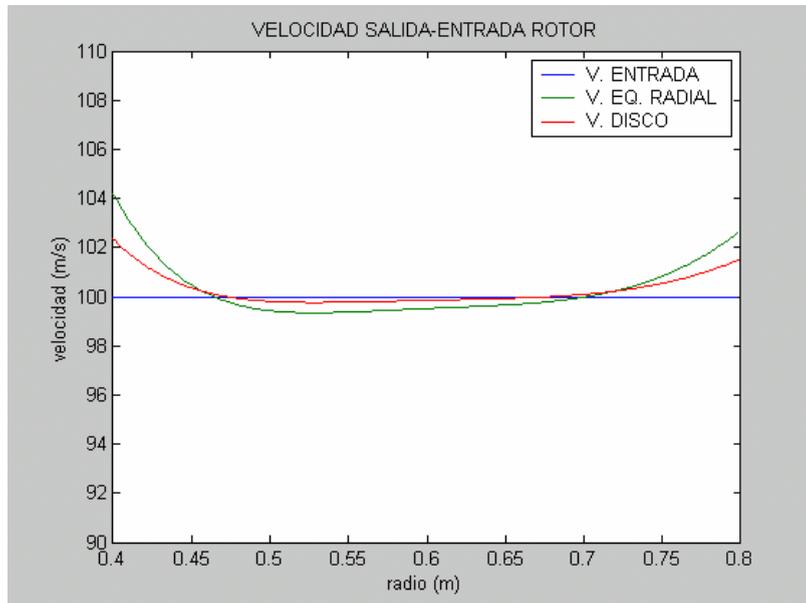
$$\Omega = 242$$

$$x_{LE} = 0.025$$

$$x_{AD} = 0.05$$

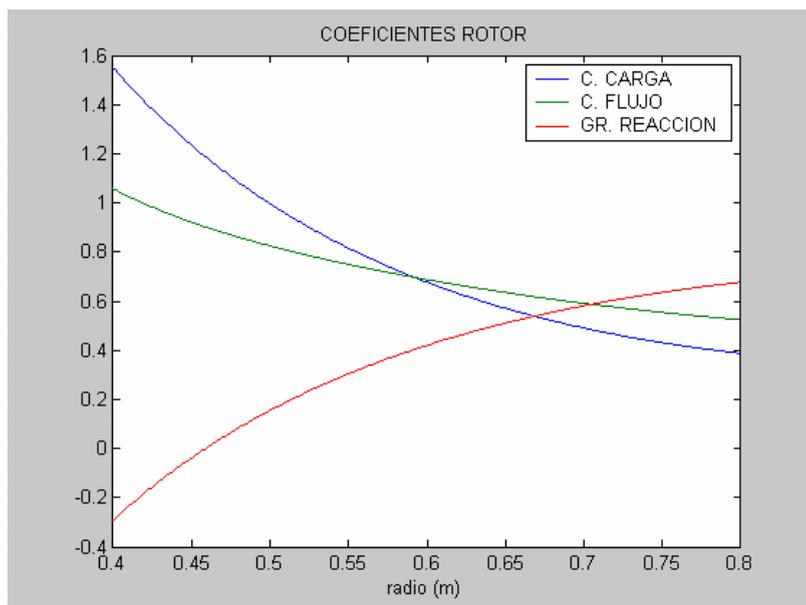
$$x_{TE} = 0.075$$

En este caso la ley torsional viene expresada de la forma $c_q = k / r$.



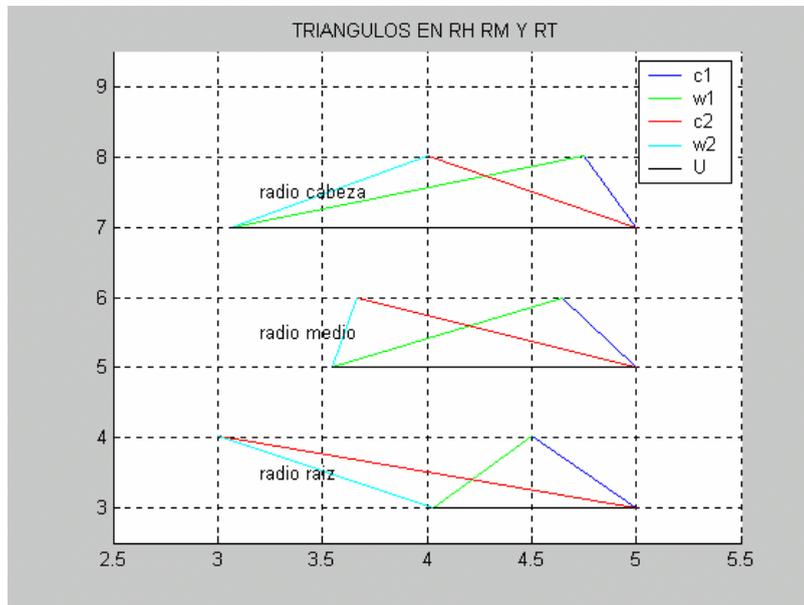
(Figura 4.5.a)

De nuevo se observa, al igual que en el estator (figura 4.1.a), como la velocidad axial de salida sufre pequeñas variaciones respecto a la velocidad de entrada, siendo mayor el cambio experimentado al resolver mediante la teoría del equilibrio radial simplificado.



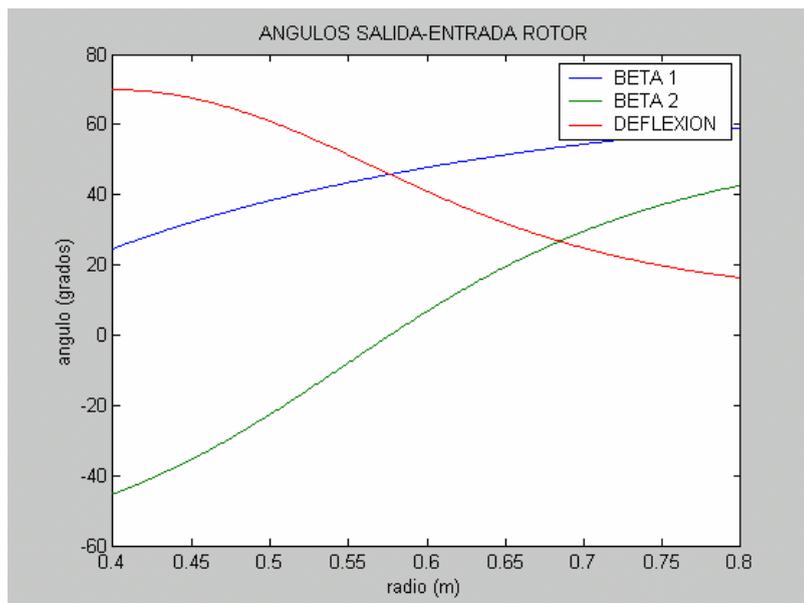
(Figura 4.5.b)

Fijándonos en los coeficientes, vemos como el grado de reacción se hace negativo en la zona del radio de raíz creciendo después de forma brusca hacia los radios de cabeza.



(Figura 4.5.c)

Se observa, tanto en los triángulos como en la gráfica de los ángulos, como en el radio de raíz el ángulo de salida es muy negativo, lo cual lleva a una gran deflexión en esa zona.

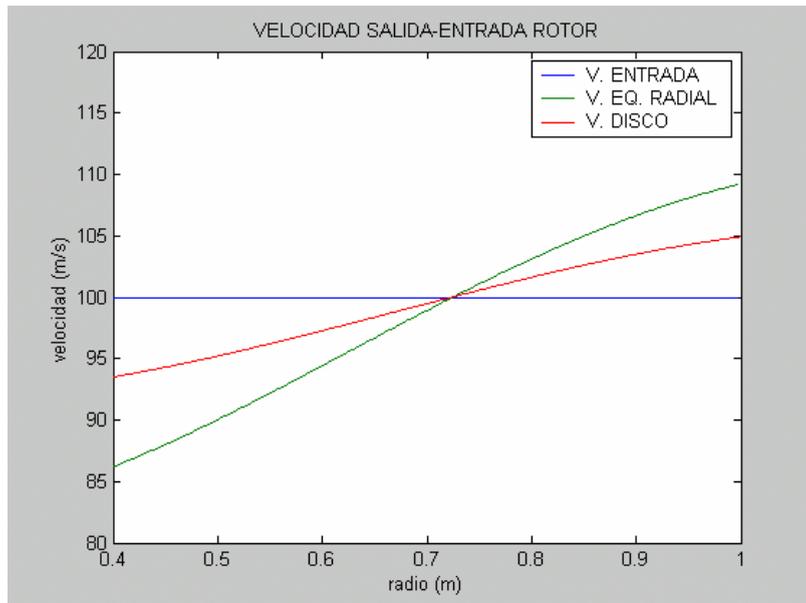


(Figura 4.5.d)

- **Rotor. Torbellino fijo**

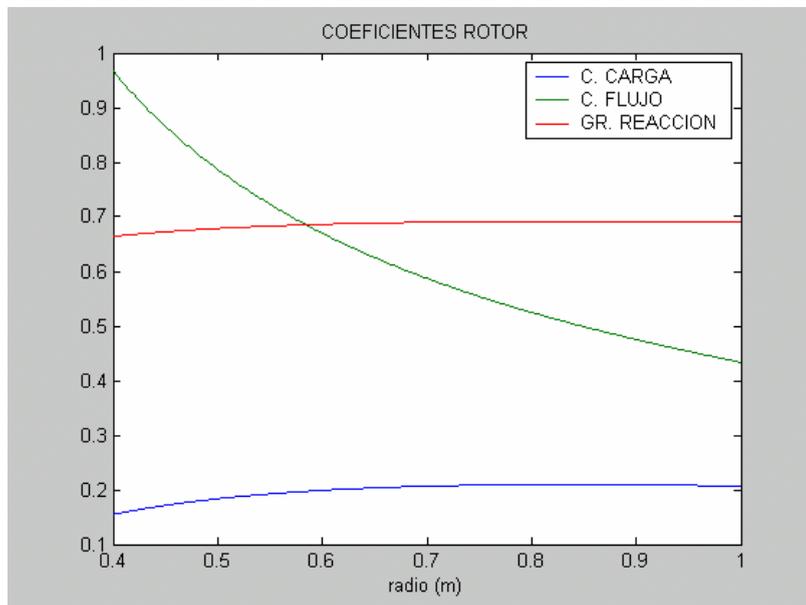
| | | |
|-----------------------|------------------------|------------------|
| $r_h = 0.4$ | $r_t = 1$ | $C_x = 100$ |
| $c_{q1} = (25,35,50)$ | $c_{q2} = (40,70,100)$ | $\Omega = 242$ |
| $x_{LE} = 0.025$ | $x_{AD} = 0.05$ | $x_{TE} = 0.075$ |

La relación para esta ley será $c_q = k * r$.



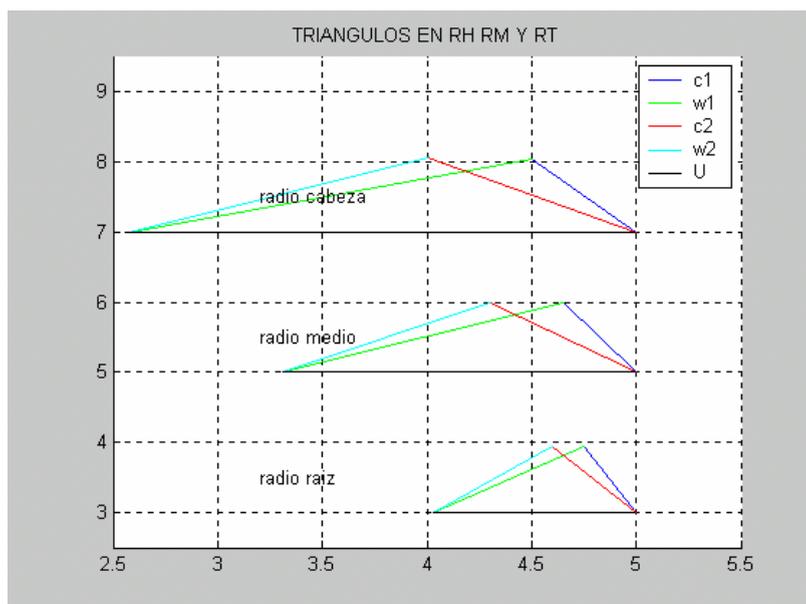
(Figura 4.6.a)

Vemos como con esta ley se produce de nuevo un cambio brusco en el perfil de velocidades con el radio, aunque a diferencia con el estator (figura 4.2.a), el perfil es a la inversa, creciendo desde el radio de raíz al de cabeza.

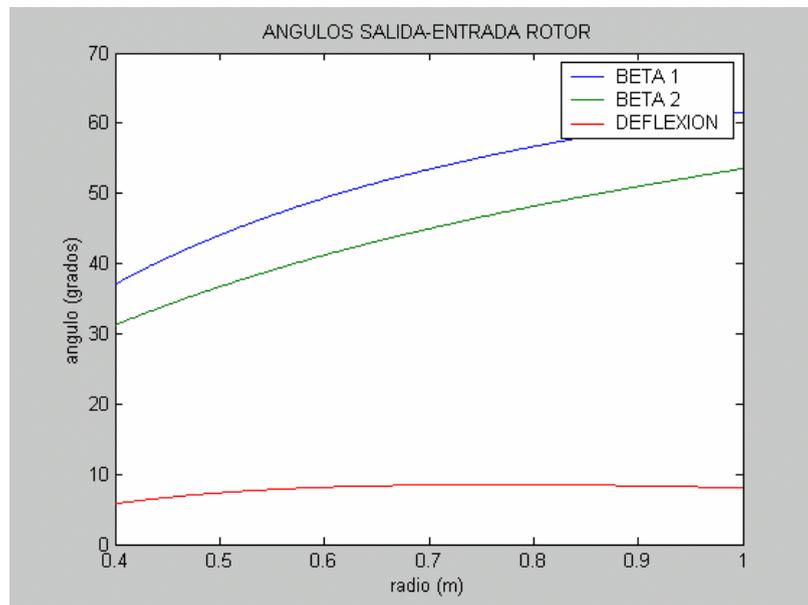


(Figura 4.6.b)

Hay que reseñar que tanto el grado de reacción como el coeficiente de carga se mantienen en valores prácticamente constantes, sufriendo sólo una pequeña variación con el radio. Como veremos en las siguientes aplicaciones de “torbellino fijo”, esto será así para todas las aplicaciones de esta ley.



(Figura 4.6.c)



(Figura 4.6.d)

Vemos como la deflexión es prácticamente constante con el radio, adoptando además valores muy pequeños, lo cual es un factor importante.

Esta distribución radial de los ángulos podría corresponderse con una geometría de los álabes como se muestra en la siguiente figura, donde se encontrarían representados los álabes correspondientes a los radios $r_h = 0.4$, $r = 0.53$ y $r_t = 1$.



(Figura 4.6.e)

Examinamos ahora un rotor aislado mediante la ley torsional “velocidad tangencial constante”, $c_q = k$.

- **Rotor. Velocidad tangencial constante**

$$r_h = 0.4$$

$$r_t = 0.8$$

$$C_x = 100$$

$$c_{q1} = (15,15,15)$$

$$c_{q2} = (40,40,40)$$

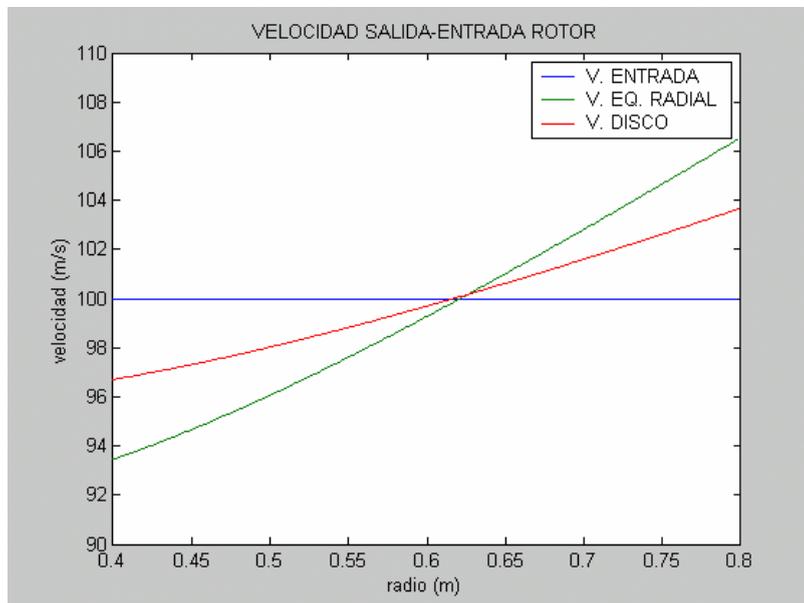
$$\Omega = 242$$

$$x_{LE} = 0.025$$

$$x_{AD} = 0.05$$

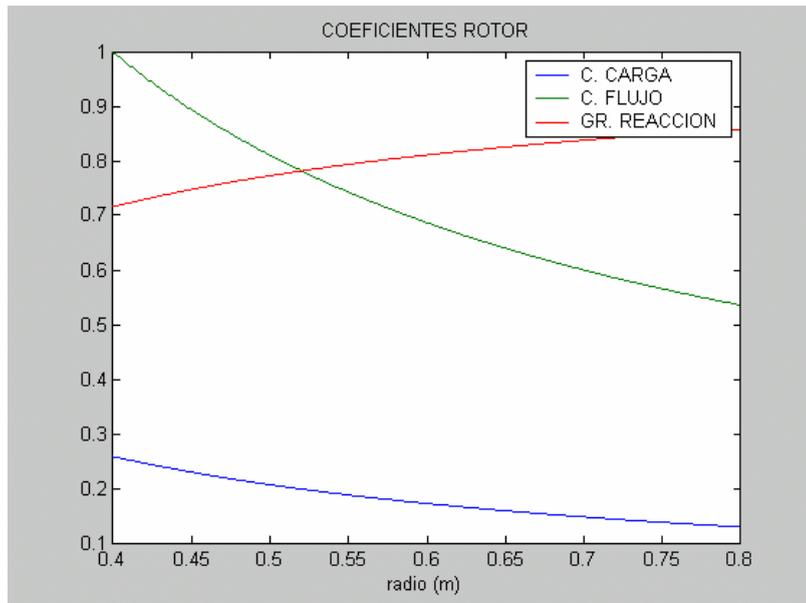
$$x_{TE} = 0.075$$

Si observamos la figura del perfil de velocidades (4.7.a), de nuevo volvemos a ver como se produce un cambio, aunque suave, en el perfil de las velocidades y además, al igual que ocurría en la ley anterior, el perfil se invierte con el radio respecto al estator (figura 4.3.a).

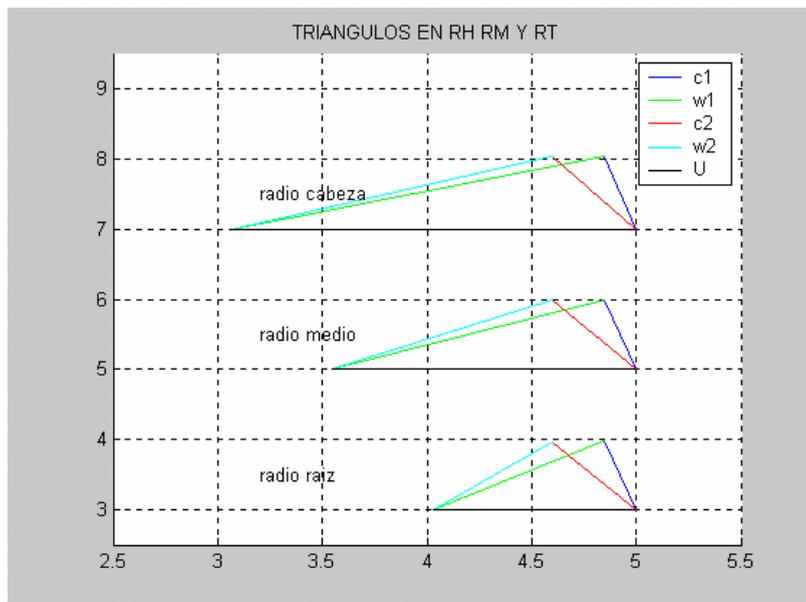


(Figura 4.7.a)

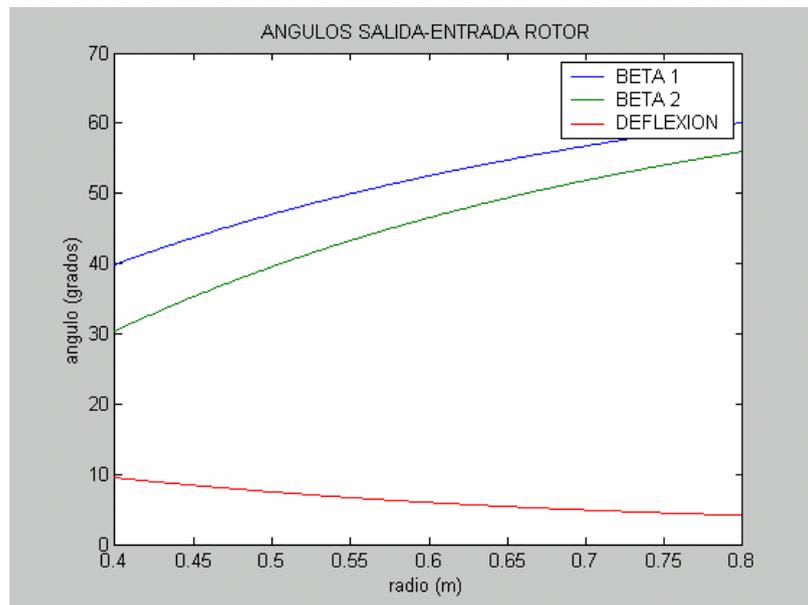
Observando la figura de los coeficientes, comprobamos que con esta ley no se mantiene constante ni el grado de reacción ni el coeficiente de carga, aunque la variación es "suave".



(Figura 4.7.b)



(Figura 4.7.c)



(Figura 4.7.d)

Podemos notar que en este caso, de nuevo se obtiene una deflexión prácticamente constante con el radio y alcanzando valores muy bajos.

De nuevo podemos representar de forma “simbólica” una geometría de los álabes que se corresponda con la distribución de los ángulos. Estarían representados tres radios que podrían ser el radio de raíz, el radio medio y el radio de cabeza.



(Figura 4.7.e)

Analizamos el caso de un rotor aislado siguiendo la ley torbellino mixto, con lo cual nos encontramos con una relación de la forma $c_q = a * r + b / r$.

- **Rotor. Torbellino mixto**

$r_h = 0.4$

$r_t = 1$

$C_x = 100$

$c_{q1} = (10,8,9)$

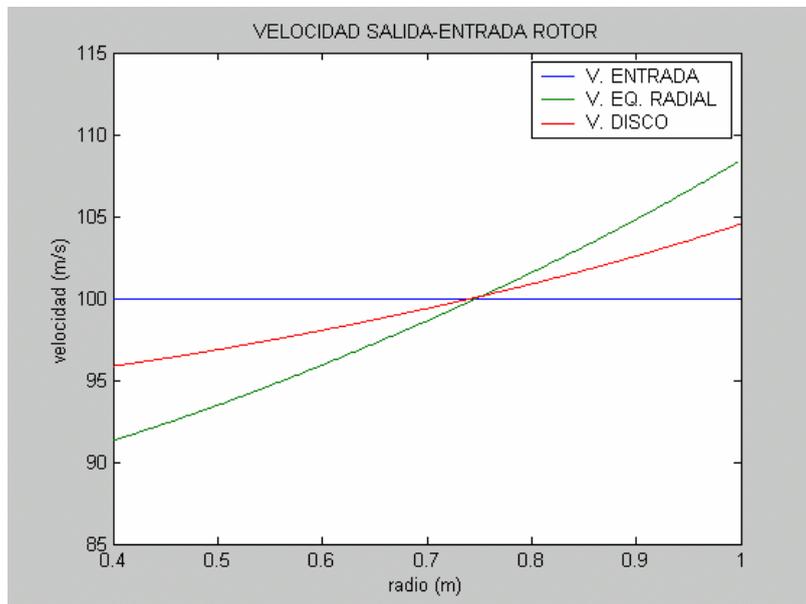
$c_{q2} = (32,28.3,30)$

$\Omega = 200$

$x_{LE} = 0.025$

$x_{AD} = 0.05$

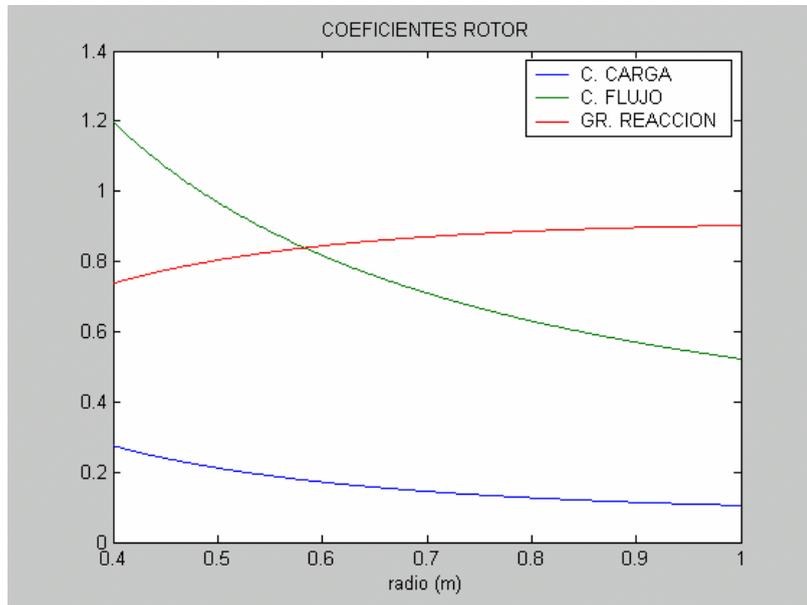
$x_{TE} = 0.075$



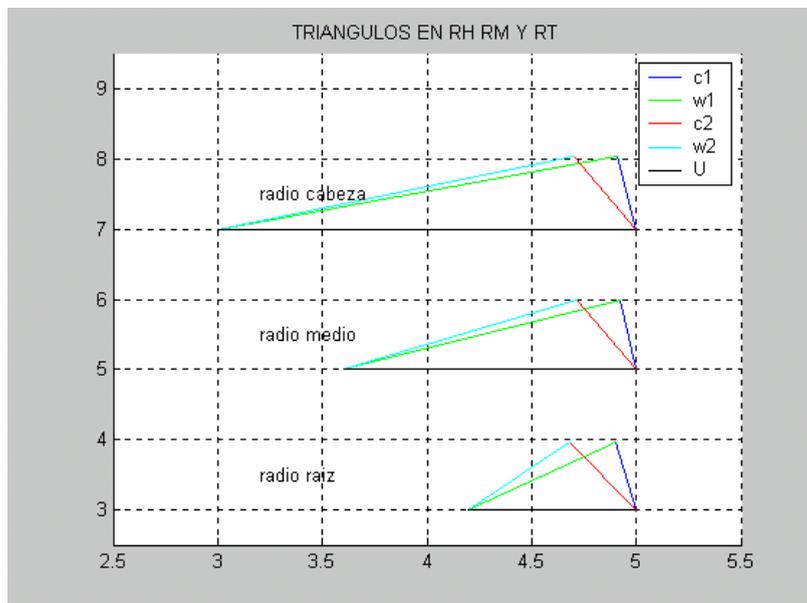
(Figura 4.8.a)

Fijándonos en la figura de la velocidad axial vemos como se produce una variación radial de la velocidad y , de nuevo, de forma inversa a como se producía en el estator (figura 4.4.a). En este caso, la velocidad crece con el radio.

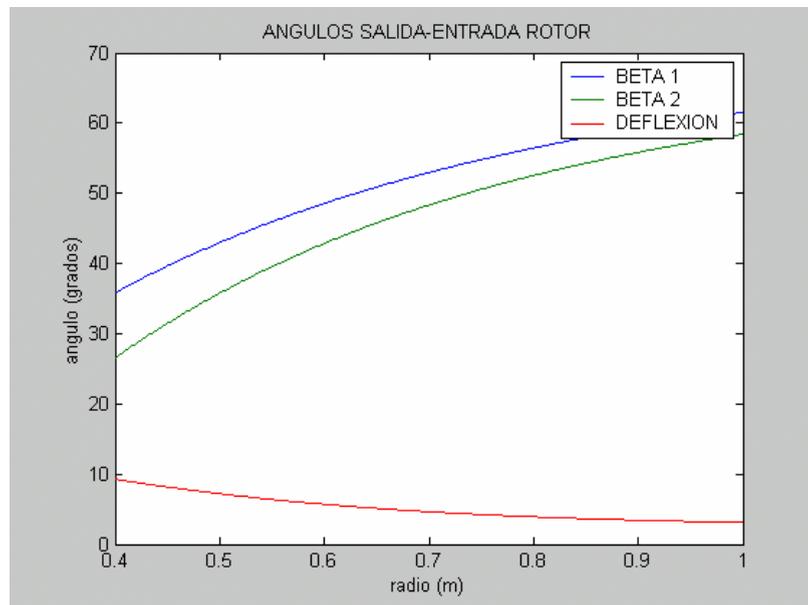
Si a la variación sufrida por la velocidad axial (importante), le añadimos el hecho de que tanto el coeficiente de carga como el grado de reacción sufren variaciones moderadas con el radio (figura 4.8.b), podemos concluir que en este caso se tiende mas a la ley torbellino fijo que a la de torbellino libre (recordar que la ley torbellino mixto se puede considerar como una mezcla de ambas).



(Figura 4.8.b)



(Figura 4.8.c)



(Figura 4.8.d)

Como factor importante, nos volvemos a encontrar de nuevo con una deflexión poco variable con el radio y adoptando valores pequeños.

Al igual que en casos anteriores podemos representar una geometría de los álabes que se corresponda con los ángulos que nos encontramos.



(Figura 4.8.e)

- **Rotor. Trabajo específico constante**

$$r_h = 0.4$$

$$r_t = 1$$

$$C_x = 100$$

$$c_{q1} = (10,40,70)$$

$$c_{q2} = (86.6,100,125)$$

$$\Omega = 175$$

$$x_{LE} = 0.025$$

$$x_{AD} = 0.05$$

$$x_{TE} = 0.075$$

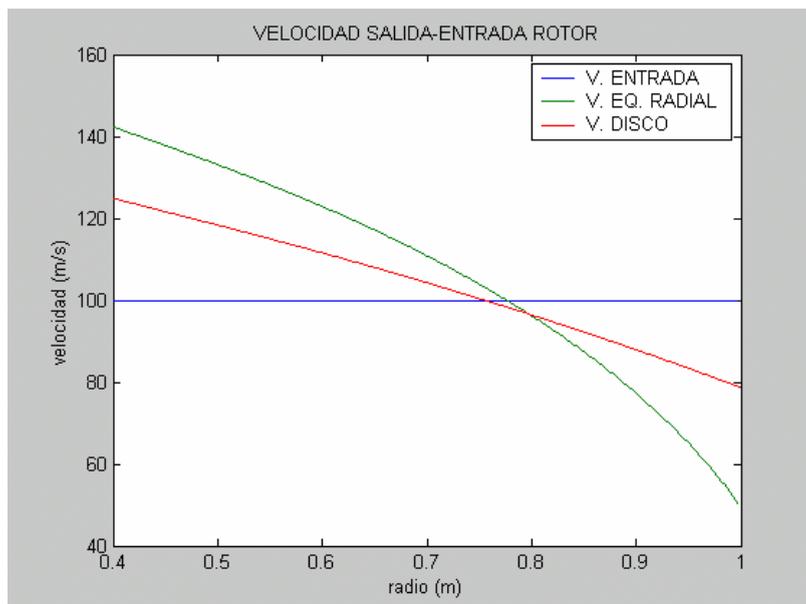
Si examinamos ahora un rotor aislado con la ley trabajo específico constante, nos encontramos con unas relaciones entre la velocidad tangencial y el radio tanto a la entrada como a la salida del mismo, las cuales se encuentran además relacionadas entre sí. Las relaciones serán de la forma:

$$c_{q1} = -\frac{a}{r} + b * r$$

Entrada rotor

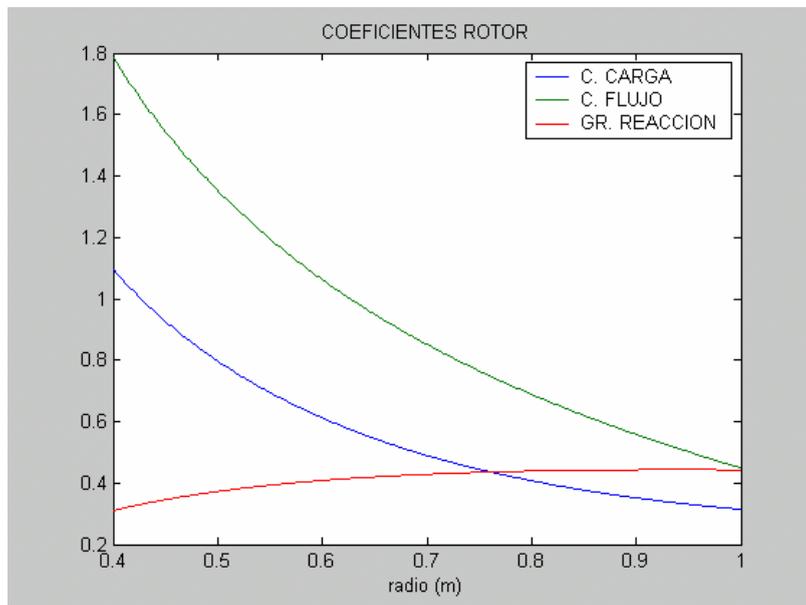
$$c_{q2} = \frac{a}{r} + b * r$$

Salida rotor



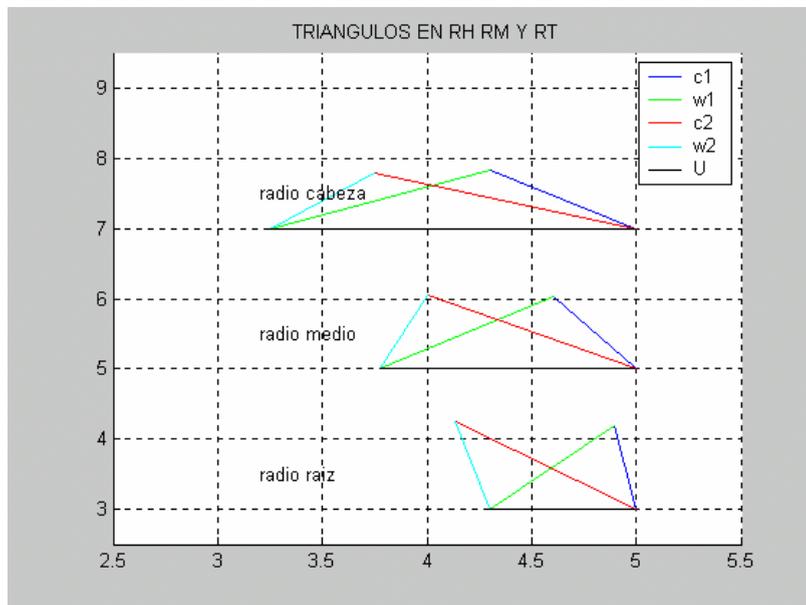
(Figura 4.9.a)

Nos encontramos con esta ley, como el perfil de la velocidad axial a la salida sufre importantes variaciones con respecto al perfil de entrada. Se observa además, como la tendencia del perfil con el radio, se produce de forma inversa a como se producía para rotor aislado en los casos anteriores (figuras 4.6.a, 4.7.a. y 4.8.a).



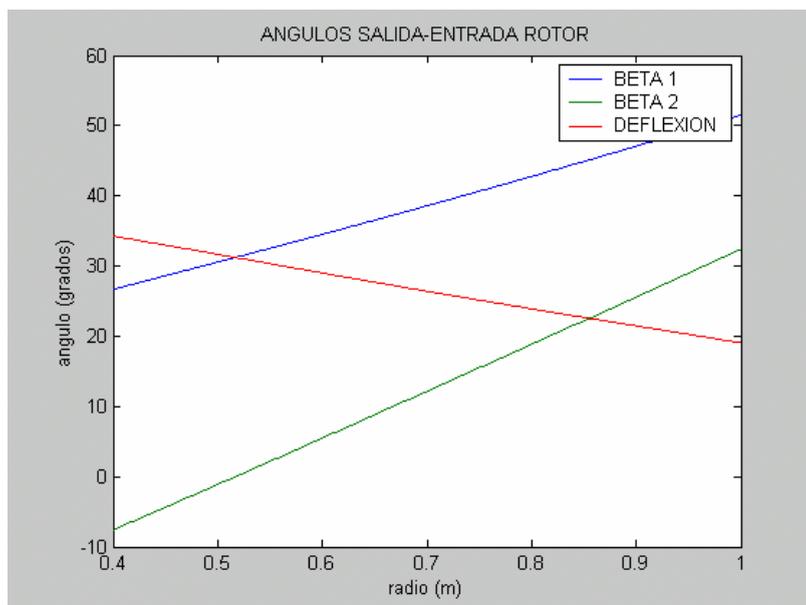
(Figura 4.9.b)

En este caso, el grado de reacción se mantiene prácticamente constante aunque a diferencia del torbellino fijo no ocurre lo mismo con el coeficiente de carga, que sufre una gran variación con el radio.



(Figura 4.9.c)

Vemos seguidamente, como aunque la variación de la deflexión con el radio no es muy elevada, si toma valores mayores que en los casos anteriores.



(Figura 4.9.d)

Una vez examinado los resultados sobre escalonamientos de ventilador aislados, vamos a aplicar las teorías estudiadas a escalonamientos de ventilador múltiples. Para ello se considerará que todos los escalonamientos obedecen a la misma ley torsional seleccionada.

Examinaremos primero la ley torbellino libre, $c_q = k / r$. Se realizará el mismo ejemplo para dos, tres y cuatro escalonamientos para ver la evolución fundamentalmente del perfil de la velocidad axial.

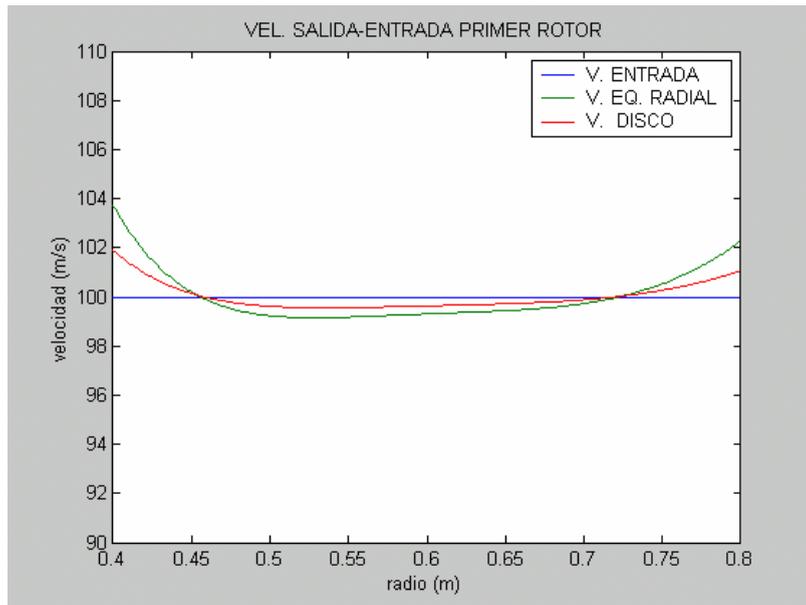
- **Dos escalonamientos. Torbellino libre**

$$\begin{array}{lll}
 r_h = 0.4 & r_t = 0.8 & C_x = 100 \\
 c_{qE} = (50,35,25) & c_{qR} = (200,133.3,100) & \Omega = 242 \\
 x_{LE} = (0,0.075) & x_{AD} = (0.025,0.1) & x_{TE} = (0.05,0.125)
 \end{array}$$

En primer lugar, inspeccionando las figuras de la velocidad axial que se muestran a continuación, se puede apreciar que en todos los elementos las variaciones que sufre la velocidad de salida respecto a la de entrada son pequeñas. Este resultado también se pudo comprobar al examinar elementos aislados (figuras 4.1.a y 4.5.a).

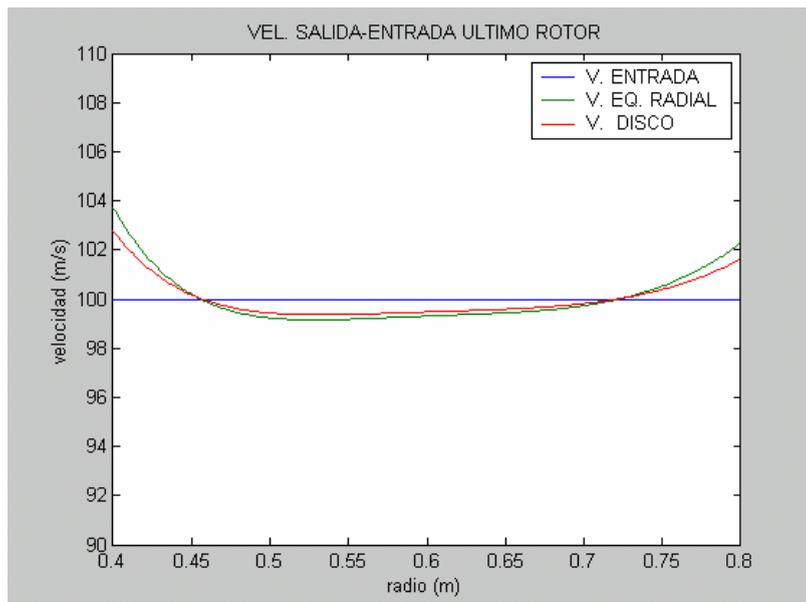
Nuevamente, como en todos los casos mostrados, las variaciones alcanzadas mediante el equilibrio radial simplificado son mayores que las alcanzadas resolviendo por la teoría del disco actuador.

Como hecho importante hay que resaltar que la velocidad hallada mediante el equilibrio radial no variará de un escalonamiento a otro. Es decir, el perfil de la velocidad axial obtenido en el primer estator se mantendrá para todos los demás estator. De igual forma ocurrirá en el rotor. Por tanto, el perfil de la velocidad axial no se ve influenciado por el número de escalonamientos. Sin embargo, esto no ocurrirá al resolver mediante el disco actuador, donde el perfil si irá variando en los sucesivos escalonamientos. Esta variación se irá analizando de forma más detallada con las siguientes figuras.

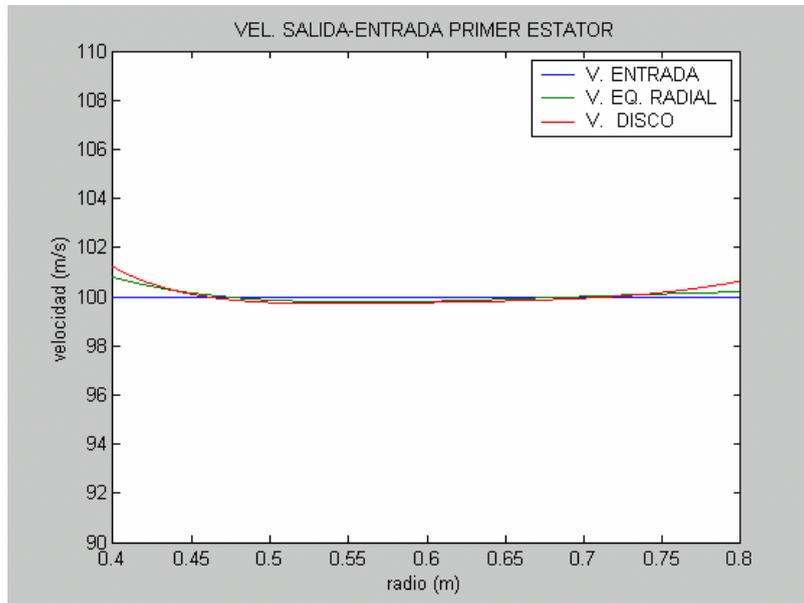


(Figura 4.10.a)

Si nos fijamos en los perfiles de salida del primer y último rotor, la velocidad hallada mediante el disco actuador varia de uno a otro y además se puede apreciar como el perfil va tendiendo hacia la solución alcanzada mediante el equilibrio radial. Vemos como en el rotor de salida la velocidad del disco difiere menos de la del equilibrio radial que en el rotor de entrada. Hay que notar, no obstante, que la variación entre el primer rotor y el segundo es muy pequeña.

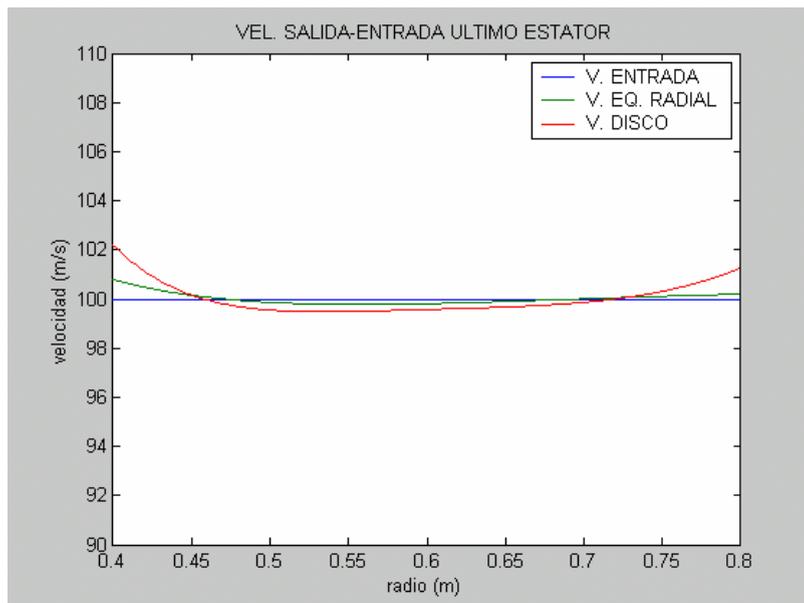


(Figura 4.10.b)



(Figura 4.10.c)

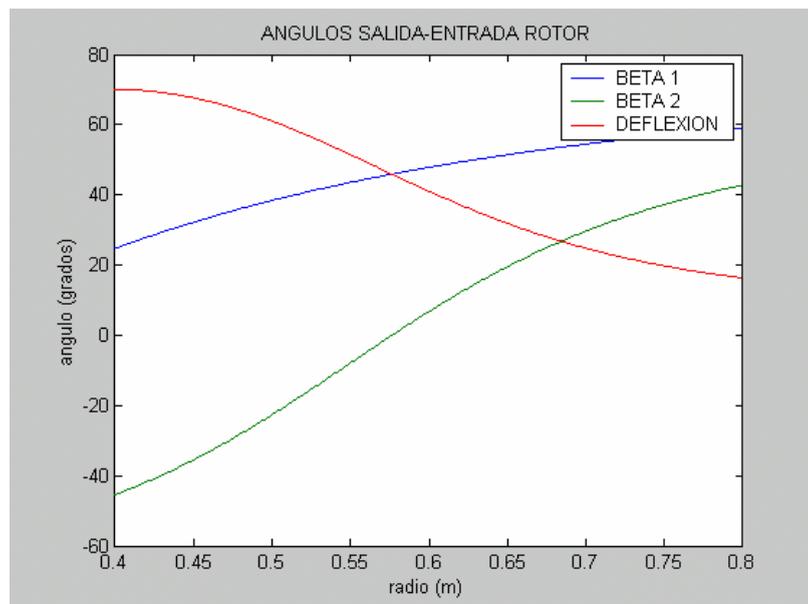
En el estator, por el contrario, sucede algo diferente. Primero hay que notar que, a diferencia de todos los casos mostrados anteriormente, las variaciones del “disco” en son más acusadas que las del “equilibrio radial”, debido a la interferencia de los distintos elementos.



(Figura 4.10.d)

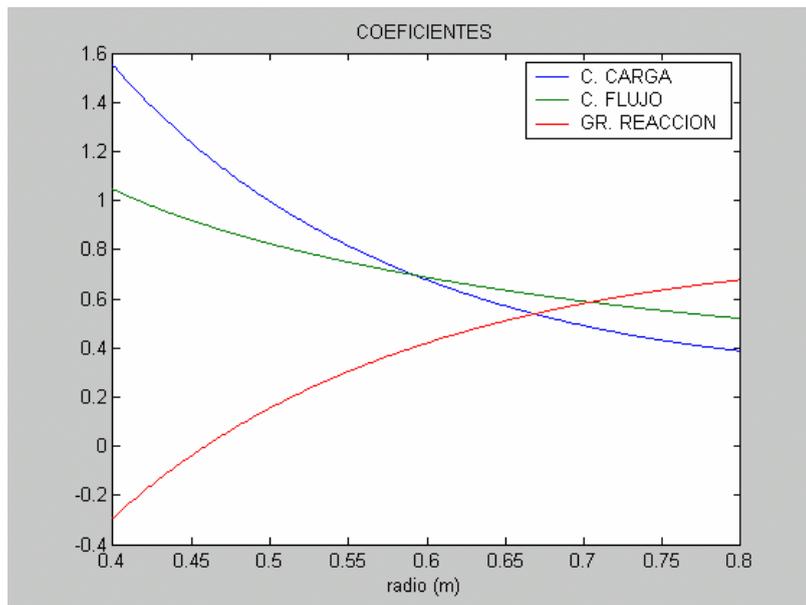
En cuanto a la evolución del perfil, en el estator difiere de la seguida en el rotor. Ahora se observa que a la entrada, la velocidad difiere algo del equilibrio radial, distanciándose algo más de la misma en el estator de salida.

También se puede ver (se observará mejor con otras leyes) como al final, las soluciones del disco actuador tienden hacia un mismo valor tanto en rotor como estator (figuras 4.10.b y 4.10.d), quedando limitadas por cada lado por las soluciones del equilibrio radial (“encerradas”). Esto lo podremos observar en los sucesivos ejemplos.



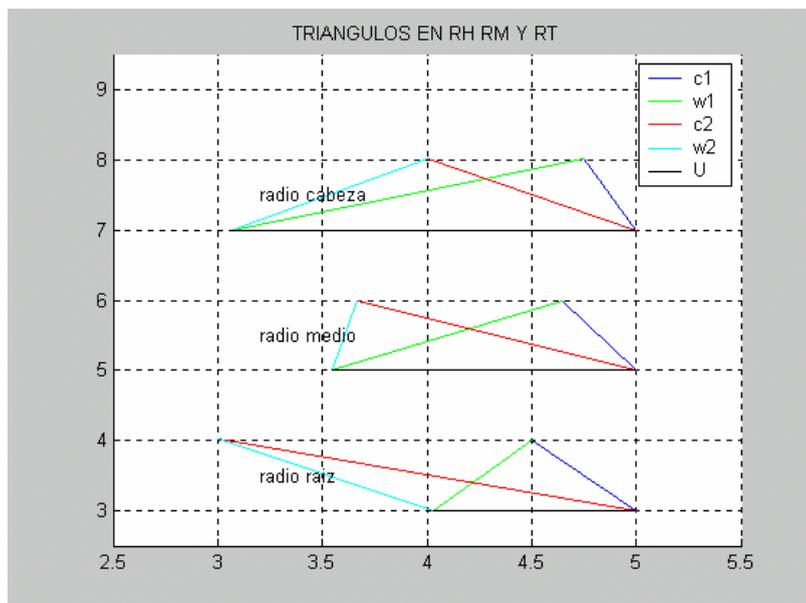
(Figura 4.10.e)

Por otro lado vemos como la deflexión es muy variable con el radio, lo cual no es un factor muy correcto, alcanzando incluso en los radios de raíz valores elevados.



(Figura 4.10.f)

Por otra parte, se observa como los demás parámetros siguen las indicaciones que se comentaron cuando se trato la misma ley en un escalonamiento aislado.

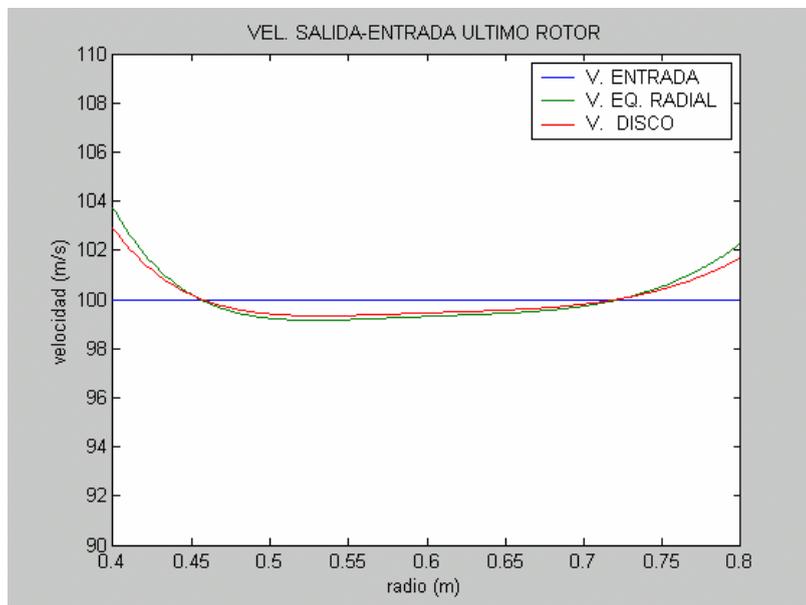


(Figura 4.10.g)

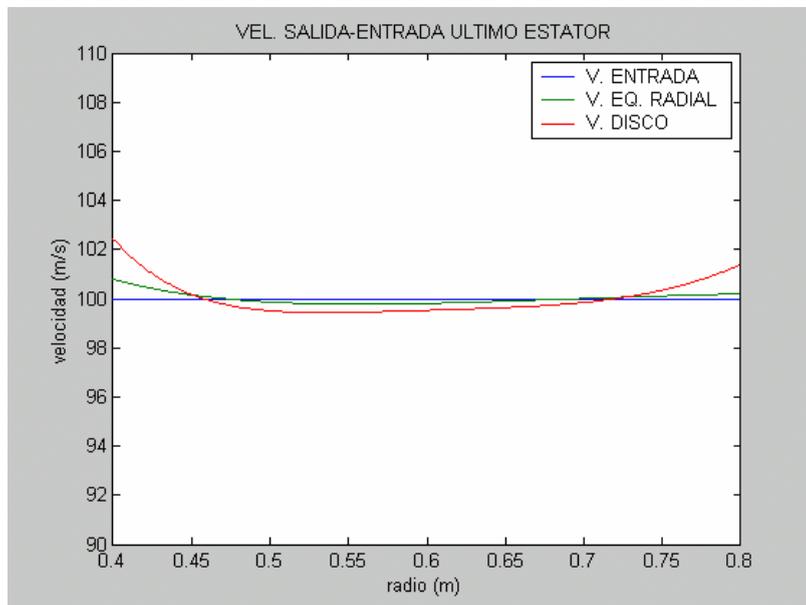
Vamos a examinar ahora el mismo ejemplo pero para tres y cuatro escalonamientos, centrándonos en la evolución que sufre la velocidad.

- **Tres escalonamientos. Torbellino libre**

$$x_{LE} = (0,0.075,0.15) \quad x_{AD} = (0.025,0.1,0.175) \quad x_{TE} = (0.05,0.125,0.2)$$



(Figura 4.11.a)

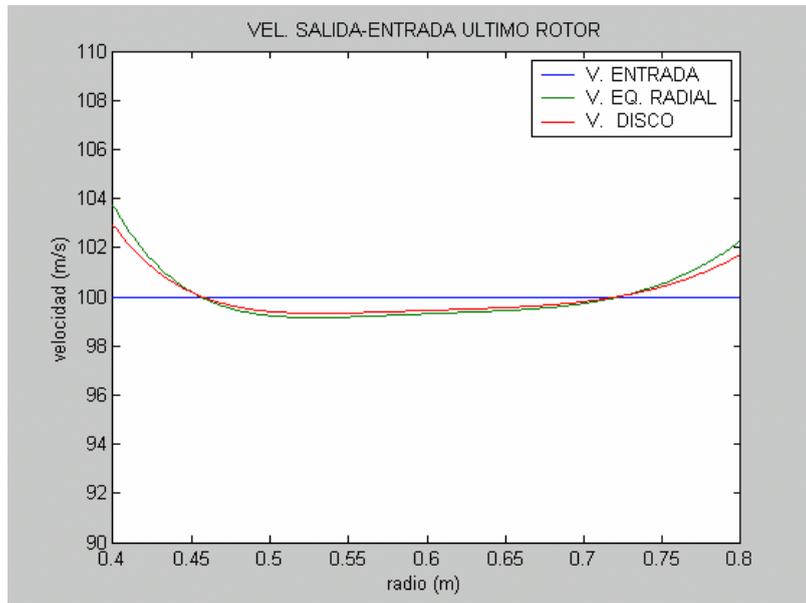


(Figura 4.11.b)

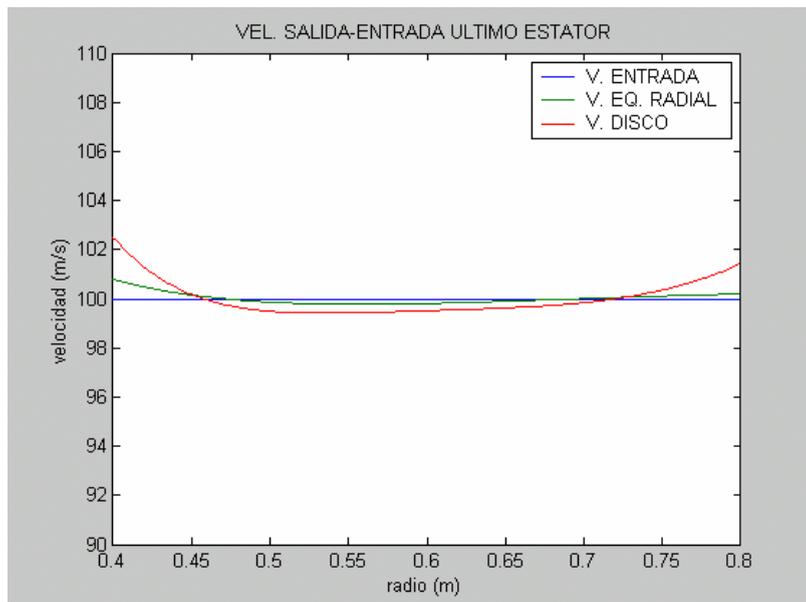
Si nos fijamos en la figuras y comparándolas con las figuras anteriores (4.10.b y 4.10.d), vemos que las salidas de ahora, con tres escalonamientos, sufren una pequeña variación con respecto al caso de dos escalonamientos, siguiendo la tendencia que comentamos anteriormente. Como punto importante hay que hacer notar que el cambio sufrido es muy pequeño y menor que el sufrido en el primer escalonamiento.

- **Cuatro escalonamientos. Torbellino libre**

$$x_{LE} = (0,0.075,0.15,0.225) \quad x_{AD} = (0.025,0.1,0.175,0.25) \quad x_{TE} = (0.05,0.125,0.2,0.275)$$



(Figura 4.12.a)



(Figura 4.12.b)

De nuevo se observa, comparando con las figuras (4.11.a y 4.11.b), que la variación sufrida entre tres y cuatro escalonamientos es mínima y además, ambas soluciones (estator y rotor) del disco actuador tienden a un mismo valor.

Se puede decir por tanto (aunque se confirmará con los siguientes ejemplos) que salvo el primer escalonamiento, donde hay un salto apreciable, los demás escalonamientos apenas difieren en sus soluciones por lo que se podrían tomar los mismos perfiles de velocidades para los mismos.

De igual manera, los perfiles para rotor y estator se pueden considerar similares mediante el disco actuador, no así mediante el equilibrio radial, como se ha podido observar.

Vamos a examinar ahora varios escalonamientos con la ley trabajo específico constante.

- **Dos escalonamientos. Trabajo específico constante**

$$r_h = 0.3$$

$$r_t = 0.7$$

$$C_x = 100$$

$$c_{qE} = (6.3, 55, 94)$$

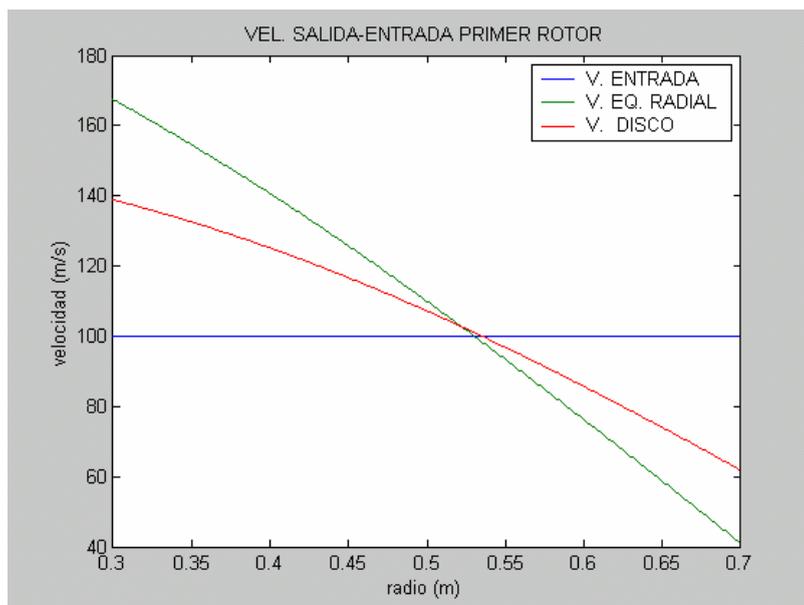
$$c_{qR} = (89.6, 105, 130)$$

$$\Omega = 250$$

$$x_{LE} = (0, 0.075)$$

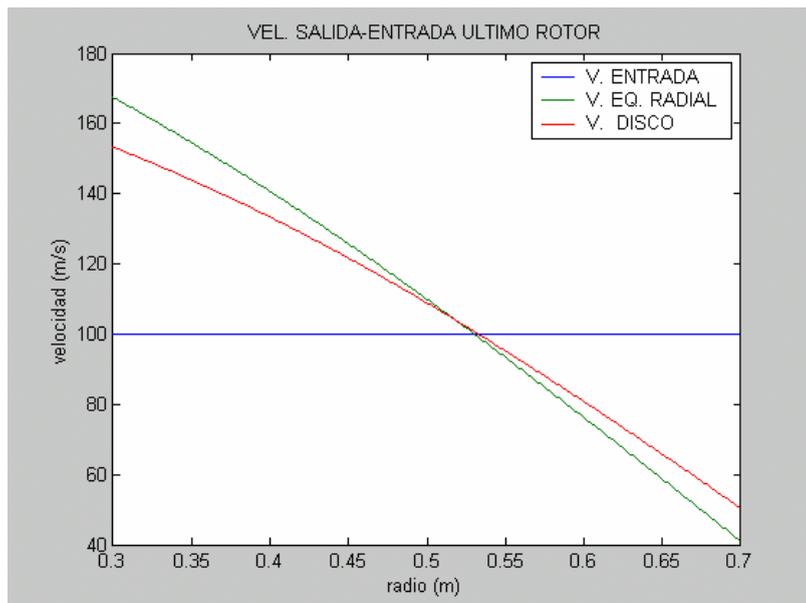
$$x_{AD} = (0.025, 0.1)$$

$$x_{TE} = (0.05, 0.125)$$

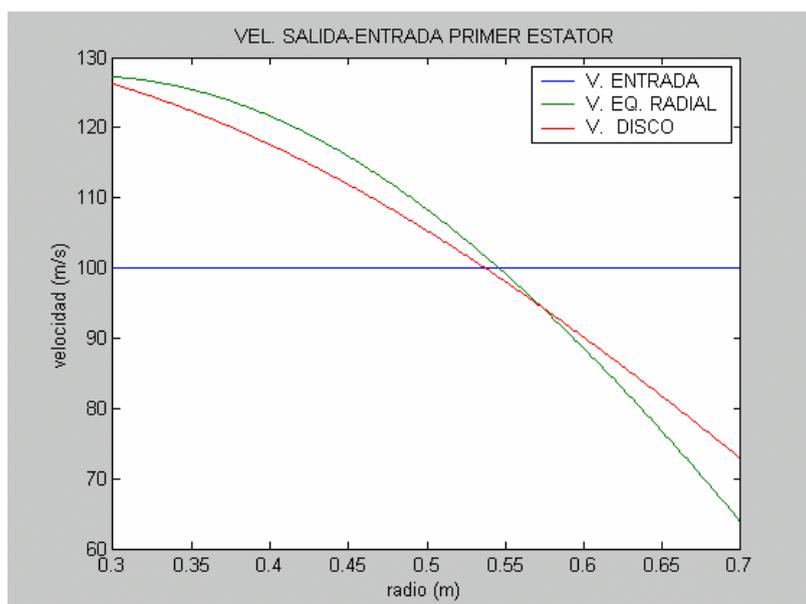


(Figura 4.13.a)

De nuevo se observa la misma tendencia. En el rotor, el perfil del disco “tiende” hacia el del equilibrio radial, aunque como veremos posteriormente casi toda la variación se produce únicamente entre este primer y segundo escalonamiento. Se aprecia además, al igual que al tratar un rotor aislado (figura 4.9.a), como con esta ley la variación radial de la velocidad axial es muy acusada.

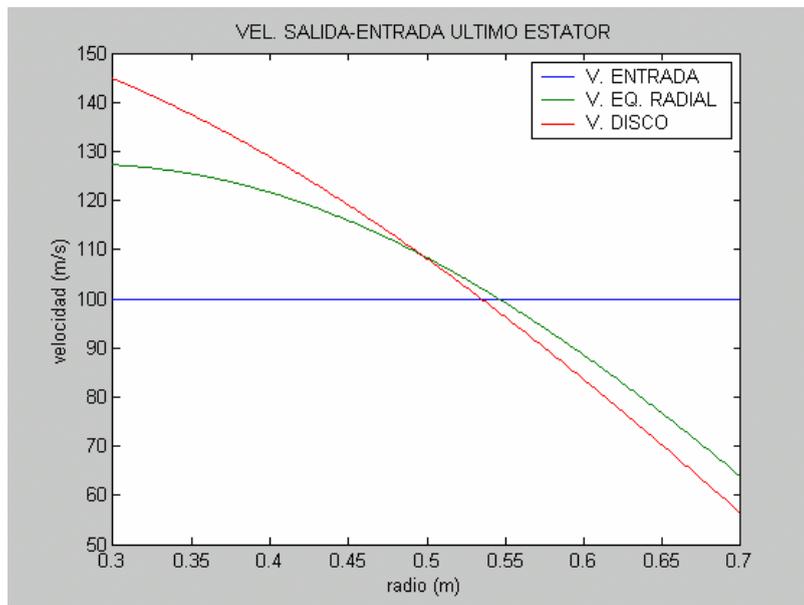


(Figura 4.13.b)



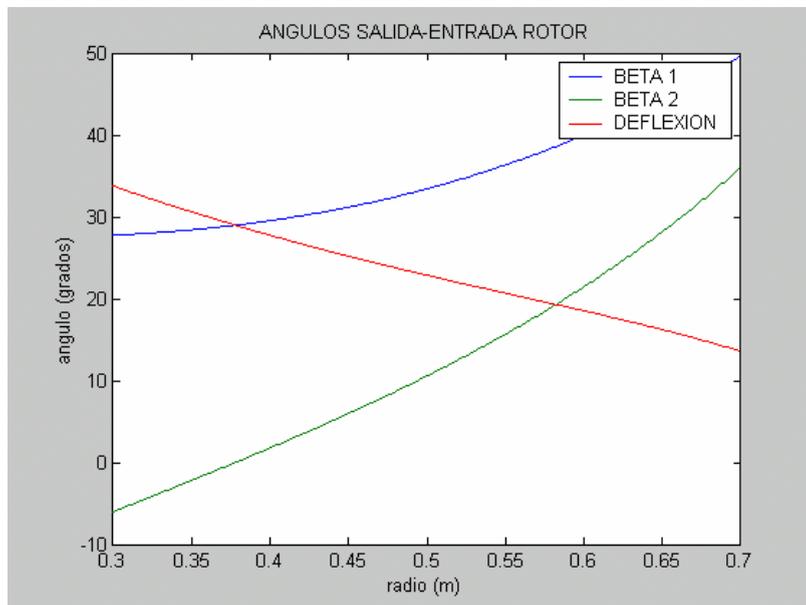
(Figura 4.13.c)

La velocidad en el estator, vemos como también en este primer escalonamiento sufre una variación apreciable, no siguiendo en este caso a la del equilibrio radial. Al igual que en caso anterior, la solución en el estator del disco actuador se encuentra “por encima” de la del equilibrio radial.



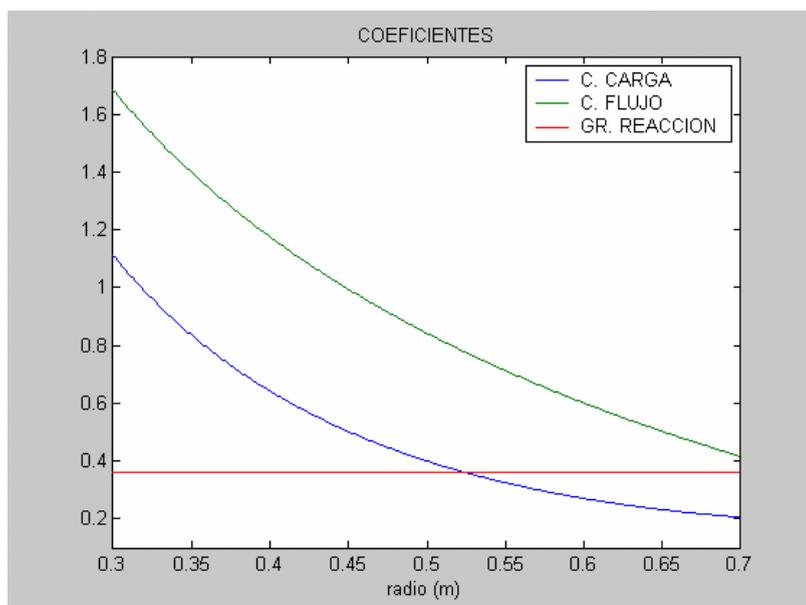
(Figura 4.13.d)

Si comparamos las soluciones del último rotor y estator (figuras 4.13.b y 4.13.d) nuevamente vemos que los perfiles alcanzados mediante el disco actuador tienden al mismo. Es decir, tiende a un perfil “único” tanto en rotor como estator.



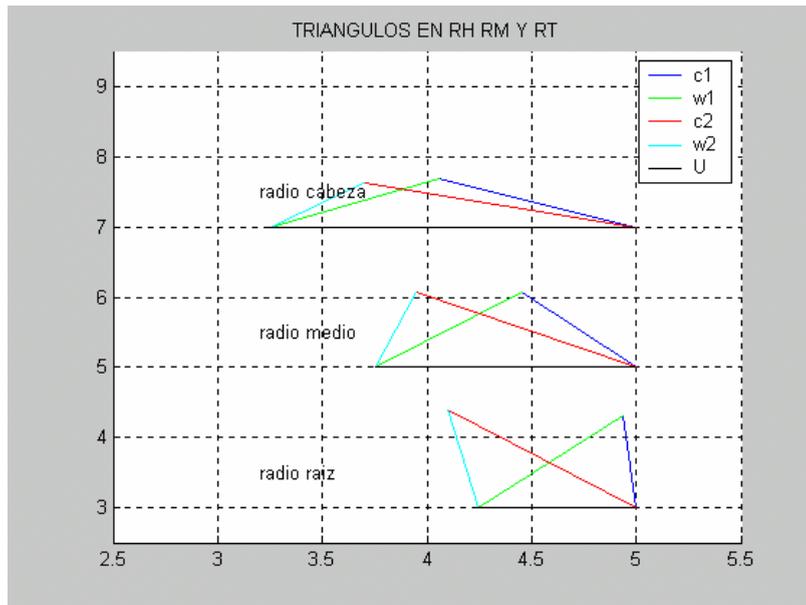
(Figura 4.13.e)

Como un factor mas recomendable podemos apreciar una deflexión menos variable y con valores no tan elevados, lo que provocará menos pérdidas y beneficiará a la hora de la construcción de dichos álabes.



(Figura 4.13.f)

De nuevo vemos como se confirma la constancia del grado de reacción y la “no” constancia del coeficiente de carga, al igual que ocurría en un rotor aislado (4.9.b).

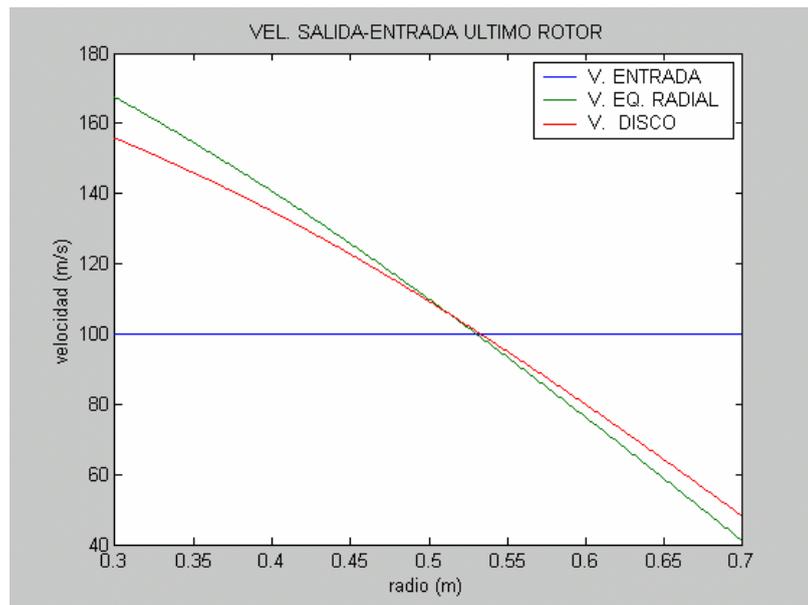


(Figura 4.13.g)

Realizamos el mismo caso para tres escalonamientos, analizando la evolución de los perfiles de velocidad.

- **Tres escalonamientos. Trabajo específico constante**

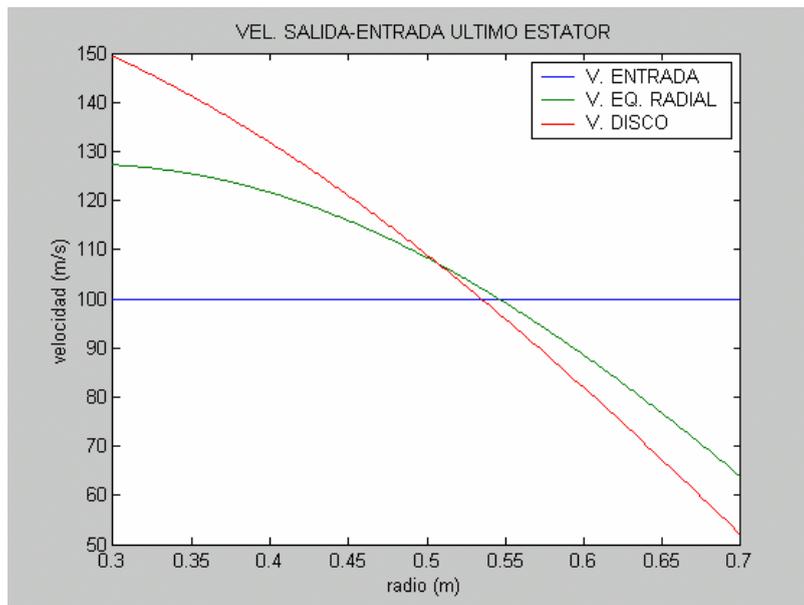
$$x_{LE} = (0,0.075,0.15) \quad x_{AD} = (0.025,0.1,0.175) \quad x_{TE} = (0.05,0.125,0.2)$$



(Figura 4.14.a)

Como se comentó en la anterior ley se puede comprobar que los perfiles siguen la misma tendencia. Si comparamos la figura de arriba con la del caso de dos escalonamientos (figura 4.13.a), se aprecia que en el rotor el perfil apenas varía de uno a otro.

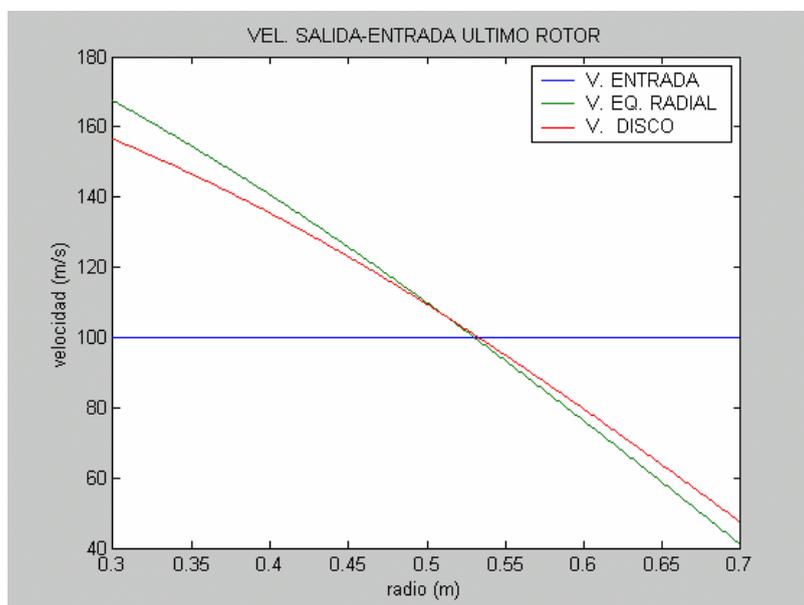
Por contra, examinando la figura de abajo (y comparándola con la figura 4.13.d), vemos que el perfil sufre una variación respecto al caso de dos escalonamientos. Hay que notar no obstante, que la variación experimentada es muy inferior a la sufrida entre el primer y segundo estator.



(Figura 4.14.b)

- **Cuatro escalonamientos. Trabajo específico constante**

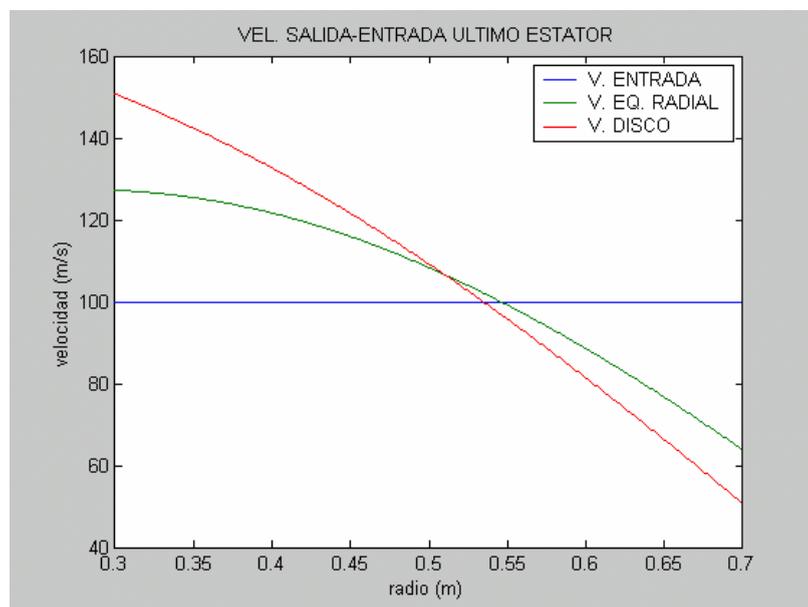
$$x_{LE} = (0,0.075,0.15,0.225) \quad x_{AD} = (0.025,0.1,0.175,0.25) \quad x_{TE} = (0.05,0.125,0.2,0.275)$$



(Figura 4.15.a)

Si examinamos ahora el caso de cuatro escalonamientos, podemos ver como las variaciones respecto al caso de tres escalonamientos son mínimas, resultando prácticamente inapreciables.

Si se puede apreciar, sin embargo, como las velocidades en estator y rotor tienden al mismo perfil conforme se aumenta el número de escalonamientos, con la salvedad del primer escalonamiento.



(Figura 4.15.b)

Para terminar de comprobar las observaciones hechas en los dos casos anteriores se resuelven varios escalonamientos más con diferentes leyes. Se podrá observar la veracidad de dichas afirmaciones para cualquier ley usada.

- **Dos escalonamientos. Torbellino fijo**

$$r_h = 0.4$$

$$r_t = 1$$

$$C_x = 100$$

$$c_{qE} = (20,35,50)$$

$$c_{qR} = (40,70,100)$$

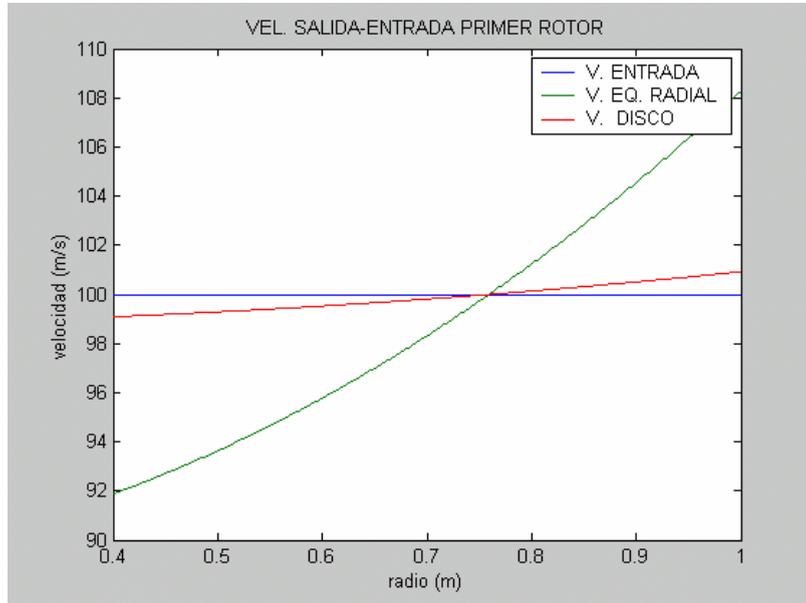
$$\Omega = 242$$

$$x_{LE} = (0,0.075)$$

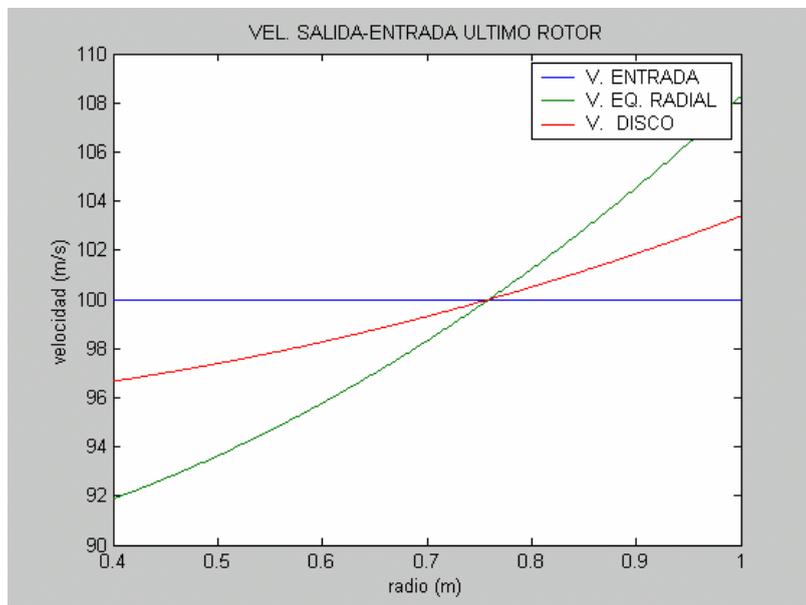
$$x_{AD} = (0.025,0.1)$$

$$x_{TE} = (0.05,0.125)$$

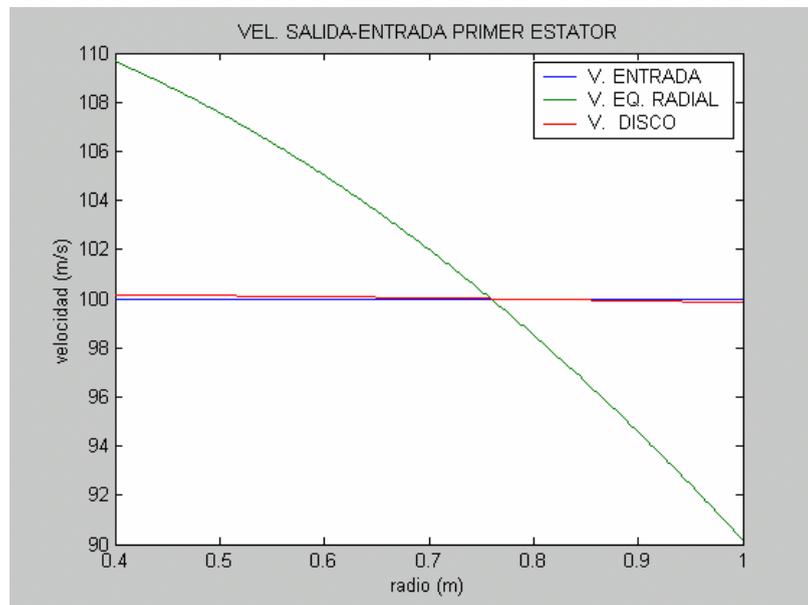
Para este caso, nos encontramos nuevamente con una relación del tipo $c_q = k * r$.



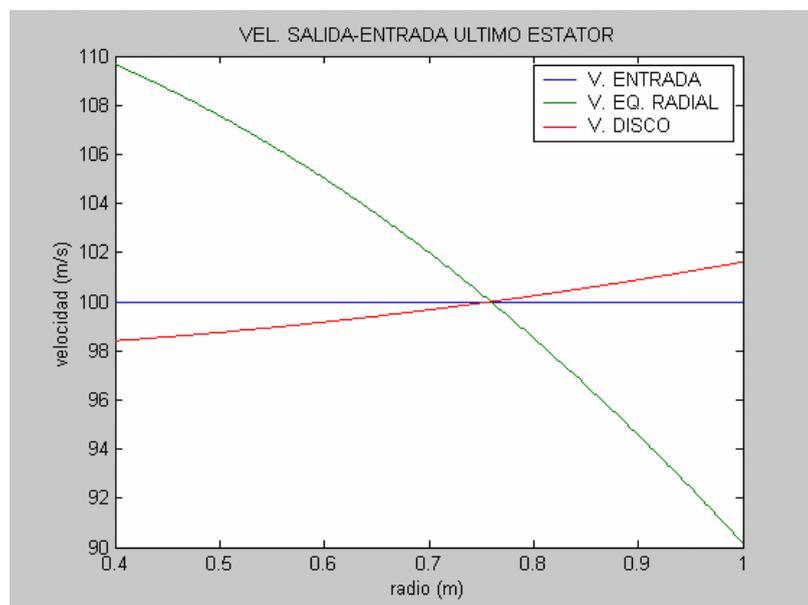
(Figura 4.16.a)



(Figura 4.16.b)

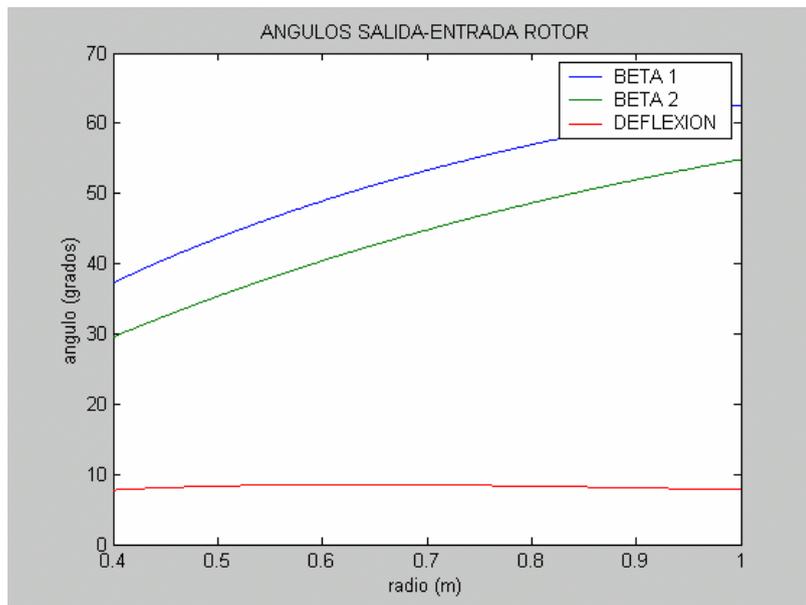


(Figura 4.16.c)

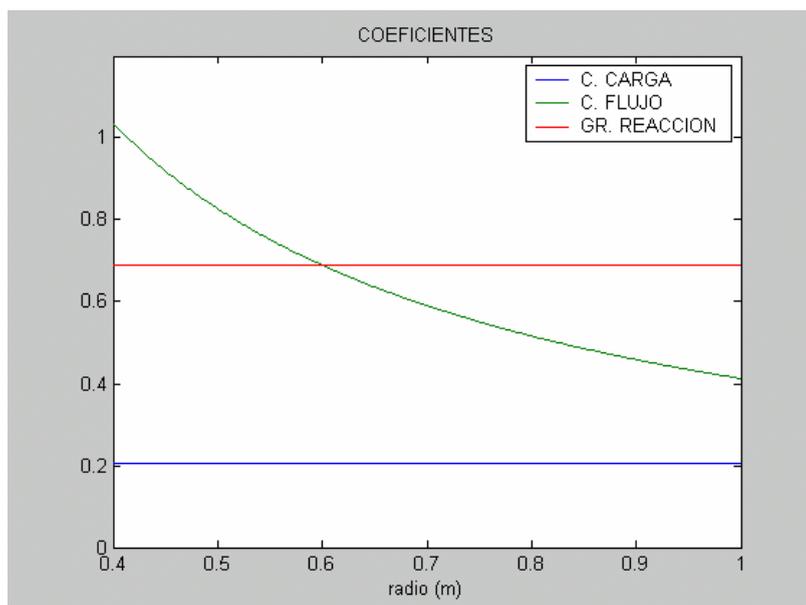


(Figura 4.16.d)

Resaltar de nuevo el hecho de que las soluciones del disco acaban “confundidas” entre sí y limitadas por las del equilibrio radial. En este caso, podemos notar que las soluciones del equilibrio difieren un poco más de las del disco que en otros casos.

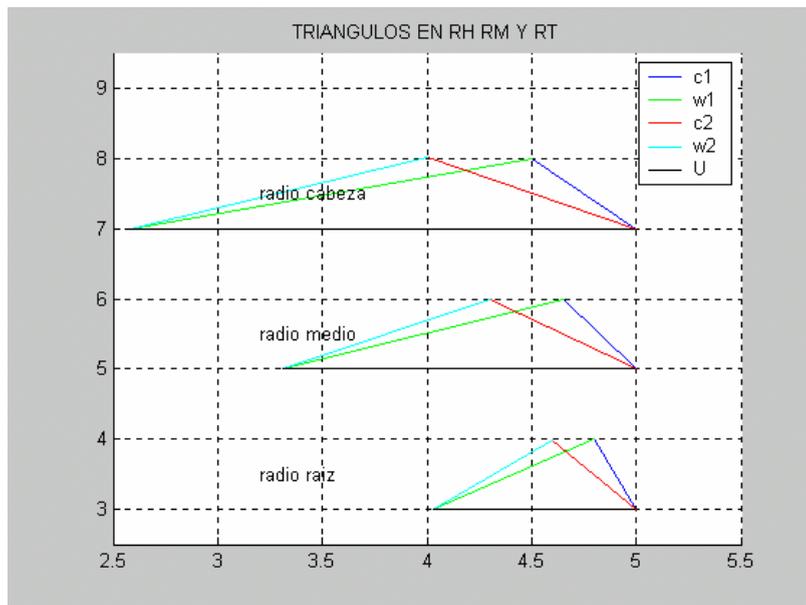


(Figura 4.16.e)



(Figura 4.16.f)

Se confirma que para escalonamientos múltiples, al igual que para escalonamientos aislados, para la ley torbellino fijo el grado de reacción y el coeficiente de carga se mantienen constantes.



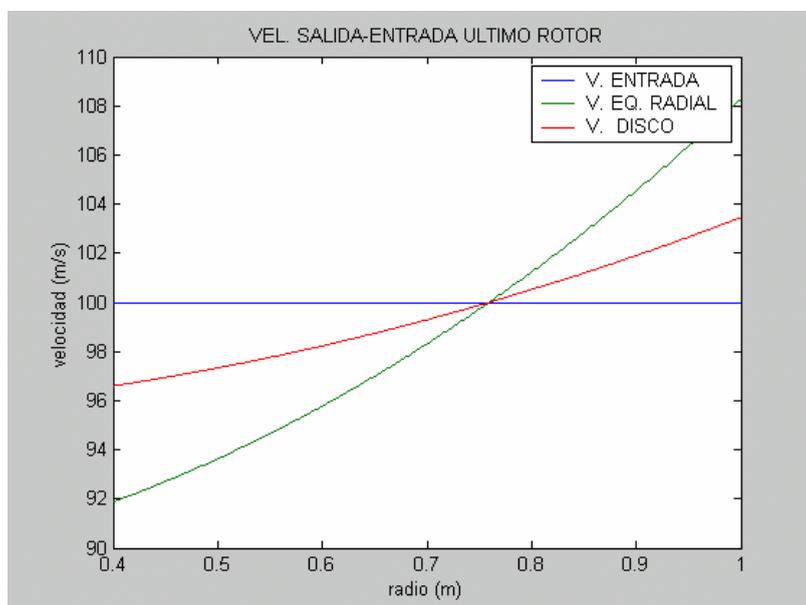
(Figura 4.16.g)

- Tres escalonamientos. Torbellino fijo

$$x_{LE} = (0, 0.075, 0.15)$$

$$x_{AD} = (0.025, 0.1, 0.175)$$

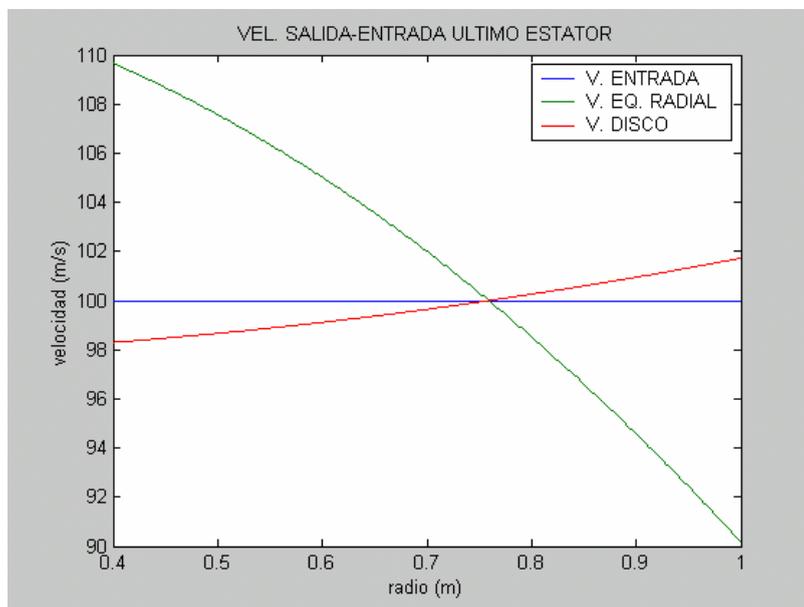
$$x_{TE} = (0.05, 0.125, 0.2)$$



(Figura 4.17.a)

Si comparamos las velocidades obtenidas en este caso con el anterior de dos escalonamientos (figuras 4.16.b y 4.16.d), de nuevo se comprueba que la variación sufrida para el caso del disco actuador es mínima. Es decir, salvo el salto producido en el primer escalonamiento, los perfiles apenas sufren variaciones en los escalonamientos posteriores.

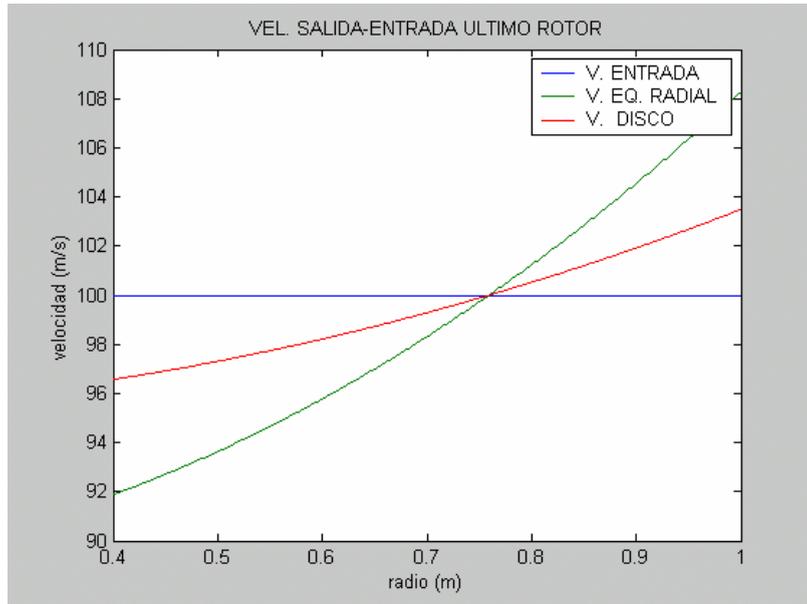
Este hecho se confirmará de nuevo en el siguiente caso cuando resolvamos el mismo ejemplo para cuatro escalonamientos (figuras 4.18.a y 4.18.b).



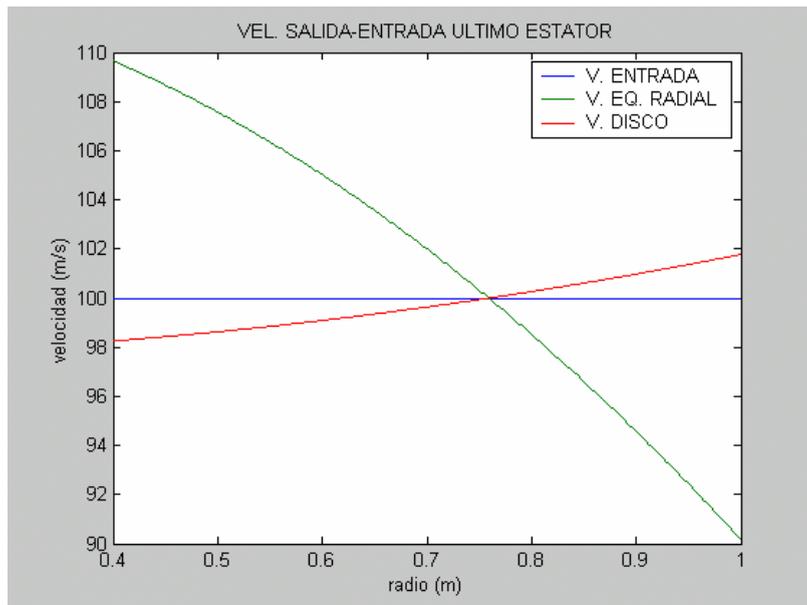
(Figura 4.17.b)

- Cuatros escalonamientos. Torbellino fijo

$$x_{LE} = (0,0.075,0.15,0.225) \quad x_{AD} = (0.025,0.1,0.175,0.25) \quad x_{TE} = (0.05,0.125,0.2,0.275)$$



(Figura 4.18.a)



(Figura 4.18.b)

- **Dos escalonamientos. Torbellino mixto**

$$r_h = 0.4$$

$$r_t = 0.8$$

$$C_x = 50$$

$$c_{qE} = (10,8,9)$$

$$c_{qR} = (32,28.3,30)$$

$$\Omega = 50$$

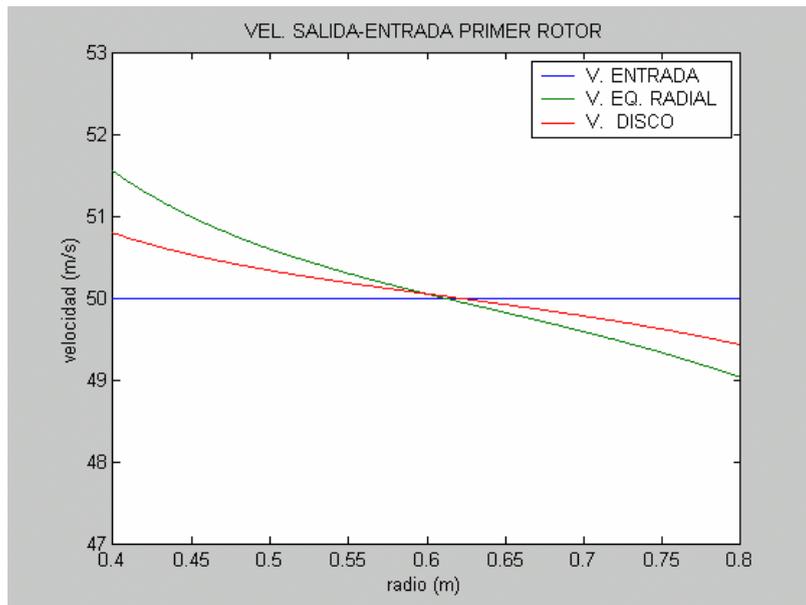
$$x_{LE} = (0,0.075)$$

$$x_{AD} = (0.025,0.1)$$

$$x_{TE} = (0.05,0.125)$$

Examinamos ahora un escalonamiento de ventilador múltiple con la ley torsional torbellino mixto, con lo cual nos encontramos con una relación del tipo

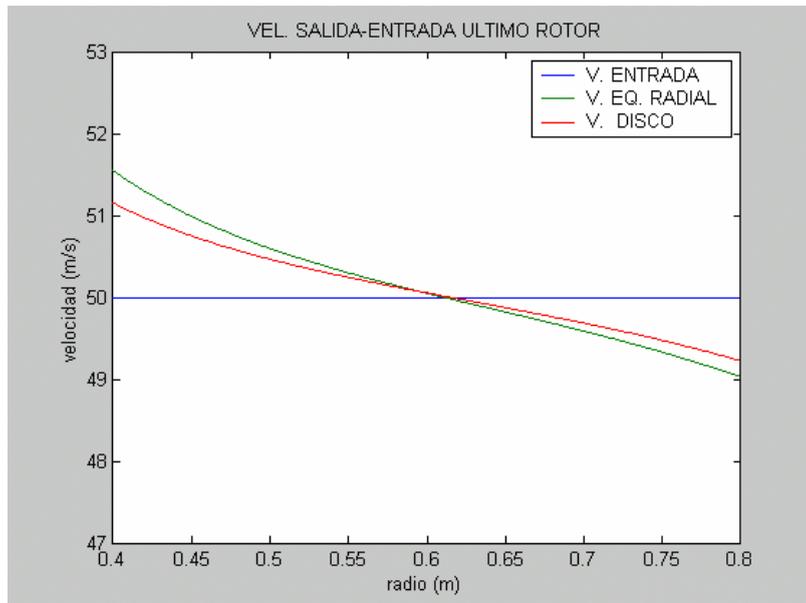
$$c_q = a * r + b / r.$$



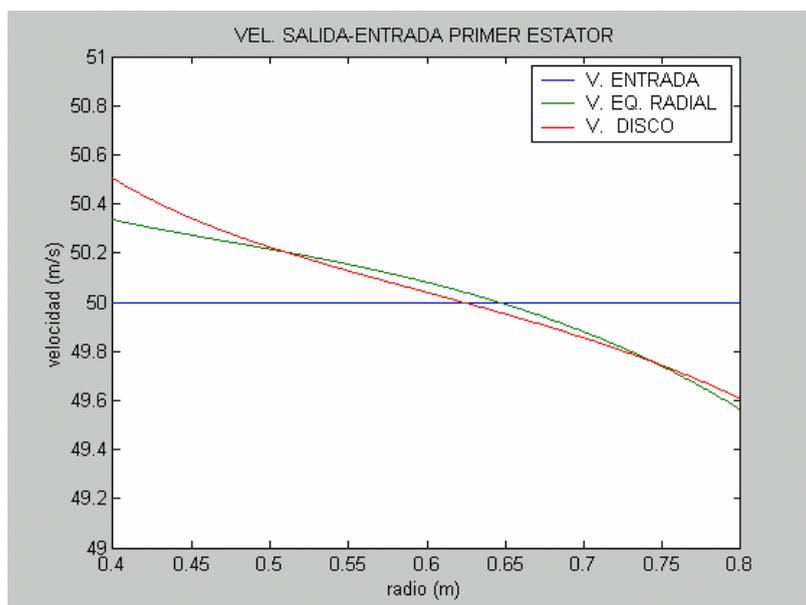
(Figura 4.19.a)

Examinando las figuras adjuntas, se verifica de nuevo las mismas tendencias de los perfiles. Vemos como la solución alcanzada mediante el equilibrio radial simplificado no varía en los distintos escalonamientos, siendo por tanto independiente del número de escalonamientos.

Por otro lado, la solución del disco actuador, como en caso anteriores, sufre un cambio entre los distintos escalonamientos siendo el más apreciable e importante el sufrido en el primero de todos ellos.

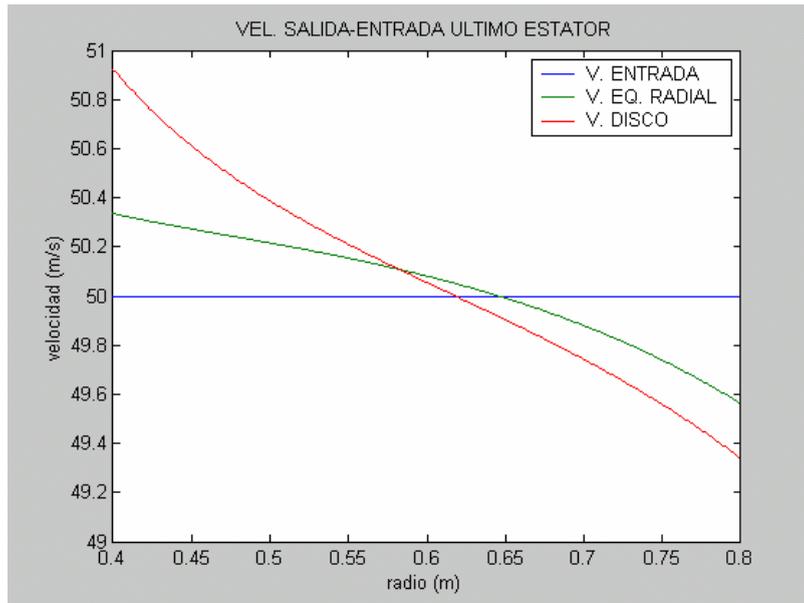


(Figura 4.19.b)

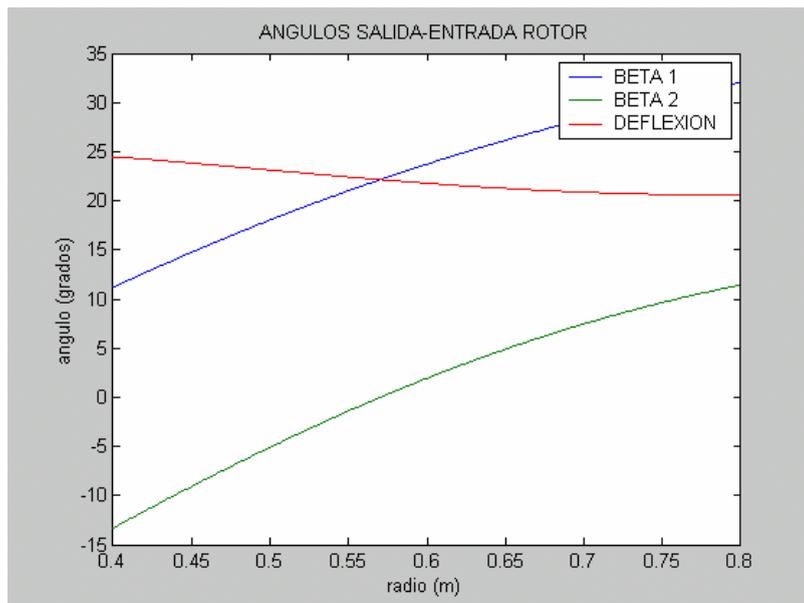


(Figura 4.19.c)

De igual forma que se producía en el rotor, en el estator sucede algo similar. Entre el primer y segundo estator es donde se produce la variación sustancial de la velocidad axial. Además se puede comprobar como tanto en rotor como en estator se tiende al mismo perfil.

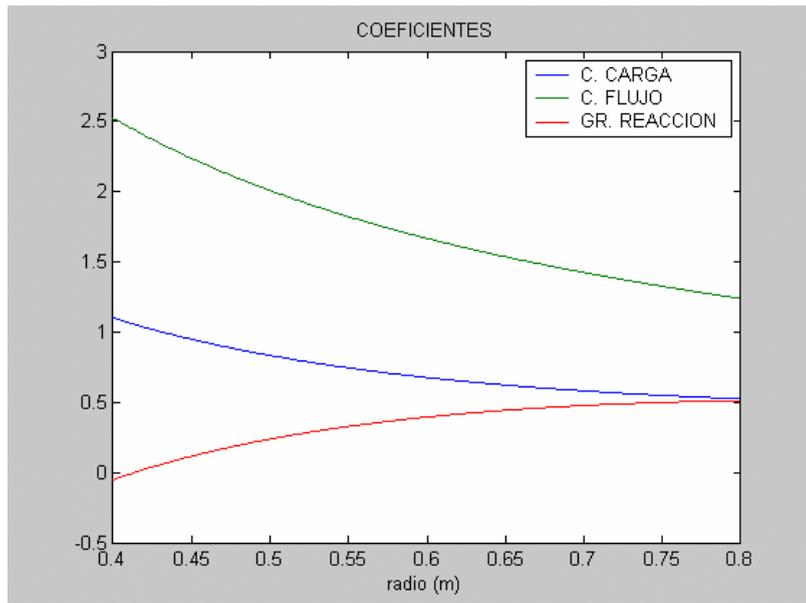


(Figura 4.19.d)

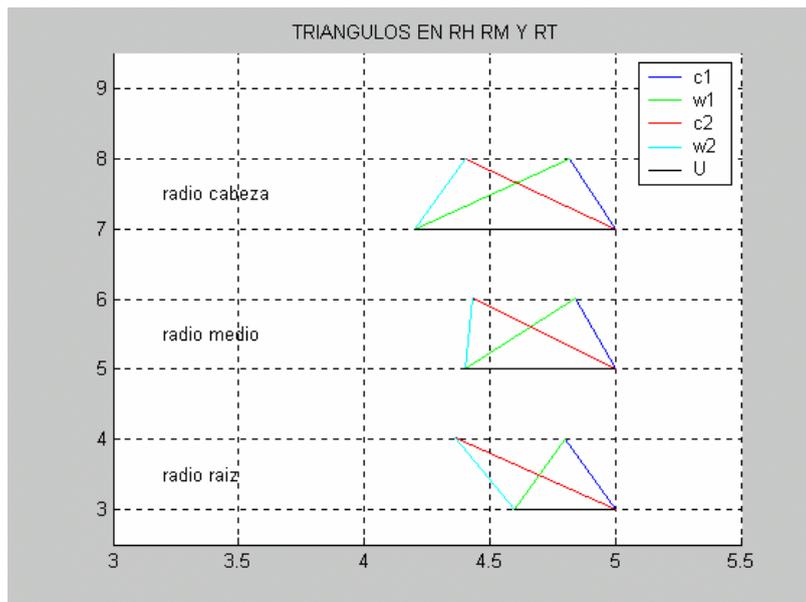


(Figura 4.19.e)

La deflexión sufre una variación moderada con el radio al igual que cuando se trató un rotor aislado, si bien en este caso, los valores son más elevados. Hay que indicar no obstante, que determinados valores de los resultados expuestos (como valores de velocidad y ángulos) dependerán de los parámetros de entrada en mayor medida que otros (tendencia de la velocidad y coeficientes).



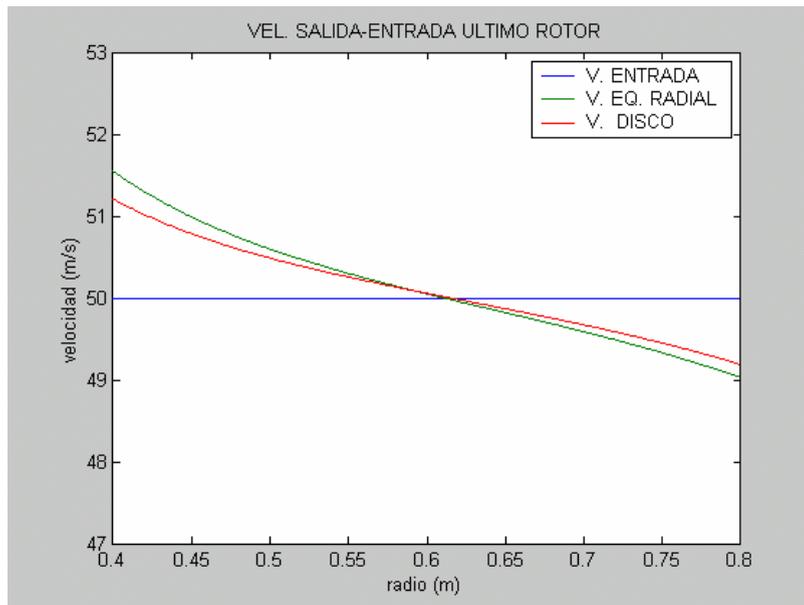
(Figura 4.19.f)



(Figura 4.19.g)

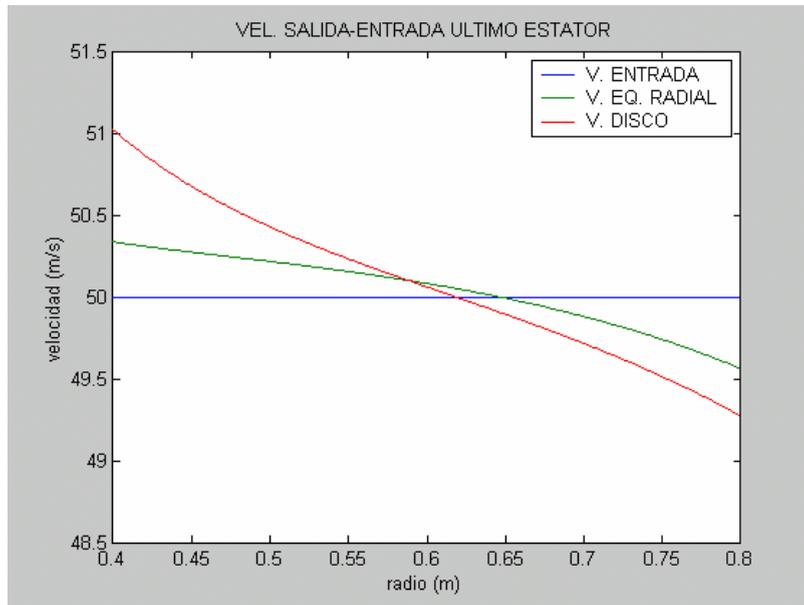
- **Tres escalonamientos. Torbellino mixto**

$$x_{LE} = (0,0.075,0.15) \quad x_{AD} = (0.025,0.1,0.175) \quad x_{TE} = (0.05,0.125,0.2)$$



(Figura 4.20.a)

Examinando el mismo caso para tres escalonamientos (y comparando con las figuras 4.19.b y 4.19.d del caso de dos escalonamientos), se aprecia, de forma reiterada, como la variación que sufren los perfiles del “disco” son mínimas y además, ambos tienden a “confundirse”. Del mismo modo, la solución obtenida del equilibrio radial simplificado no varía.

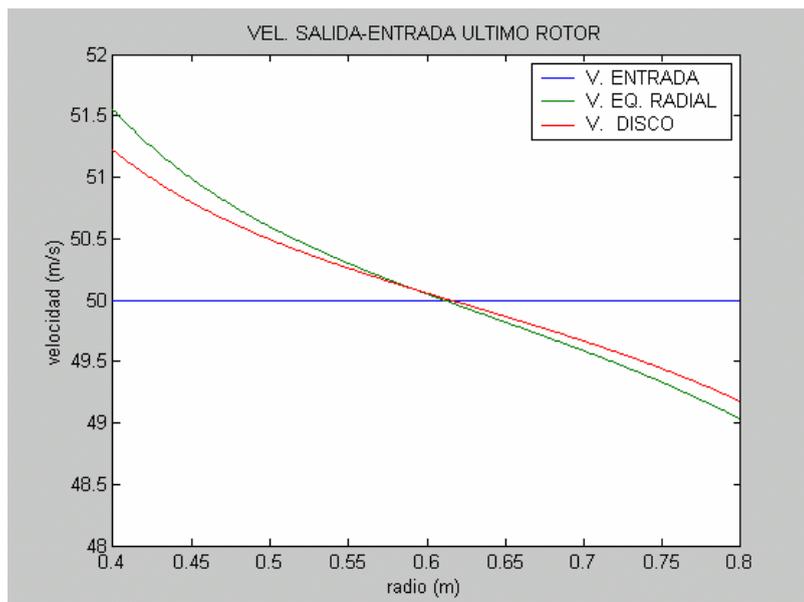


(Figura 4.20.b)

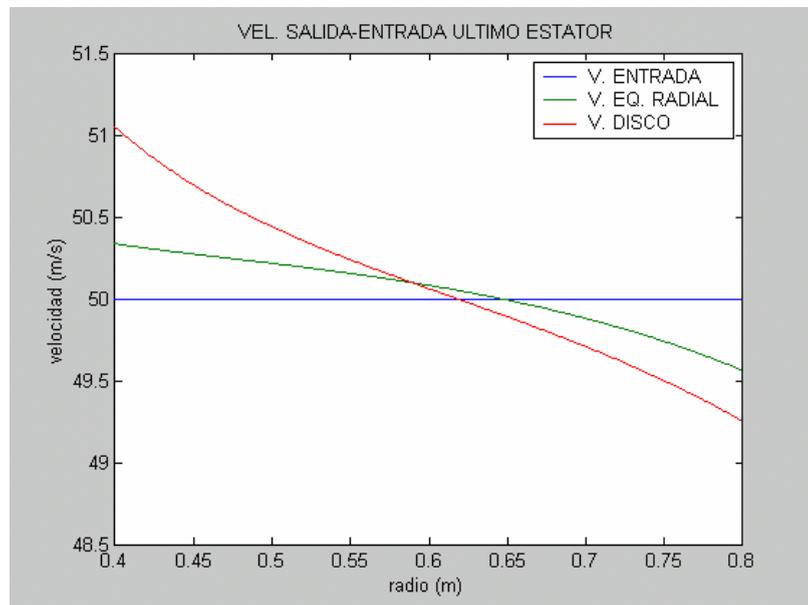
Para el caso de un escalonamiento múltiple con cuatro etapas podemos realizar las mismas apreciaciones que las realizadas para el caso anterior.

- **Cuatro escalonamientos. Torbellino mixto**

$$x_{LE} = (0,0.075,0.15,0.225) \quad x_{AD} = (0.025,0.1,0.175,0.25) \quad x_{TE} = (0.05,0.125,0.2,0.275)$$



(Figura 4.21.a)



(Figura 4.21.b)

- **Dos escalonamientos. Velocidad tangencial constante**

$$r_h = 0.4$$

$$r_t = 0.8$$

$$C_x = 100$$

$$c_{qE} = (15,15,15)$$

$$c_{qR} = (45,45,45)$$

$$\Omega = 242$$

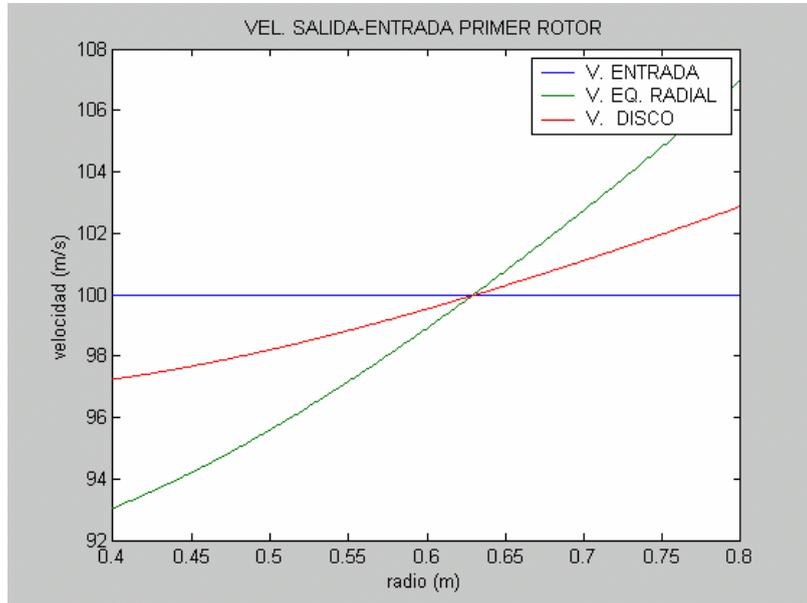
$$x_{LE} = (0,0.075)$$

$$x_{AD} = (0.025,0.1)$$

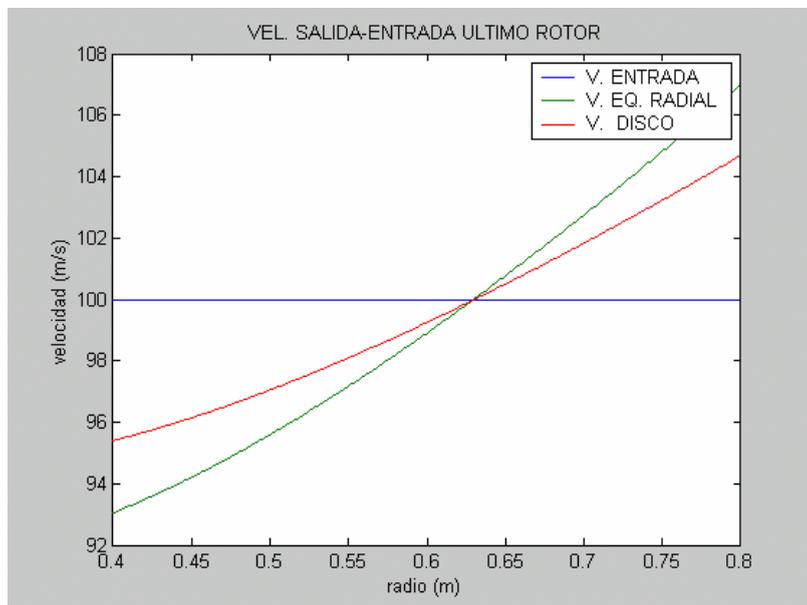
$$x_{TE} = (0.05,0.125)$$

Para finalizar el análisis del flujo incompresible a través de ventiladores analizaremos el caso con la ley torsional “velocidad tangencial constante”, $c_q = k$.

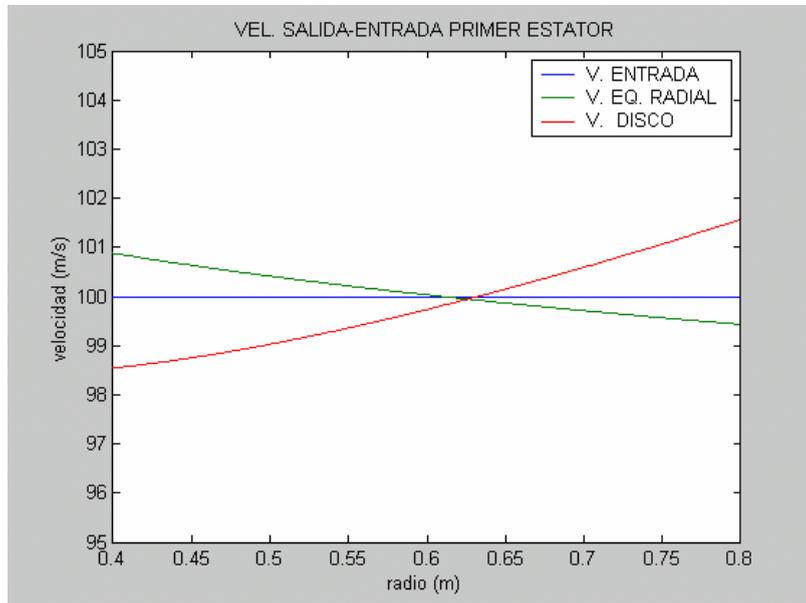
Examinando los resultados obtenidos en las siguientes figuras podemos de nuevo confirmar la validez de los análisis realizados en los diferentes casos anteriores.



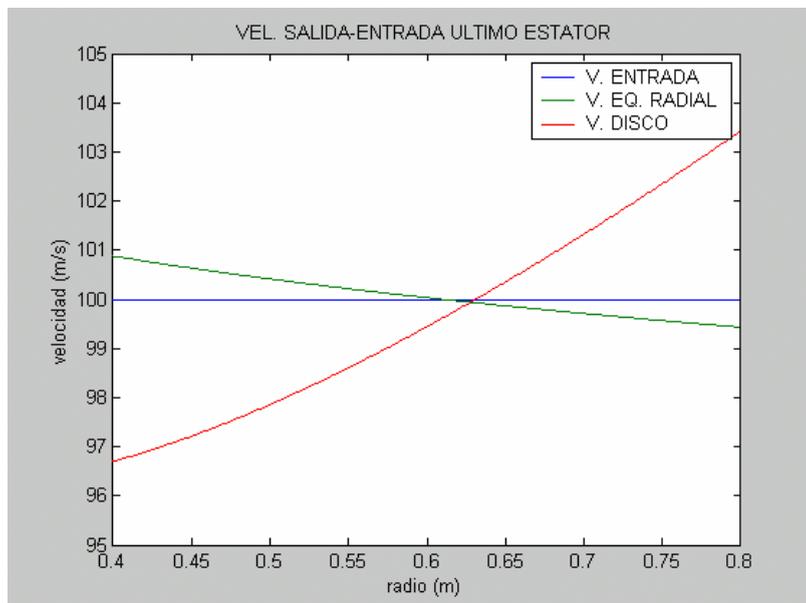
(Figura 4.22.a)



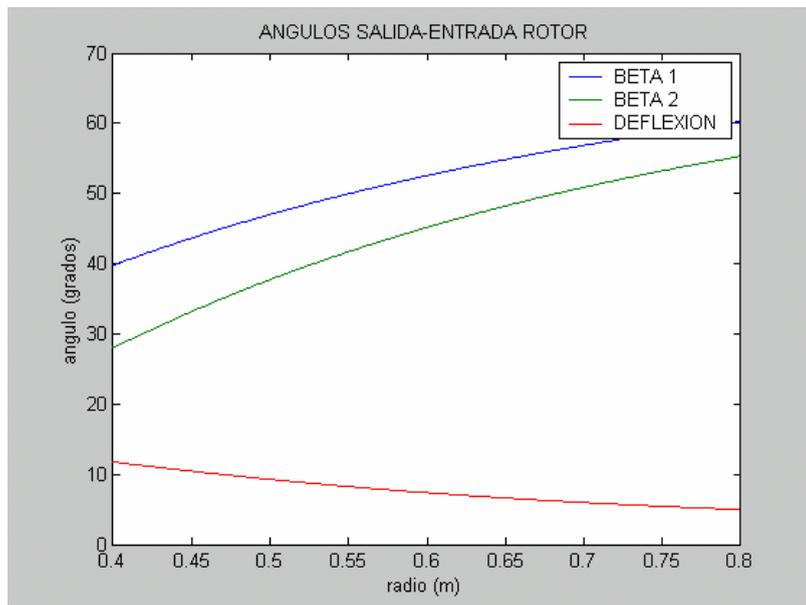
(Figura 4.22.b)



(Figura 4.22.c)

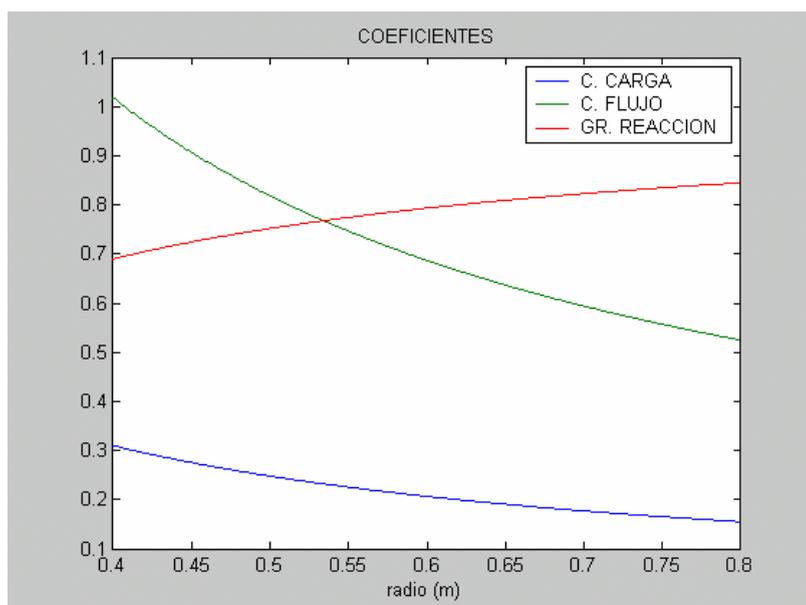


(Figura 4.22.d)



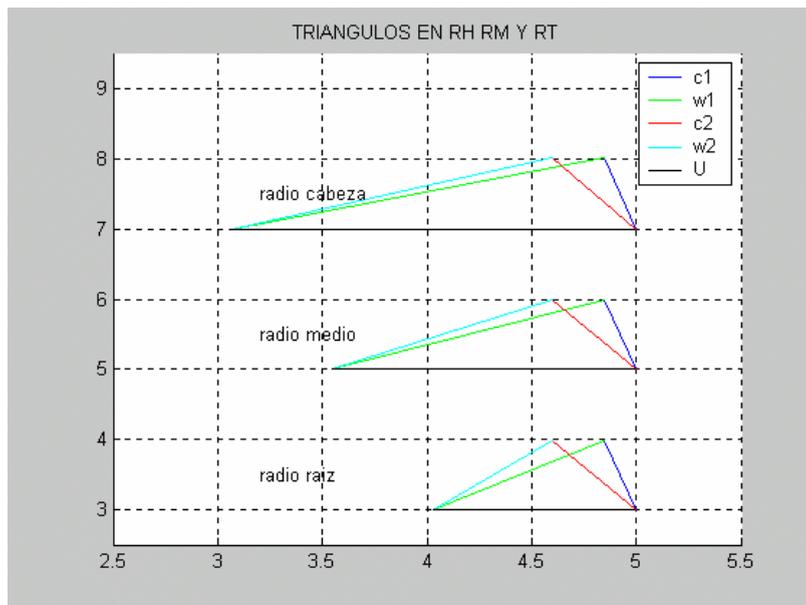
(Figura 4.22.e)

Observando las figuras de los ángulos y de los coeficientes, encontramos que estos siguen las mismas tendencias que para escalonamientos aislados. Por un lado encontramos que los ángulos a la entrada y a la salida son muy similares, lo cual nos lleva a una deflexión poco variable con el radio y con unos valores muy pequeños, lo cual siempre resulta un factor deseable desde el punto de vista de los rendimientos.



(Figura 4.22.f)

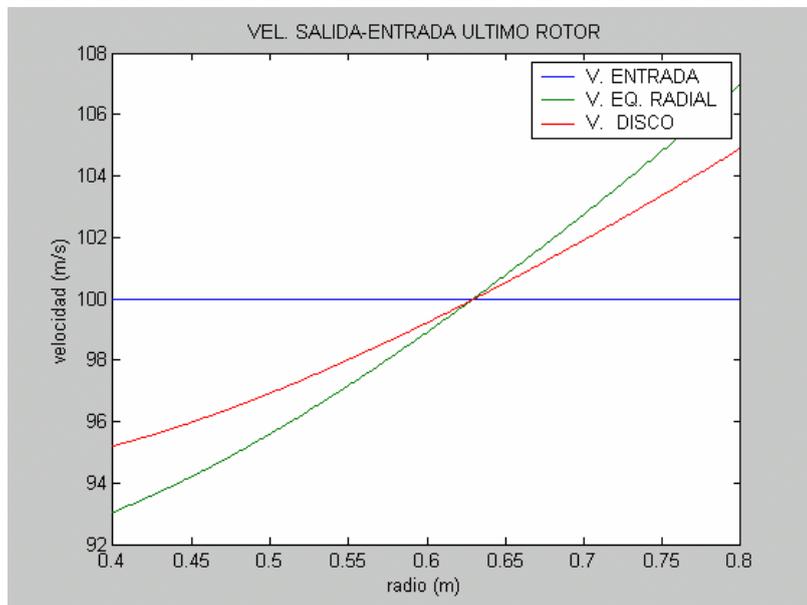
Por otro lado, el coeficiente de carga y el grado de reacción, aún cuando varían con el radio, experimentan variaciones moderadas.



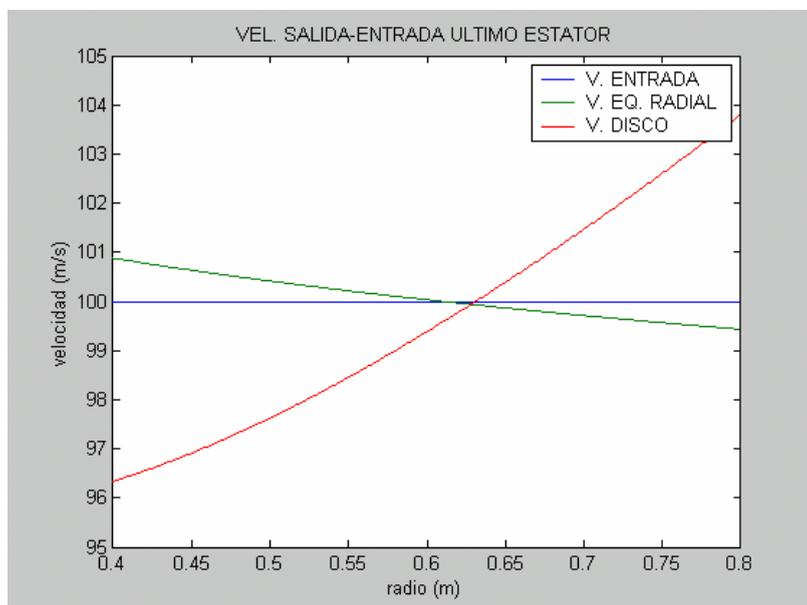
(Figura 4.22.g)

- **Tres escalonamientos. Velocidad tangencial constante**

$$x_{LE} = (0,0.075,0.15) \quad x_{AD} = (0.025,0.1,0.175) \quad x_{TE} = (0.05,0.125,0.2)$$



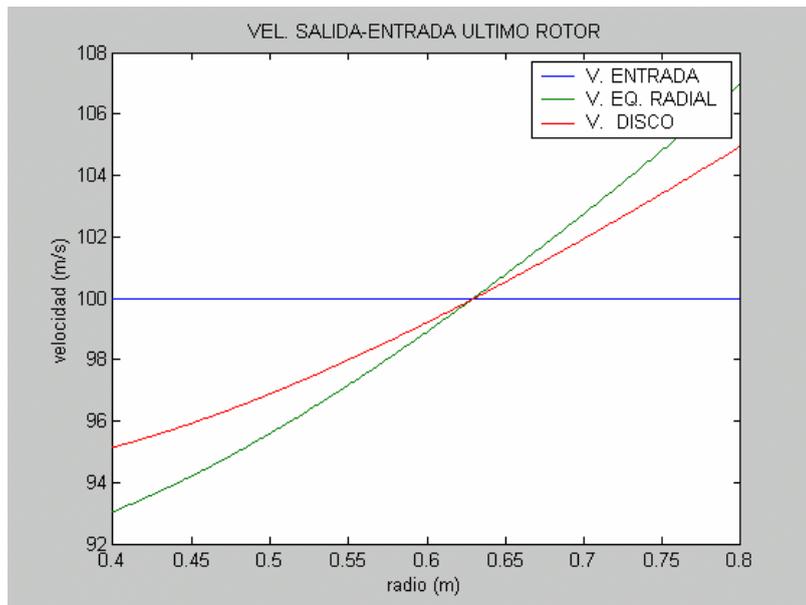
(Figura 4.23.a)



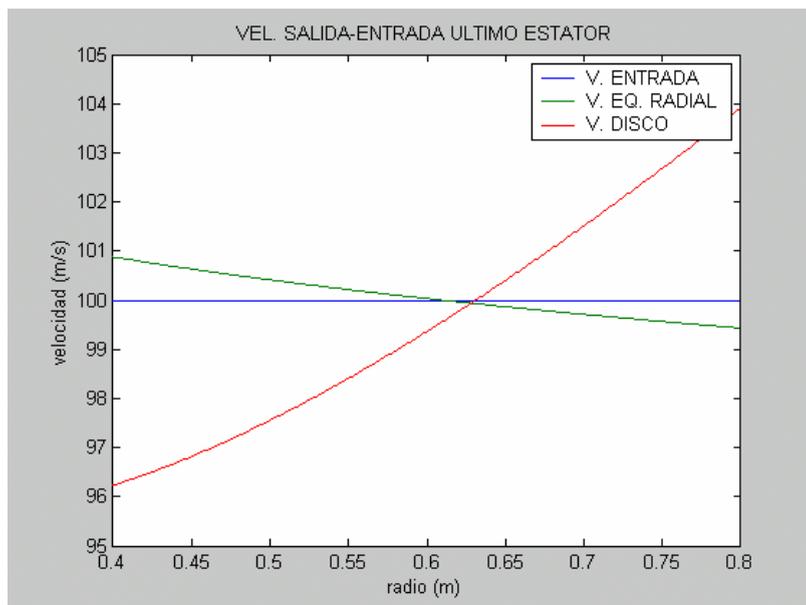
(Figura 4.23.b)

- **Cuatro escalonamientos. Velocidad tangencial constante**

$$x_{LE} = (0,0.075,0.15,0.225) \quad x_{AD} = (0.025,0.1,0.175,0.25) \quad x_{TE} = (0.05,0.125,0.2,0.275)$$



(Figura 4.24.a)



(Figura 4.24.b)

Una vez examinada las dos teorías en ventiladores, se aplicarán ahora ambas a turbinas. De nuevo se examinarán las diferentes leyes sobre escalonamientos aislados y múltiples.

Hay que comentar que los resultados encontrados son muy similares a los encontrados en ventiladores, con lo cual, de forma general se podrán realizar las mismas apreciaciones hechas hasta el momento.

b) Turbinas

Examinaremos primero los resultados sobre coronas aisladas para después pasar a diversos escalonamientos.

- **Rotor. Torbellino libre**

$r_h = 0.4$

$r_t = 0.8$

$C_x = 200$

$c_{q1} = (250,166.6,125)$

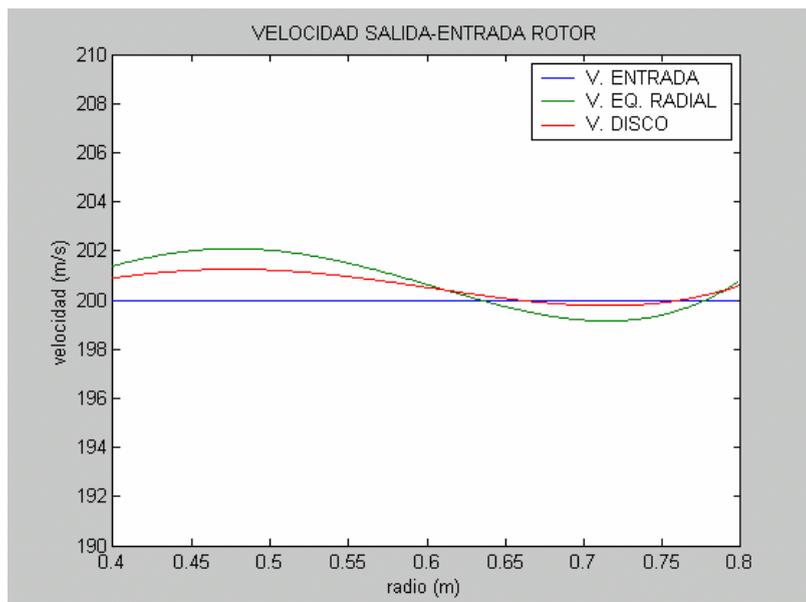
$c_{q2} = (120,83,62.5)$

$\Omega = 175$

$x_{LE} = 0.025$

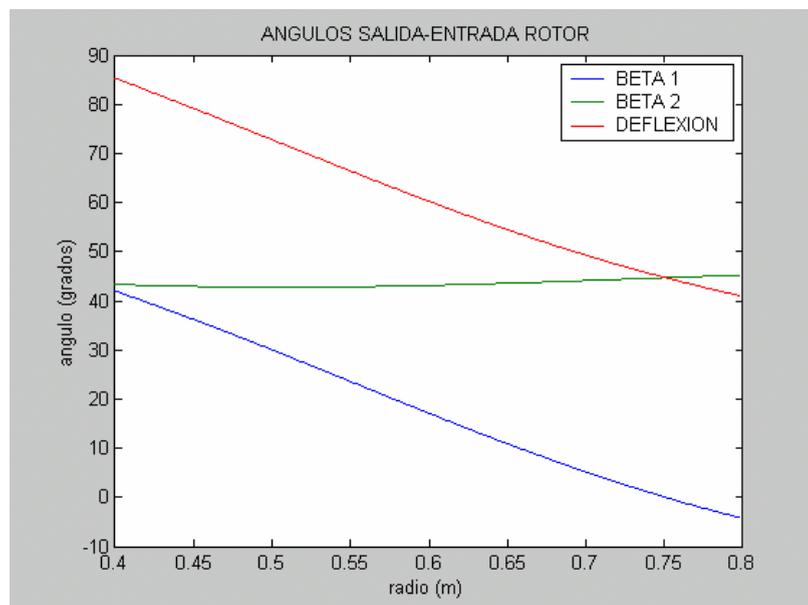
$x_{AD} = 0.05$

$x_{TE} = 0.075$



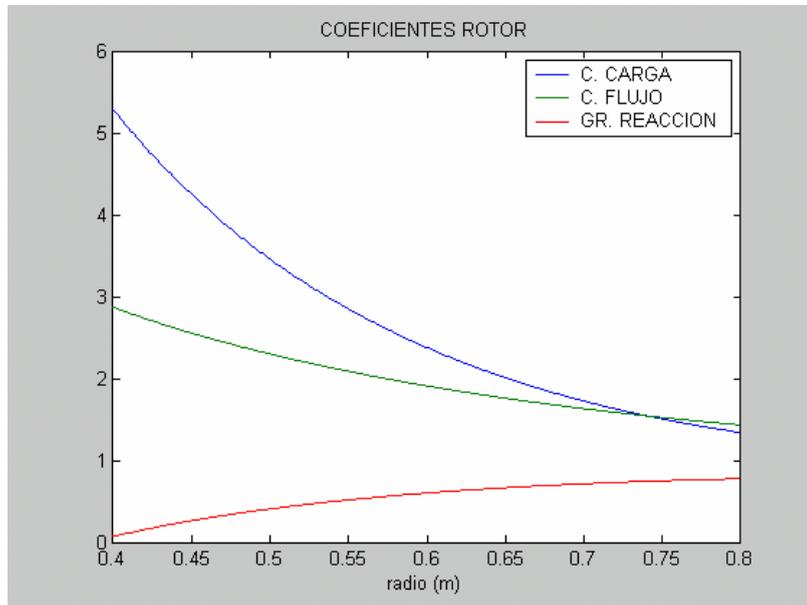
(Figura 4.25.a)

En este caso, de igual forma que para ventiladores, el perfil de velocidades axiales de salida sufre pequeñas variaciones respecto a la velocidad de entrada, siendo mayor la sufrida mediante el equilibrio radial simplificado que mediante la teoría del disco actuador.

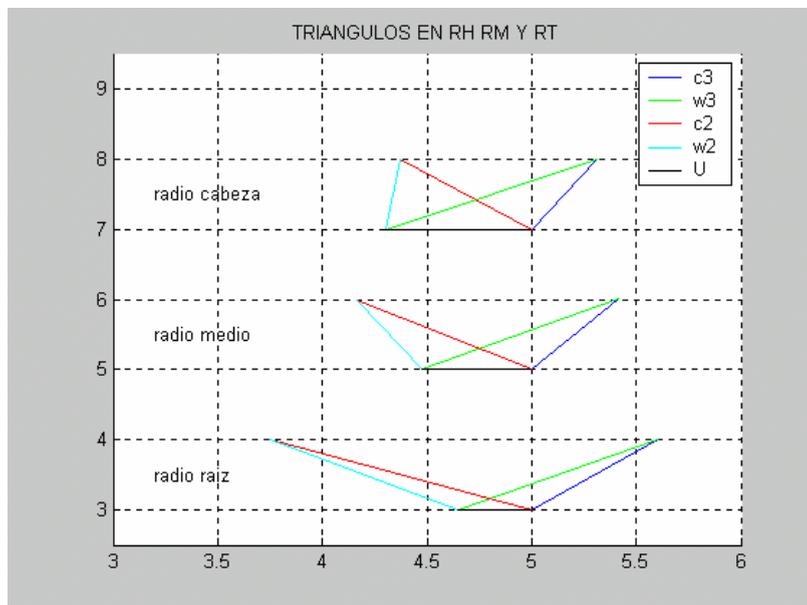


(Figura 4.25.b)

La deflexión en este caso alcanza valores más elevados que para ventiladores y al igual que ocurría en estos, con esta ley, la variación con el radio es importante alcanzado en los radios de raíz valores elevados.



(Figura 4.25.c)



(Figura 4.25.d)

Vamos a analizar seguidamente un rotor aislado mediante la ley torbellino fijo donde tendremos una relación entre el radio y la velocidad tangencial de la forma $c_q = k * r$.

- **Rotor. Torbellino fijo**

$r_h = 0.4$

$r_t = 1$

$C_x = 200$

$c_{q1} = (80,140,200)$

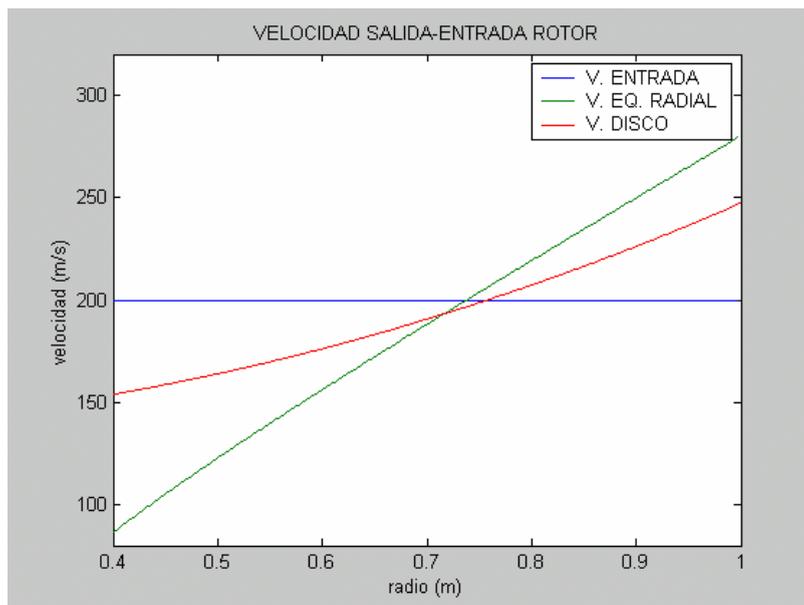
$c_{q2} = (26.6,46.6,66.6)$

$\Omega = 175$

$x_{LE} = 0.025$

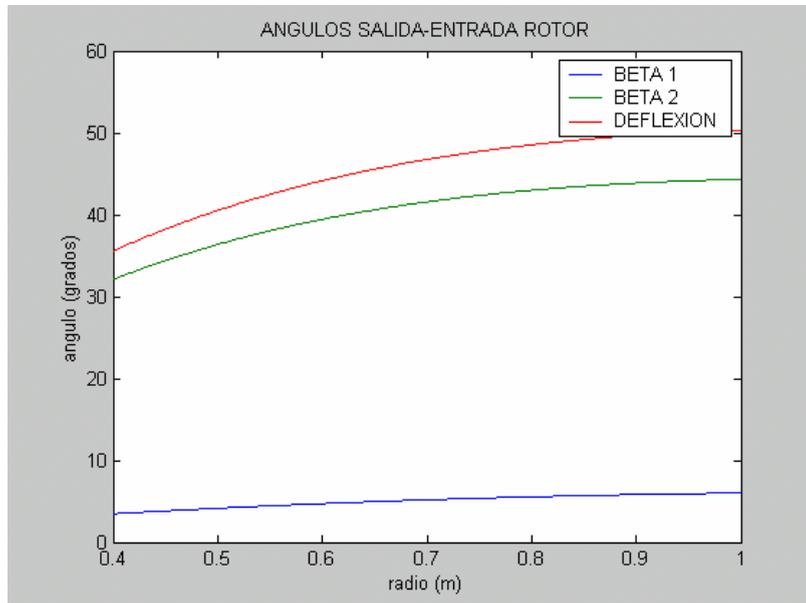
$x_{AD} = 0.05$

$x_{TE} = 0.075$



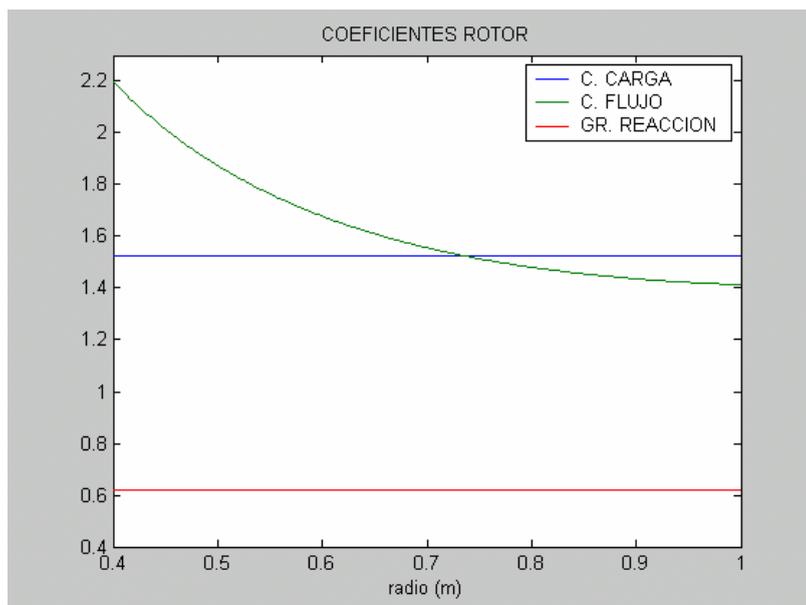
(Figura 4.26.a)

Para el torbellino fijo de nuevo existe un cambio brusco del perfil de velocidades axiales, lo que se mantiene como una constante de esta ley, tanto para turbinas como ventiladores.



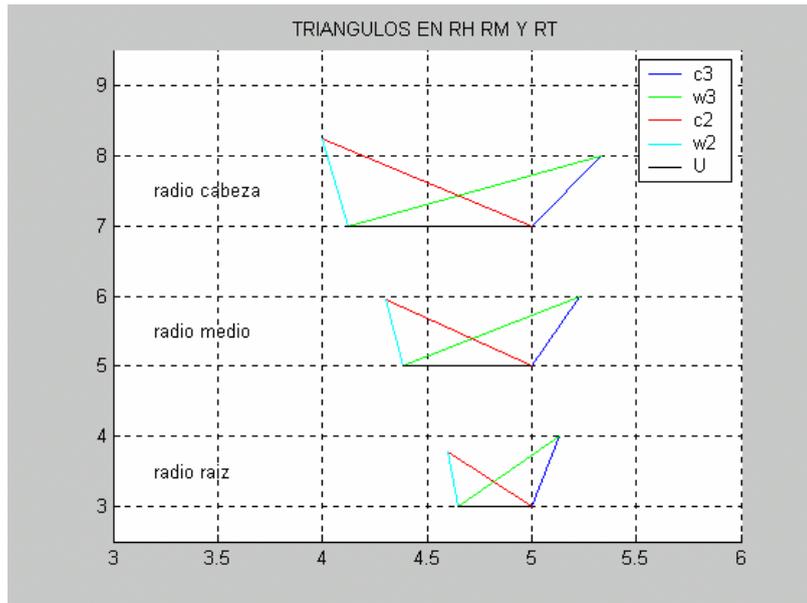
(Figura 4.26.b)

La deflexión adopta un perfil cuya variación con el radio es moderada y, además, con unos valores admisibles.



(Figura 4.26.c)

De igual forma se mantiene la constancia del grado de reacción y del coeficiente de carga con el radio al igual que ocurría en todos los casos resueltos con esta ley.



(Figura 4.26.d)

- **Rotor. Velocidad tangencial constante**

$$r_h = 0.4$$

$$r_t = 1$$

$$C_x = 125$$

$$c_{q1} = (100,100,100)$$

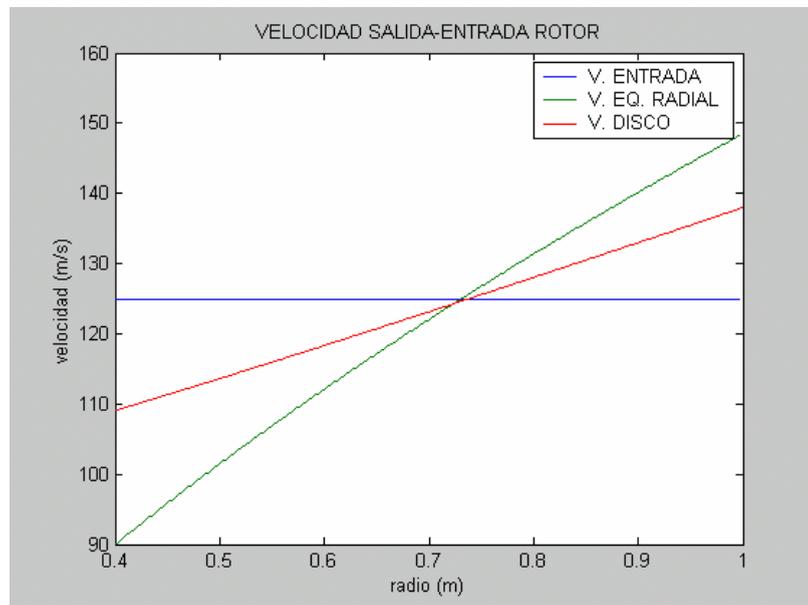
$$c_{q2} = (30,30,30)$$

$$\Omega = 100$$

$$x_{LE} = 0.025$$

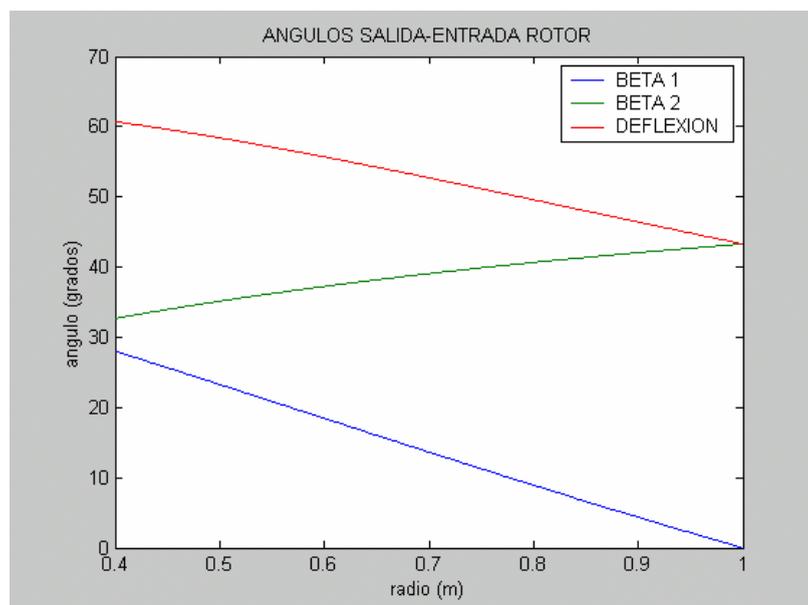
$$x_{AD} = 0.05$$

$$x_{TE} = 0.075$$



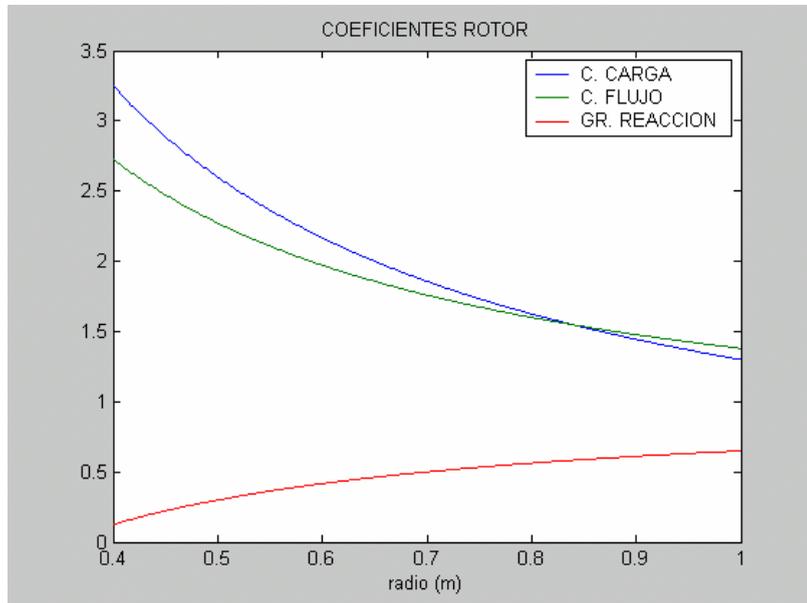
(Figura 4.27.a)

Para turbinas, también se puede comprobar como esta ley provoca variaciones importantes en la velocidad axial aunque, de nuevo, éstas son menores que para el torbellino fijo visto anteriormente (figura 4.26.a).

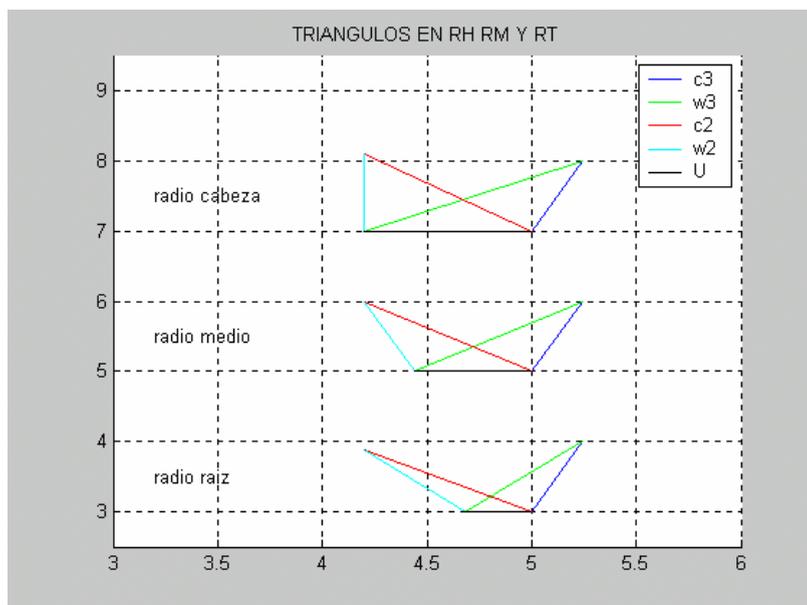


(Figura 4.27.b)

De nuevo nos encontramos con una valores de deflexión correctos y con una variación radial moderada.



(Figura 4.27.c)



(Figura 4.27.d)

- **Rotor. Torbellino mixto**

$$r_h = 0.4$$

$$r_t = 1$$

$$C_x = 125$$

$$c_{q1} = (80,70.7,75)$$

$$c_{q2} = (10,8,9)$$

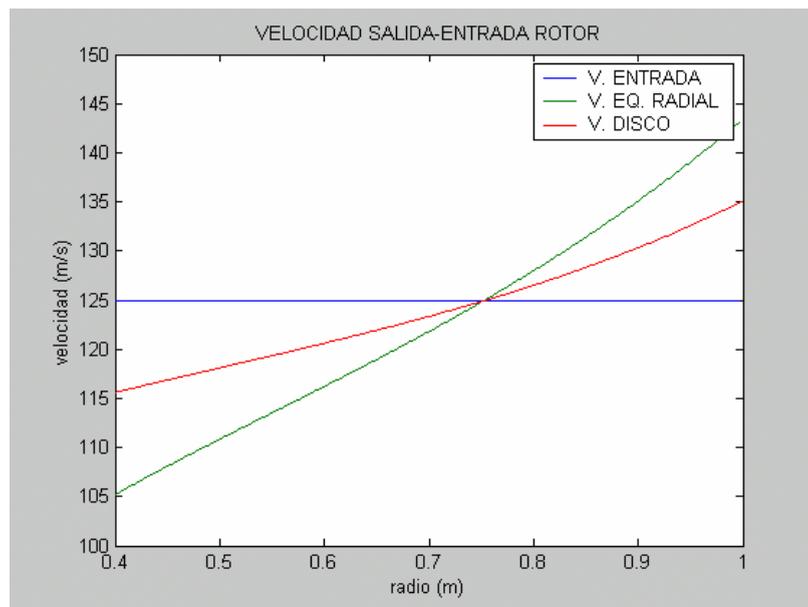
$$\Omega = 100$$

$$x_{LE} = 0.025$$

$$x_{AD} = 0.05$$

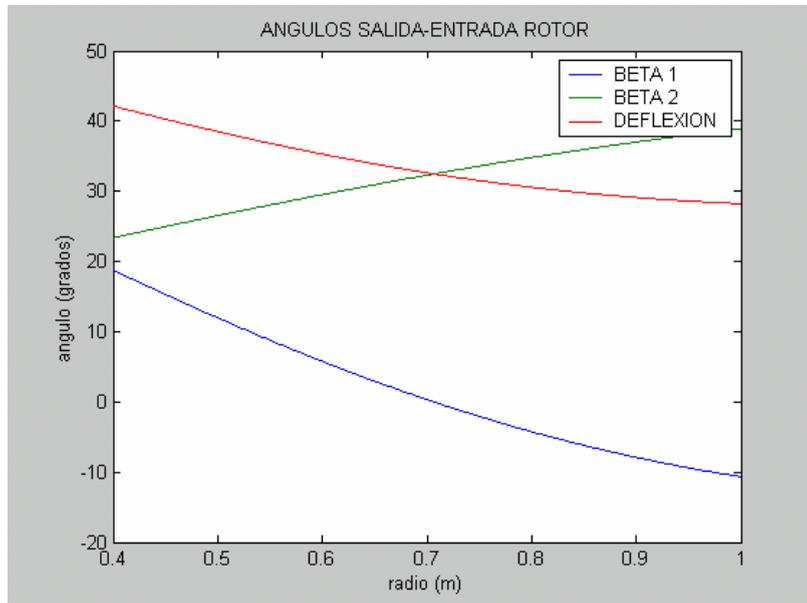
$$x_{TE} = 0.075$$

En este caso la ley que seguimos es $c_q = a * r + b / r$.

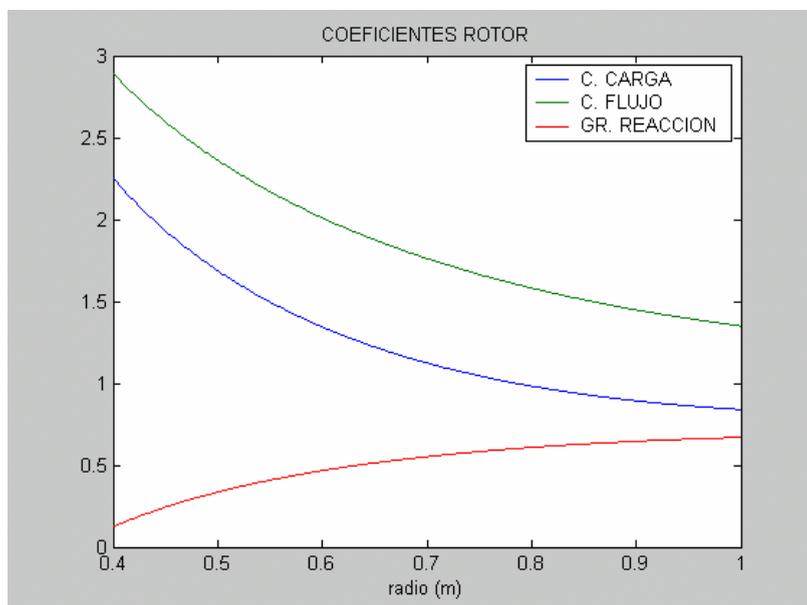


(Figura 4.28.a)

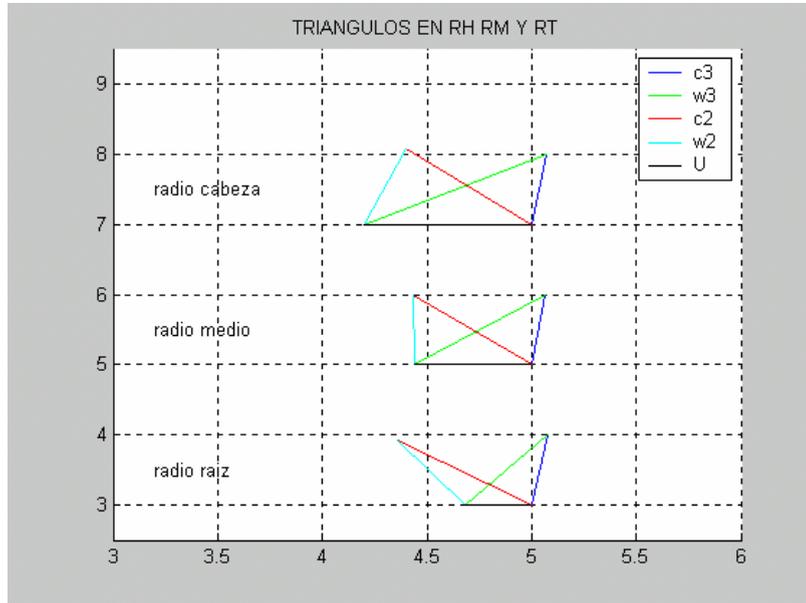
Examinando la ley torbellino mixto para un rotor de turbina podemos apreciar un cambio moderado en el perfil de velocidades. La variación es mayor que para el torbellino libre y menor que para el caso de torbellino fijo (recordar de nuevo que esta ley se puede considerar como mezcla de ambas).



(Figura 4.28.b)



(Figura 4.28.c)



(Figura 4.28.d)

Una vez examinados algunos casos de coronas aisladas, vamos a centrarnos en escalonamientos múltiples. Al igual que antes, se realizarán los casos para dos, tres y cuatro escalonamientos. En todos ellos se considerará la misma ley torsional.

- **Dos escalonamientos. Torbellino libre**

$$r_h = 0.4$$

$$r_t = 0.8$$

$$C_x = 100$$

$$c_{qE} = (200, 133.3, 100)$$

$$c_{qR} = (50, 35, 25)$$

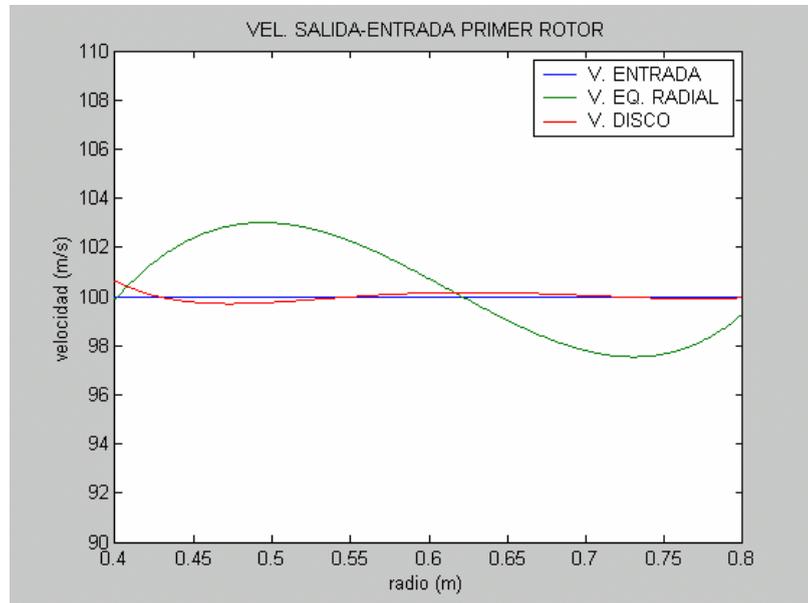
$$\Omega = 200$$

$$x_{LE} = 0.025$$

$$x_{AD} = 0.05$$

$$x_{TE} = 0.075$$

En este caso nos encontramos de nuevo con la relación $c_q = k / r$.

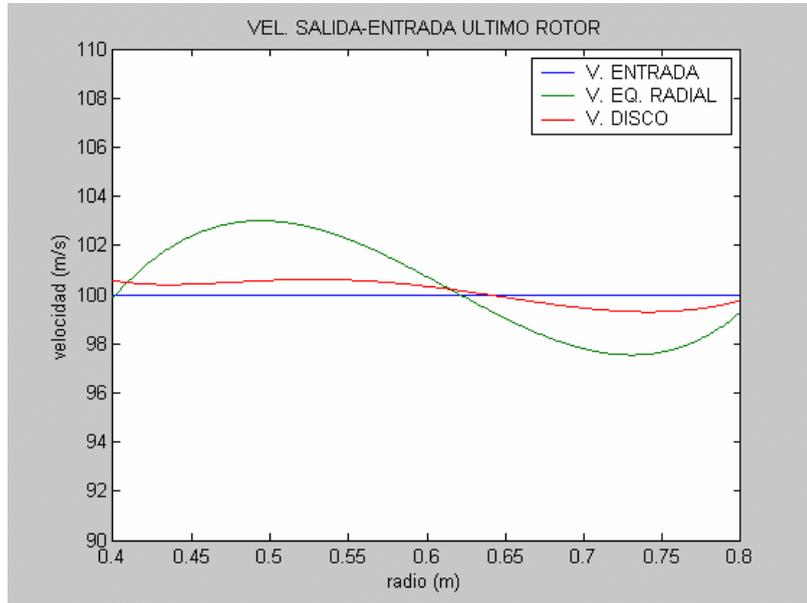


(Figura 4.29.a)

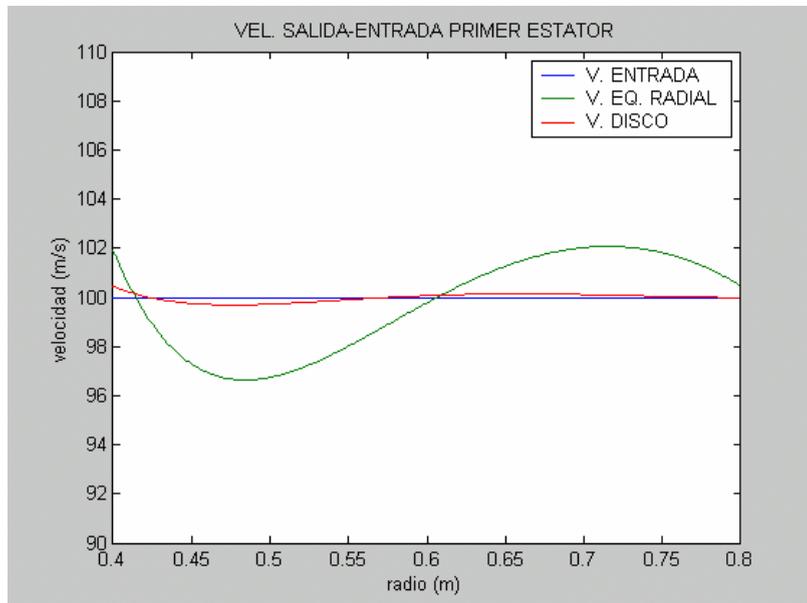
Se puede apreciar observando los resultados, como de nuevo los perfiles sufrirán la mayor variación en el primer escalonamiento, y mucho mayor para el calculado mediante la teoría del equilibrio radial.

De nuevo, los perfiles del equilibrio radial permanecen constantes en todos los escalonamientos, no produciéndose esto en los del disco actuador.

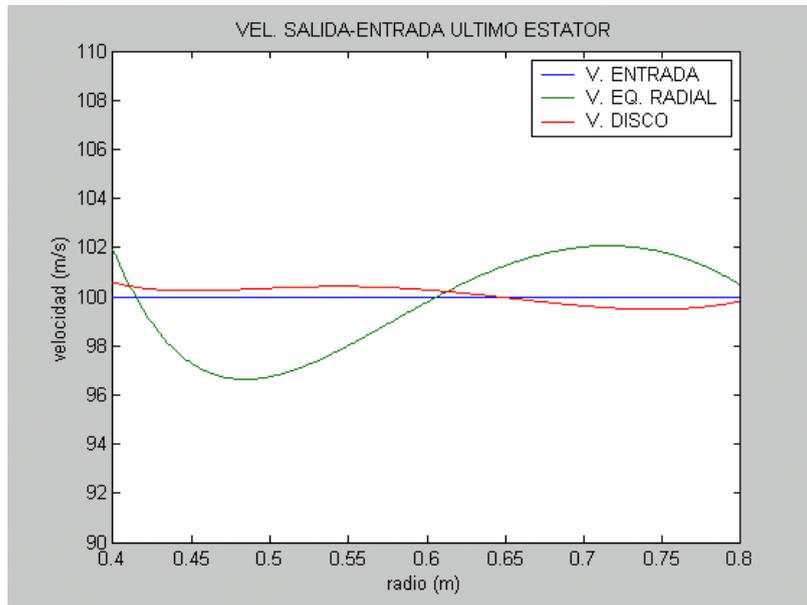
Viendo las figuras, se aprecia, además, como los perfiles del disco van a tender a un mismo valor tanto en rotor como en estator conforme el flujo vaya atravesando las coronas. Estos perfiles, quedarán “encerrados” entre los del equilibrio radial.



(Figura 4.29.b)

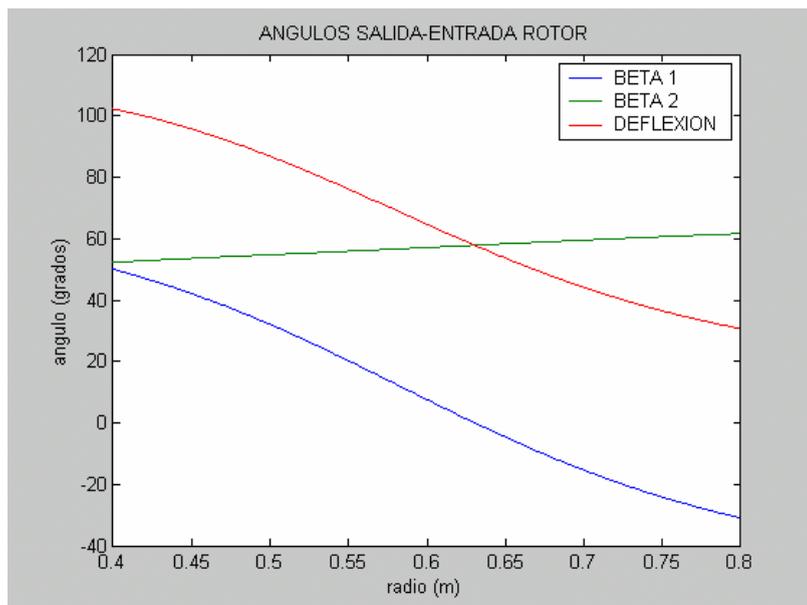


(Figura 4.29.c)

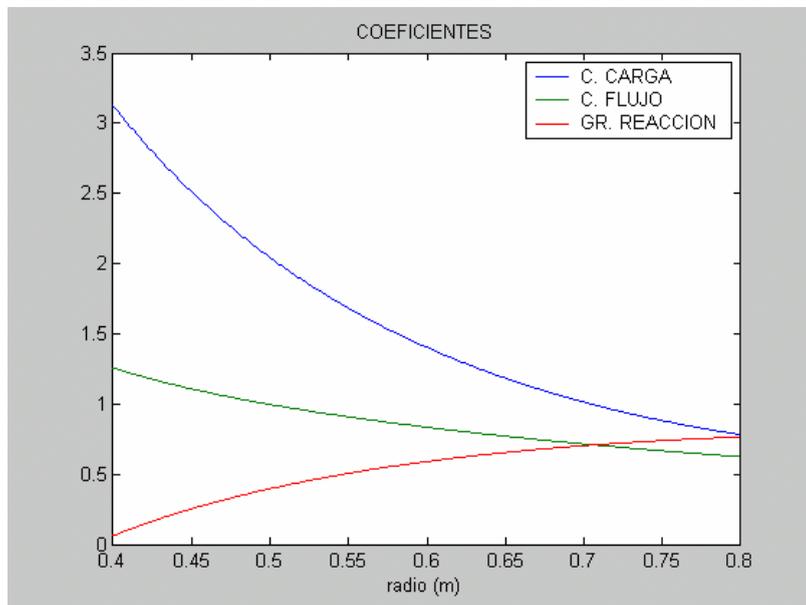


(Figura 4.29.d)

La deflexión alcanza para turbinas y con esta ley de nuevo valores muy elevados y variables con el radio a diferencia de los producidos por otras leyes torsionales donde los valores son menores y menos variables con el radio.

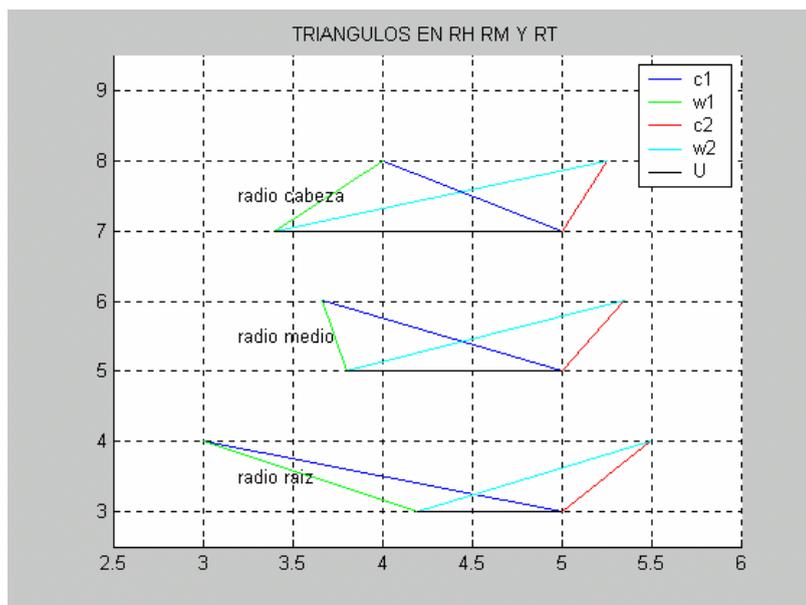


(Figura 4.29.e)



(Figura 4.29.f)

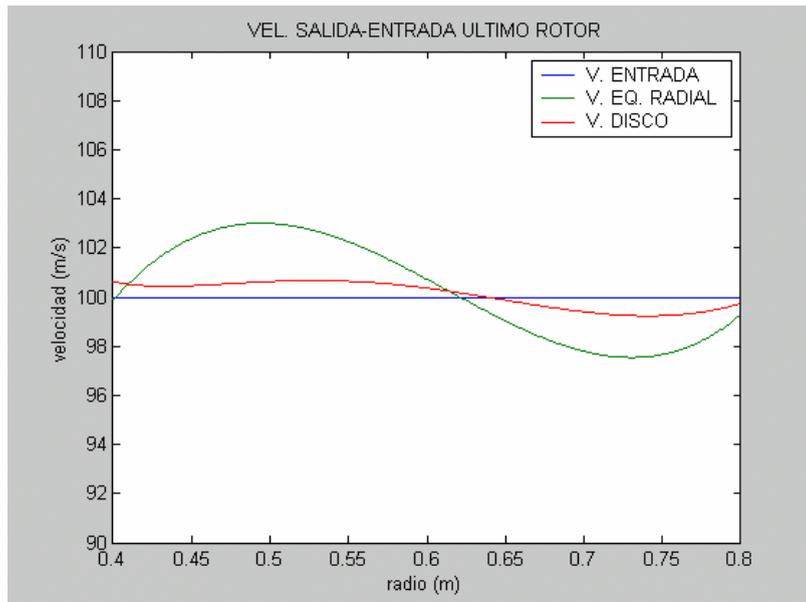
El grado de reacción también es muy pequeño en la zona de los radios de raíz, creciendo bruscamente con el radio. Esto, se convierte en una constante para esta ley tanto para ventiladores como para turbinas, así como para escalonamientos aislados o múltiples.



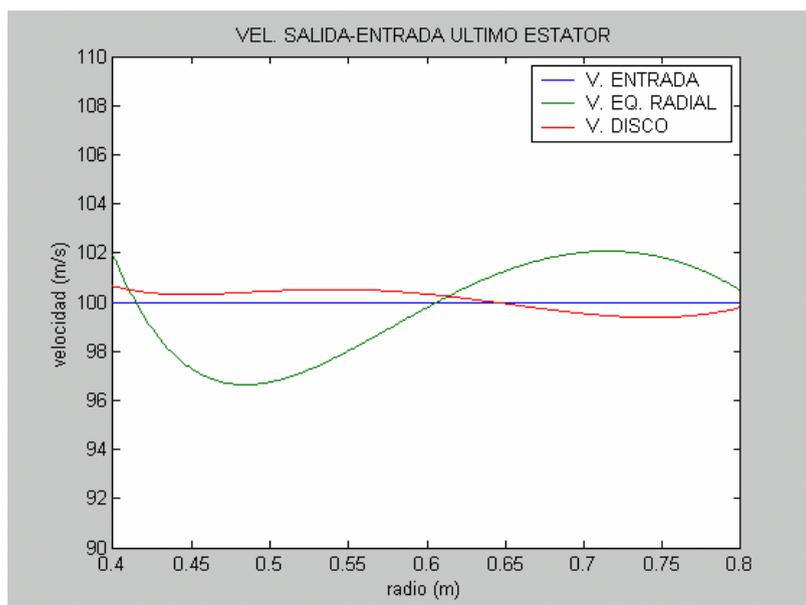
(Figura 4.29.g)

- **Tres escalonamientos. Torbellino libre**

$$x_{LE} = (0,0.075,0.15) \quad x_{AD} = (0.025,0.1,0.175) \quad x_{TE} = (0.05,0.125,0.2)$$



(Figura 4.30.a)



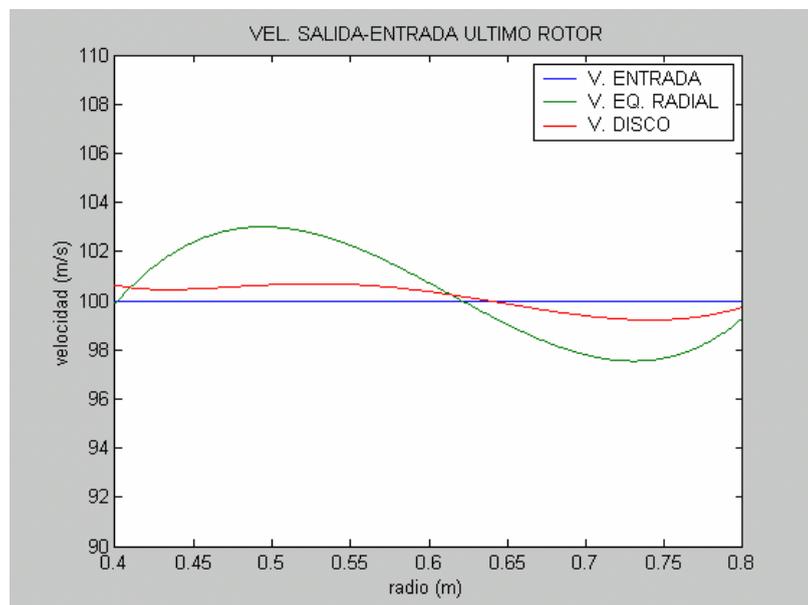
(Figura 4.30.b)

Si nos fijamos en las figuras (y comparándolas con el caso de dos escalonamientos, figuras 4.29.b y 4.29.d) podemos comprobar como entre el segundo y tercer escalonamiento los perfiles apenas sufren variaciones, tendiendo tanto en rotor como en estator al mismo perfil.

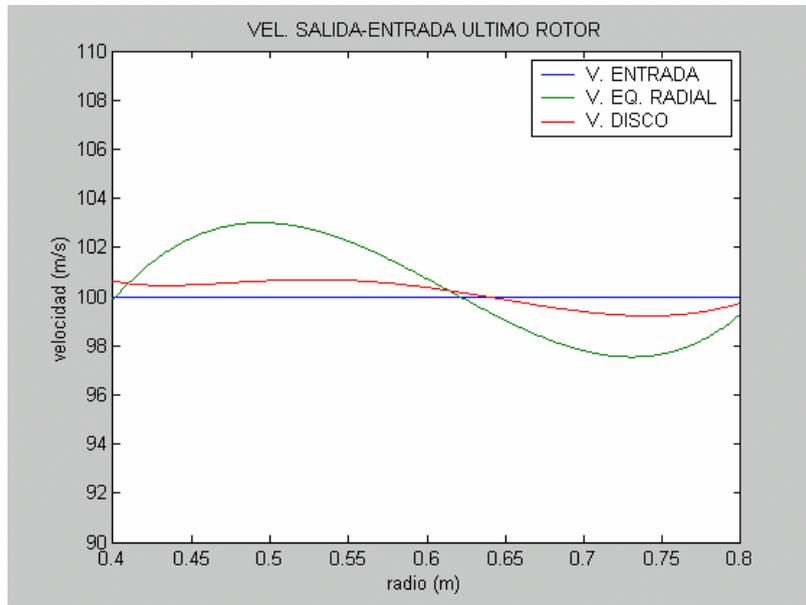
Seguidamente podemos confirmar esto al realizar el mismo caso para cuatro escalonamientos.

- **Cuatro escalonamientos. Torbellino libre**

$$x_{LE} = (0,0.075,0.15,0.225) \quad x_{AD} = (0.025,0.1,0.175,0.25) \quad x_{TE} = (0.05,0.125,0.2,0.275)$$



(Figura 4.31.a)



(Figura 4.31.b)

A continuación mostramos los resultados al aplicar ambas teorías sobre un escalonamiento múltiple con la ley torbellino fijo, $c_q = k * r$.

- **Dos escalonamientos. Torbellino fijo**

$$r_h = 0.4$$

$$r_t = 0.8$$

$$C_x = 200$$

$$c_{qE} = (120,180,240)$$

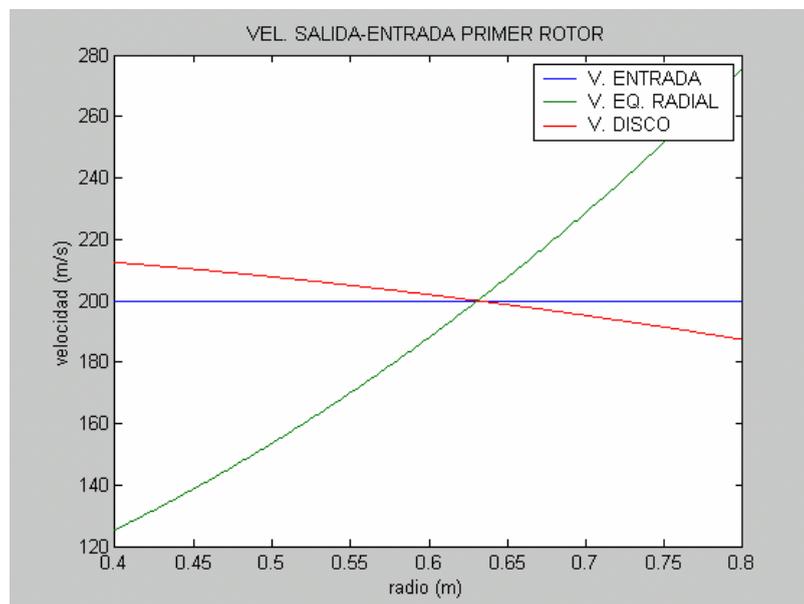
$$c_{qR} = (20,30,40)$$

$$\Omega = 200$$

$$x_{LE} = (0,0.075)$$

$$x_{AD} = (0.025,0.1)$$

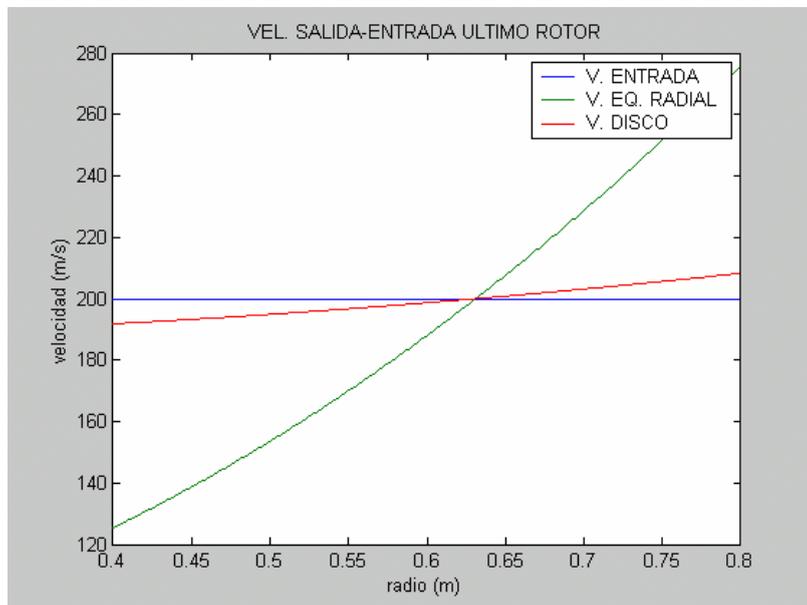
$$x_{TE} = (0.05,0.125)$$



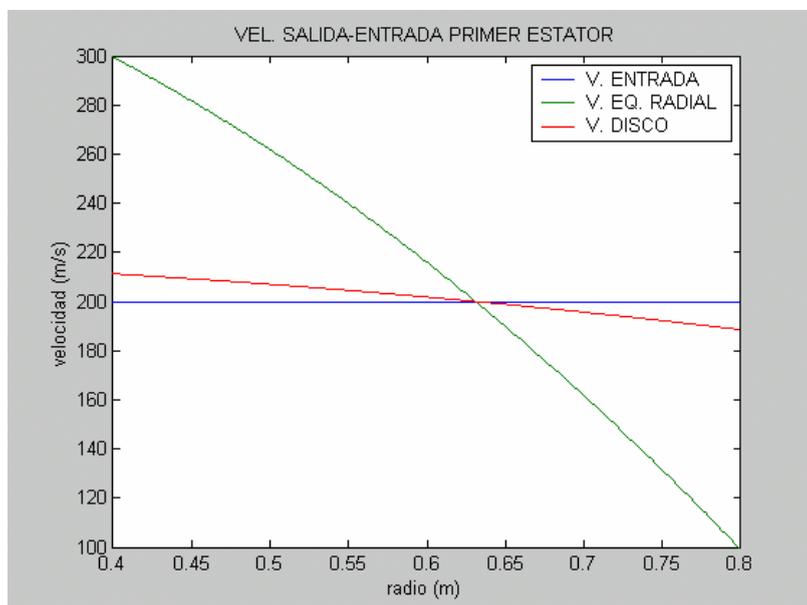
(Figura 4.32.a)

Al igual que se comentó en el caso anterior la evolución de los perfiles siguen las mismas tendencias.

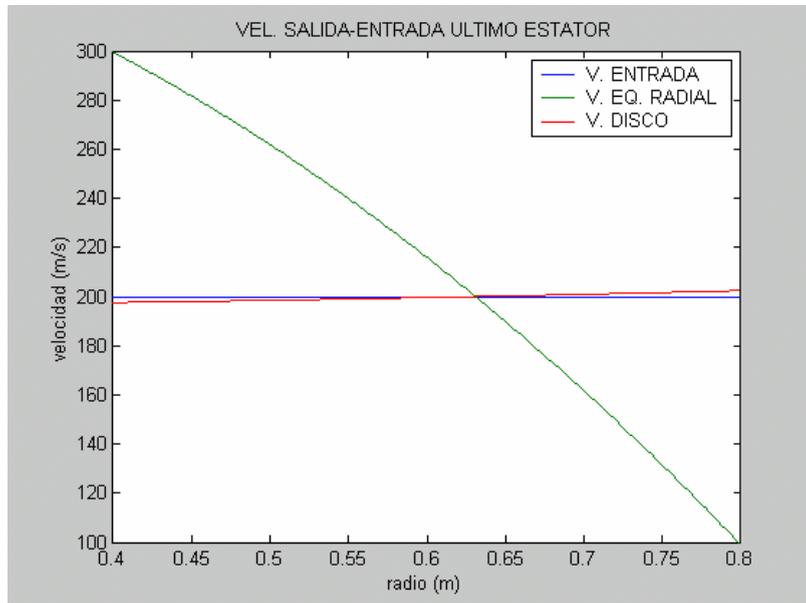
No obstante, vamos a hacer hincapié en un efecto que se produce al evaluar escalonamientos múltiples respecto a escalonamientos aislados y que tiene una influencia mayor con esta ley. Al tratar escalonamientos aislados con esta ley, vimos que tanto para ventiladores como para turbinas el perfil de la velocidad axial sufría unas variaciones elevadas respecto al de entrada. Al examinar ahora escalonamientos múltiples, si nos centramos en la solución del equilibrio radial podemos observar que esto se mantiene. Esto es así debido a que, como se comentó anteriormente, mediante este método el número de escalonamientos no tiene influencia sobre el mismo. Sin embargo, fijándonos en los perfiles obtenidos mediante el disco actuador vemos que estos adoptan formas muy diferentes a las mostradas en escalonamientos aislados, diferenciándose sobre todo con esta ley. Esto se debe a que, en la resolución de este método, la presencia de diversos escalonamientos si tiene influencia al existir una interrelación entre los mismos.



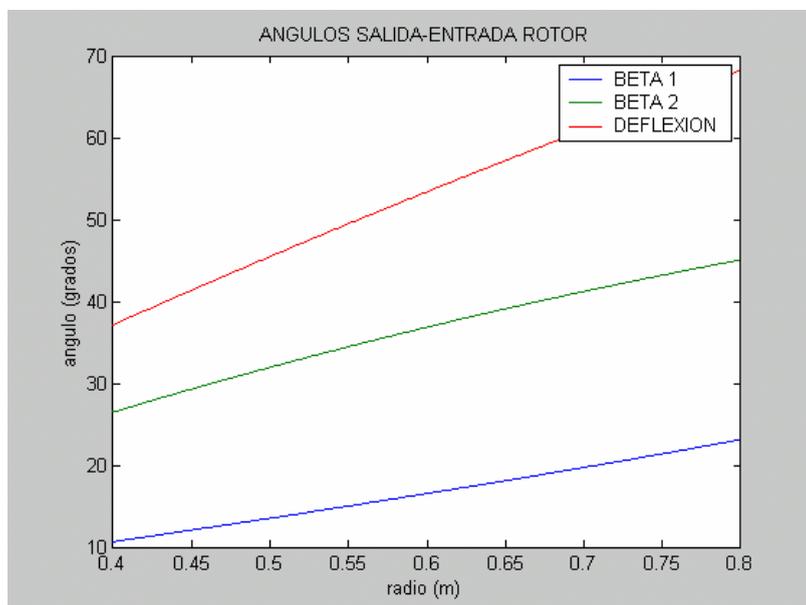
(Figura 4.32.b)



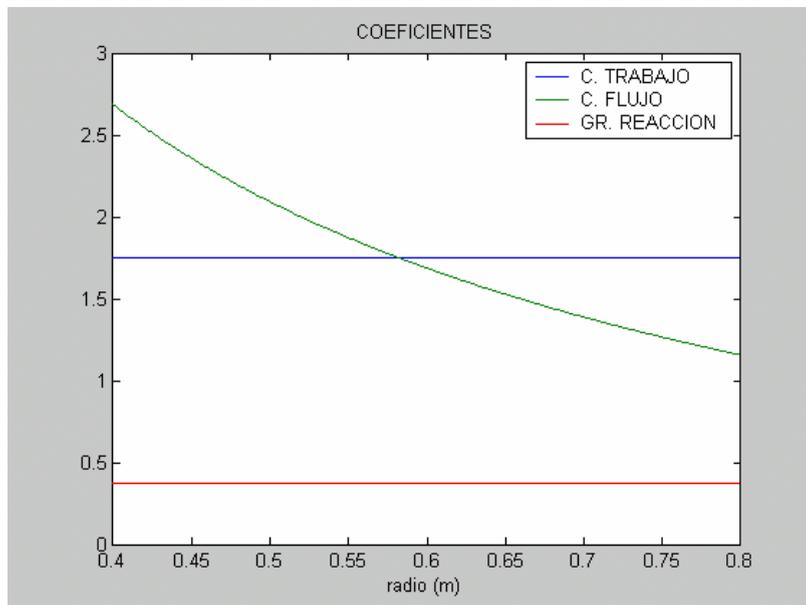
(Figura 4.32.c)



(Figura 4.32.d)

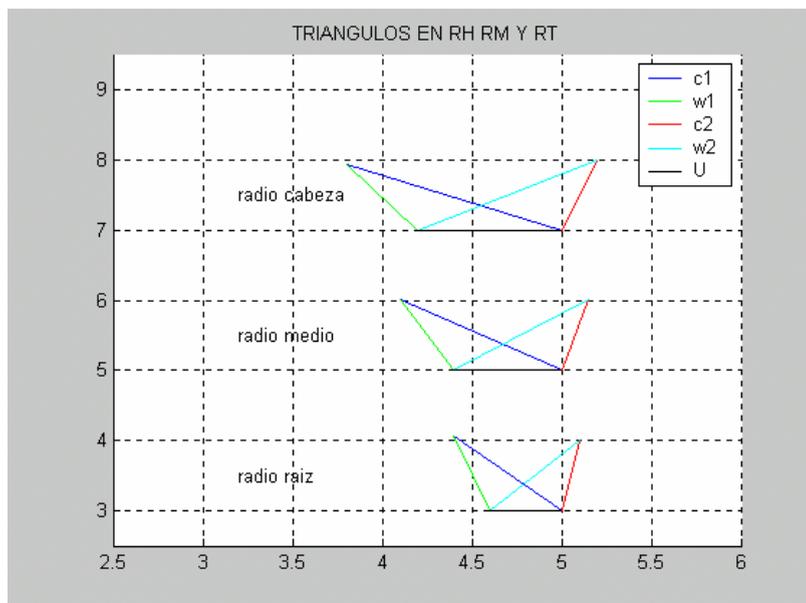


(Figura 4.32.e)



(Figura 4.32.f)

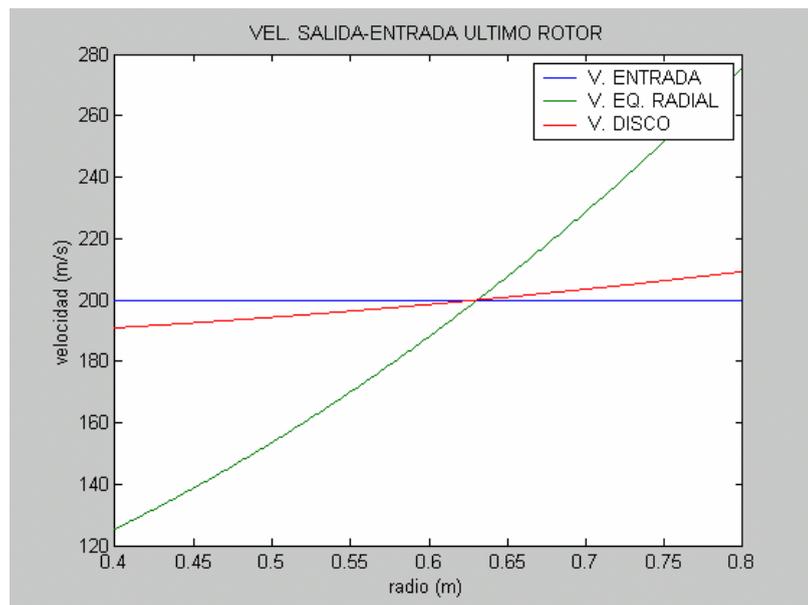
Se puede confirmar, que con la ley torbellino fijo, el grado de reacción y el coeficiente de carga también permanecen constantes con el radio para turbinas al igual que ocurría con los ventiladores.



(Figura 4.32.g)

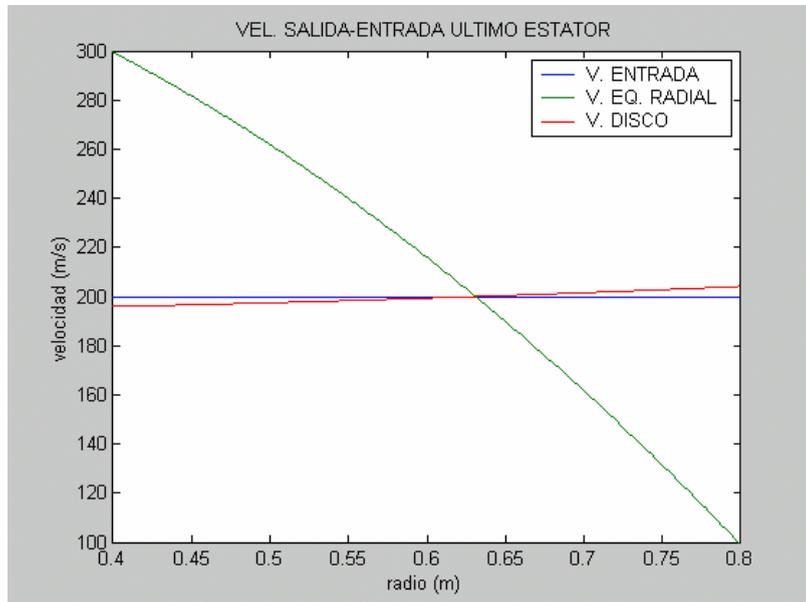
- **Tres escalonamientos. Torbellino fijo**

$$x_{LE} = (0,0.075,0.15) \quad x_{AD} = (0.025,0.1,0.175) \quad x_{TE} = (0.05,0.125,0.2)$$



(Figura 4.33.a)

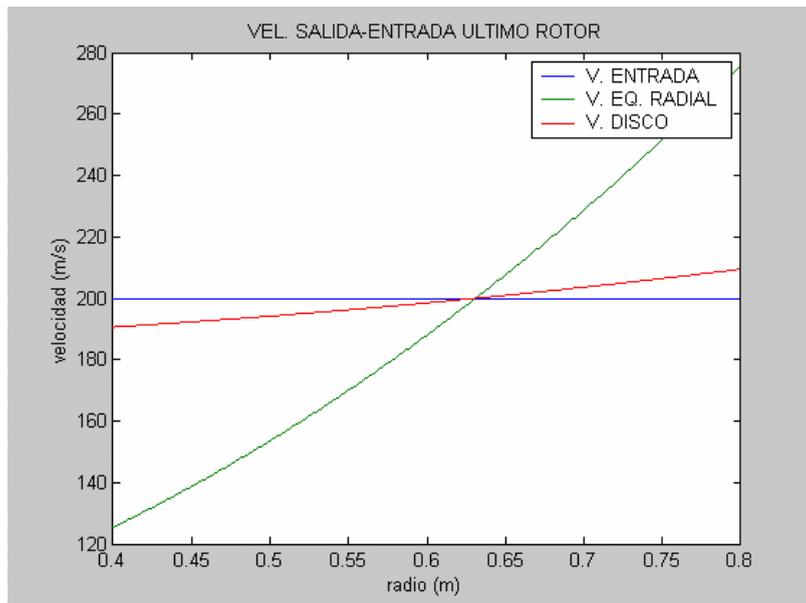
Si comparamos los resultados obtenidos al resolver para tres escalonamientos con los obtenidos anteriormente para el caso de dos escalonamientos (figuras 4.32.b y 4.32.d) comprobamos como la variación sufrida al pasar de dos a tres escalonamientos es mínima, siendo los perfiles prácticamente similares.



(Figura 4.33.b)

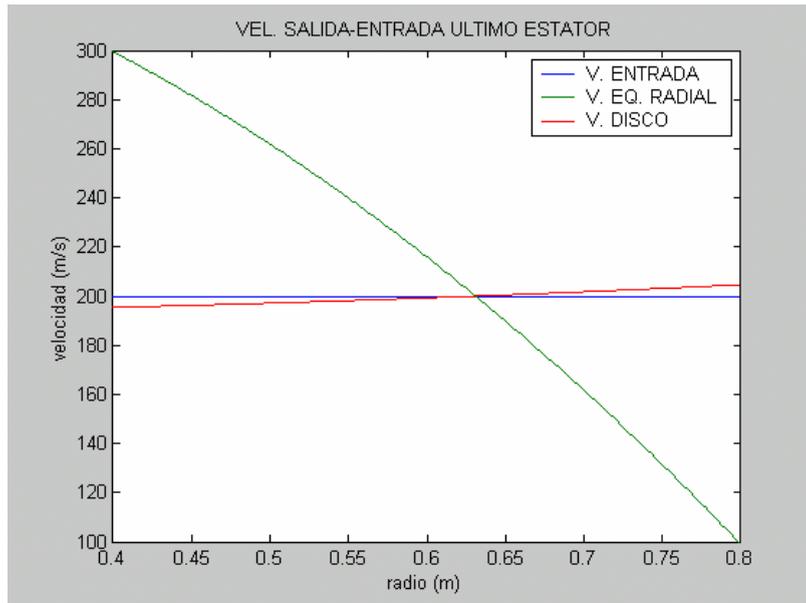
- **Cuatro escalonamientos. Torbellino fijo**

$$x_{LE} = (0,0.075,0.15,0.225) \quad x_{AD} = (0.025,0.1,0.175,0.25) \quad x_{TE} = (0.05,0.125,0.2,0.275)$$



(Figura 4.34.a)

Realizando el mismo caso para cuatro escalonamientos volvemos a comprobar como prácticamente no existe variación cuando seguimos aumentando el número de escalonamientos.



(Figura 4.34.b)

Seguimos el análisis de escalonamientos múltiples, aplicando ahora la ley torbellino mixto, $c_q = a * r + b / r$.

- **Dos escalonamientos. Torbellino mixto**

$$r_h = 0.4$$

$$r_t = 0.8$$

$$C_x = 200$$

$$c_{qE} = (216,157.2,133.2)$$

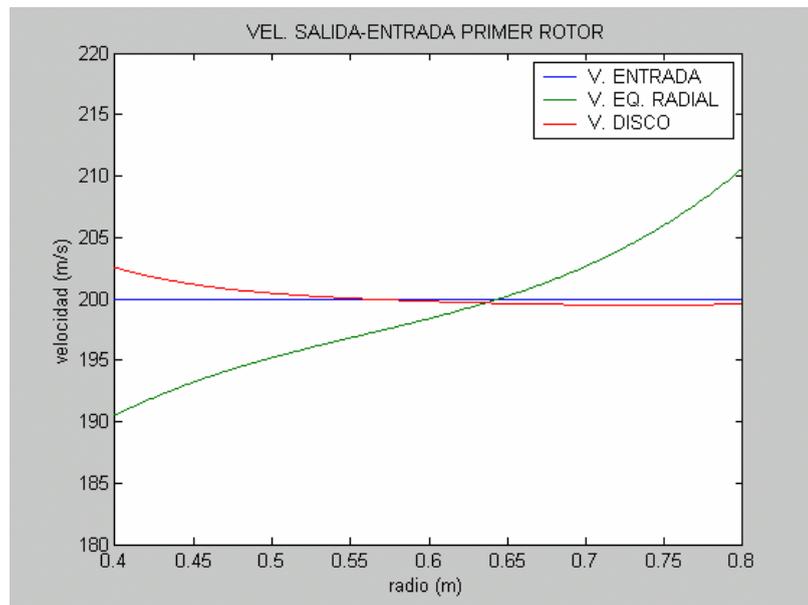
$$c_{qR} = (18,13.1,11.1)$$

$$\Omega = 200$$

$$x_{LE} = (0,0.075)$$

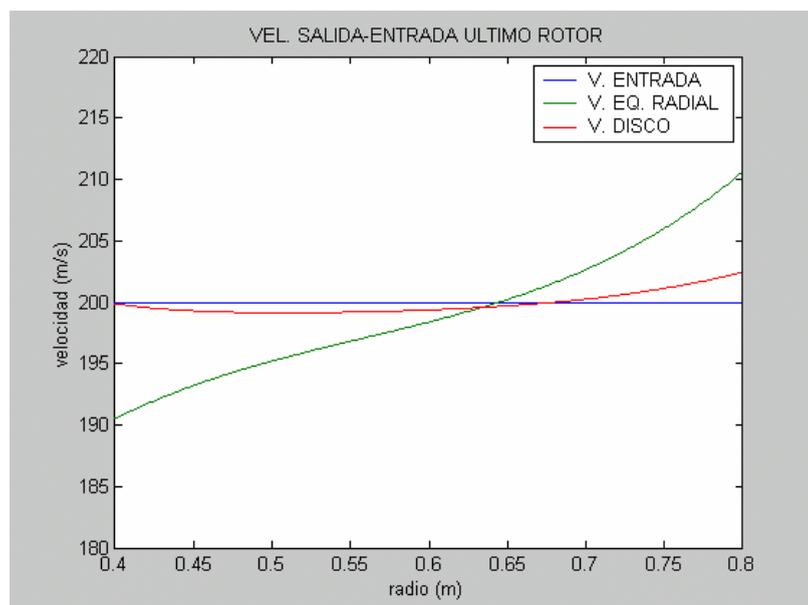
$$x_{AD} = (0.025,0.1)$$

$$x_{TE} = (0.05,0.125)$$

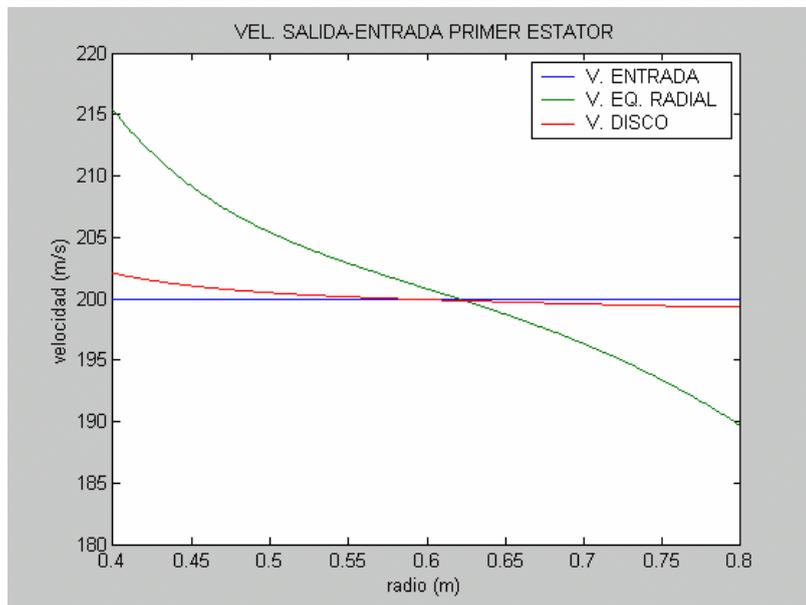


(Figura 4.35.a)

Examinando las salidas del primer y segundo rotor vemos como la variación que sufre el perfil obtenido mediante el “disco” es apreciable, mostrándose sin embargo invariante el obtenido mediante el equilibrio radial simplificado. Notar también, que la tendencia del perfil del “disco” es acercarse al del “equilibrio radial” como ocurría en casos anteriores.

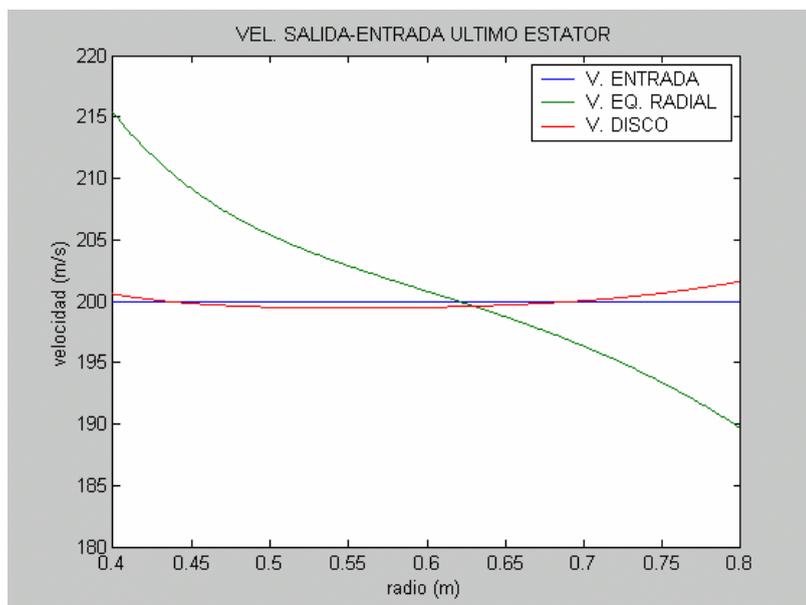


(Figura 4.35.b)

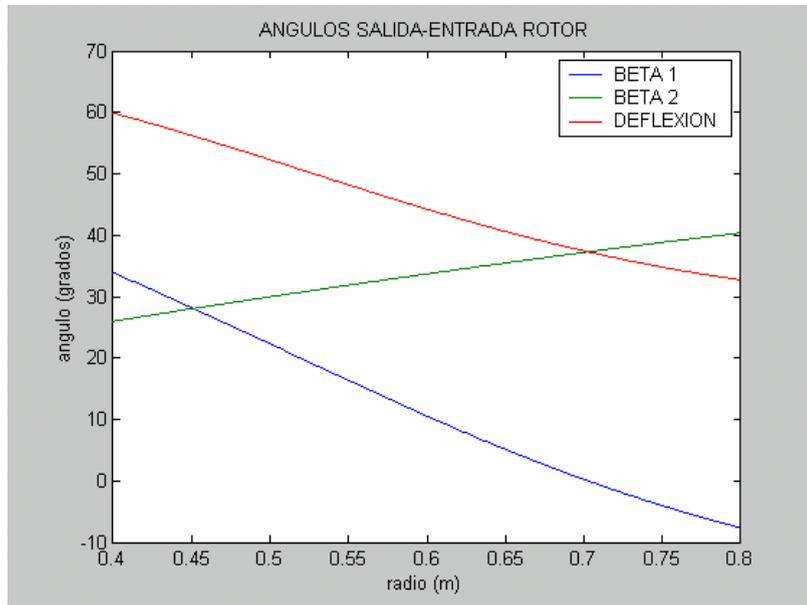


(Figura 4.35.c)

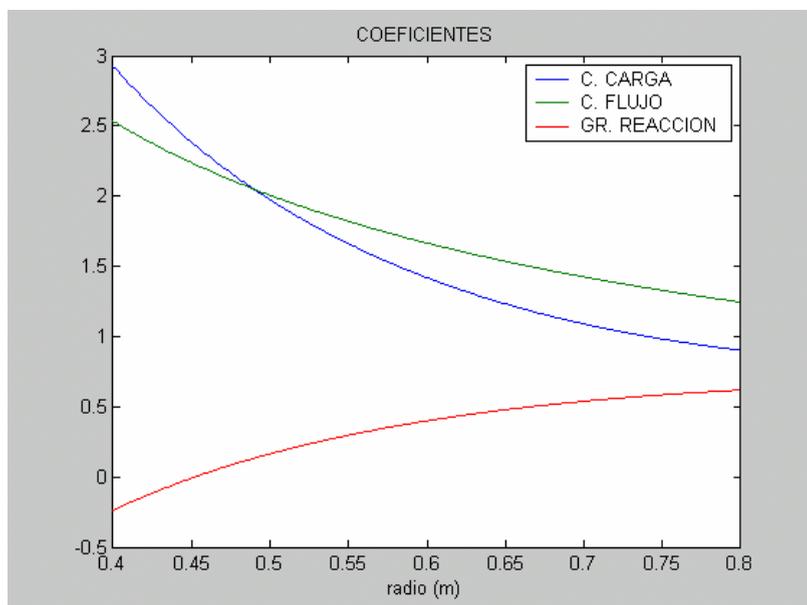
En el caso del estator, de nuevo vemos como entre estos dos primeros estator si se produce una variación apreciable, tendiendo en este caso el perfil del disco a “alejarse” de la solución del equilibrio radial.



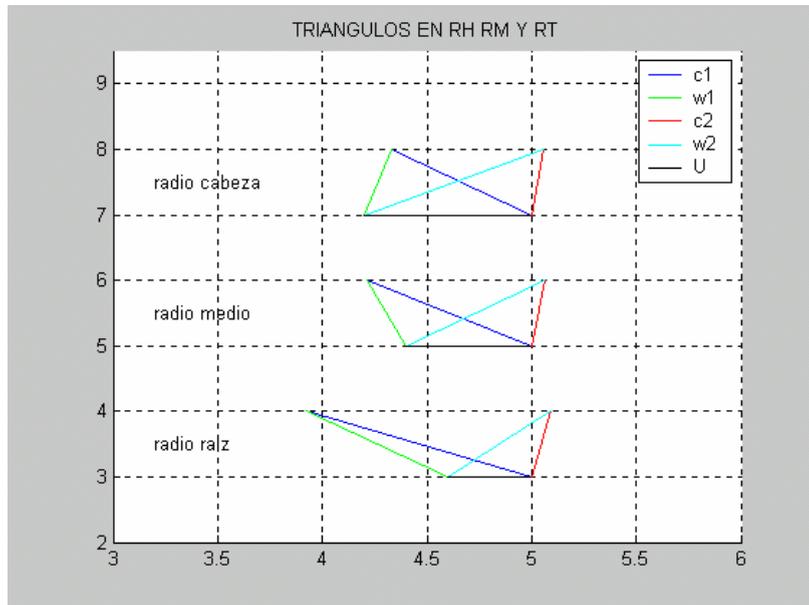
(Figura 4.35.d)



(Figura 4.35.e)



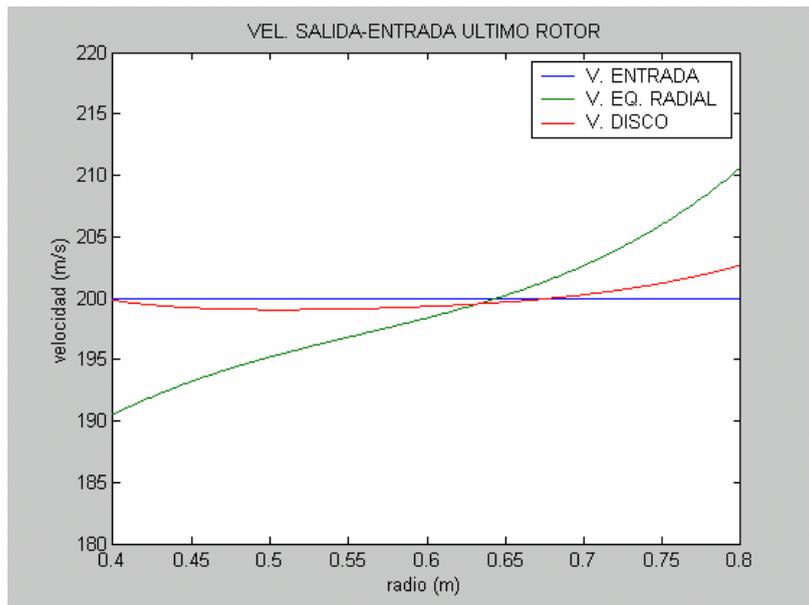
(Figura 4.35.f)



(Figura 4.35.f)

- Tres escalonamientos. Torbellino mixto

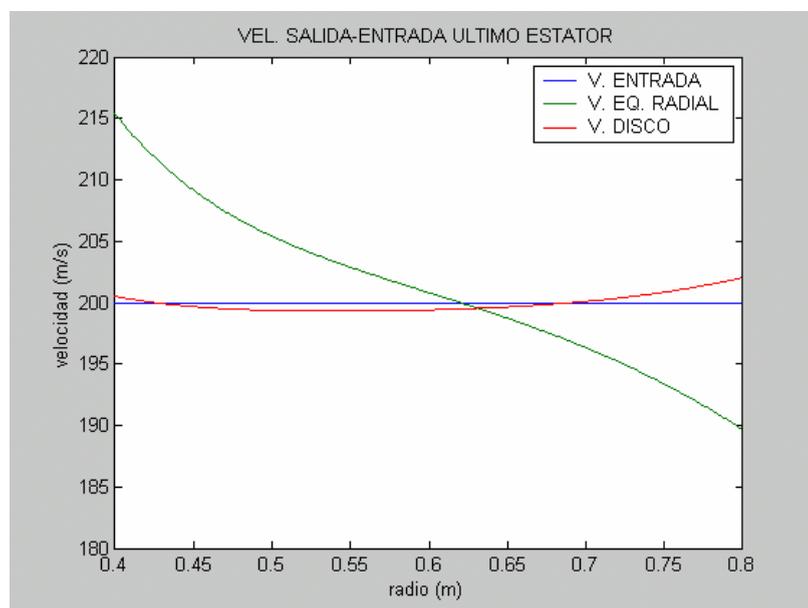
$$x_{LE} = (0,0.075,0.15) \quad x_{AD} = (0.025,0.1,0.175) \quad x_{TE} = (0.05,0.125,0.2)$$



(Figura 4.36.a)

Realizando el mismo ejemplo para tres escalonamientos, y comparando con el caso anterior, se observa que los perfiles son prácticamente idénticos con lo cual, el hecho de haber añadido un nuevo escalonamiento no tiene influencia sobre la solución alcanzada.

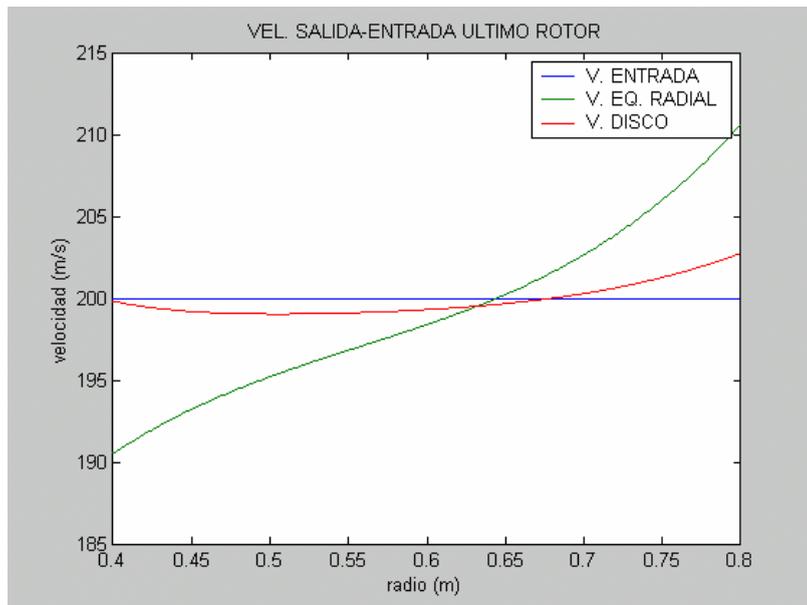
Esta misma conclusión se puede comprobar seguidamente al resolver un escalonamiento múltiple con cuatro etapas.



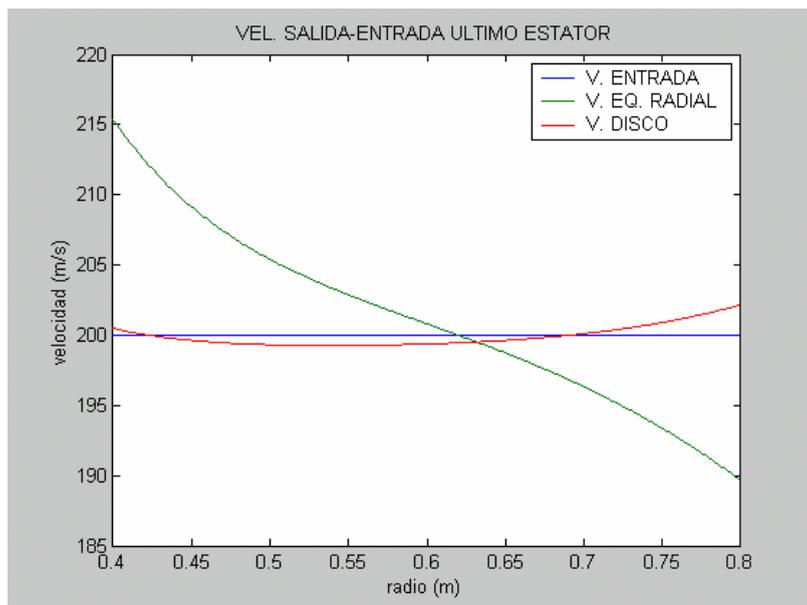
(Figura 4.36.b)

- Cuatro escalonamientos. Torbellino mixto

$$x_{LE} = (0,0.075,0.15,0.225) \quad x_{AD} = (0.025,0.1,0.175,0.25) \quad x_{TE} = (0.05,0.125,0.2,0.275)$$



(Figura 4.37.a)



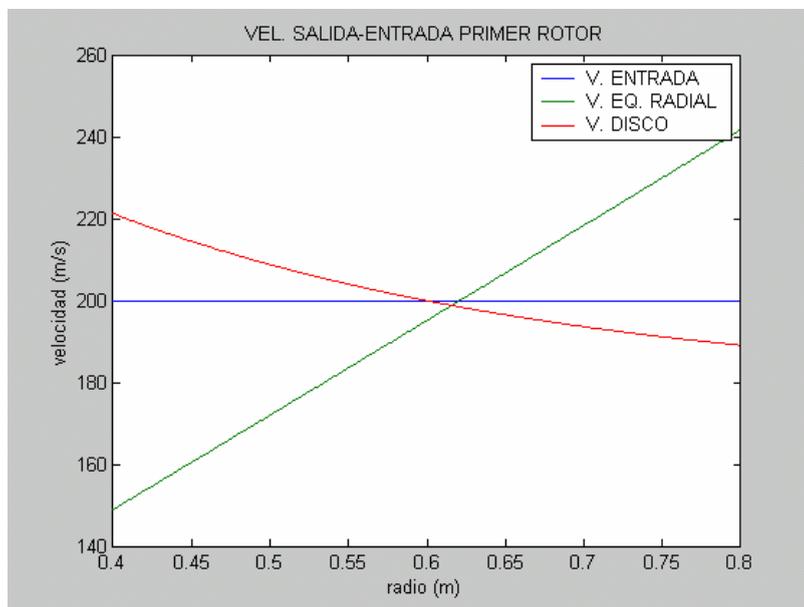
(Figura 4.37.b)

Para terminar el análisis del flujo incompresible sobre escalonamientos múltiples de turbinas realizamos el siguiente caso con la ley torsional velocidad tangencial constante.

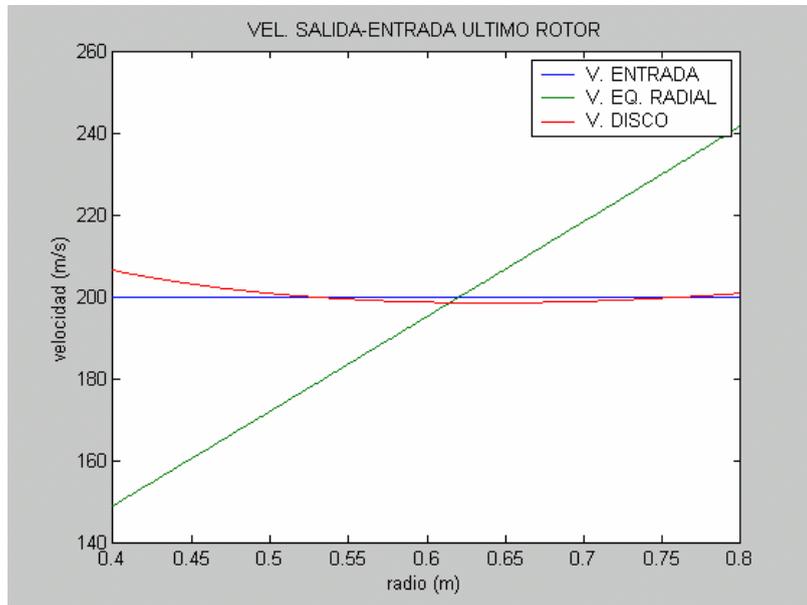
En las representaciones que se muestran a continuación se puede comprobar como se vuelven a repetir los resultados que se han ido obteniendo en los sucesivos casos, obteniéndose por tanto las mismas conclusiones.

- **Dos escalonamientos. Velocidad tangencial constante**

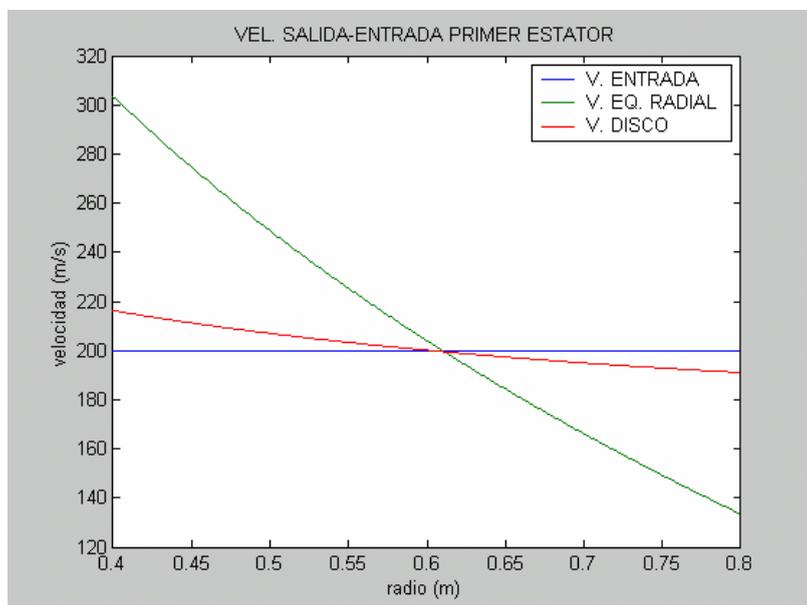
| | | |
|----------------------------|-------------------------|--------------------------|
| $r_h = 0.4$ | $r_t = 0.8$ | $C_x = 200$ |
| $c_{qE} = (230, 230, 230)$ | $c_{qR} = (25, 25, 25)$ | $\Omega = 200$ |
| $x_{LE} = (0, 0.075)$ | $x_{AD} = (0.025, 0.1)$ | $x_{TE} = (0.05, 0.125)$ |



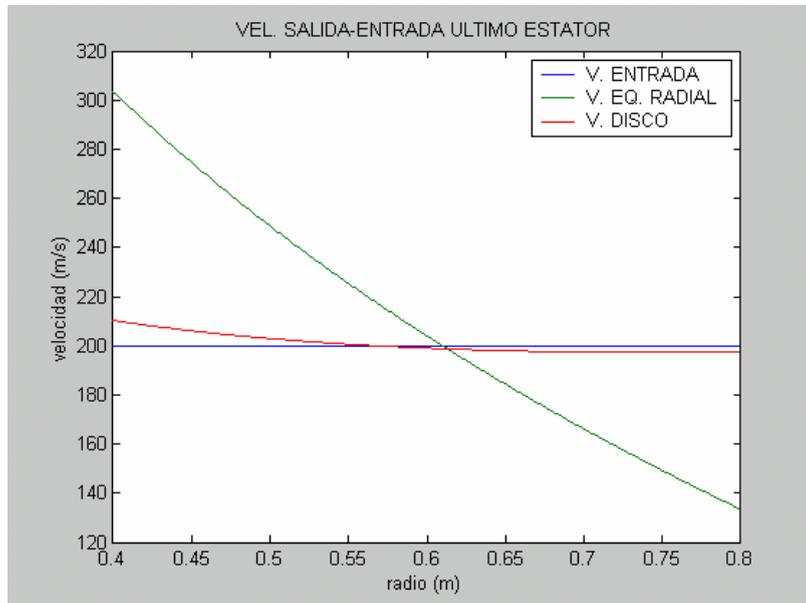
(Figura 4.38.a)



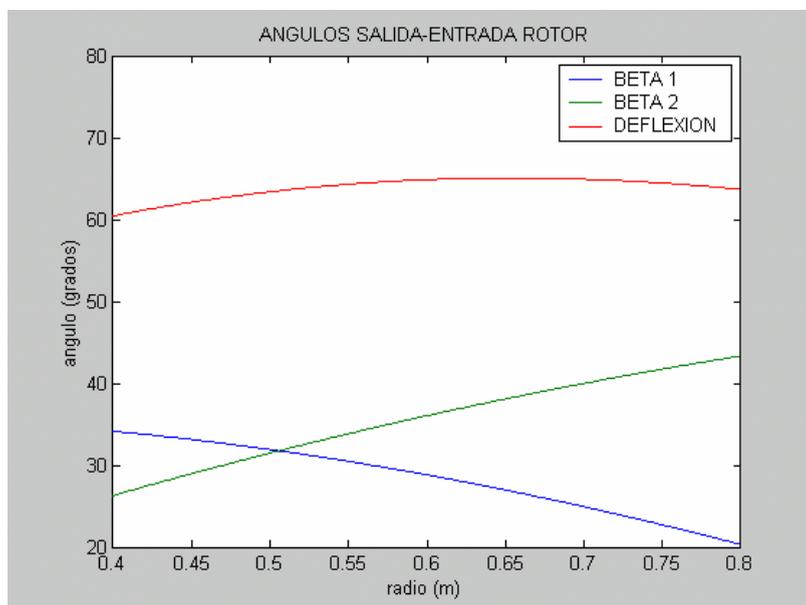
(Figura 4.38.b)



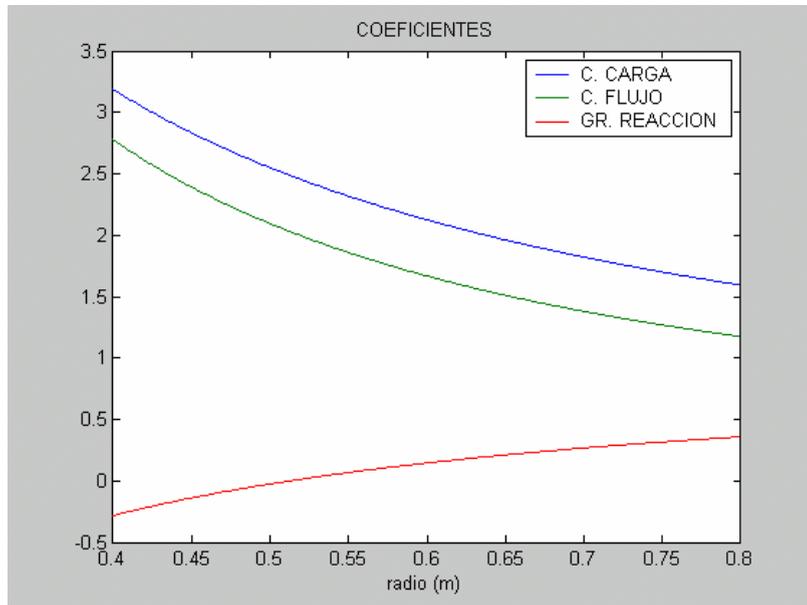
(Figura 4.38.c)



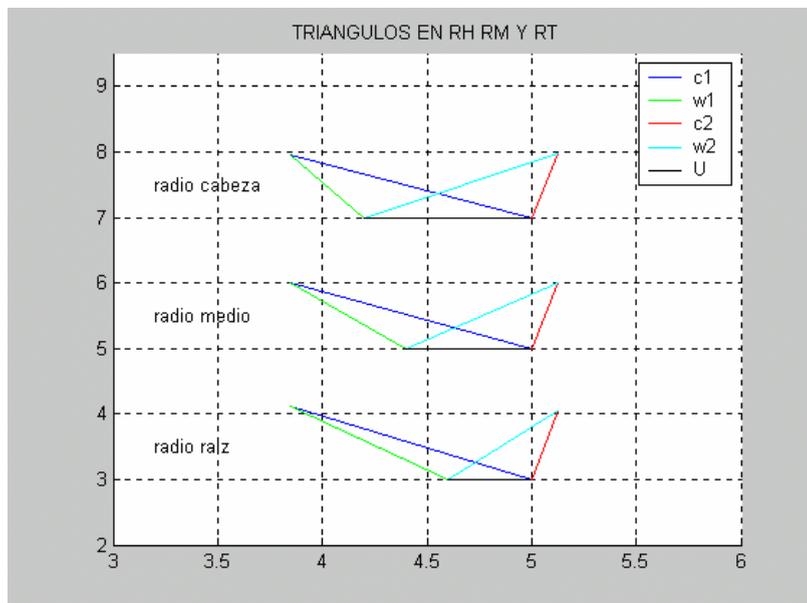
(Figura 4.38.d)



(Figura 4.38.e)



(Figura 4.38.f)

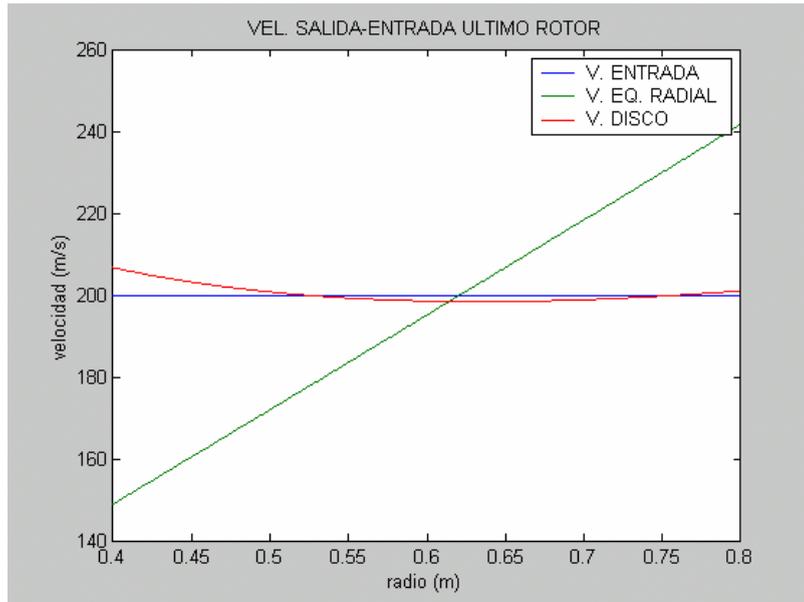


(Figura 4.38.g)

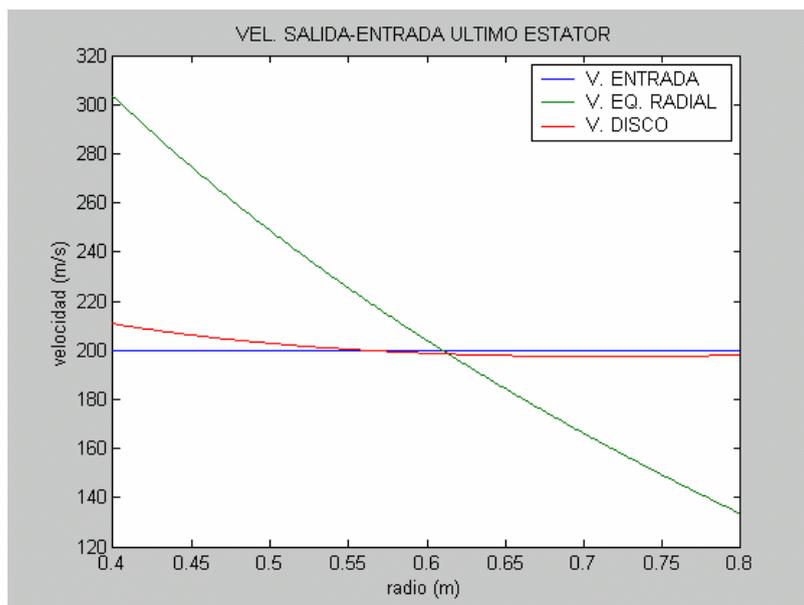
En el caso de resolver tres y cuatro escalonamientos con la misma ley, volvemos a obtener unos resultados similares a los obtenidos con anterioridad.

- **Tres escalonamientos. Velocidad tangencial constante**

$$x_{LE} = (0,0.075,0.15) \quad x_{AD} = (0.025,0.1,0.175) \quad x_{TE} = (0.05,0.125,0.2)$$



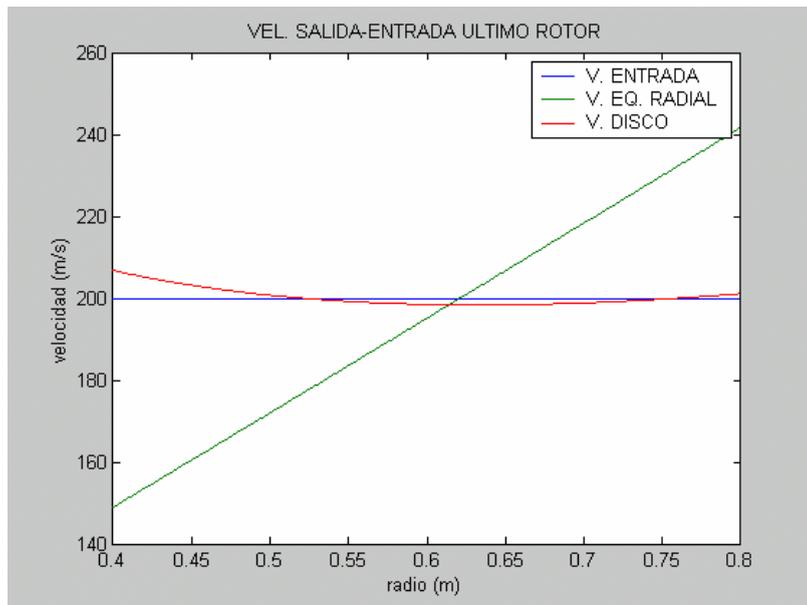
(Figura 4.39.a)



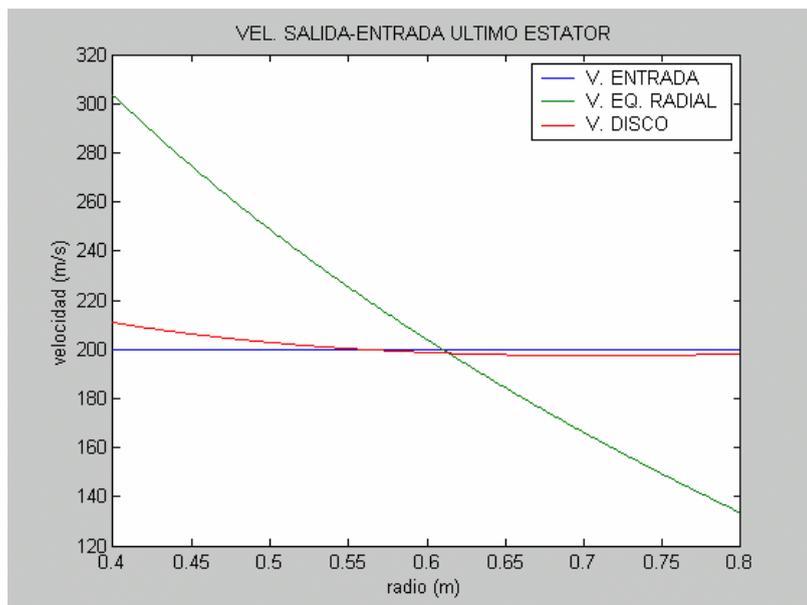
(Figura 4.39.b)

- Cuatro escalonamientos. Velocidad tangencial constante

$$x_{LE} = (0,0.075,0.15,0.225) \quad x_{AD} = (0.025,0.1,0.175,0.25) \quad x_{TE} = (0.05,0.125,0.2,0.275)$$



(Figura 4.40.a)



(Figura 4.40.b)

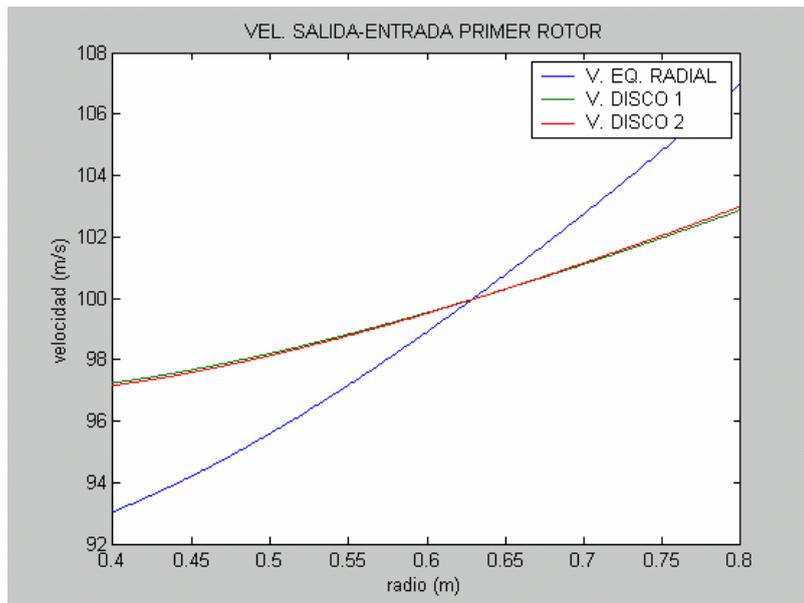
Una vez examinadas las diferentes leyes en los distintos elementos, vamos a fijarnos en la posible influencia de las posiciones de los discos a la hora de resolver mediante la teoría del disco actuador.

Para ello vamos a resolver un escalonamiento de ventilador con dos etapas. Primero se resolverá con una determinada distancia entre los discos y posteriormente se resolverá el mismo caso pero duplicando esa distancia entre discos.

Vamos a fijarnos en los resultados que se muestran a continuación.

- **Dos escalonamientos. Velocidad tangencial constante**

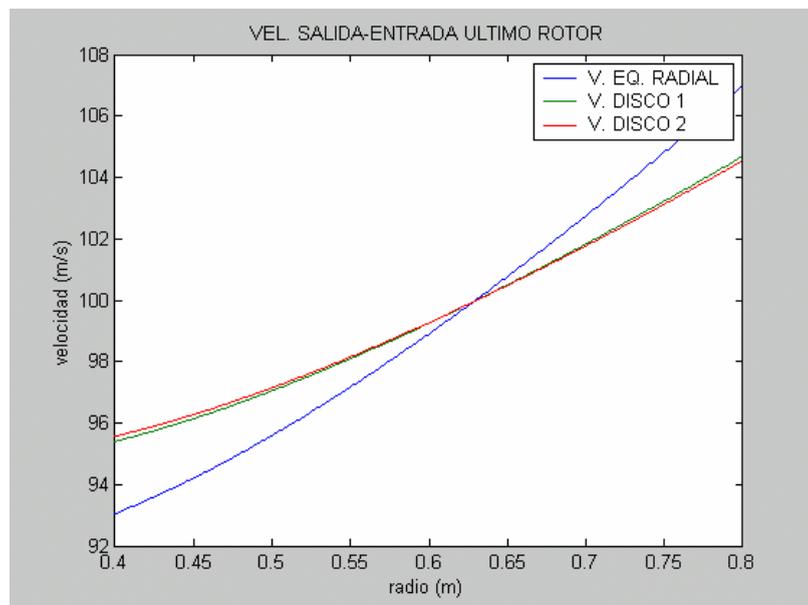
| | | |
|-----------------------|---------------------------|-------------------------|
| $r_h = 0.4$ | $r_t = 0.8$ | $C_x = 100$ |
| $c_{qE} = (15,15,15)$ | $c_{qR} = (45,45,45)$ | $\Omega = 242$ |
| $x_{LE} = (0,0.075)$ | $x_{AD} = (0.025,0.1)$ | $x_{TE} = (0.05,0.125)$ |
| $x_{LE2} = (0,0.15)$ | $x_{AD2} = (0.025,0.175)$ | $x_{TE2} = (0.05,0.2)$ |



(Figura 4.41.a)

Si nos fijamos en la gráfica, podemos comprobar como en el primer escalonamiento, que si recordamos era donde se producía el mayor salto, apenas difieren los perfiles entre ambos casos. Es decir, tiene poca influencia la distancia entre los discos, siempre y cuando las distancias seleccionadas sean razonables.

Si nos fijamos ahora en el segundo escalonamiento, de nuevo podemos comprobar como apenas difieren las soluciones entre ambos casos, siendo prácticamente iguales los perfiles radiales de la velocidad axial.



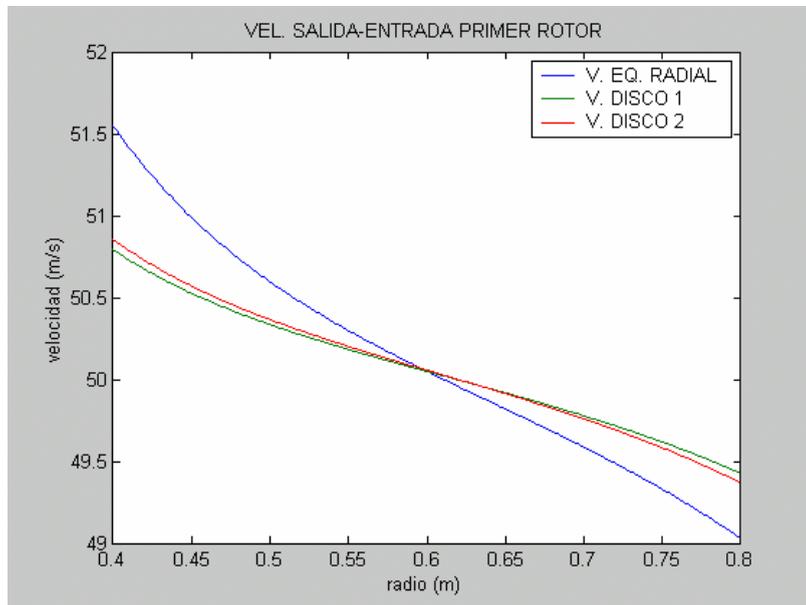
(Figura 4.41.b)

Vamos a realizar otro ejemplo para corroborar los resultados anteriores utilizando otra ley torsional, en este caso la de “torbellino mixto”.

- **Dos escalonamientos. Torbellino mixto**

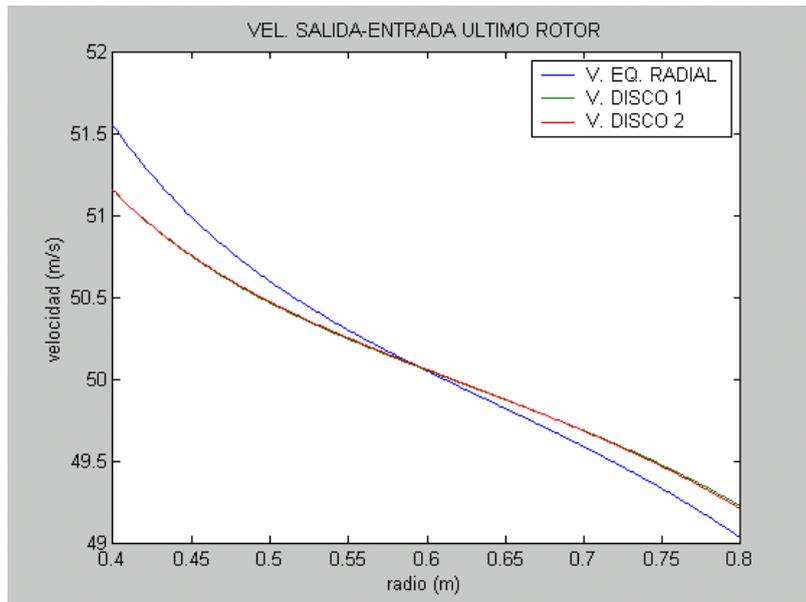
| | | |
|----------------------|---------------------------|-------------------------|
| $r_h = 0.4$ | $r_t = 0.8$ | $C_x = 50$ |
| $c_{qE} = (10,8,9)$ | $c_{qR} = (32,28.3,30)$ | $\Omega = 50$ |
| $x_{LE} = (0,0.075)$ | $x_{AD} = (0.025,0.1)$ | $x_{TE} = (0.05,0.125)$ |
| $x_{LE2} = (0,0.15)$ | $x_{AD2} = (0.025,0.175)$ | $x_{TE2} = (0.05,0.2)$ |

Si nos fijamos en el primer rotor, de nuevo vemos como, la solución con el disco 2 (cuya distancia entre discos es el doble que en el disco 1), es muy similar al del disco 1. De nuevo se pone de manifiesto, que a efectos prácticos, la influencia de la distancia entre “discos” es poco relevante.



(Figura 4.42.a)

Viendo la gráfica del último rotor, vemos como en este la diferencia es aún menor, siendo ambas soluciones prácticamente coincidentes.



(Figura 4.42.b)