



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE TESIS DOCTORAL

“SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA ENTROPÍA EN UN FLUJO DENTRO DE UN RECUPERADOR DE CALOR COMPACTO CON GEOMETRÍA COMPLEJA MEDIANTE UNA ECUACIÓN DE TRANSPORTE”

ALUMNO:

M. en I. ISAAC HERNÁNDEZ ARRIETA

TUTOR:

DR. WILLIAM VICENTE Y RODRÍGUEZ

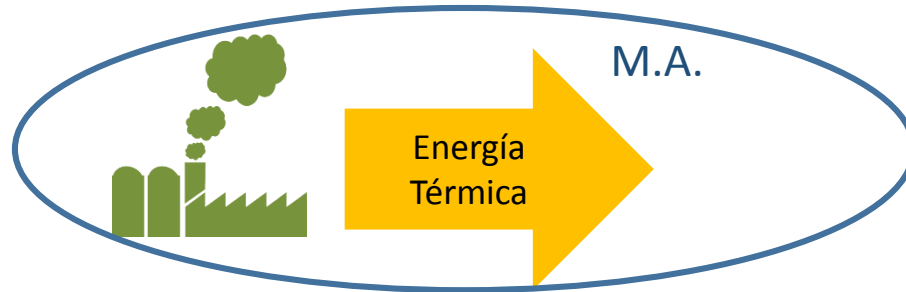


Generalidades

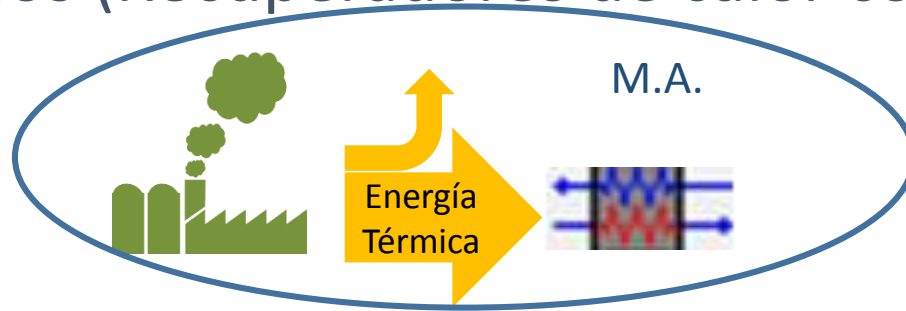
- Uso racional de la energía



- Recuperación y aprovechamiento de la energía térmica

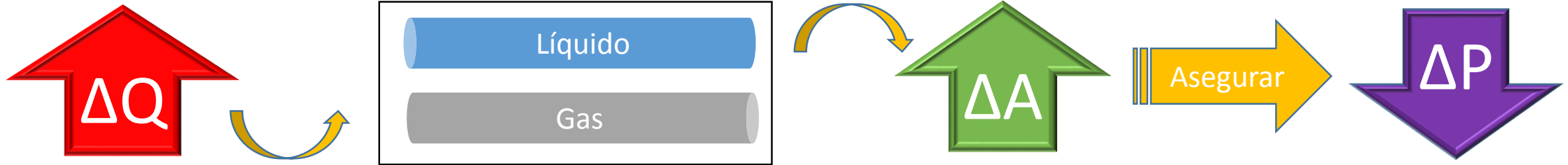


- Equipos térmicos (Recuperadores de calor compactos)



Recuperadores de calor compactos

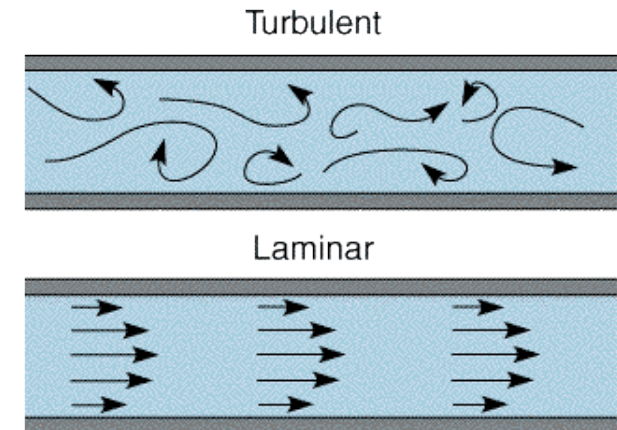
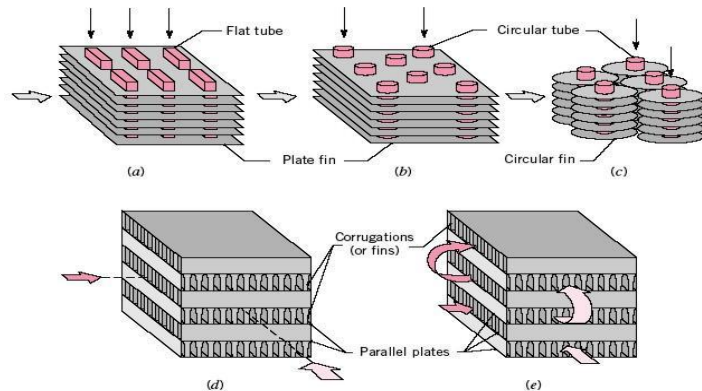
- Funcionamiento



- Implementación (adaptabilidad)

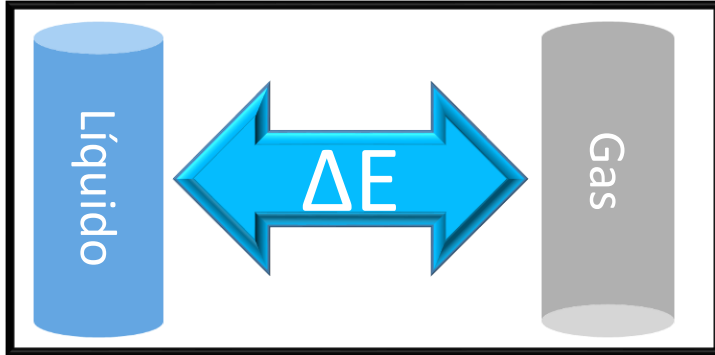
$$\left[\begin{array}{c} \text{Tamaño} \\ \text{Forma} \\ \text{Peso} \end{array} \right] = f \left(\begin{array}{c} \text{Necesidades} \\ \text{Operativas} \end{array} \right)$$

- Diseño



Diseño de recuperadores de calor

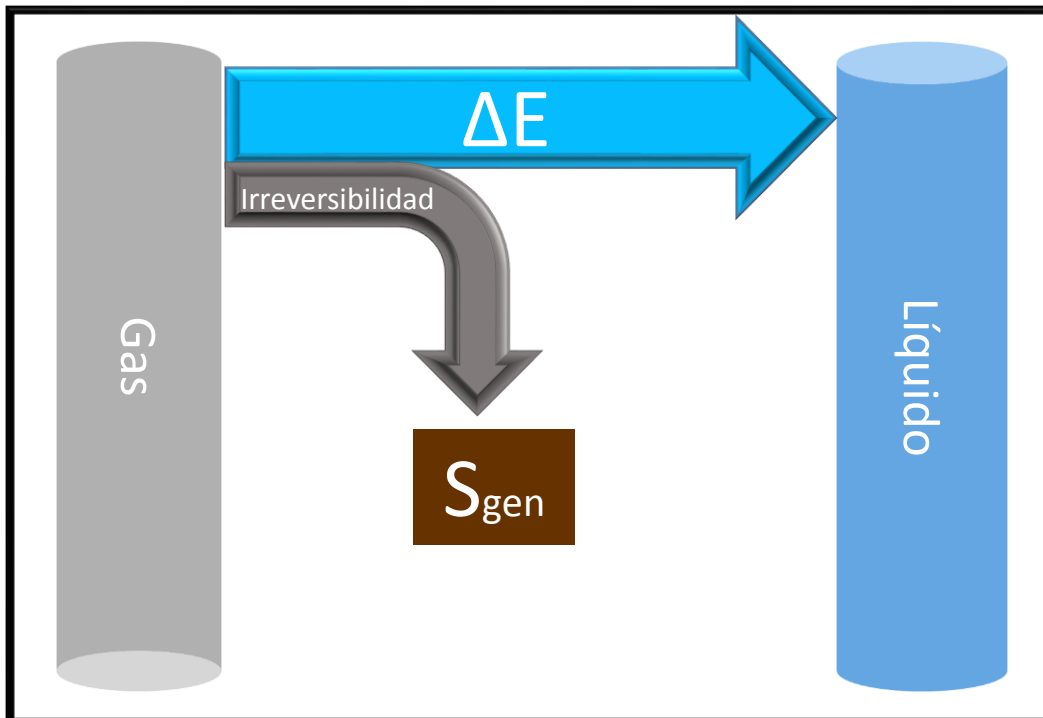
- 1° Ley de la termodinámica



$$\Delta E = Q \pm W$$

✓ Más Utilizada

- 2° Ley de la termodinámica

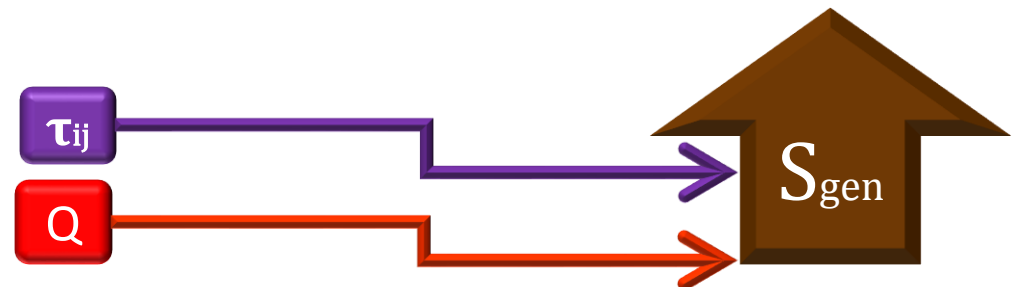


$$\Delta S = \int_a^b \frac{\delta Q}{T} + S_{gen}$$

✓ Poco Utilizada

✓ Dirección, existencia y tipo de procesos

✓ Calidad de energía y cantidad de energía no organizada



Entropía generada

- Ecuación general

$$S_{gen} = S_{gen_{tm}} + S_{gen_{tt}} + S_{gen_{vm}} + S_{gen_{tv}}$$

$$S_{gen} = \frac{k}{\bar{T}^2} \left[\left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} \right)^2 \right] + \frac{k}{\bar{T}'^2} \left[\left(\frac{\partial \bar{T}'}{\partial x_i} \right)^2 \right] + \frac{\mu}{\bar{T}} \left[\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2 \right] + \frac{\mu}{\bar{T}'} \left[\left(\frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}'_j}{\partial x_i} \right)^2 \right]$$

- Cálculo y Solución

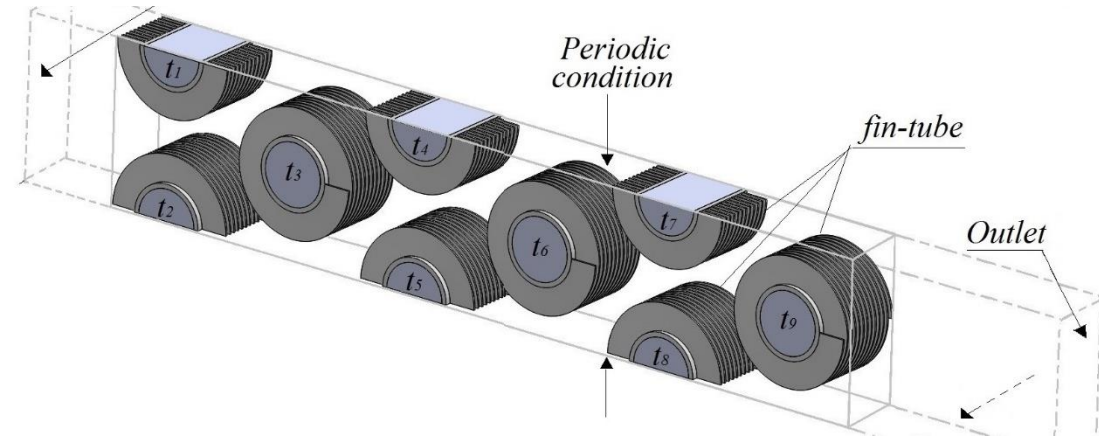
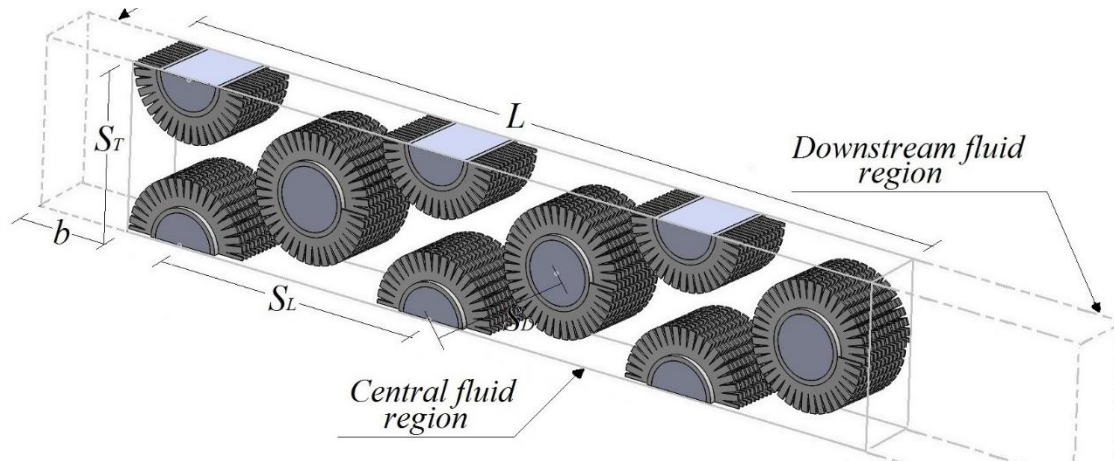
- ✓ Experimentación inviable
- ✓ Análisis numérico

- Métodos numéricos
- Cálculo Diferencial, Integral y Vectorial
- Sistemas de ecuaciones diferenciales
- Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD)

Caso de estudio

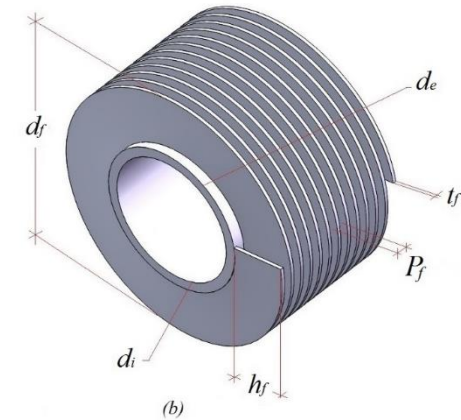
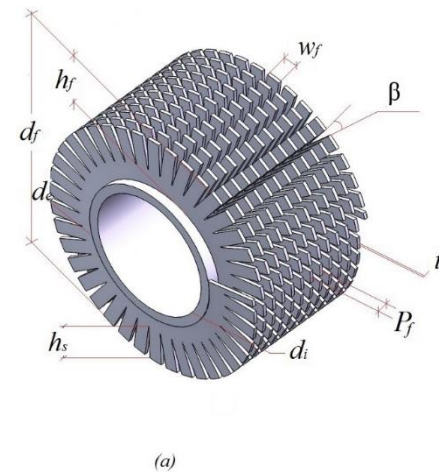
- Análisis comparativo de S_{gen}

- ✓ Recuperador de calor compacto de tubos aletados helicodales planos



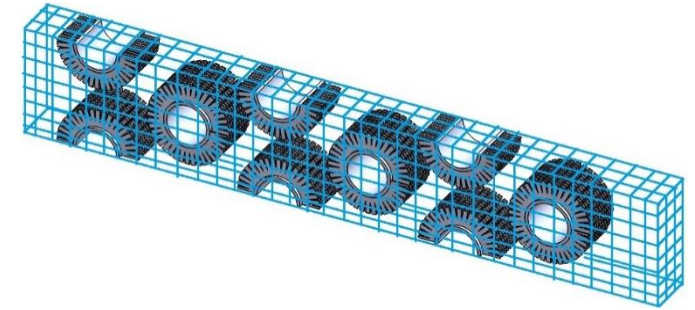
- ✓ Recuperador de calor compacto de tubos aletados helicodales segmentados

- Elaboración de un código numérico en Fortran para el cálculo de S_{gen} (CFD)
- Cuantificar de forma local S_{gen} en ambas configuraciones
- Evaluar el desempeño de cada configuración a través de 2° Ley de la termodinámica



Metodología

- Método de volúmenes finitos
 - ✓ Discretización del dominio de estudio
- RANS (Reynolds Average Navier-Stokes)



- ✓ Resolución de las ecuaciones de gobierno
- ✓ Aplicación de modelos de turbulencia

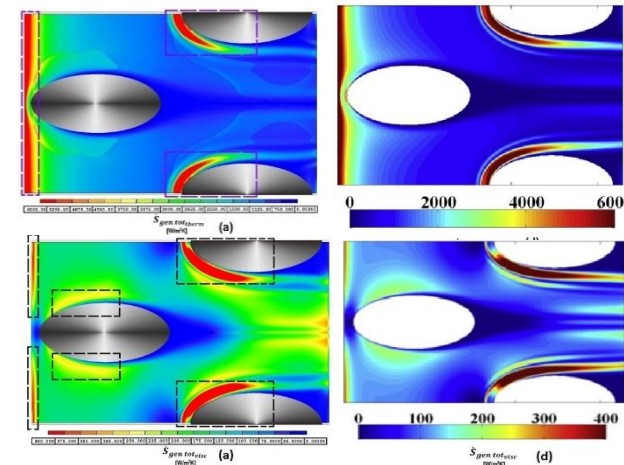
- Verificación y Validación

- Reproducción de un trabajos numérico sobre S_{gen} con un 99.88% de precisión
- Correlaciones de ΔT y ΔP
- Análisis de gráficos de S_{gen} en dirección del flujo principal para ambas configuraciones.
- Cálculos y comparación de Nu y h para ambos

Continuity equation:
$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

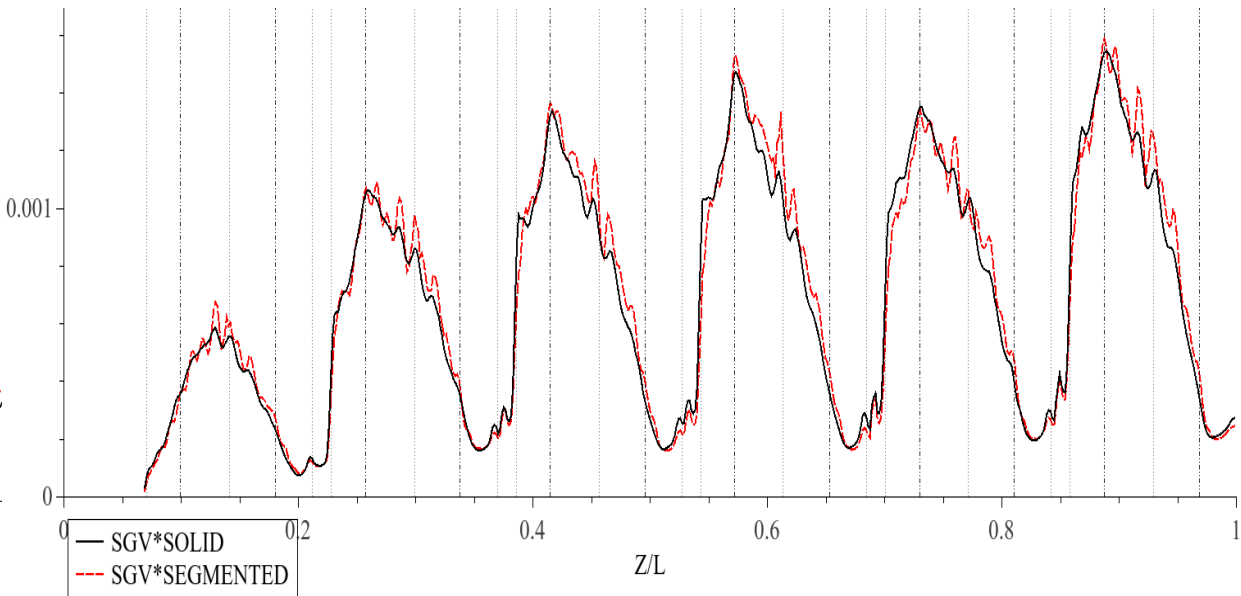
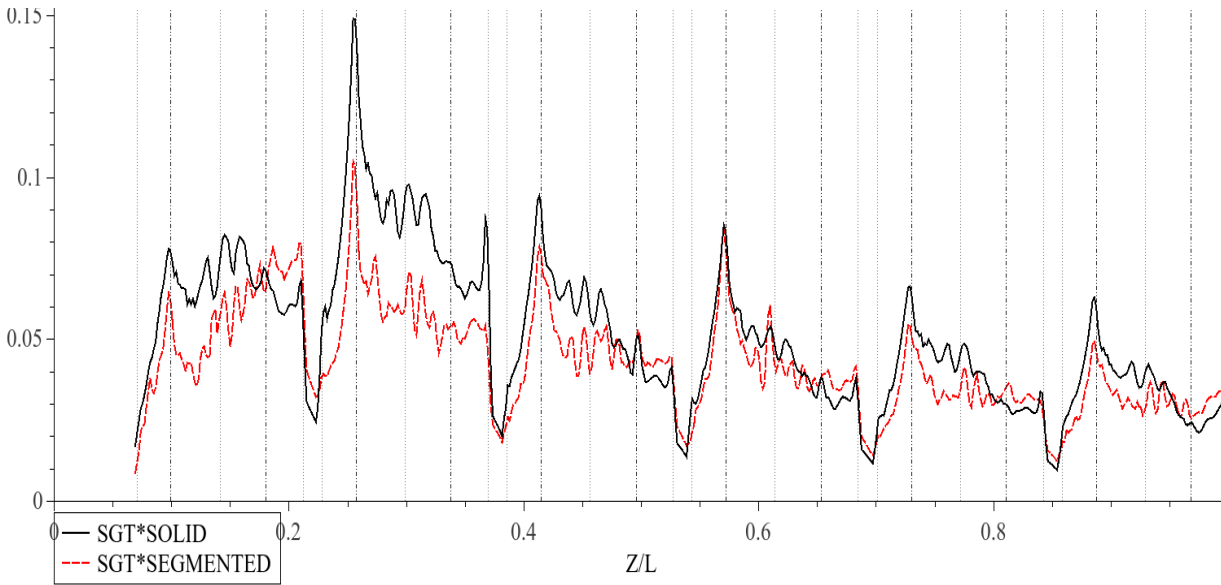
Momentum equation:
$$\bar{\rho} \frac{\partial \bar{u}_k \bar{u}_j}{\partial x_k} + \bar{\rho} \frac{\partial \bar{u}'_k \bar{u}'_j}{\partial x_k} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_k} + \bar{\rho} \bar{g}_k + \mu \left(\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial^2 \bar{u}_j}{\partial x_i^2} \right)$$

Energy equation:
$$\bar{\rho} \bar{C}_p \frac{\partial \bar{u}_j \bar{T}}{\partial x_j} + \bar{\rho} \bar{C}_p \frac{\partial \bar{u}'_j \bar{T}'}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[k \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} \mu \left\{ \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2 \right\}$$

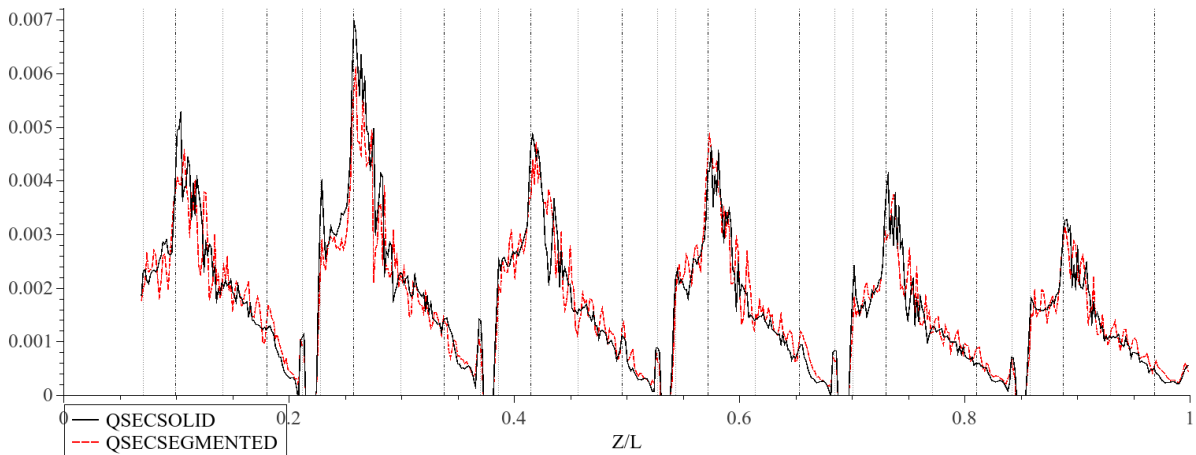


Resultados

- Gráficos Q S_{gen_t} y S_{gen_v}



- $S_{gen_t} > S_{gen_v}$ en 2 órdenes de magnitud
- Máximos de S_{gen_t} parte frontal tubo
- Máximos de S_{gen_v} parte frontal y zona media tubo
- El máximo de S_{gen_t} se ubica en 2° línea de tubos

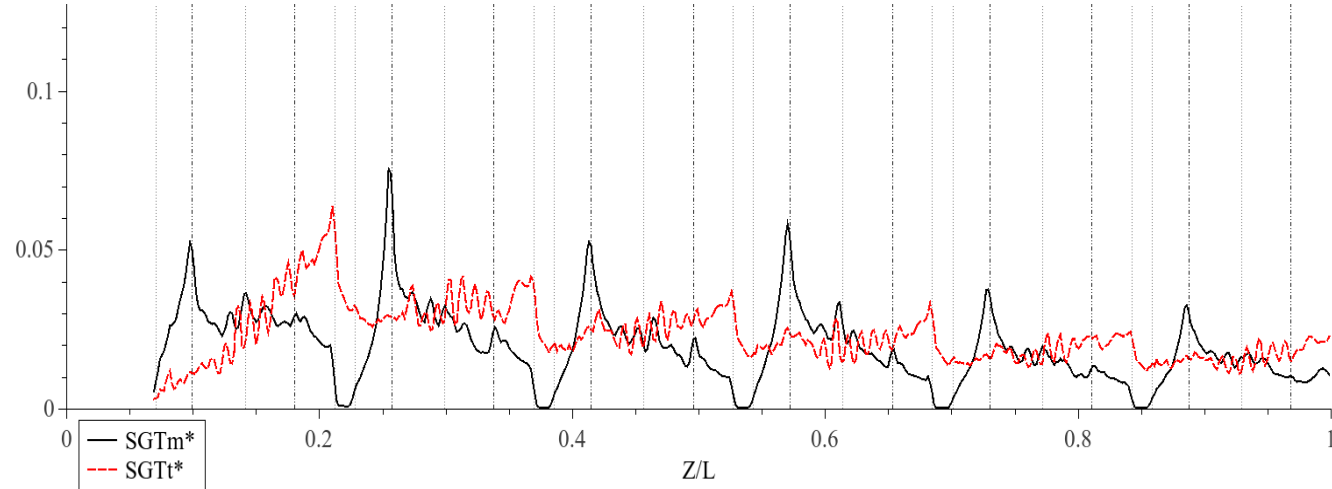
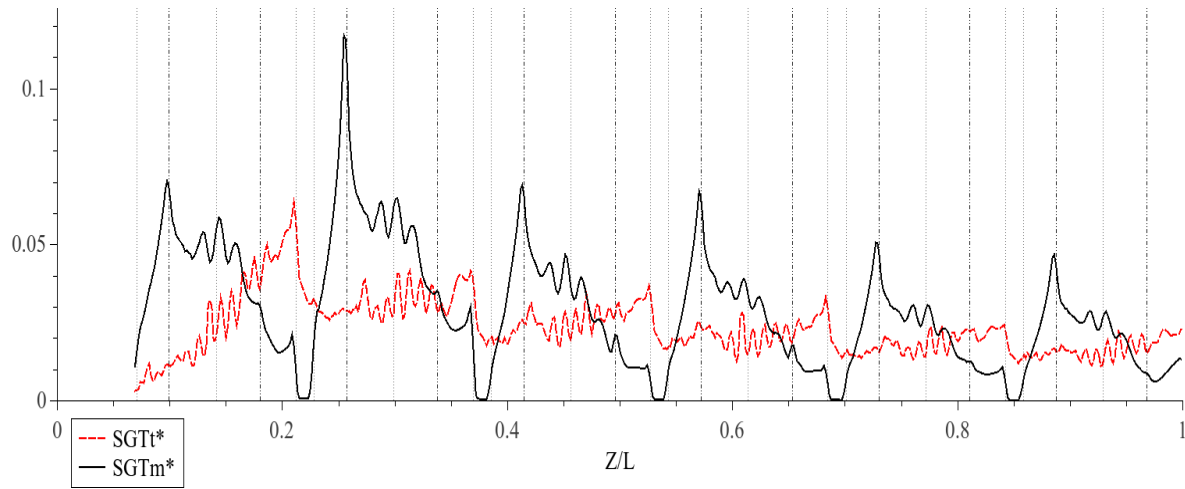


Resultados

- Gráficos $S_{gen_{tm}}$ y $S_{gen_{tt}}$

✓ Arreglo sólido

✓ Arreglo segmentado



➤ Sólido $S_{gen_{tm}} \gg S_{gen_{tt}}$; Segmentado $S_{gen_{tm}} > S_{gen_{tt}}$

➤ $S_{gen_{tm}}$ (flecha hacia abajo) $\approx 11.41\%$ y $S_{gen_{tt}}$ (flecha hacia arriba) $\approx 11.12\%$ segmentado

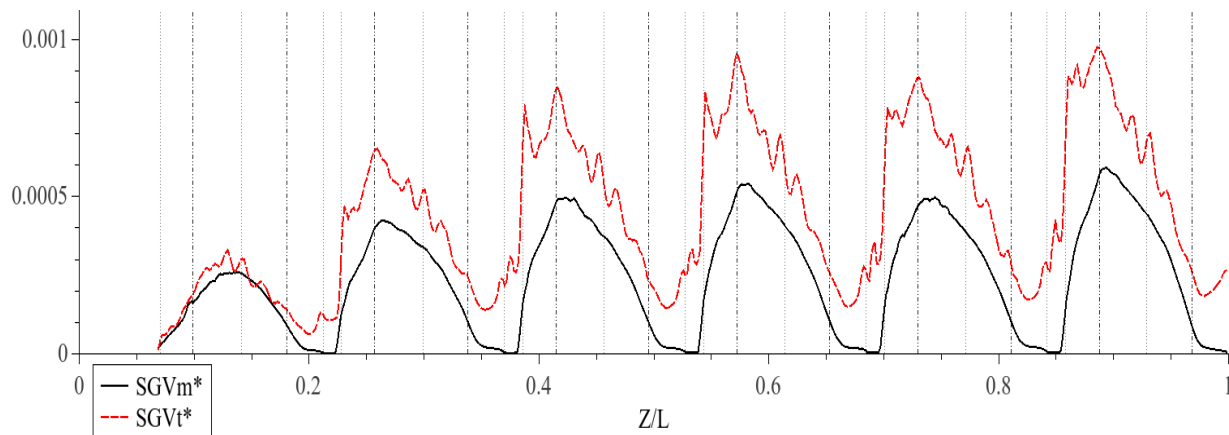
➤ $S_{gen_{tm}} \approx S_{gen_{tt}}$ magnitud

➤ Zona de estela $S_{gen_{tm}}$ (flecha hacia abajo) y $S_{gen_{tt}}$ (flecha hacia arriba)

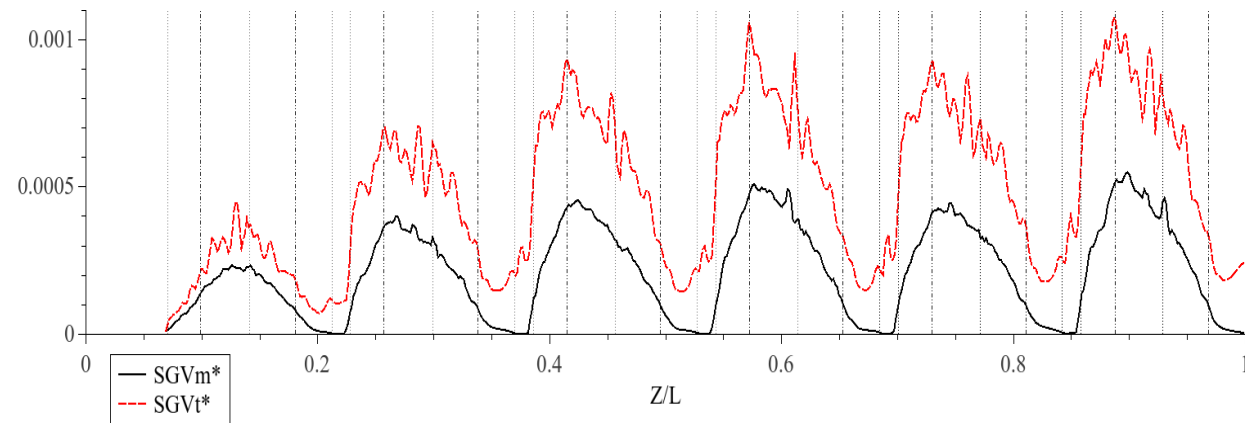
Resultados

- Gráficos $S_{gen_{vm}}$ y $S_{gen_{vt}}$

✓ Arreglo sólido



✓ Arreglo segmentado



➤ $S_{gen_{vt}} > S_{gen_{vm}}$ ambas configuraciones

➤ $S_{gen_{vm}} \approx 0.2\%$ y $S_{gen_{vt}} \approx 0.27\%$ segmentado

➤

➤ $S_{gen_{vm}} \approx S_{gen_{vt}}$ magnitud

➤ $S_{gen_{vm}} \approx \text{cte.}$; $S_{gen_{vt}}$

Resultados y Conclusiones

- ✓ Comparación S_{gen} (sólido vs segmentado)

	<i>SEGMENTED</i>	<i>SOLID</i>	
	$SG_{totsol} \%$	$SG_{totsol} \%$	r/a
SGT^*	82.60%	98.68%	16.09%
SGT_m^*	37.60%	56.19%	18.60%
SGT_t^*	45.00%	42.49%	-2.51%
SGV^*	1.35%	1.32%	-0.03%
SGV_m^*	0.41%	0.47%	0.06%
SGV_t^*	0.94%	0.85%	-0.09%

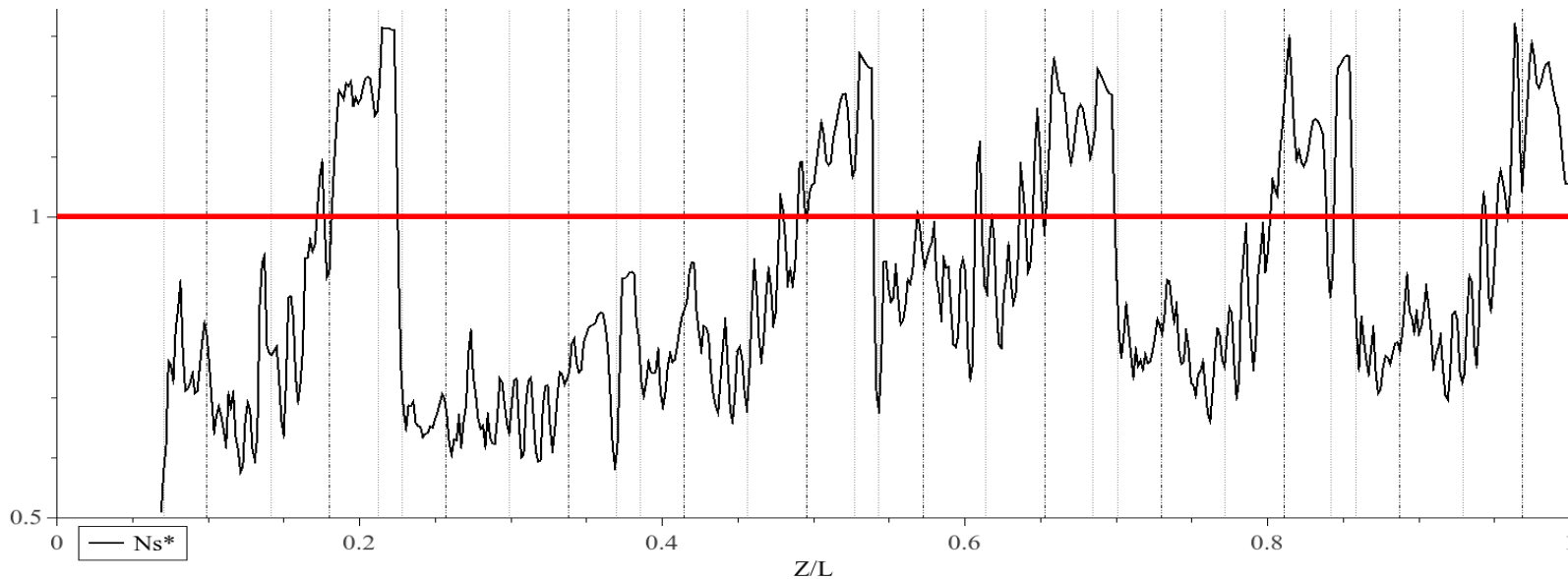
$$\diamond A_{seg_{tot}} < A_{sol_{tot}} \approx 6 \%$$

$$\diamond \dot{Q}_{seg_{tot}} < \dot{Q}_{sol_{tot}} \approx 1.06 \%$$

$$\diamond \overline{Nu}_{seg} > \overline{Nu}_{sol} \approx 4.35 \%$$

$$\diamond (S_{gen_{tot}})_{seg} < (S_{gen_{tot}})_{sol} \approx 16.06 \%$$

- ✓ Número de Entropía de Mejora $N_{s,a}$



$$\diamond N_{s,a} = 0.8395$$

Resultados y Conclusiones

- ✓ Efecto geométrico del aletado

