

Unidad 6: Resultados empíricos para flujo turbulento en procesos metalúrgicos y de materiales

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA

PROFESOR: LUIS ENRIQUE JARDÓN PÉREZ

Índice

- Introducción
 - ¿Qué es la turbulencia?
 - ¿Cómo calculamos el efecto de la turbulencia sobre la fluidodinámica?
- Software CFD
- Procedimiento de solución mediante software CFD
- Software ANSYS

Introducción

¿Qué es la turbulencia?

¿Cómo cambia el comportamiento de un flujo laminar y uno turbulento?

Introducción

La **turbulencia** es, en términos generales, el grado de **movimiento caótico** que presenta un fluido, es decir, es el grado de cambios espacio-temporales que sufre un fluido en su velocidad y presión.

La **turbulencia** se caracteriza por presentarse en fluidos que presentan un **movimiento** con un componente **convectivo** alto.

La **turbulencia** que presenta un flujo **promueve** los **transportes de momentum, energía térmica** y de **especies químicas**, es decir, a mayor turbulencia mayor será el transporte de dichas cantidades dentro del fluido.

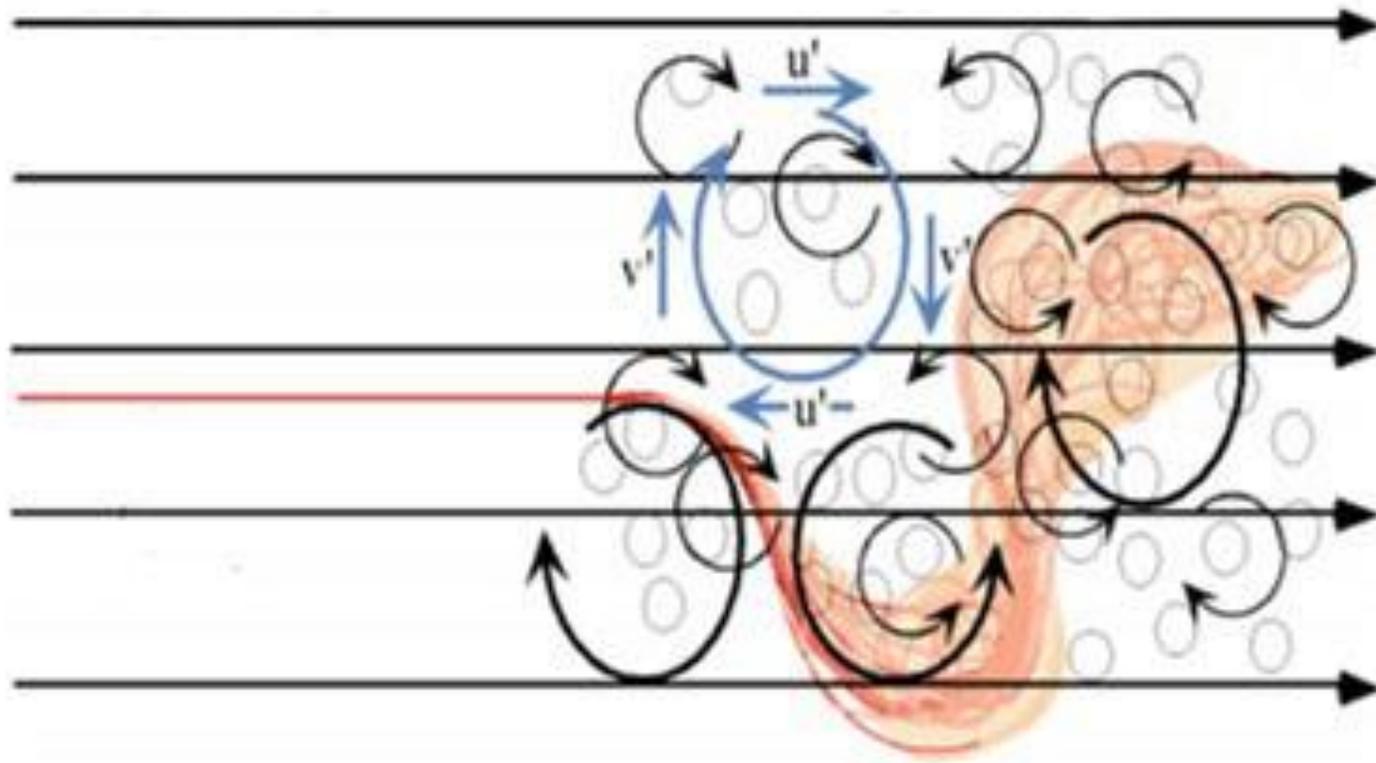
A pesar de la importancia que tiene la turbulencia, aun hoy día, **no se ha explicado completamente dicho fenómeno**, tendiendo por ende diversas **teorías** que buscan explicarla y **modelos** que la predicen, pero aun queda mucho camino para poder cuantificarla perfectamente.

Introducción

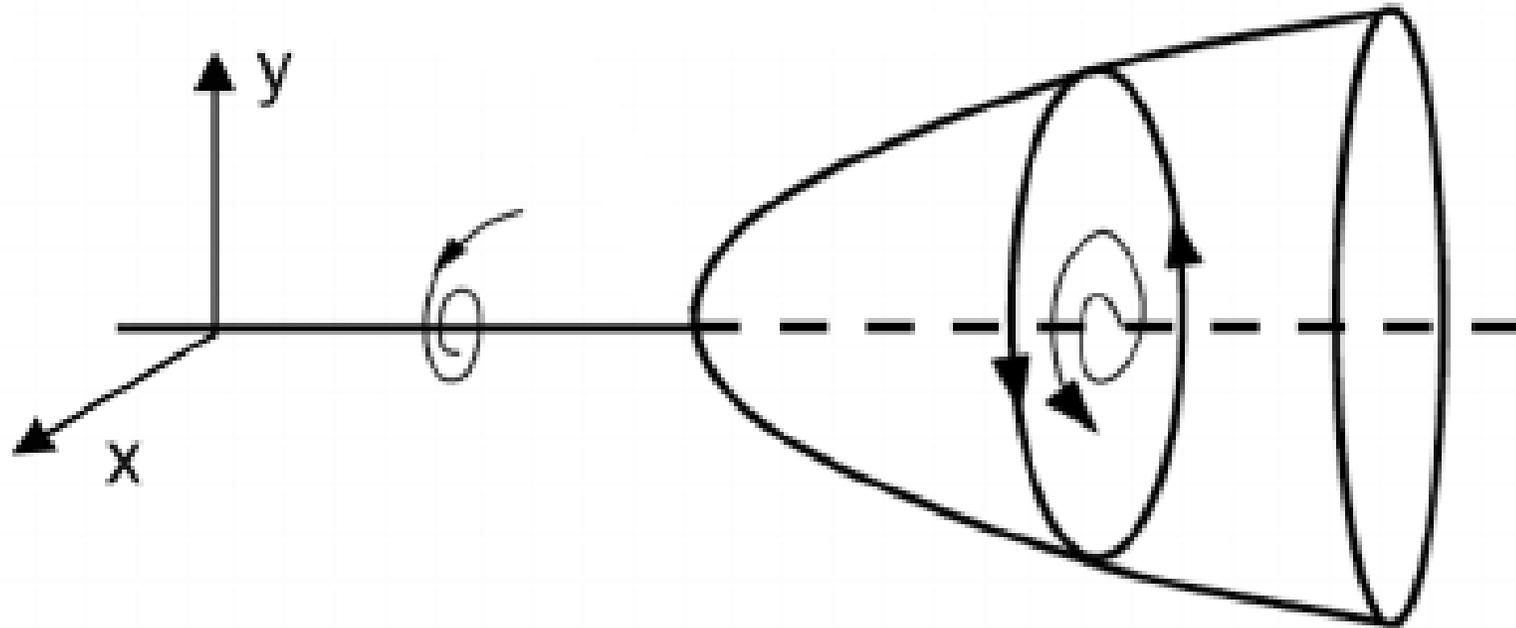
Las principales teorías de turbulencia son:

- Teoría de [Kolmogorov](#) (1941): plantea que la turbulencia en un fluido es debido a la presencia de eddys de diferentes tamaños dentro del flujo, los cuales son pequeños remolinos que aparecen y desaparecen dentro del mismo.
- Teoría de [Landau-Hopf](#) (1944): proponen que la turbulencia se debe a una superposición indefinida de bifurcaciones oscilatorias sucesivas, es decir, que se presentan pequeñas vibraciones dentro del flujo que se van acumulando en el fluido.
- Teoría [Ruelle-Takens](#) (1971): es similar a la teoría de Landau-Hopf, pero en este caso trata la turbulencia como un proceso estocástico, es decir, su predicción debe considerar elementos aleatorios, y por lo tanto la presencia de turbulencia en el sistema solo puede tenerse tras un número finito de bifurcaciones de Hopf.

Introducción



Introducción



Introducción

¿Cómo calculamos el efecto de la turbulencia sobre la fluidodinámica?

Ecuaciones gobernantes

La resolución de la fluidodinámica de un flujo turbulento requiere de la solución de las ecuaciones de continuidad, de Navier-Stokes y la resolución de los esfuerzos de Reynolds.

Ecuación de continuidad (conservación de masa) para flujo estacionario 2D axisimétrico, sin términos fuente.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho u_r) + \frac{\rho v_r}{r} = 0$$

Dónde:

u_x es el componente axial de la velocidad, u_r es el componente radial de la velocidad y ρ es la densidad.

Nota:

$$\begin{aligned} u_i &= (u_x, u_r) \\ x_i &= (x, r) \end{aligned}$$

Ecuaciones gobernantes

Ecuación de Navier-Stokes (conservación de momentum) para flujo estacionario 2D axisimétrico.

Componente axial (x):

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \rho u_x u_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho u_r u_x) \\ &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial r} + \frac{\partial u_r}{\partial x} \right) \right] \end{aligned}$$

Componente radial (r):

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \rho u_x u_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho u_r u_r) \\ &= -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{\partial u_r}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial r} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{u}) \right) \right] - 2\mu \frac{u_r}{r^2} + \frac{2\mu}{3r} (\nabla \cdot \vec{u}) \end{aligned}$$

Dónde:

$$\nabla \cdot \vec{u} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r}$$

P es la presión estática y μ es la viscosidad molecular.

Ecuaciones gobernantes

En modelos de turbulencia basados en los **esfuerzos de Reynolds (RANS)** las ecuaciones se descomponen en su componente promedio y el fluctuante.

Para la velocidad:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i$$

Dónde, \bar{u}_i y u'_i son los componentes promedio y fluctuantes de la velocidad, siendo $i = (x, r)$

De la misma manera, las cantidad escalares (φ), toman la forma:

$$\varphi = \bar{\varphi} + \varphi'$$

Donde, $\bar{\varphi}$ y φ' son el valor promedio y fluctuante de las cantidades escalares (presión, energía, especies, etcétera)

Modelo de turbulencia

Reynolds stress model (RSM)

Dado que los modelos de esfuerzos de Reynolds (RSM) toman en cuenta el efecto de la curvatura en la línea de flujo, los giros, la rotación, y los cambios rápidos en el tensor de esfuerzos de una manera más rigurosa, tienen un gran potencial para dar predicciones precisas para flujos complejos.

El cálculo de la turbulencia en este tipo de modelos puede estar basada en ε o en ω , siendo particularmente importante la forma en la que se calculan los distintos esfuerzos para lograr una predicción precisa de la turbulencia en el modelo.

RSM:

Gibson, M. M., & Launder, B. E. (1978). Ground effects on pressure fluctuations in the atmospheric boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 86(3), 491-511.

Launder, B. E. (1989). Second-moment closure: present... and future?. *International Journal of Heat and fluid flow*, 10(4), 282-300.

Launder, B. E., Reece, G. J., & Rodi, W. (1975). Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure. *Journal of fluid mechanics*, 68(3), 537-566.

Ecuaciones gobernantes

Además, a la ecuación de Navier-Stokes se le añade un término:

$$+ \frac{\partial}{\partial x_i} (-\rho \overline{u'_i u'_j})$$

Siendo $\overline{u'_i u'_j}$ los esfuerzos de Reynolds.

Los cuales deben resolverse añadiendo un total de siete ecuaciones gobernantes en las simulaciones 3D y cinco en el caso de ser un modelo 2D.

Siendo la mayor diferencia con respecto a los modelos de turbulencia previamente mencionados el abandonar la suposición de turbulencia isotrópica.

$$\tau_{ij, \text{turbulent}} = - \begin{pmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{pmatrix}$$

Ecuaciones Gobernantes

En el **Reynolds stress model (RMS)** las ecuaciones de transporte para los esfuerzos de Reynolds ($\overline{\rho u'_i u'_j}$) son:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\overline{\rho u'_i u'_j}) + C_{ij} = D_{T,ij} + D_{L,ij} + P_{ij} + G_{ij} + \varphi_{ij} + \varepsilon_{ij} + F_{ij} + S_{user}$$

Dónde:

C_{ij} es el termino convectivo

$D_{T,ij}$ es la difusión turbulenta

$D_{L,ij}$ es la difusión molecular

P_{ij} es la producción de esfuerzos

G_{ij} es la producción de boyancia

φ_{ij} es el esfuerzo debido a la presión

ε_{ij} es la disipación

F_{ij} es la producción debido a la rotación del sistema

S_{user} son los términos fuente definidos por el usuario

Modelo de turbulencia Spalart - Allmaras

El modelo de Spalart – Allmaras es un modelo de una sola ecuación que resuelve el transporte de la viscosidad cinemática de Eddy ($\tilde{\nu}$). Originalmente se diseñó específicamente para aplicaciones aeroespaciales que involucran flujos contenidos en paredes y ha mostrado buenos resultados para capas con fronteras sujetas a presiones adversas. También ha tenido popularidad en aplicaciones de turbomaquinaria.

Vorticity – based:

Spalart, P., & Allmaras, S. (1992, January). A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. In *30th aerospace sciences meeting and exhibit* (p. 439).

Strain/Vorticity – based:

Dacles-Mariani, J., Zilliac, G. G., Chow, J. S., & Bradshaw, P. (1995).

Numerical/experimental study of a wingtip vortex in the near field. *AIAA journal*, 33(9), 1561-1568.

Ecuaciones gobernantes

Además, a la ecuación de Navier-Stokes se le añade un término:

$$+ \frac{\partial}{\partial x_i} (-\rho \overline{u'_i u'_j})$$

Siendo $\overline{u'_i u'_j}$ los esfuerzos de Reynolds.

Los cuales deben resolverse o bien emplearse la hipótesis de Boussinesq para obtenerlos:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}$$

Dónde k es la energía cinética turbulenta y μ_t es la viscosidad turbulenta, las cuales se obtienen de los modelos Spalart-Allmaras, k- ϵ y k- ω , siendo su principal suposición que la turbulencia es isotrópica.

Nota:

La delta de Kronecker (δ_{ij}) es:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq j \\ 1 & \text{si } i = j \end{cases}$$

Ecuaciones Gobernantes

Es un modelo de una ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\tilde{\nu}u_i) = G_\nu + \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu + \rho\tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_i} \right\} + C_{b2}\rho \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_i} \right)^2 \right] - Y_\nu + S_{\tilde{\nu}}$$

Dónde:

$\tilde{\nu}$ es la viscosidad cinemática turbulenta (excepto en las regiones cercanas a una pared)

G_ν es la producción de viscosidad turbulenta

Y_ν es la destrucción de la viscosidad turbulenta que ocurre en la proximidad a las paredes

$\sigma_{\tilde{\nu}}$ y C_{b2} son constantes del modelo con valores por defecto de 0.667 y 0.622 respectivamente

ν es la viscosidad cinemática molecular

$S_{\tilde{\nu}}$ son los términos fuente definidos por el usuario

Modelos de turbulencia

k- ϵ

El modelo de turbulencia k – ϵ estándar considera dos ecuaciones de transporte, una para la energía cinética turbulenta (k) y otra para la rapidez de disipación de la misma (ϵ). A lo largo de los años ha demostrado tener características como ser robusto, ser computacionalmente económico y tener una precisión aceptable. Sin embargo, eso no lo exime de mejora, por lo que variantes del mismo que suplen sus carencias se han desarrollado, entre las que se encuentran el modelo k – ϵ RNG y el modelo k – ϵ realizable.

Estándar:

Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1972). Lectures in mathematical models of turbulence.

RNG:

Yakhot, V., & Orszag, S. A. (1986). Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. *Journal of scientific computing*, 1(1), 3-51.

Realizable:

Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., & Zhu, J. (1995). A new k- ϵ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. *Computers & fluids*, 24(3), 227-238.

Ecuaciones gobernantes

Además, a la ecuación de Navier-Stokes se le añade un término:

$$+ \frac{\partial}{\partial x_i} (-\rho \overline{u'_i u'_j})$$

Siendo $\overline{u'_i u'_j}$ los esfuerzos de Reynolds.

Los cuales deben resolverse o bien emplearse la hipótesis de Boussinesq para obtenerlos:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}$$

Dónde k es la energía cinética turbulenta y μ_t es la viscosidad turbulenta, las cuales se obtienen de los modelos Spalart-Allmaras, k- ϵ y k- ω , siendo su principal suposición que la turbulencia es isotrópica.

Nota:

La delta de Kronecker (δ_{ij}) es:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq j \\ 1 & \text{si } i = j \end{cases}$$

Ecuaciones Gobernantes

En este caso las ecuaciones de transporte de las tres variantes del modelo difieren ligeramente, pero en todos los casos constituyen una para la energía cinética turbulenta (k) y otra para la rapidez de disipación de la misma (ε). Para el modelo de turbulencia **k- ε estándar** son:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

Dónde:

G_k es la generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad promedio

G_b es la generación de energía cinética turbulenta debido a los efectos boyantes

Y_M representa la contribución de la dilatación fluctuante por la compresibilidad del flujo

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ y $C_{3\varepsilon}$ son constantes del modelo con valores por defecto de 1.44, 1.92 y un valor variable ente 0.00 y 1.00 (dependiendo de la boyancia) respectivamente

σ_k y σ_ε son los números de Prandtl turbulentos para k y ε con valores por defecto de 1.0 y 1.3 respectivamente

S_k y S_ε son los términos fuente definidos por el usuario para k y ε

Modelos de turbulencia

k- ω

Los modelos de turbulencia k – ω se basan en la resolución de dos ecuaciones de transporte, una para la energía cinética turbulenta (k) y otra para la razón específica de disipación de la misma hacia energía térmica interna (ω). A pesar de que la formulación original de Wilcox en 1998 tiene carencias, siendo la principal la baja sensibilidad para calcular los valores de k y ω fuera de la capa laminar, las versiones posteriores solventan este problema con modificaciones a esa formulación.

Estándar:

Wilcox, D. C. (1998). *Turbulence modeling for CFD* (Vol. 2, pp. 103-217). DCW industries.

BSL:

F. R. Menter. "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications". *AIAA Journal*. 32(8). 1598–1605. August 1994.

SST:

F. R. Menter. "Review of the SST Turbulence Model Experience from an Industrial Perspective". *International Journal of Computational Fluid Dynamics*. Volume 23, Issue 4. 2009.

GEKO:

Fluent, ANSYS (2022). *Ansys Fluent Theory Guide 2022 R2*. ANSYS Inc., USA.

Menter, F. R., Lechner, R., & Matyushenko, A. (2019). Best practice: generalized k- ω two-equation turbulence model in ANSYS CFD (GEKO). *ANSYS Germany GmbH*.

Ecuaciones gobernantes

Además, a la ecuación de Navier-Stokes se le añade un término:

$$+ \frac{\partial}{\partial x_i} (-\rho \overline{u'_i u'_j})$$

Siendo $\overline{u'_i u'_j}$ los esfuerzos de Reynolds.

Los cuales deben resolverse o bien emplearse la hipótesis de Boussinesq para obtenerlos:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij}$$

Dónde k es la energía cinética turbulenta y μ_t es la viscosidad turbulenta, las cuales se obtienen de los modelos Spalart-Allmaras, k- ϵ y k- ω , siendo su principal suposición que la turbulencia es isotrópica.

Nota:

La delta de Kronecker (δ_{ij}) es:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq j \\ 1 & \text{si } i = j \end{cases}$$

Ecuaciones Gobernantes

En el caso de los modelos de turbulencia $k - \omega$, la formulación es muy similar, resolviendo ecuaciones similares para la energía cinética turbulenta (k) y para la razón específica de disipación (ω).

El modelo de turbulencia **k- ω estándar** usa una formulación modificada propuesta por Wilcox en 2006:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - Y_k + S_k + G_b$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + G_{\omega b}$$

Dónde:

G_k es la generación de energía cinética turbulenta debido a los gradientes de velocidad promedio

G_ω es la generación de la razón específica de disipación de energía cinética turbulenta

Γ_k y Γ_ω son la difusividad efectiva de k y ω respectivamente

Y_k y Y_ω representan la disipación de k y ω debido a la turbulencia respectivamente

S_k y S_ω son los términos fuente definidos por el usuario para k y ω

G_b y $G_{b\omega}$ son los términos que describen el efecto de la boyancia sobre la turbulencia para k y ω respectivamente

Introducción

Szekely, J. (2012). *Fluid flow phenomena in metals processing*. Elsevier.

Szekely, J., & Luis Gerardo Trapaga M. (1988). *Fenómenos de Flujo de Fluidos en Procesamiento de metales*. Limusa.

Daily, J. W., & Harleman, D. R. (1969). *Dinámica de los fluidos*. Editorial F. Trillas S. A.

Gaskell, D. (2012). *An introduction to transport phenomena in materials engineering*. Momentum Press.

Poirier, D. R., & Geiger, G. (Eds.). (2016). *Transport phenomena in materials processing*. Springer.

Iguchi, M., & Ilegbusi, O. J. (2014). *Basic transport phenomena in materials engineering (Vol. 260)*. Springer.

Welty, J. R., Wicks, C. E., Rorrer, G., & Wilson, R. E. (2009). *Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer*. John Wiley & Sons.

Yunus, A. C. (2010). *Fluid Mechanics: Fundamentals And Applications (Si Units)*. Tata McGraw Hill Education Private Limited.

Hong, C. P. (2019). *Computer modelling of heat and fluid flow in materials processing*. CRC press.

Introducción

Szekely, J. (2012). *Fluid flow phenomena in metals processing*. Elsevier.

Szekely, J., & Luis Gerardo Trapaga M. (1988). *Fenómenos de Flujo de Fluidos en Procesamiento de metales*. Limusa.

Daily, J. W., & Harleman, D. R. (1969). *Dinámica de los fluidos*. Editorial F. Trillas S. A.

Gaskell, D. (2012). *An introduction to transport phenomena in materials engineering*. Momentum Press.

Poirier, D. R., & Geiger, G. (Eds.). (2016). *Transport phenomena in materials processing*. Springer.

Iguchi, M., & Ilegbusi, O. J. (2014). *Basic transport phenomena in materials engineering* (Vol. 260). Springer.

Welty, J. R., Wicks, C. E., Rorrer, G., & Wilson, R. E. (2009). *Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer*. John Wiley & Sons.

Yunus, A. C. (2010). *Fluid Mechanics: Fundamentals And Applications (Si Units)*. Tata McGraw Hill Education Private Limited.

Hong, C. P. (2019). *Computer modelling of heat and fluid flow in materials processing*. CRC press.

Software CFD

En la actualidad existen dos aproximaciones para el diseño y análisis de sistemas ingenieriles, el **modelado físico** y el **modelado matemático**, es decir, trabajo **experimental** y **simulaciones matemáticas**.

En el caso del **modelo matemático**, la mayoría de las veces se requiere la solución de un conjunto de ecuaciones diferenciales, esta solución normalmente se realiza mediante el empleo de **software CFD (computational fluid dynamics)**.

La resolución de problemas de flujo laminar en la mayoría de los casos es sencilla, sin embargo, simular flujos turbulentos requiere del uso de un **modelo de turbulencia**.

Existe una gran cantidad de paquetes de **software CFD**, que se basan en distintos métodos y algoritmos numéricos. La mayoría de las ocasiones requieren de un **pre-procesamiento**, un **procesamiento** y un **post-procesamiento**.

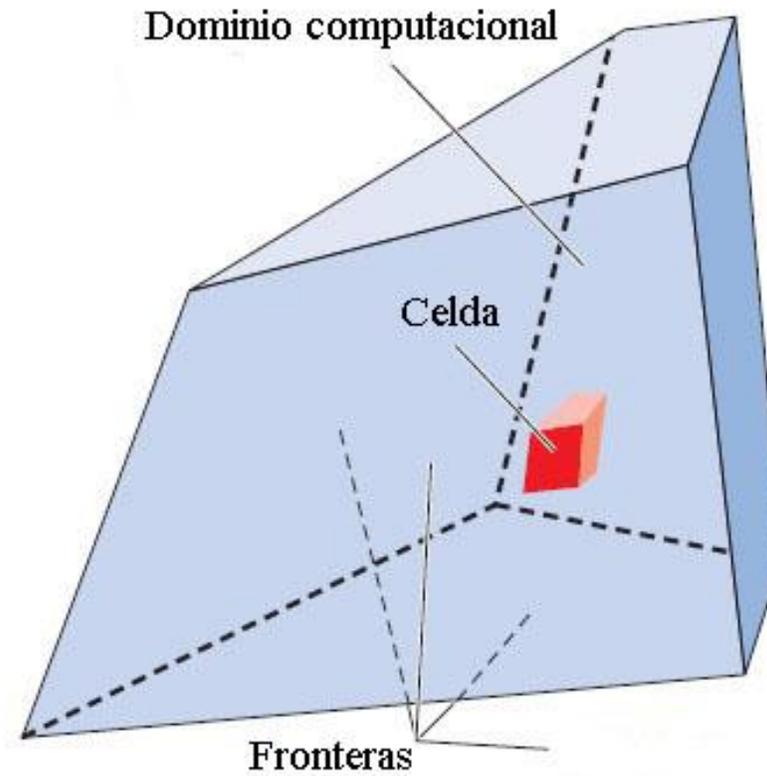
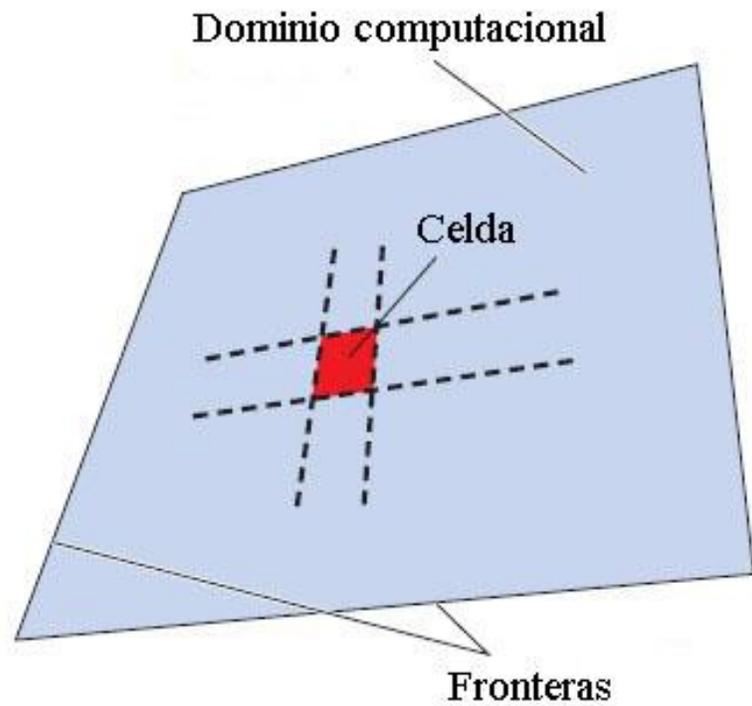
El software **ANSYS** tiene licencia libre para su uso estudiantil.

Procedimiento de solución

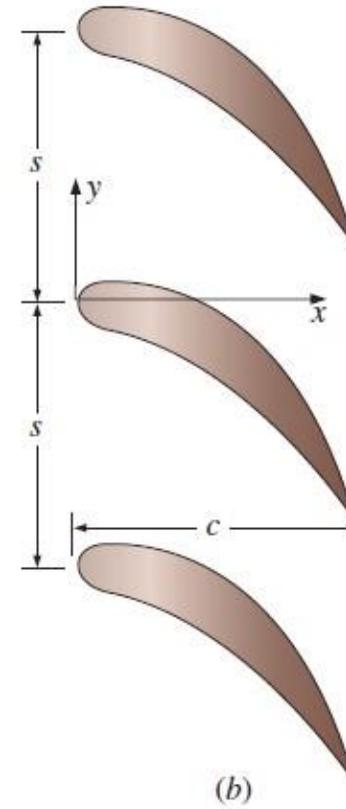
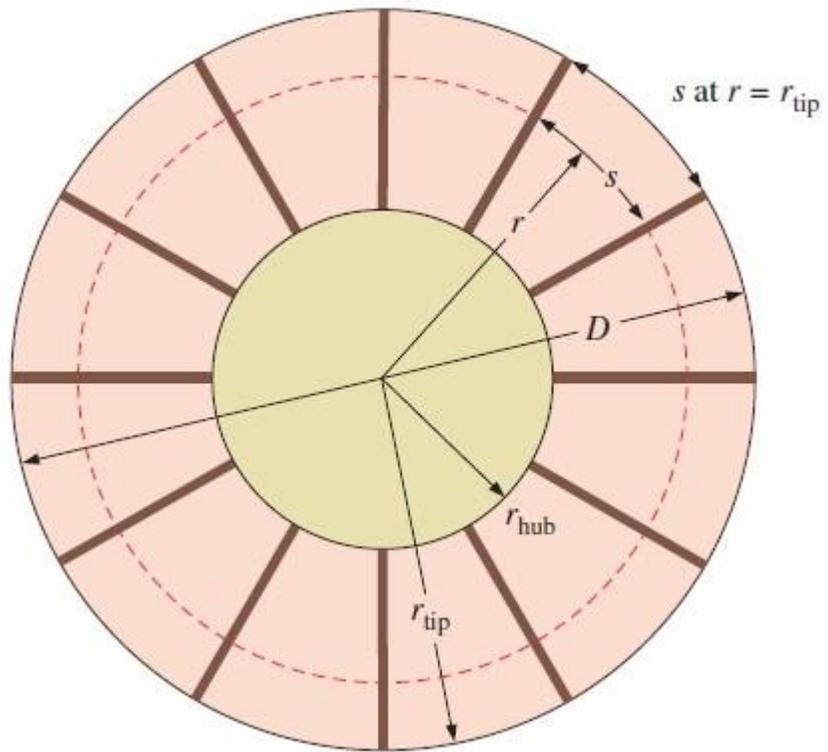
Pre-procesamiento

- Primeramente se debe elegir el dominio computacional, y debe dividirse en pequeños elementos para el cálculo, este proceso se denomina **discretización** y da como resultado la obtención de una malla. El dominio queda entonces dividido en celdas. La calidad de la malla es fundamental para que la solución del problema sea adecuada.
- Se establecen las **condiciones de frontera**, en las caras o bordes de la malla dependiendo de las necesidades de solución.
- Se establecen las **propiedades de los materiales**, en algunos casos el software CFD posee una base de datos con las mismas.
- Se establecen los **parámetros numéricos** y los **algoritmos** empleados para la solución.
- Se **inicializa el problema**, este proceso es necesario independientemente de si se considera un cálculo en estado estacionario o transitorio.

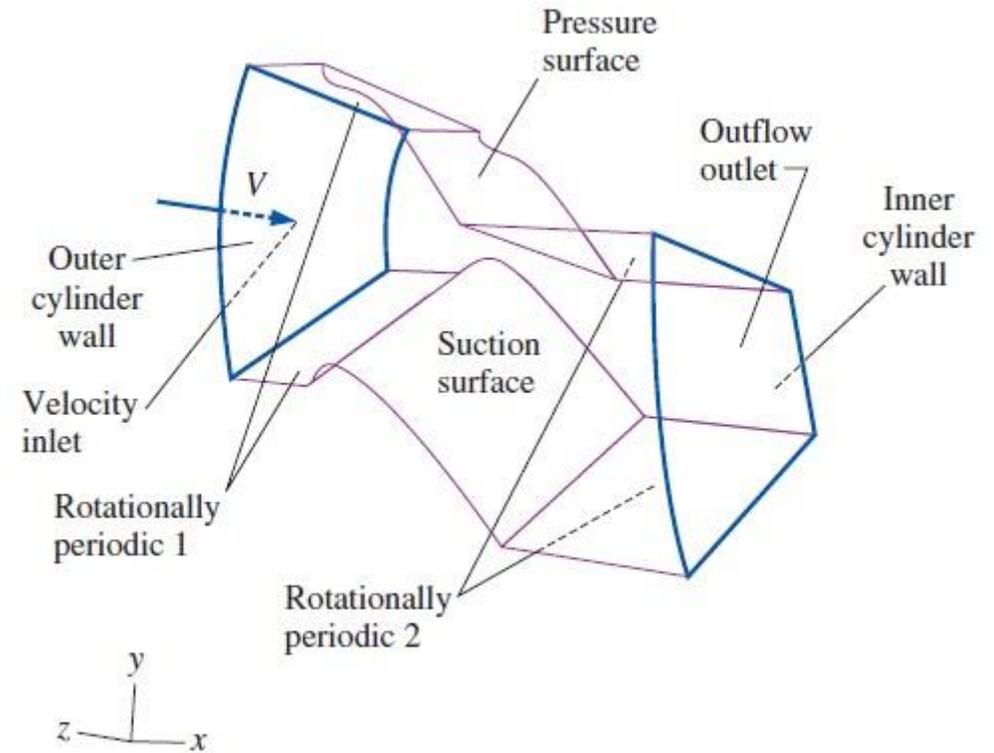
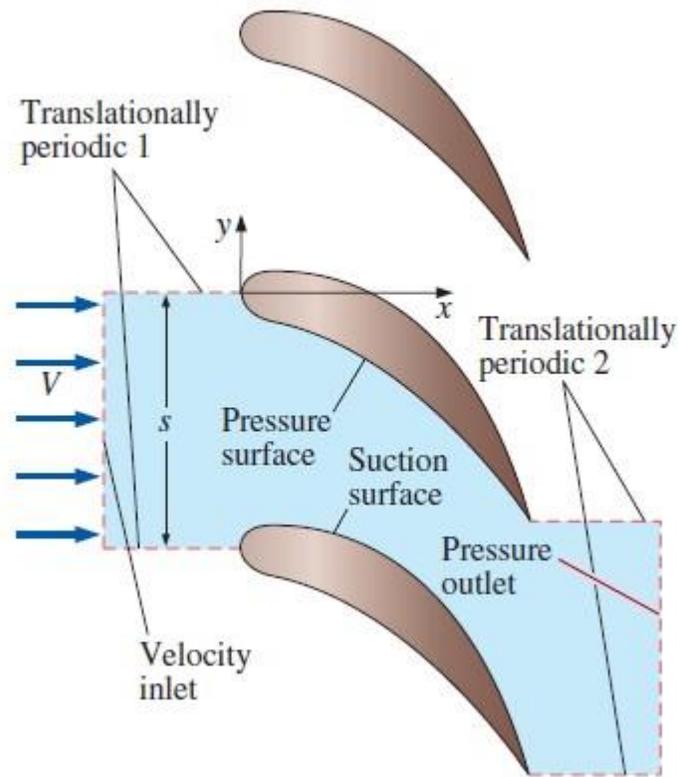
Procedimiento de solución



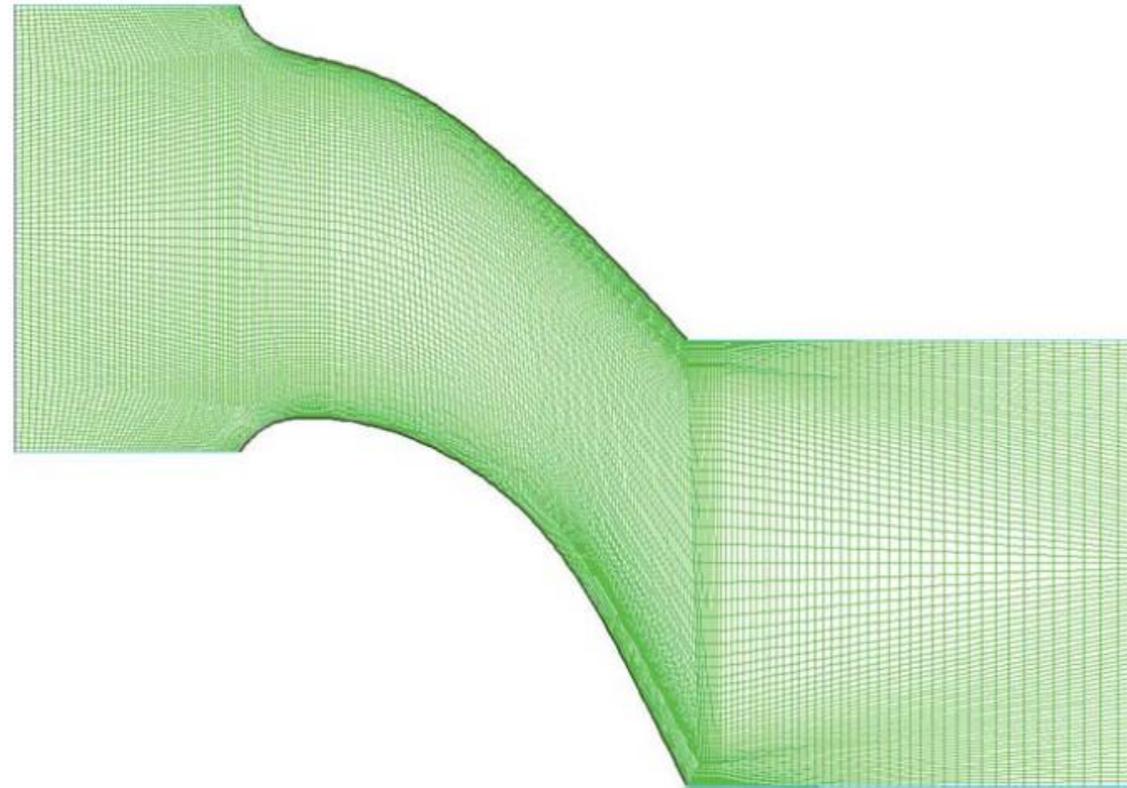
Procedimiento de solución



Procedimiento de solución



Procedimiento de solución

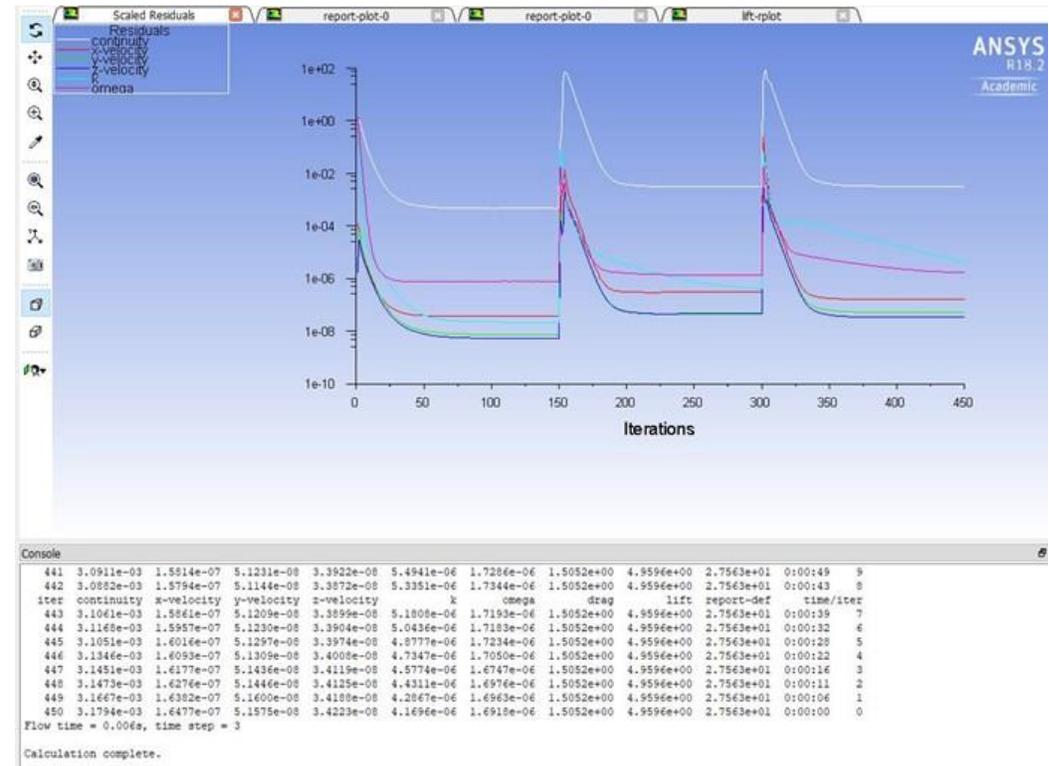
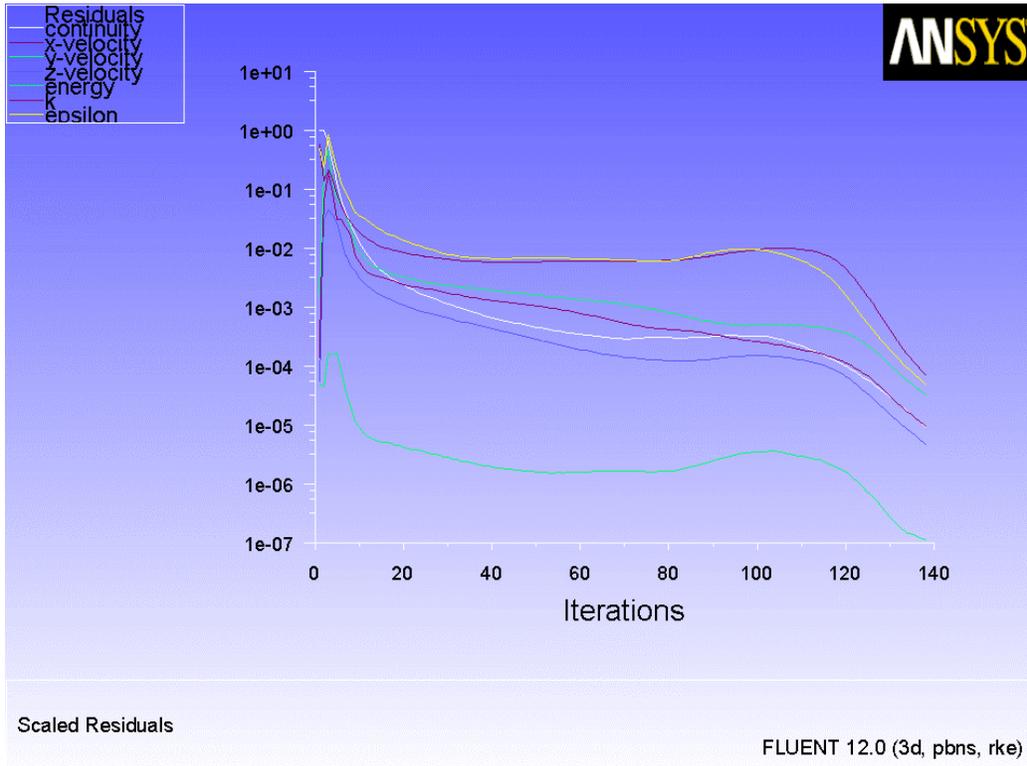


Procedimiento de solución

Procesamiento

- Se resuelven las ecuaciones gobernantes del sistema, generalmente en el centro de cada celda, esto mediante un proceso iterativo. Dado que las ecuaciones son balances de alguna cantidad, en el proceso de solución se cuantifica la posible diferencia que hay entre entradas, salidas, términos fuente y la acumulación. Esta diferencia se denomina residual, si el problema está bien planteado los **residuales** disminuirán con cada iteración, en un proceso que se denomina **convergencia**.

Procedimiento de solución

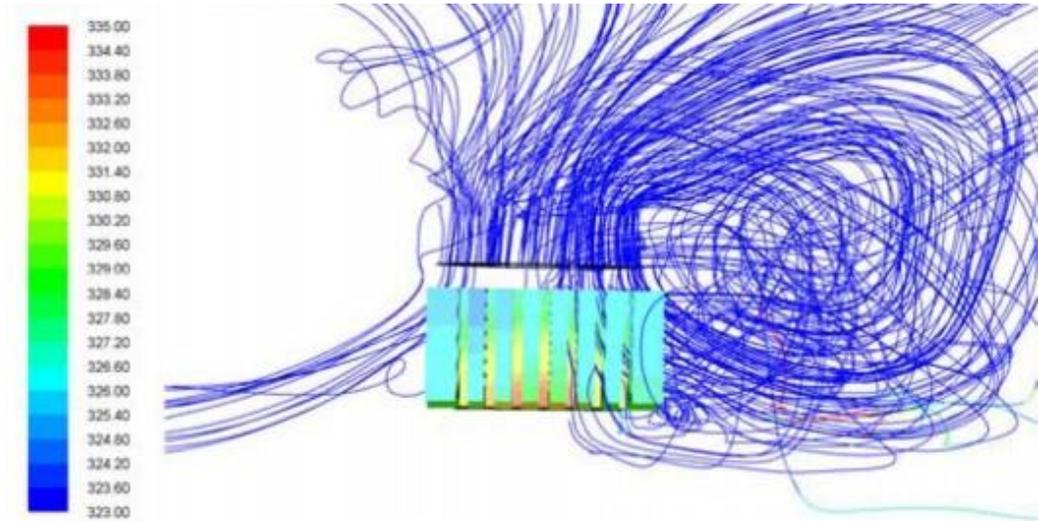
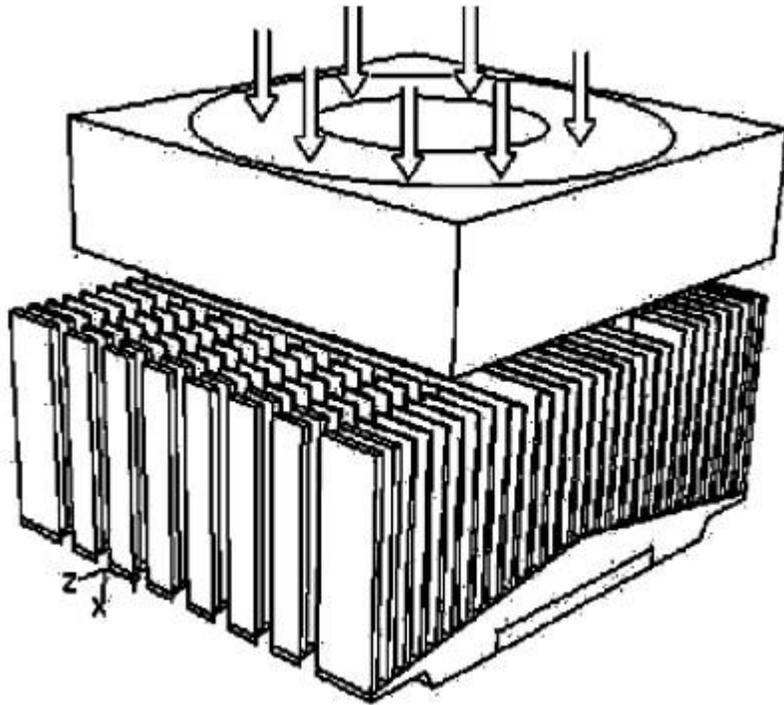


Procedimiento de solución

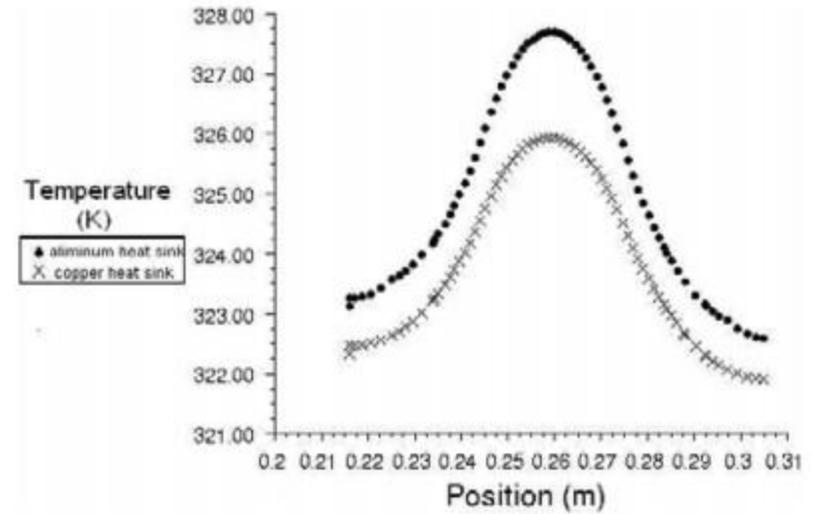
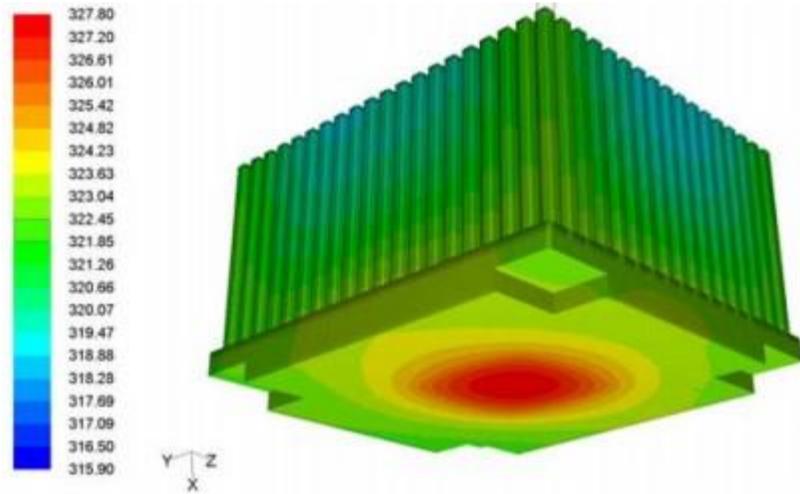
Post-procesamiento

- Finalmente se obtienen los **resultados deseados**, para ello la mayoría de los software CFD incluyen un **post-procesador**, que permite obtener los vectores de velocidad, contornos de concentración, contornos de presión, perfiles de velocidad sobre una línea, temperatura promedio del sistema, entre muchos otros resultados que pudiesen requerirse del mismo.

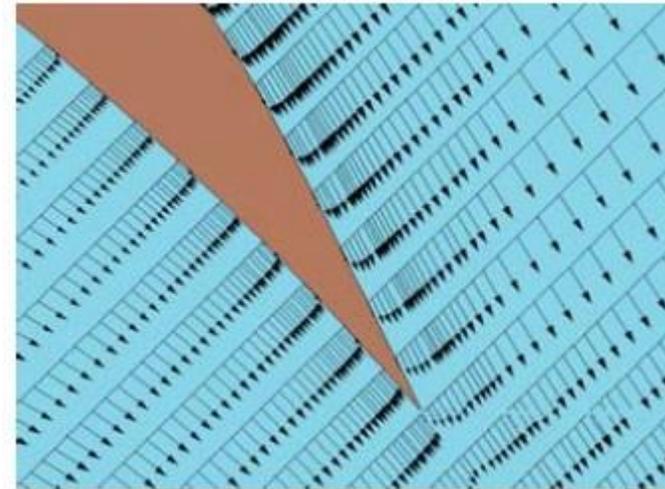
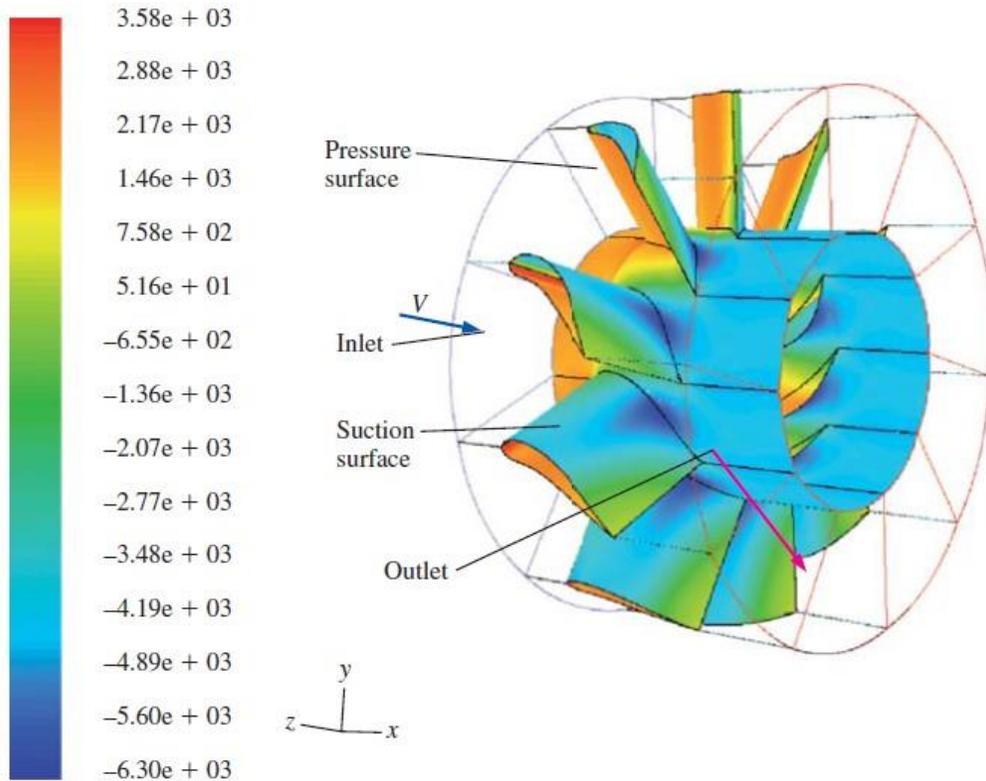
Procedimiento de solución



Procedimiento de solución



Procedimiento de solución



Software ANSYS

ANSYS provee software gratuito para fines educativos, en su versión más reciente presenta herramientas como:

- Space Claim: software para generar geometrías complejas, es decir, dibujar el dominio computacional de interés.
- Mesh: un software encargado de discretizar el dominio computacional.
- Fluent: software CFD que permite realizar complejos cálculos con una gran variedad de modelos y una extensa base de datos, además de diversos algoritmos de solución.
- CFD-Post: un visualizador de resultados que permite generar mapas vectoriales, contornos, graficas de control, entre muchas otras posibilidades.

Se puede descargar de la siguiente liga:

<https://www.ansys.com/academic/free-student-products>