



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Trabajo Final de Máster

# Aplicación de la teoría de choque para un modelo predictivo de compresor centrífugo

Máster en Ingeniería Aeronáutica  
Curso 2020-2021

**Autor:** Raúl Arce Balbás

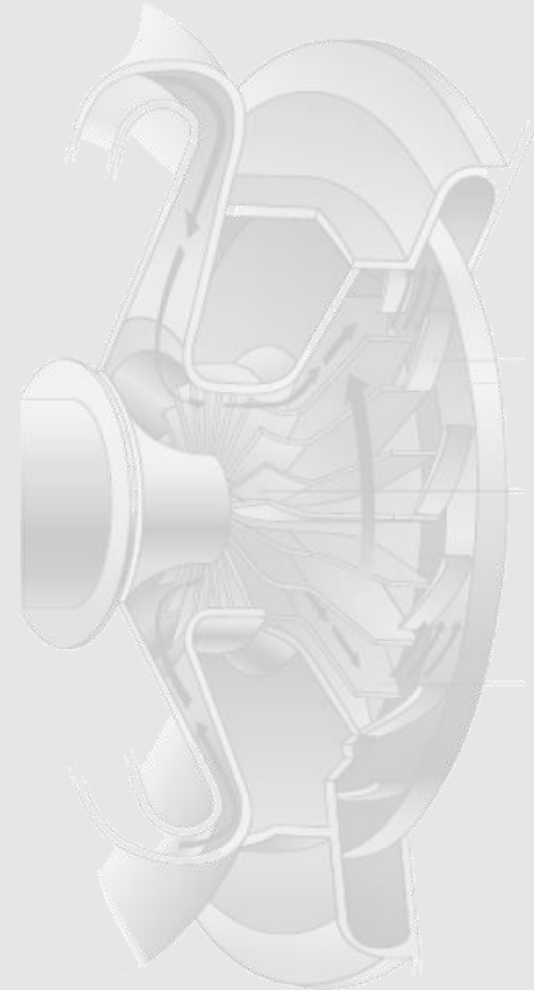
**Tutor:** Andrés Omar Tiseira Izaguirre

**Cotutor:** Jorge Saavedra García

# Índice

---

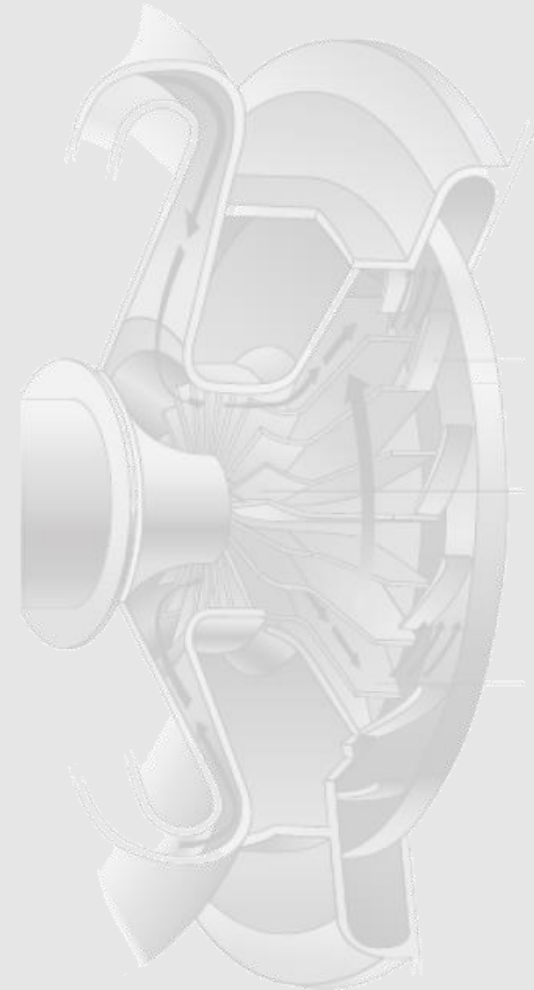
- Introducción
- Objetivos
- Modelo Anterior
- Modelo de Compresor
  - Coeficientes de pérdidas
- Estudio del Choqueo
- Resultados
- Conclusiones



# Índice

---

- **Introducción**
- Objetivos
- Modelo Anterior
- Modelo de Compresor
  - Coeficientes de pérdidas
- Estudio del Choqueo
- Resultados
- Conclusiones



# Introducción

---

## ¿Para qué sirven los compresores?

¿Por qué compresores centrífugos?

¿Qué es el mapa del compresor?

- Aumentar el techo operativo.
- Mejorar prestaciones.
- Reducir tamaño y peso.
- Reducir consumo, impacto ambiental.

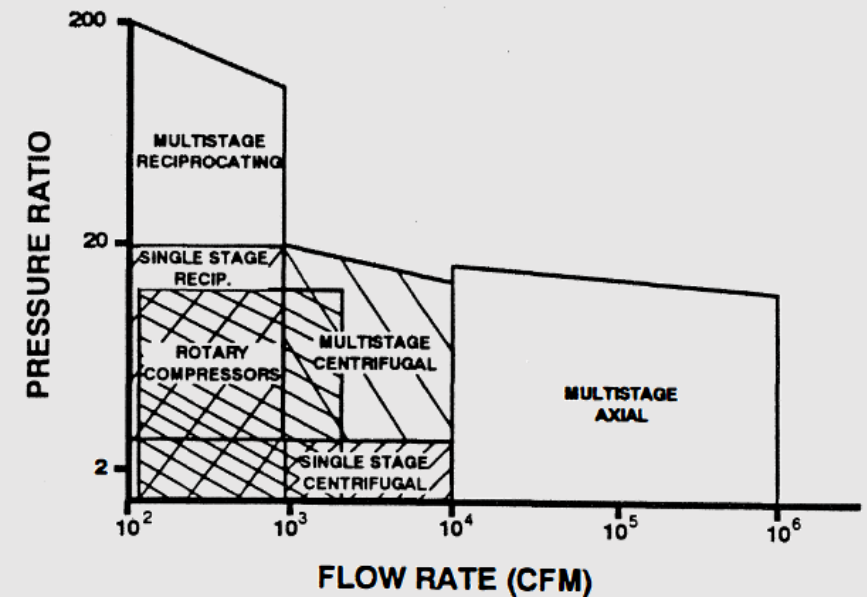
# Introducción

¿Para qué sirven los compresores?

## ¿Por qué compresores centrífugos?

¿Qué es el mapa del compresor?

- Gran salto de presión por etapa.
- Gasto elevado.
- Tamaño reducido.
- Confiables.



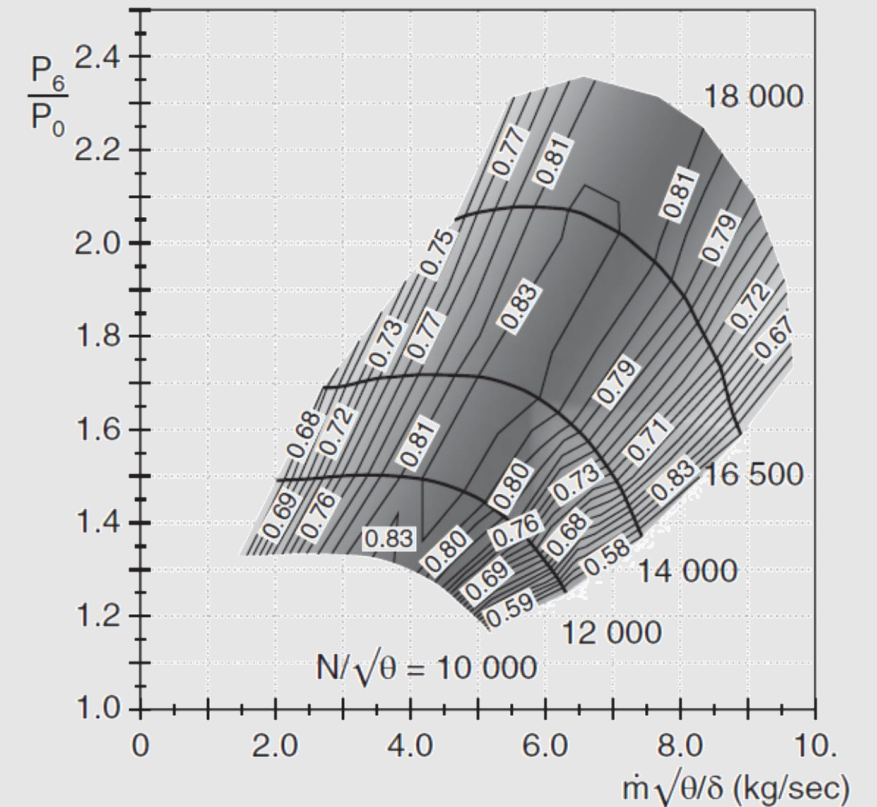
# Introducción

¿Para qué sirven los compresores?

¿Por qué compresores centrífugos?

## ¿Qué es el mapa del compresor?

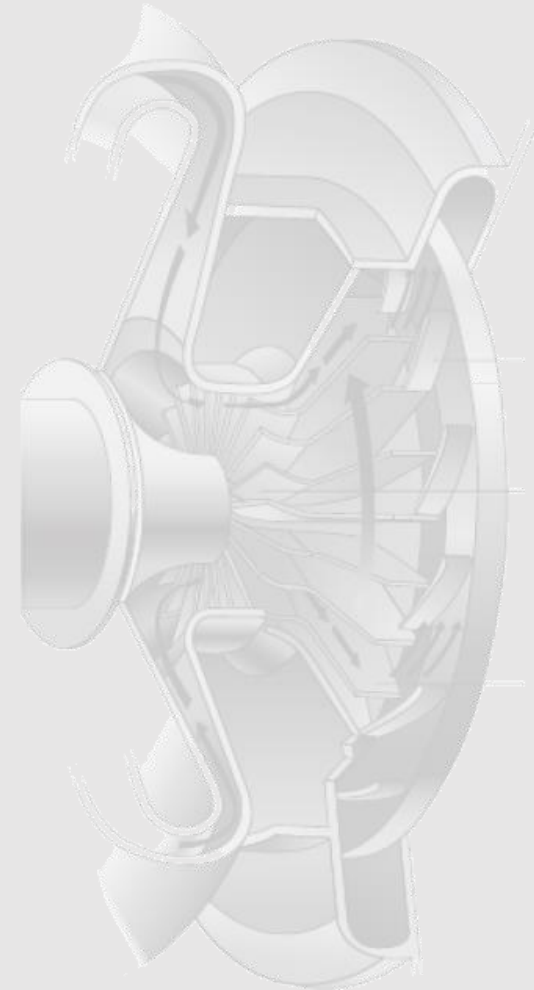
- Herramienta que permite conocer el funcionamiento del compresor.
- $\pi_c \leftrightarrow \dot{m} \leftrightarrow rpm \quad (\eta)$
- No es suficiente.



# Índice

---

- Introducción
- **Objetivos**
- Modelo Anterior
- Modelo de Compresor
  - Coeficientes de pérdidas
- Estudio del Choqueo
- Resultados
- Conclusiones



# Objetivos

---

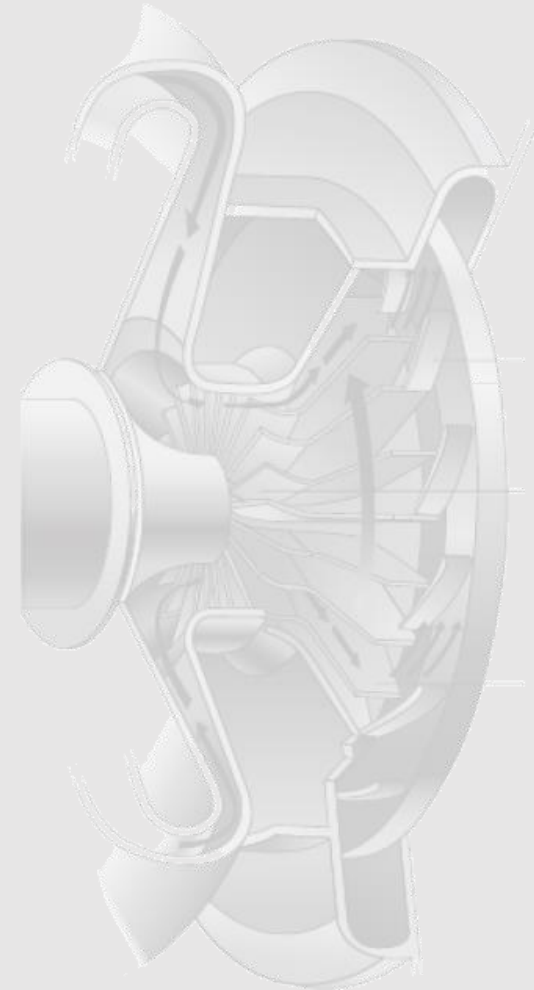
1. Mejorar el modelo de compresor programado por Jorge Saavedra.
2. Incluir en el modelo la caracterización de la zona cercana al choqueo.
3. Celeridad en los cálculos sin perder precisión ni sentido físico.
4. Validar los resultados.



# Índice

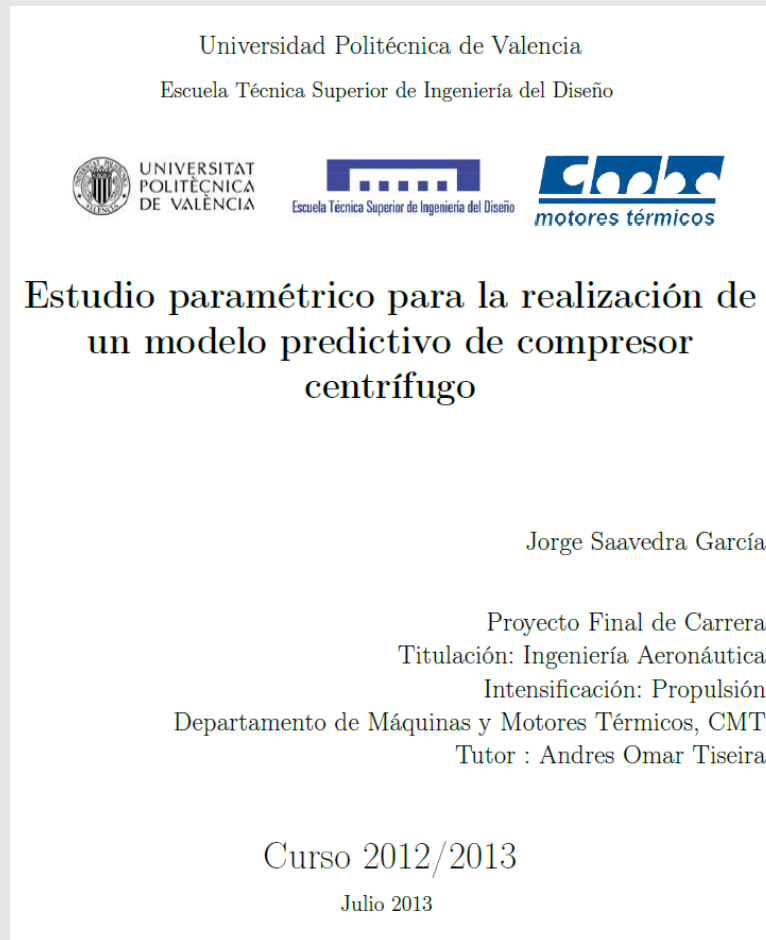
---

- Introducción
- Objetivos
- **Modelo Anterior**
- Modelo de Compresor
  - Coeficientes de pérdidas
- Estudio del Choqueo
- Resultados
- Conclusiones



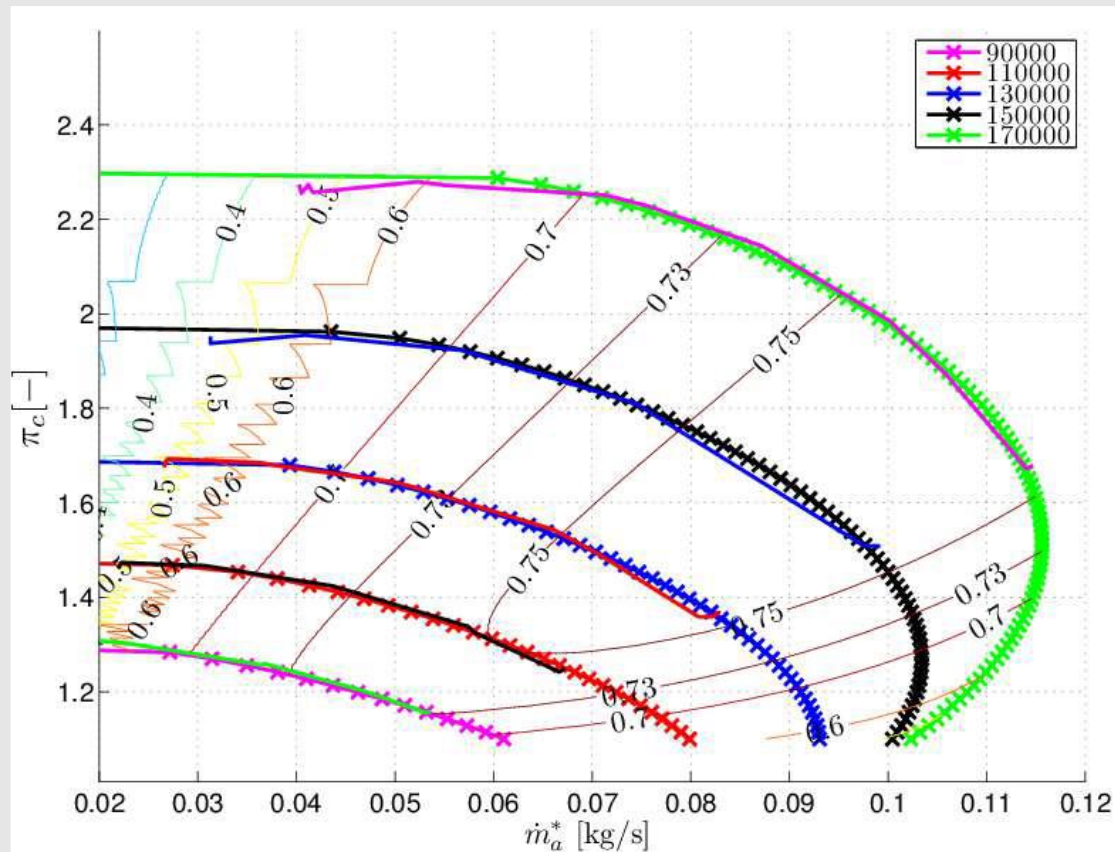
# Modelo Anterior

**Jorge Saavedra García, 2013**



- Cálculo transitorio y estacionario.
- Modelo de tuberías, ecuaciones de Euler 1-D.
- Caracterización geométrica.
- Validación.

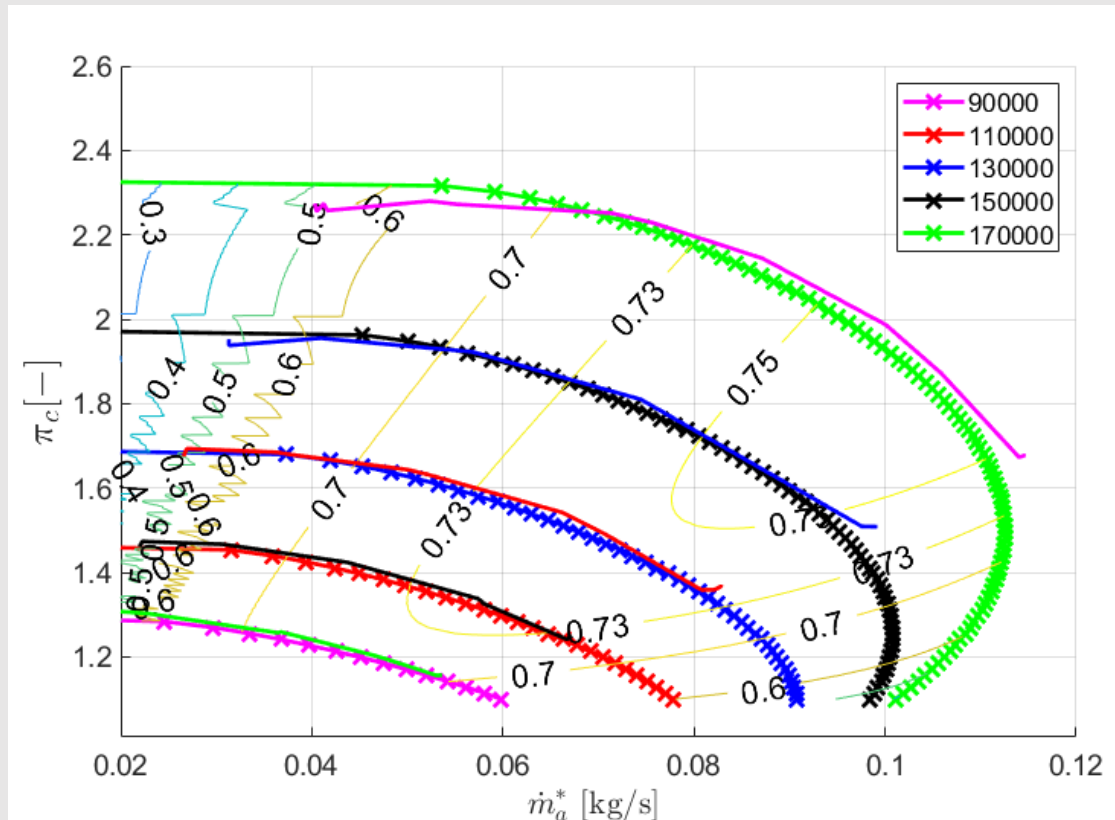
# Modelo Anterior



## Primer objetivo: mejora del código

- Limpieza y orden: eliminación de redundancias, declaración inicial de variables...
- Vectorización: bucles *for* y *while*.
- Selección y clasificación de funciones.
- Reducción de cálculos.
- Coherencia en los valores geométricos.
- Criterio de parada.
- Errores menores.

# Modelo Anterior



## Primer objetivo: mejora del código

- Limpieza y orden: eliminación de redundancias, declaración inicial de variables...
- Vectorización: bucles *for* y *while*.
- Selección y clasificación de funciones.
- Reducción de cálculos.
- Coherencia en los valores geométricos.
- Criterio de parada.
- Errores menores.

# Modelo Anterior

## Reto: El factor de deslizamiento ( $\sigma$ )

**Estadounidense:**  $\sigma = 1 - \frac{\Delta c_{2,u}}{u_2} = 1 - \frac{c_{2,u}^i - c_{2,u}}{u_2}$

**Europea:**  $\sigma' = 1 - \frac{\Delta c_{2,u}}{c_{2,u}^i} = 1 - \frac{\Delta w_{2,u}}{c_{2,u}^i} = \frac{c_{2,u}}{c_{2,u}^i} = \frac{\Delta h}{\Delta h^i}$

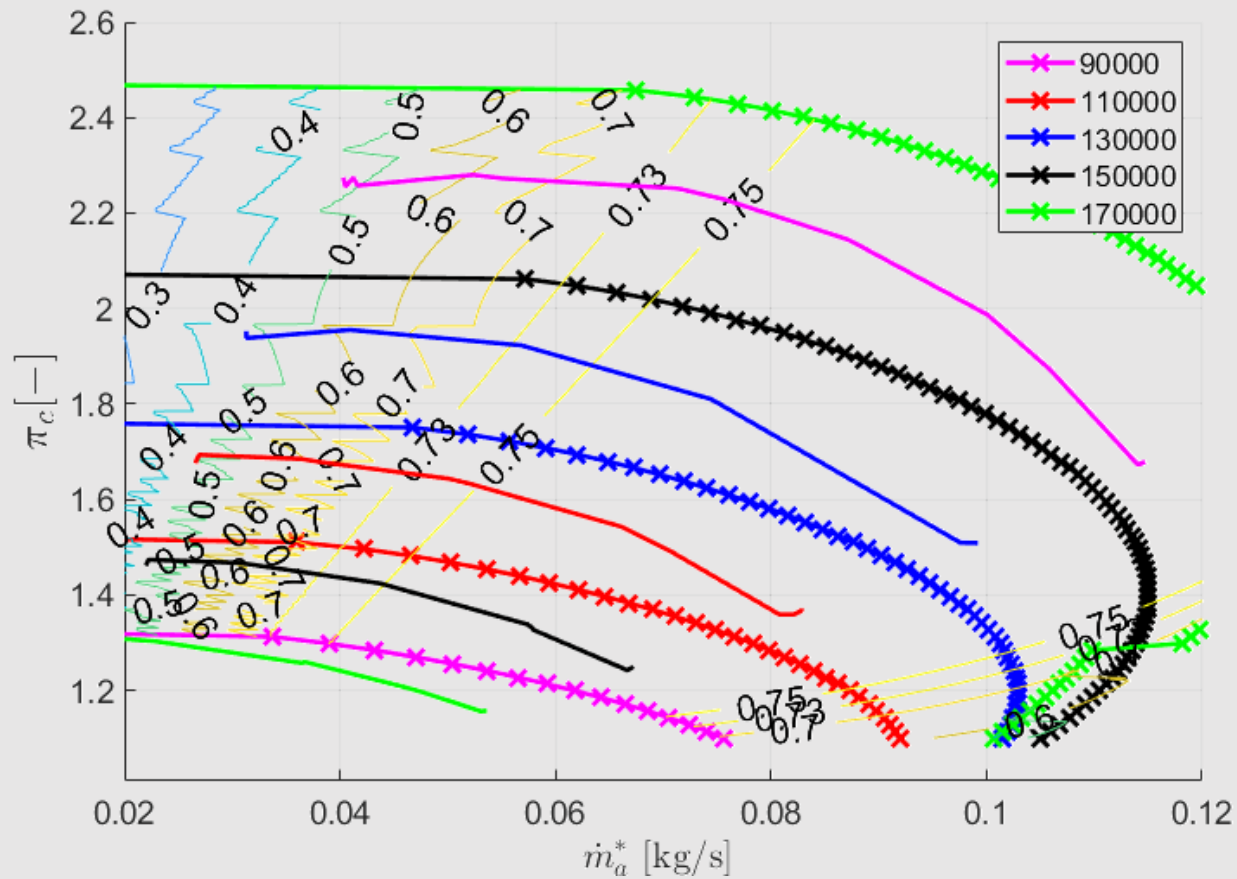
$$\sigma' = 1 - \frac{(1 - \sigma) \cdot u_2}{c_{2,u}^i}$$

**Trabajo base:**

$$\sigma = w_{u,2} / w_{u,2}^i$$



# Modelo Anterior



## Hipótesis

1. Fallos teóricos y/o de programación.
2. Caracterización geométrica deficiente, u otro compresor calculado.
3. Modelos de pérdidas incorrectos u optimizables.

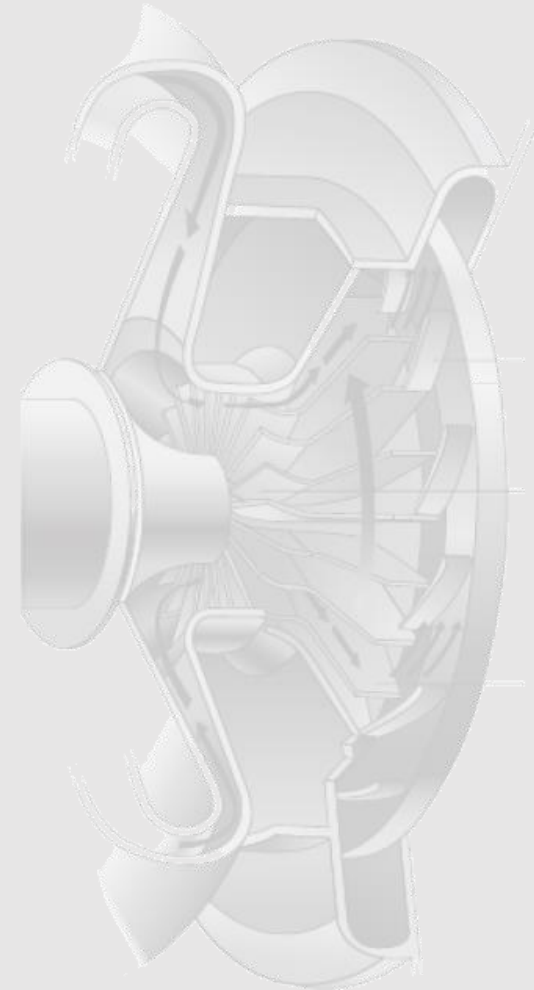


1. Caracterización geométrica deficiente. \*\*\*
2. **Modelos de pérdidas incorrectos u optimizables.**

# Índice

---

- Introducción
- Objetivos
- Modelo Anterior
- **Modelo de Compresor**
  - Coeficientes de pérdidas
- Estudio del Choqueo
- Resultados
- Conclusiones



# Modelo de compresor

## Hipótesis de partida

- Proceso adiabático.
- Condiciones totales constantes en la entrada.
- Flujo completamente axial en la entrada.
- Guiado perfecto del flujo dentro del rodete.
- Flujo no viscoso.
- Calor específico a presión constante, constante.

## Relaciones clave

$$\frac{T_2^i}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

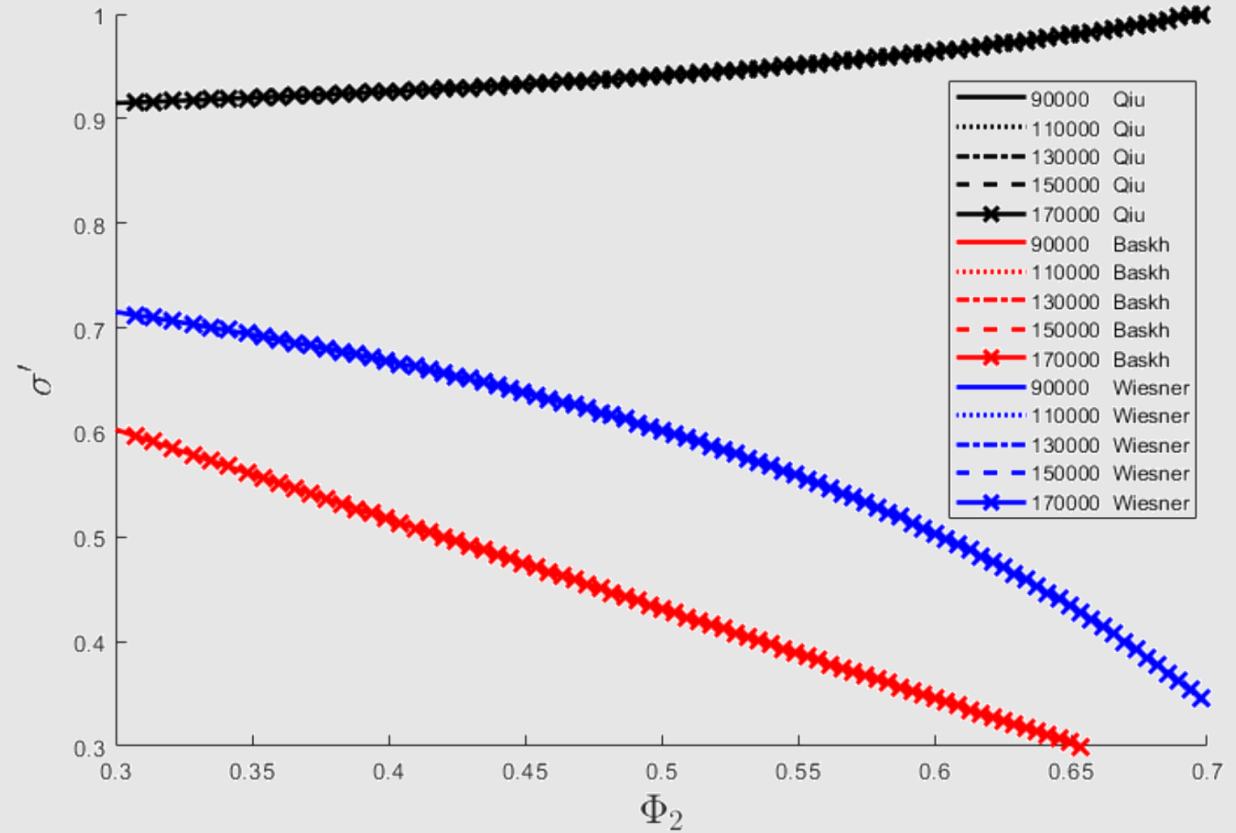
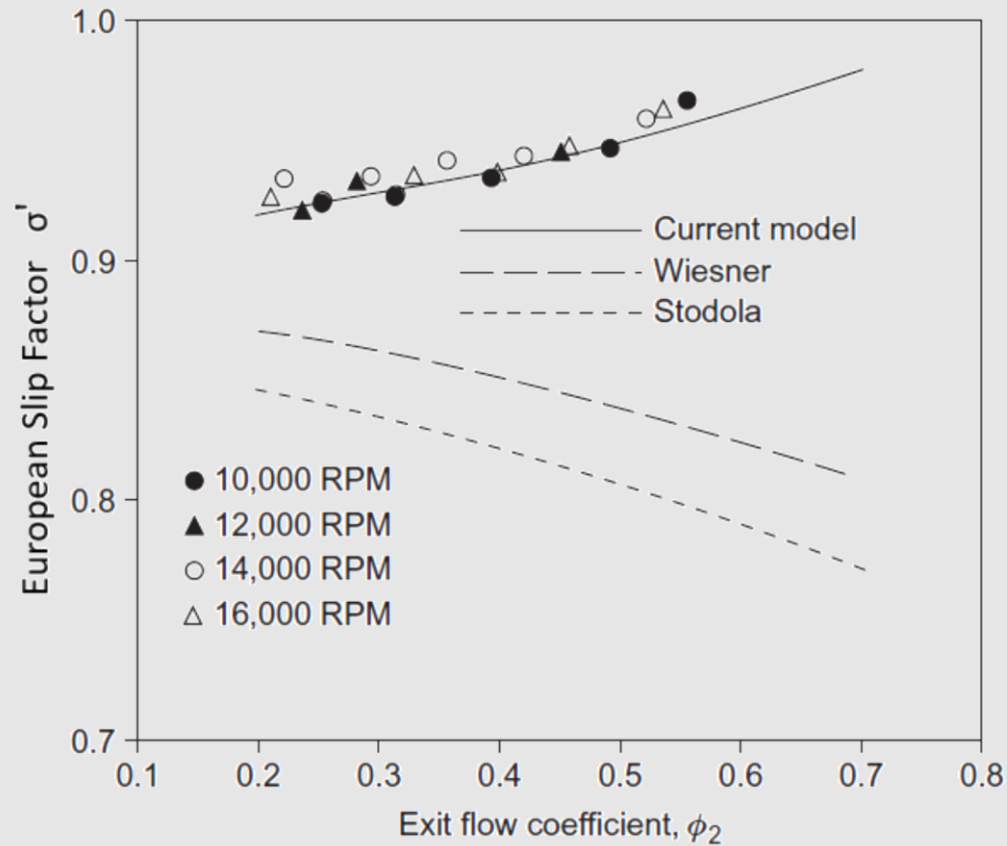
$$c_{2,u}u_2 - c_{1,u}u_1 = C_p(T_{2,t} - T_{1,t})$$

$$(\pi_c)^{\frac{n_p-1}{n_p}} = (\pi_{c,eq})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\pi_{c,eq} = \left( \pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} + \frac{\Delta h_{perdidas}}{c_p T_{1,t}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

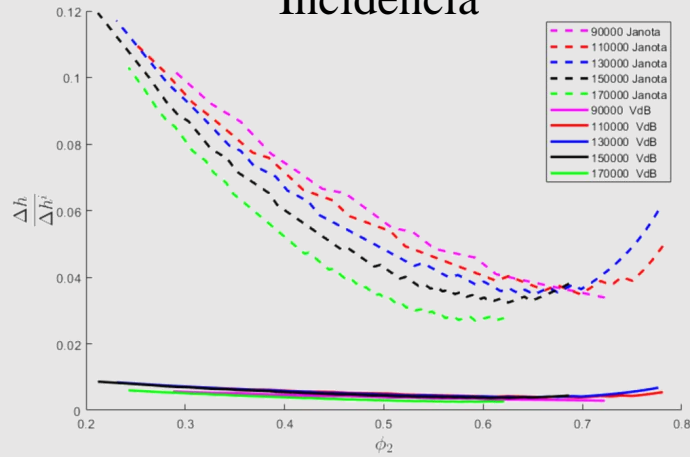


# Pérdidas: deslizamiento

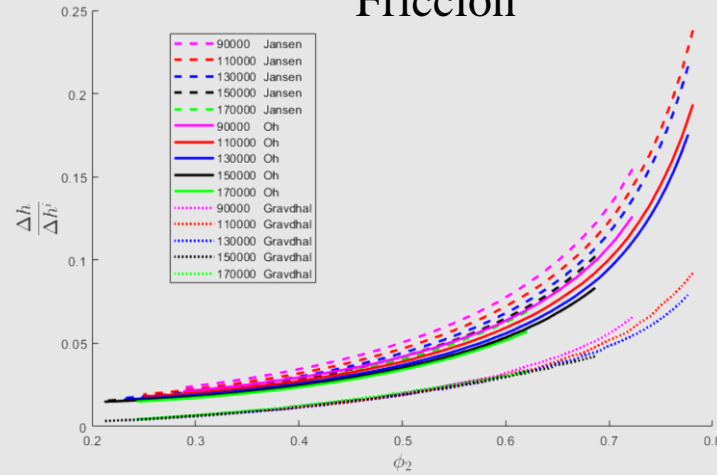


# Pérdidas

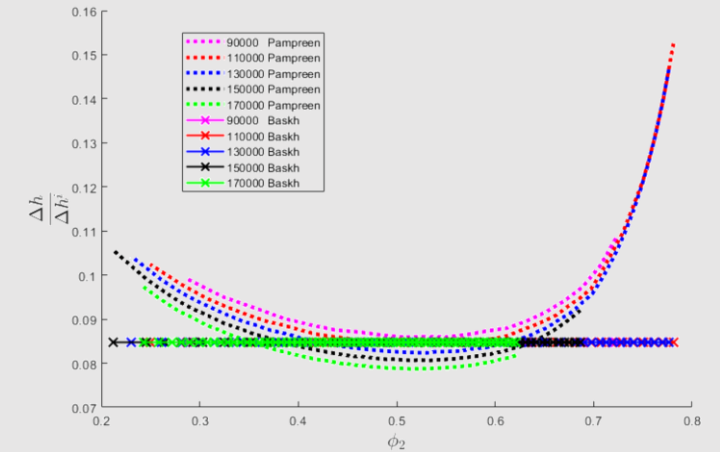
## Incidencia



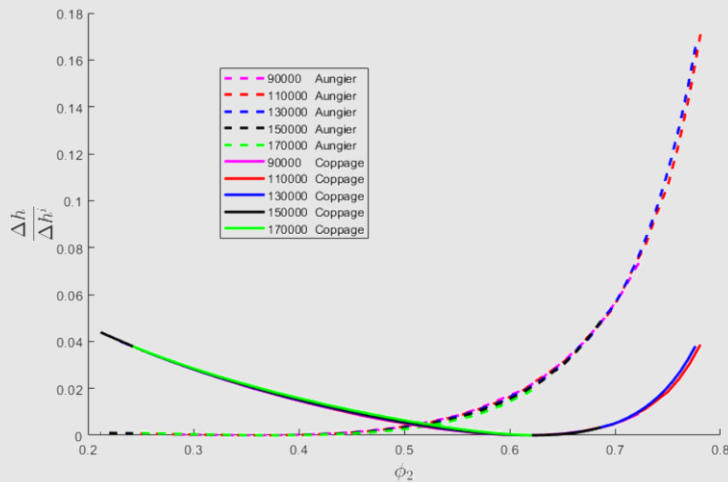
## Fricción



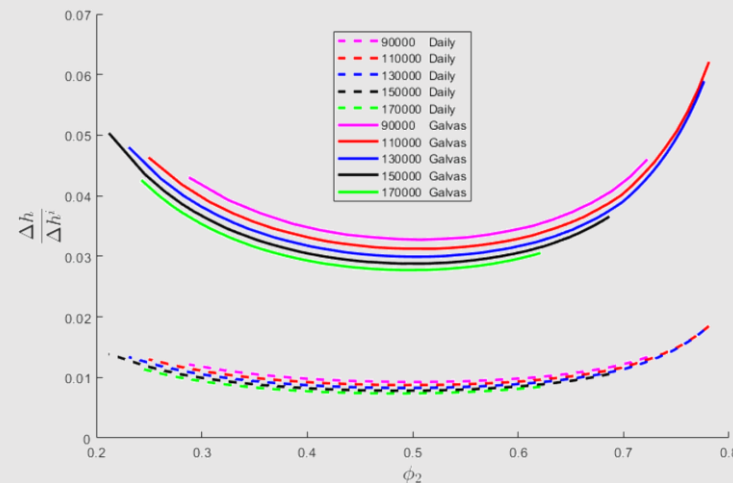
## Intersticio



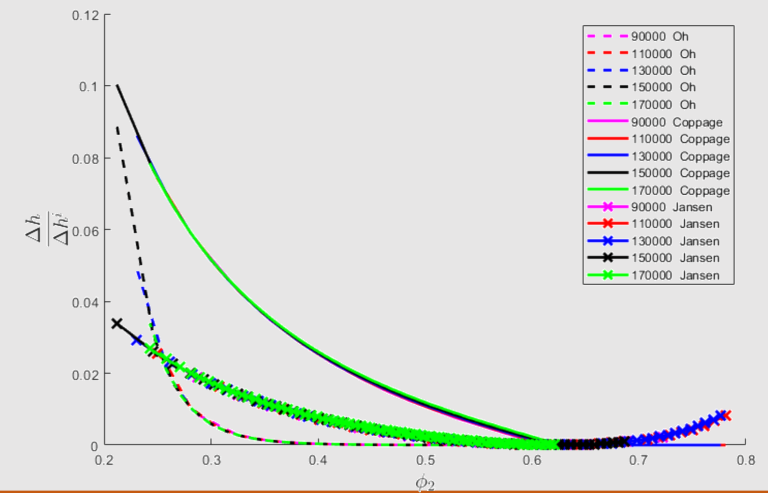
## Carga



## Fricción del disco

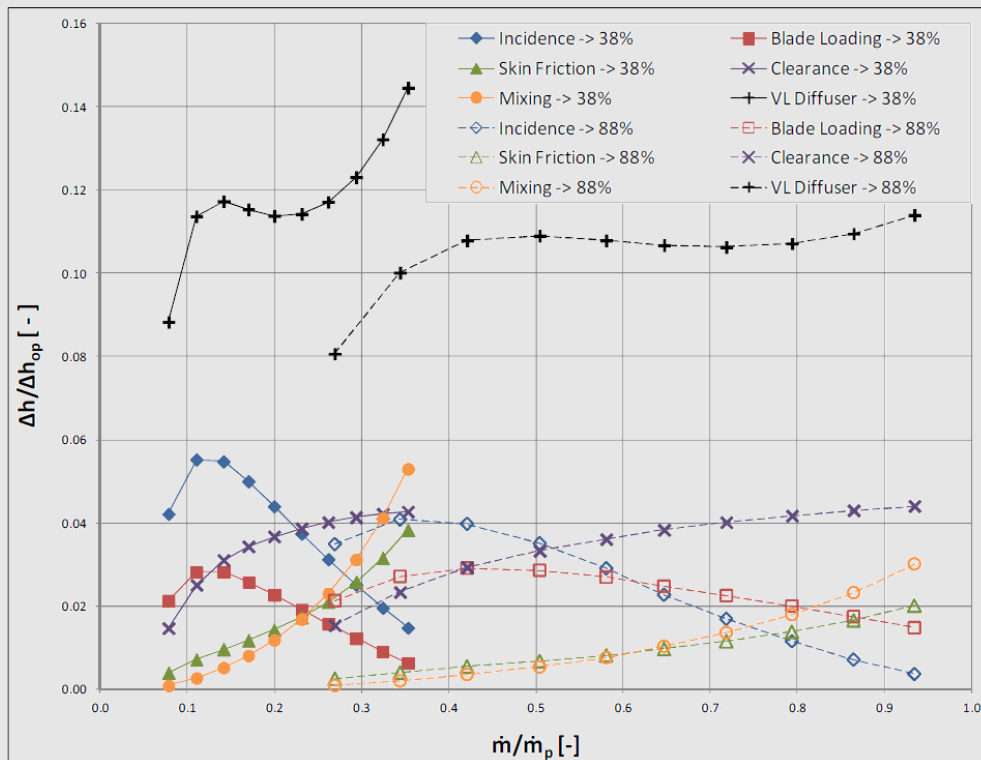


## Recirculación

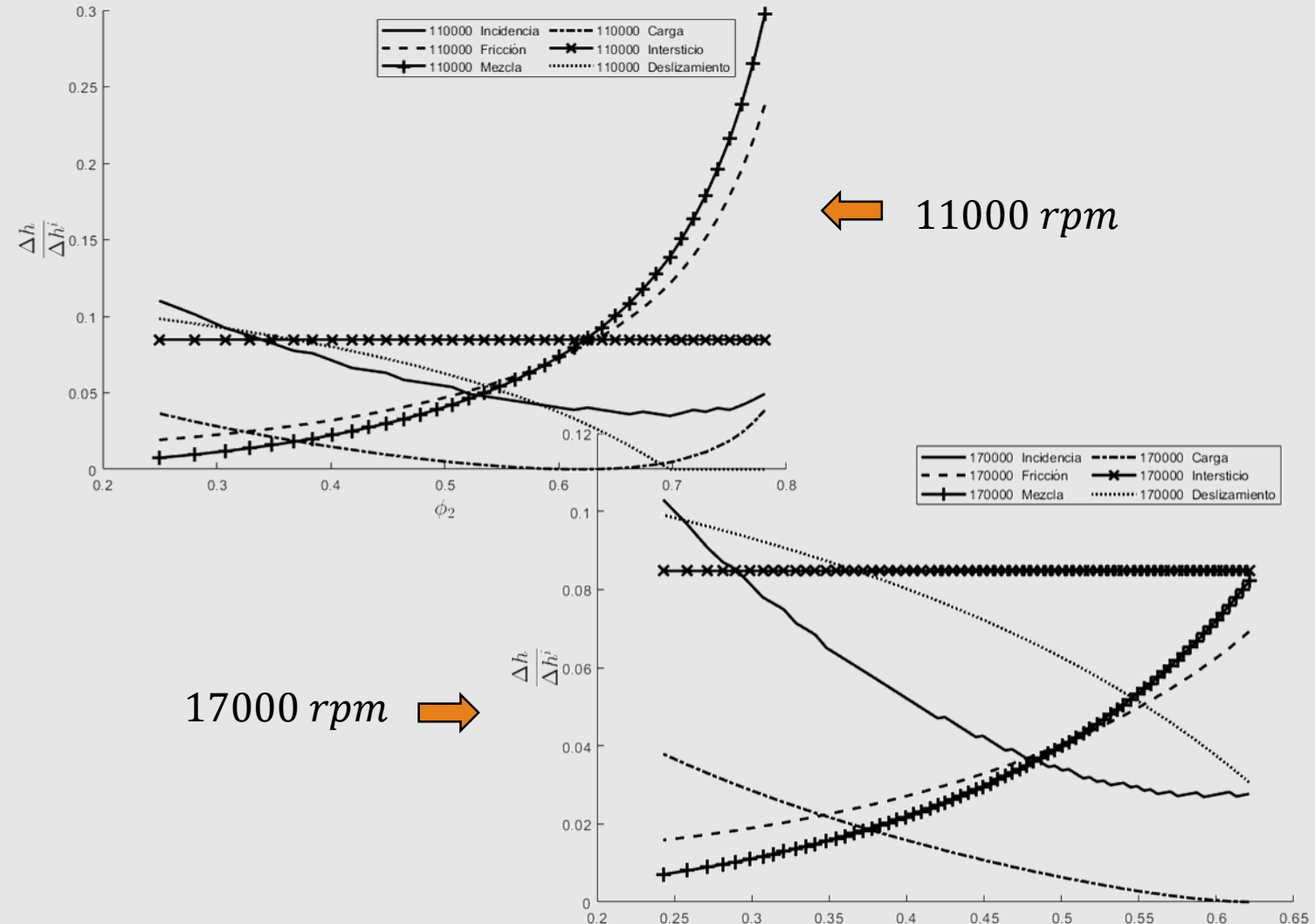


# Pérdidas: validación

## Pérdidas Internas



Pérdidas Internas, 2 Regímenes, (Fuente: P. Harley y otros)

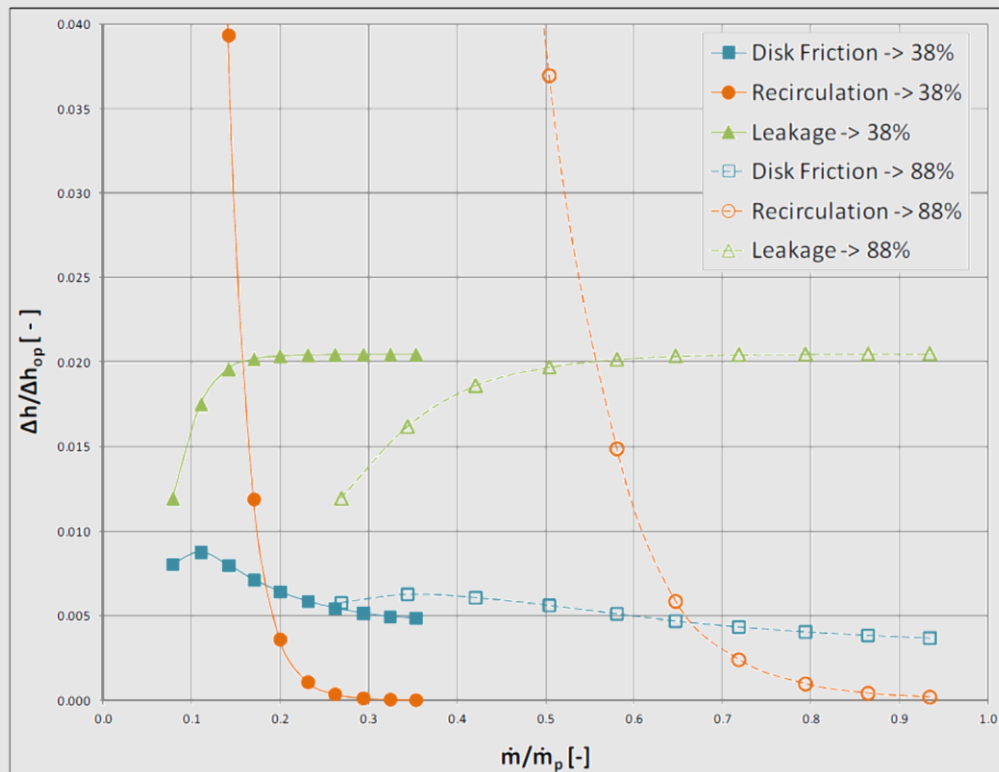


← 11000 rpm

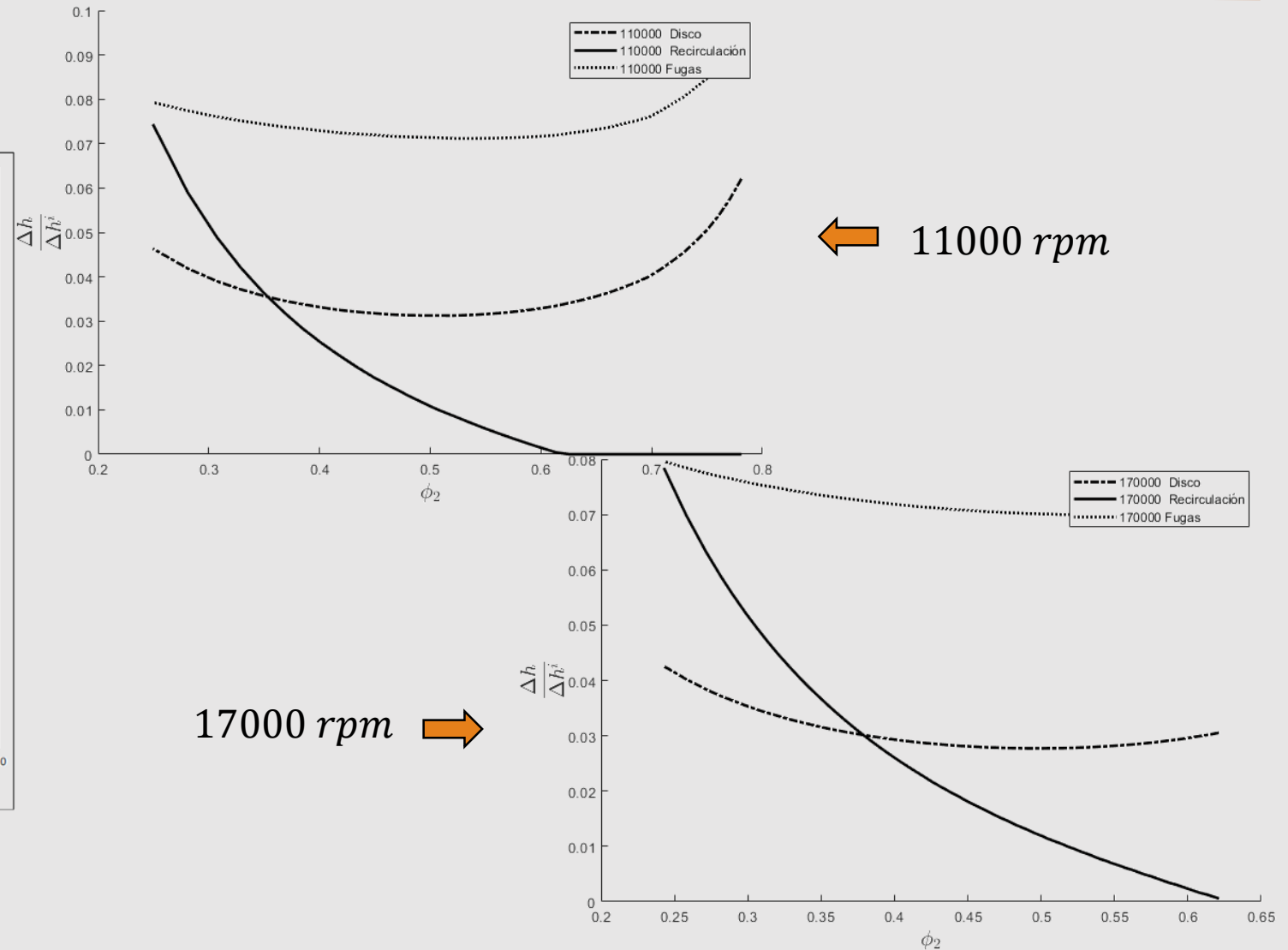
17000 rpm →

# Pérdidas: validación

## Pérdidas Parásitas



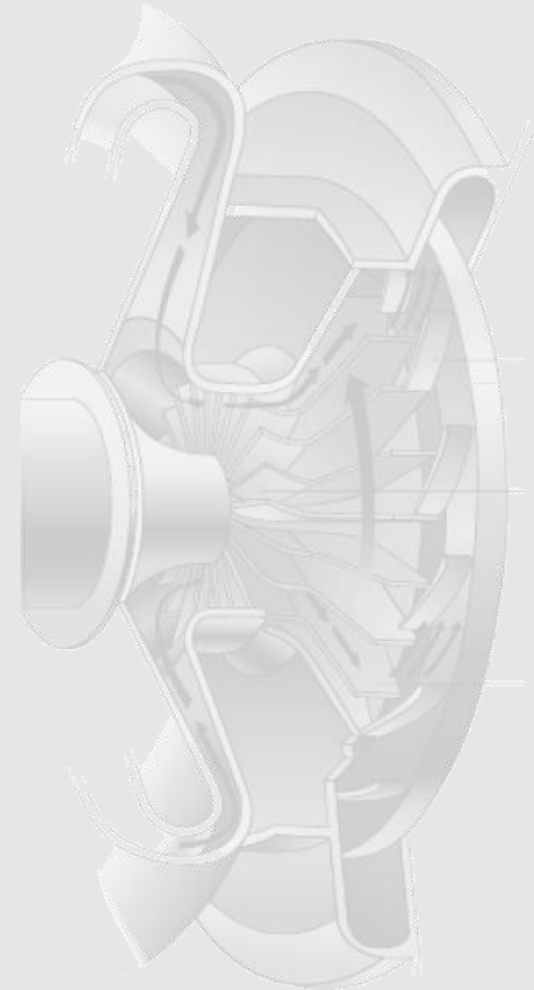
Pérdidas Parásitas, 2 Regímenes, (Fuente: P. Harley y otros)



# Índice

---

- Introducción
- Objetivos
- Modelo Anterior
- Modelo de Compresor
  - Coeficientes de pérdidas
- **Estudio del Choqueo**
- Resultados
- Conclusiones

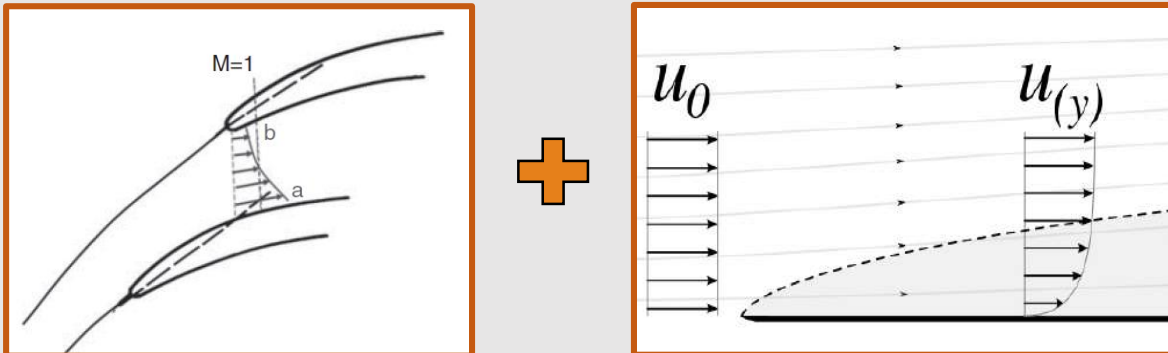


# Choqueo

## Teóricamente

Gasto másico máximo  $\leftrightarrow$  Velocidad sónica  
( $M = 1$ )

## Realidad



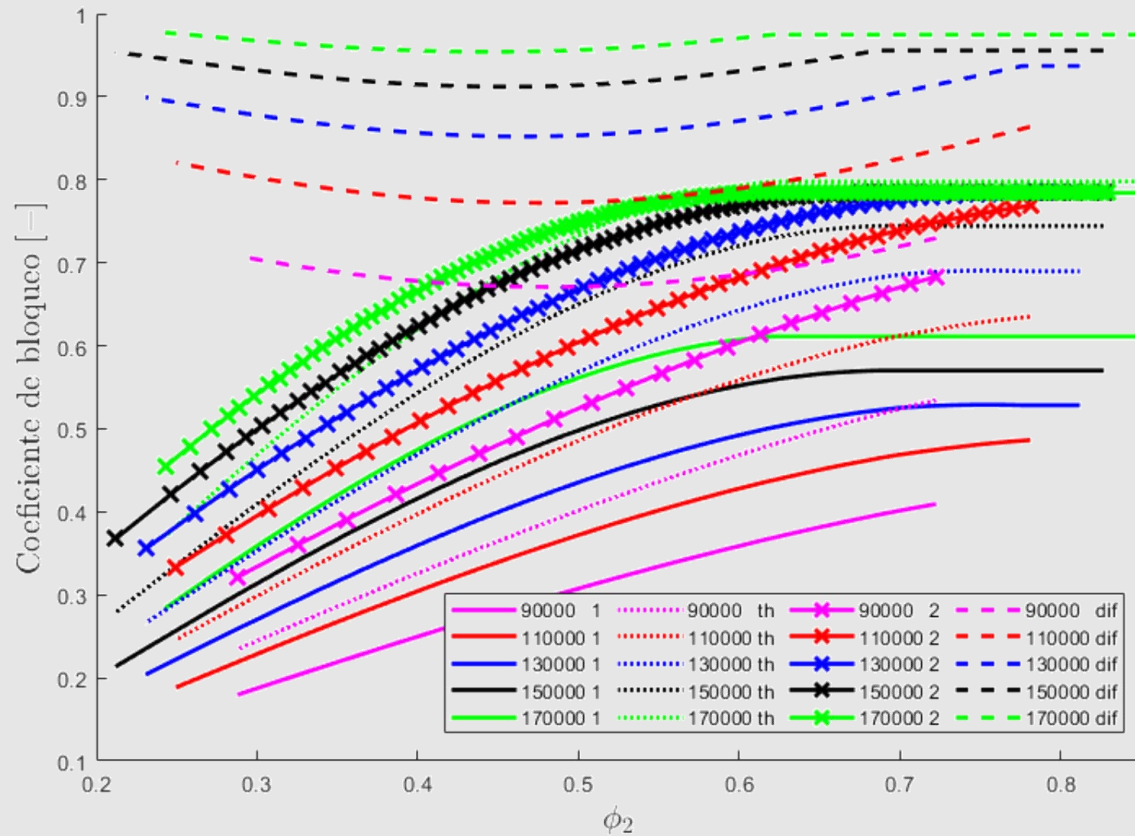
## Características

- Muy poco estudiado.
- Zona no común de operación.
- Mapas no cubren el choqueo.

## ¿Interés?

- Académico.
- Tres situaciones.
  - Motor en frío.
  - Freno motor.
  - Sistemas multietapa.

# Choqueo: caracterización

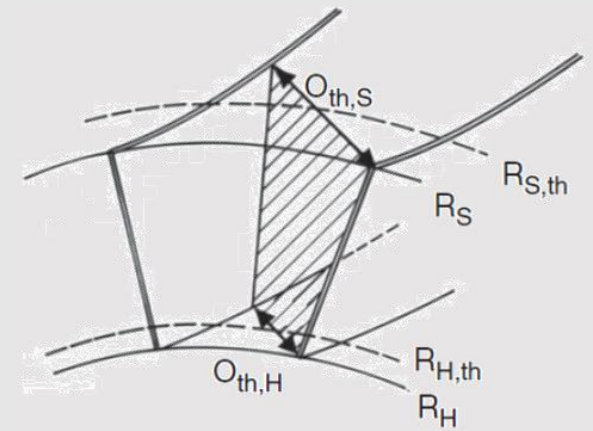


## Gasto máximo

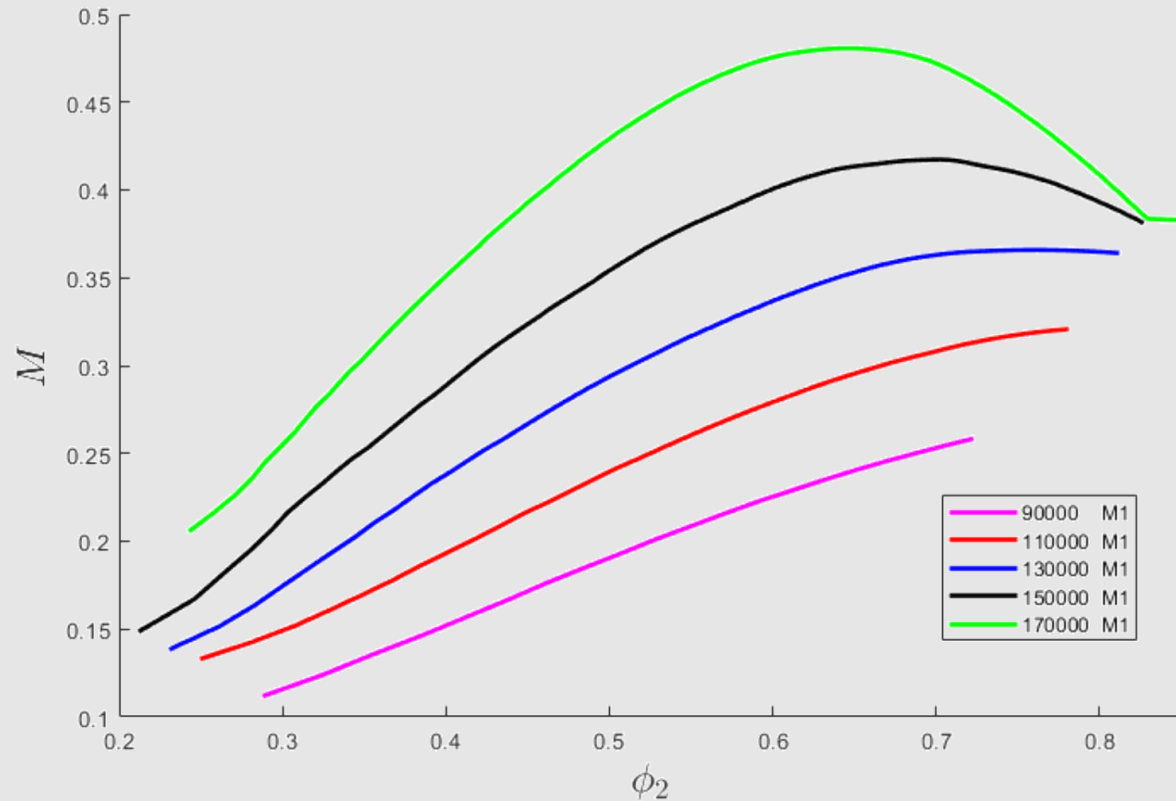
$$\frac{\dot{m}}{A} = \rho_{01} a_{01} \left[ \frac{2 + (\gamma - 1)U^2/a_{01}^2}{\gamma + 1} \right]^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)}$$

$$\frac{\dot{m}}{A_2} = \rho_{2,t} a_{2,t} \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)}$$

¿Áreas?



# Choqueo: caracterización



**Trabajo anterior:**

$$M_2 = \frac{c_2}{a_2}$$

**También:**

$$M_1 = \frac{c_1}{a_1}$$

$$M_{1,w} = \frac{w_1}{a_1}$$

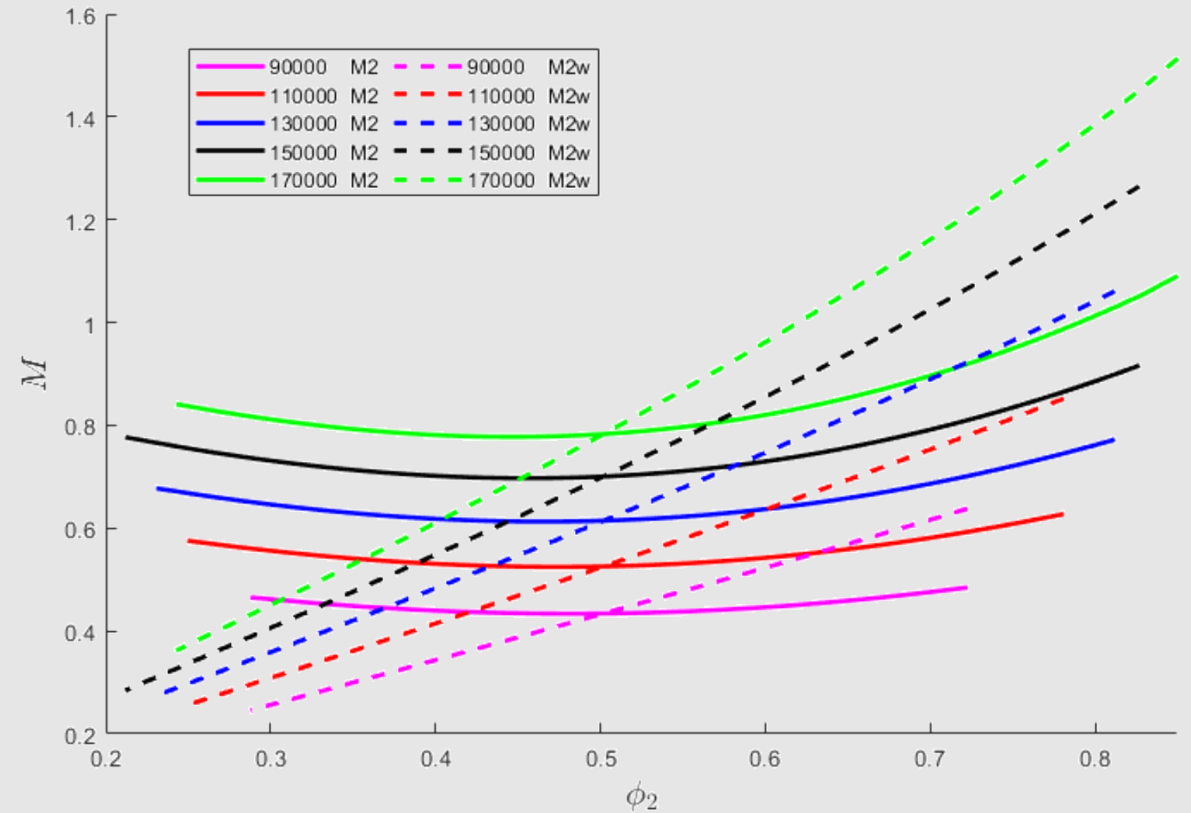
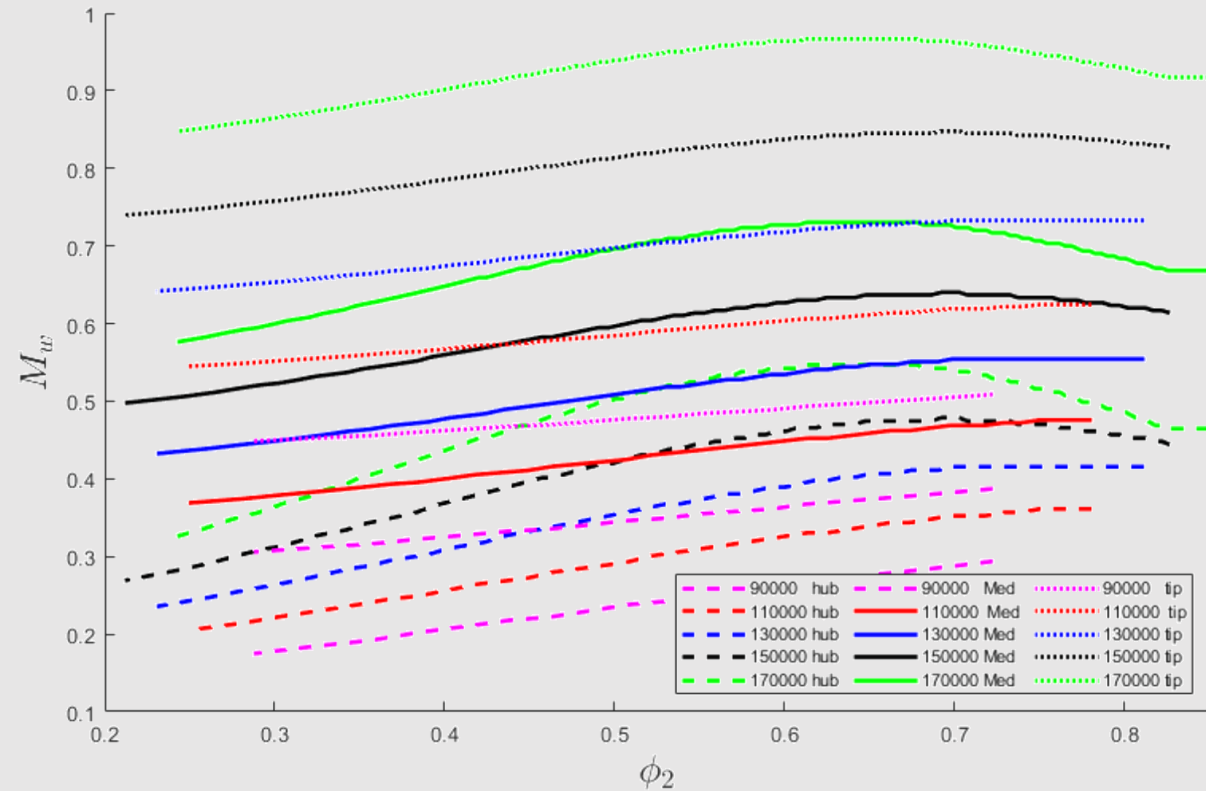
$$M_{1,w,tip} = \frac{w_{1,tip}}{a_1}$$

$$M_{1,w,hub} = \frac{w_{1,hub}}{a_1}$$

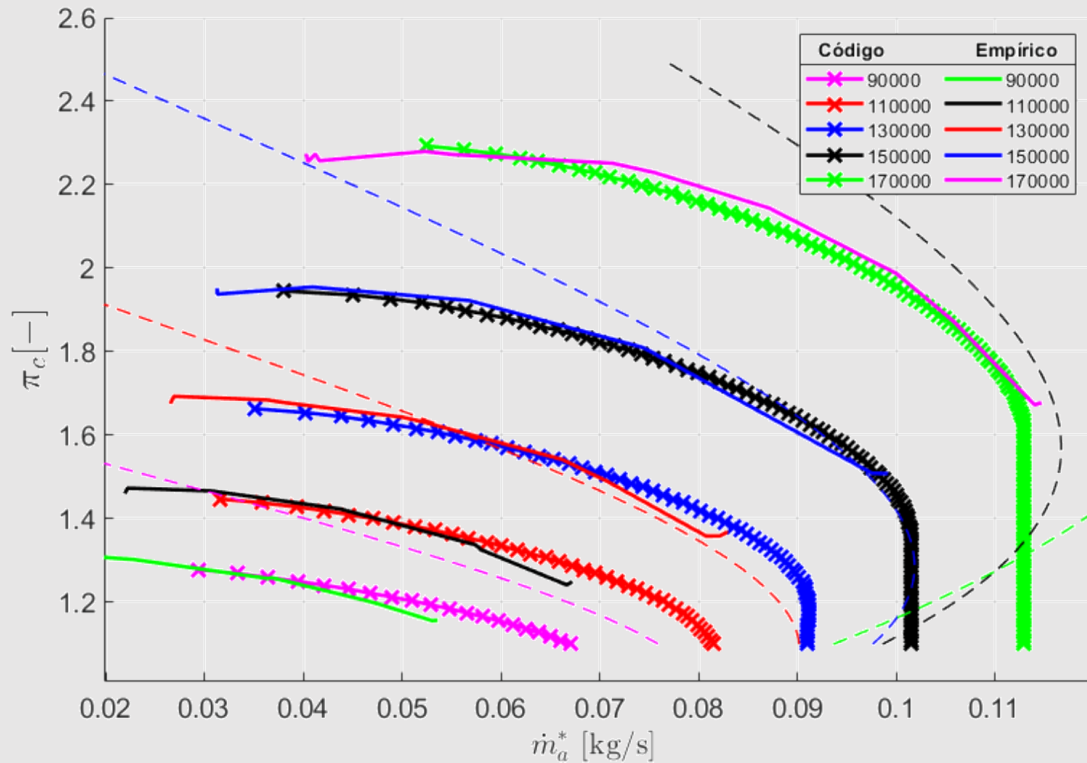
$$M_{2,w} = \frac{w_2}{a_2}$$



# Choqueo: caracterización



# Choqueo: caracterización



## Interpretación

- Mejora respecto al anterior.
- Cierta éxito.
- Incertidumbre inherente.

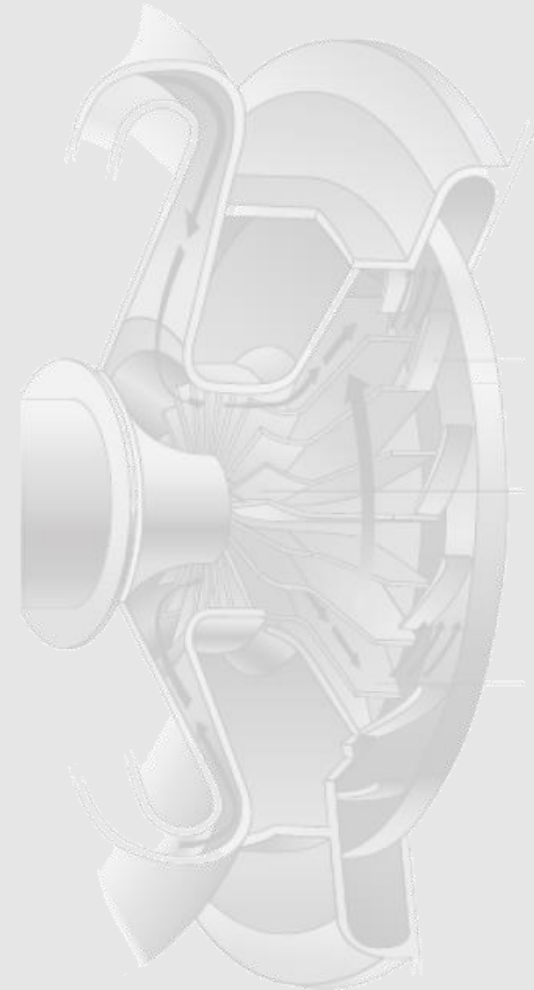
## Mejoras

- Cálculo del área de garganta.
- Relación de ondas de choque con estabilidad, esfuerzos...

# Índice

---

- Introducción
- Objetivos
- Modelo Anterior
- Modelo de Compresor
  - Coeficientes de pérdidas
- Estudio del Choqueo
- **Resultados**
- Conclusiones

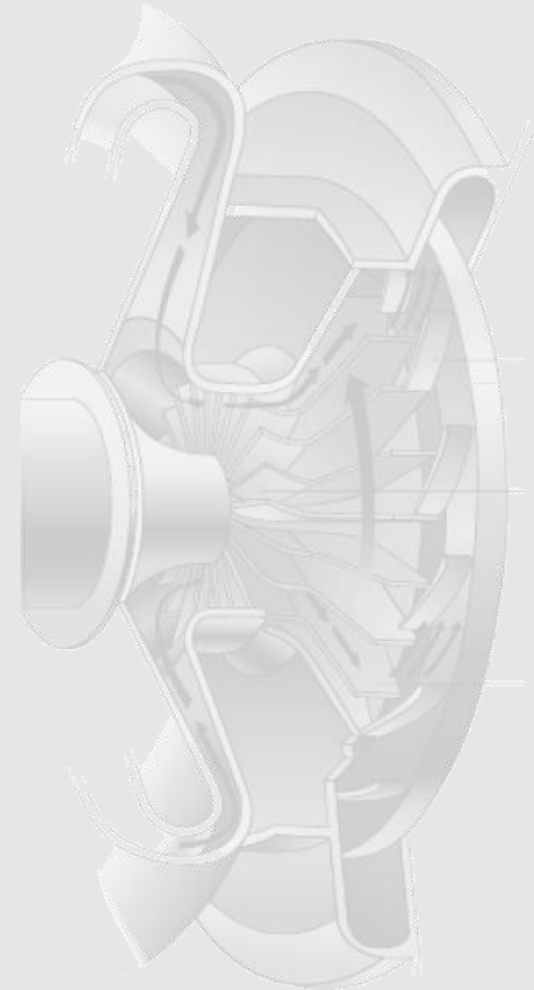




# Índice

---

- Introducción
- Objetivos
- Modelo Anterior
- Modelo de Compresor
  - Coeficientes de pérdidas
- Estudio del Choqueo
- Resultados
- **Conclusiones**



# Conclusiones

---

1. Mejorar el modelo de compresor programado por Jorge Saavedra.
2. Incluir en el modelo la caracterización de la zona cercana al choqueo.
3. Celeridad en los cálculos sin perder precisión ni sentido físico.
4. Validar los resultados.

1. Corrección de errores menores, aumento de velocidad, inclusión de nuevos modelos de pérdidas. Nuevo factor de deslizamiento e incorporación de gráficas. ✓
2. Dentro de las limitaciones de un código unidimensional: éxito. ✓
3. Velocidad, sentido físico y cierta precisión. 1/2
4. Ensayo de Jorge y otros trabajos. 1/2

# Conclusiones y mejoras

---

- Los fallos en los coeficientes de pérdidas, especialmente el factor de deslizamiento, han condicionado el trabajo.
- Inexistencia de modelos unidimensionales de choque, bloqueo o evolución de las capas límite.
- Pese al error derivado de corregir el factor de deslizamiento, el modelo presenta una precisión aceptable.
- Incorporación de un modelo de dos zonas.



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Trabajo Final de Máster

# Aplicación de la teoría de choque para un modelo predictivo de compresor centrífugo

Máster en Ingeniería Aeronáutica  
Curso 2020-2021

**Autor:** Raúl Arce Balbás

**Tutor:** Andrés Omar Tiseira Izaguirre

**Cotutor:** Jorge Saavedra García





# Modelo de Compresor

## Opciones

1. Modelo unidimensional.
2. Modelo 2D o 3D
3. Modelo unidimensional de dos zonas.

### Modelo unidimensional

Código ya programado \*



Velocidad de cálculo

Unidimensionalidad

¿Trabajos?



### Modelo 2D o 3D

Precisión



Referencia

Velocidad de cálculo



### Modelo unidimensional de dos zonas

Caracterización del choque



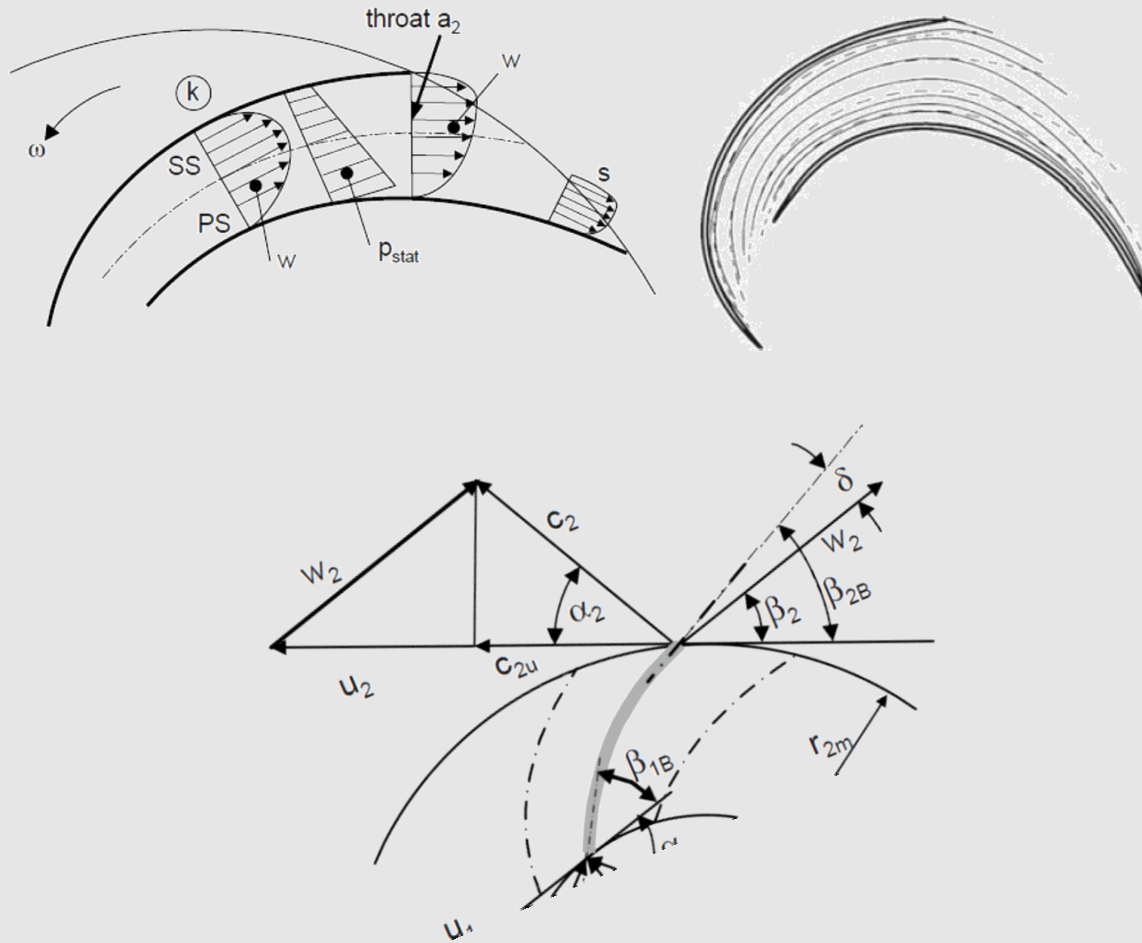
Velocidad de cálculo

Parámetros de entrada

Validación



# Pérdidas: deslizamiento



Wiesner

$$\sigma = 1 - \frac{\sqrt{\sin \beta_{2,bl}}}{Z^{0.70}}$$

Bashkarone

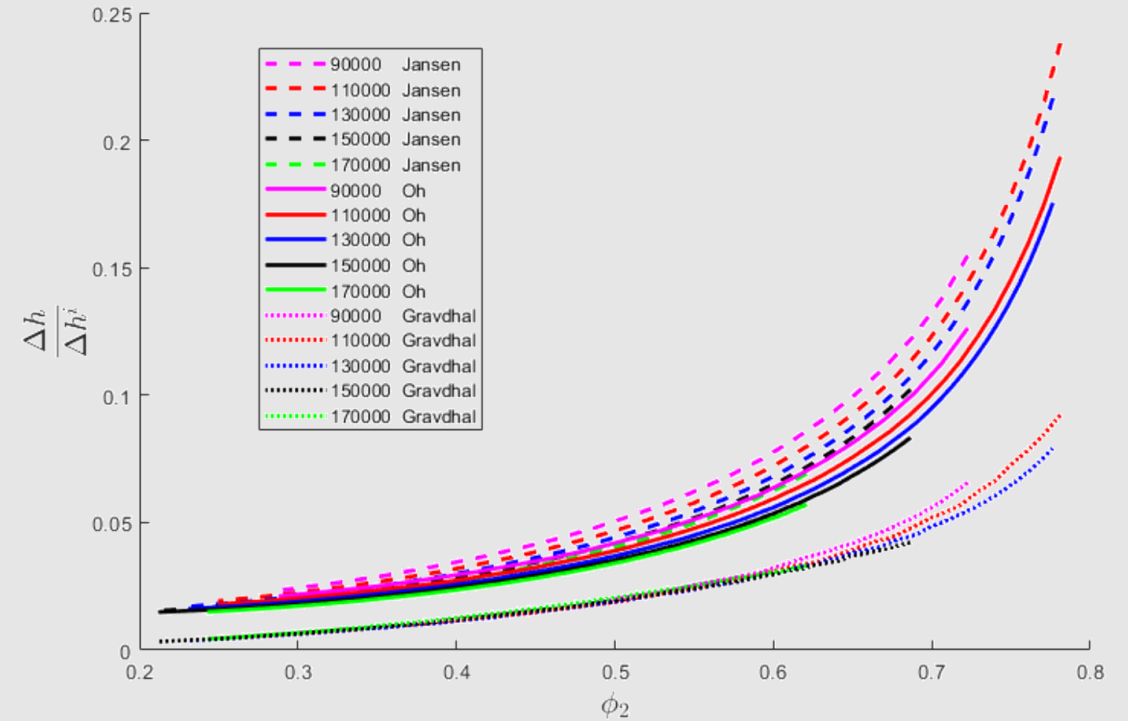
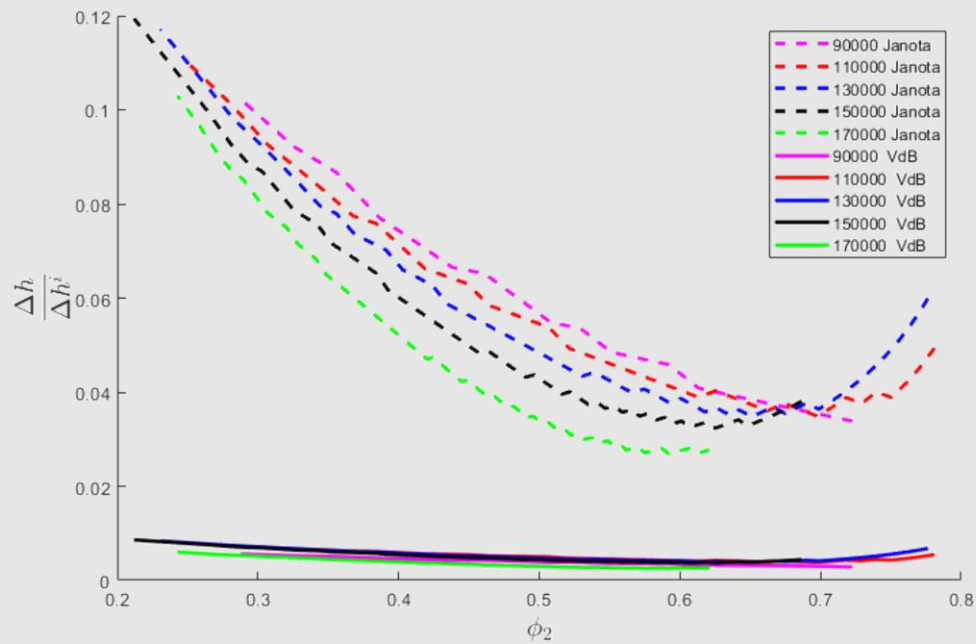
$$\sigma = \left[ 1 - \frac{2}{Z} \sqrt{\sin \beta_{2,bl}} \right] \left[ 1 - \frac{W_{2,m}}{U_2} \frac{1}{\tan \beta_{2,bl}} \right]$$

Qiu

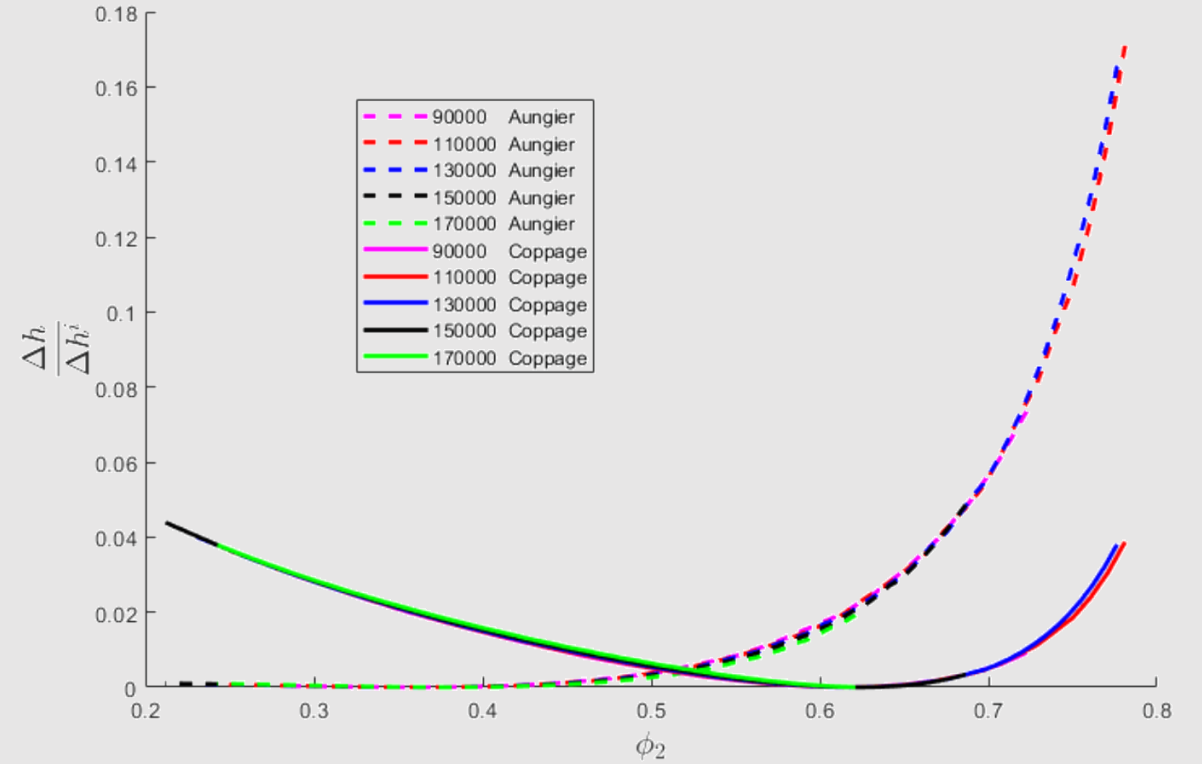
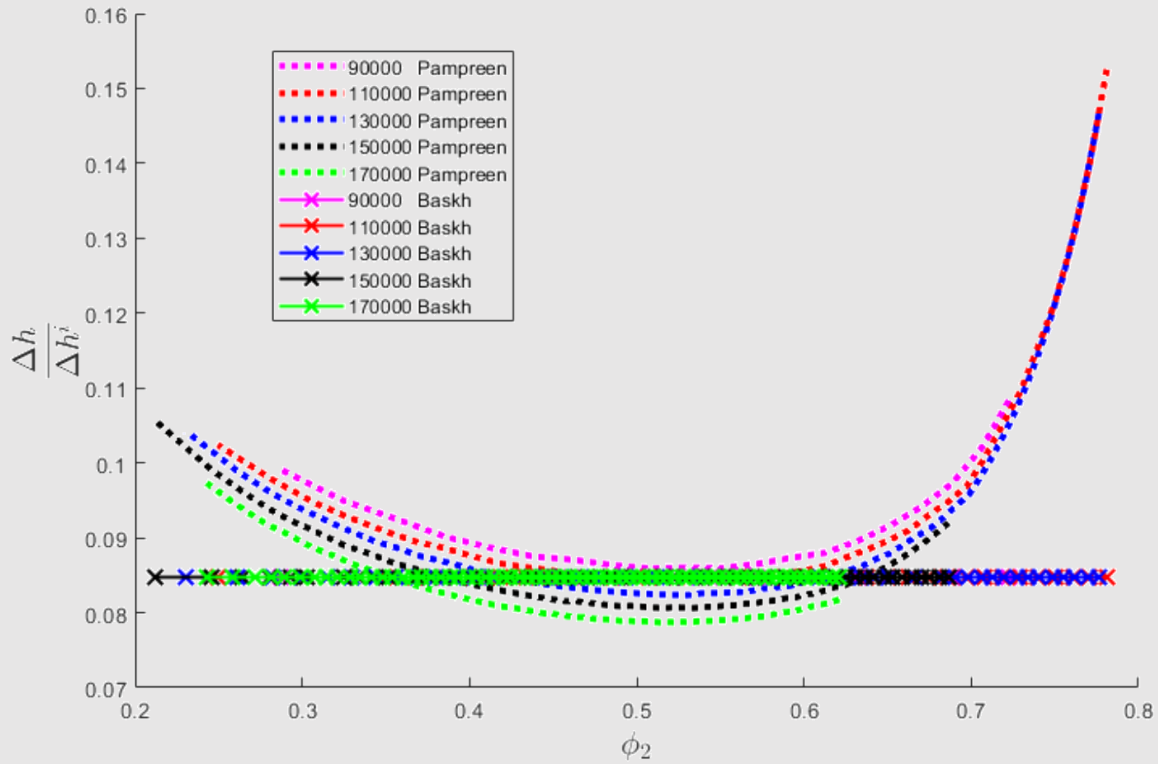
$$\sigma = 1 - \Delta\sigma_{radial} - \Delta\sigma_{turn}$$

$$\sigma = 1 - \frac{F\pi \cos \beta_{2b} \sin \gamma_2}{Z_2} - \frac{F s_2 \phi_2}{4 \cos \beta_{2,bl}} \left( \frac{d\beta}{dm} \right)_2$$

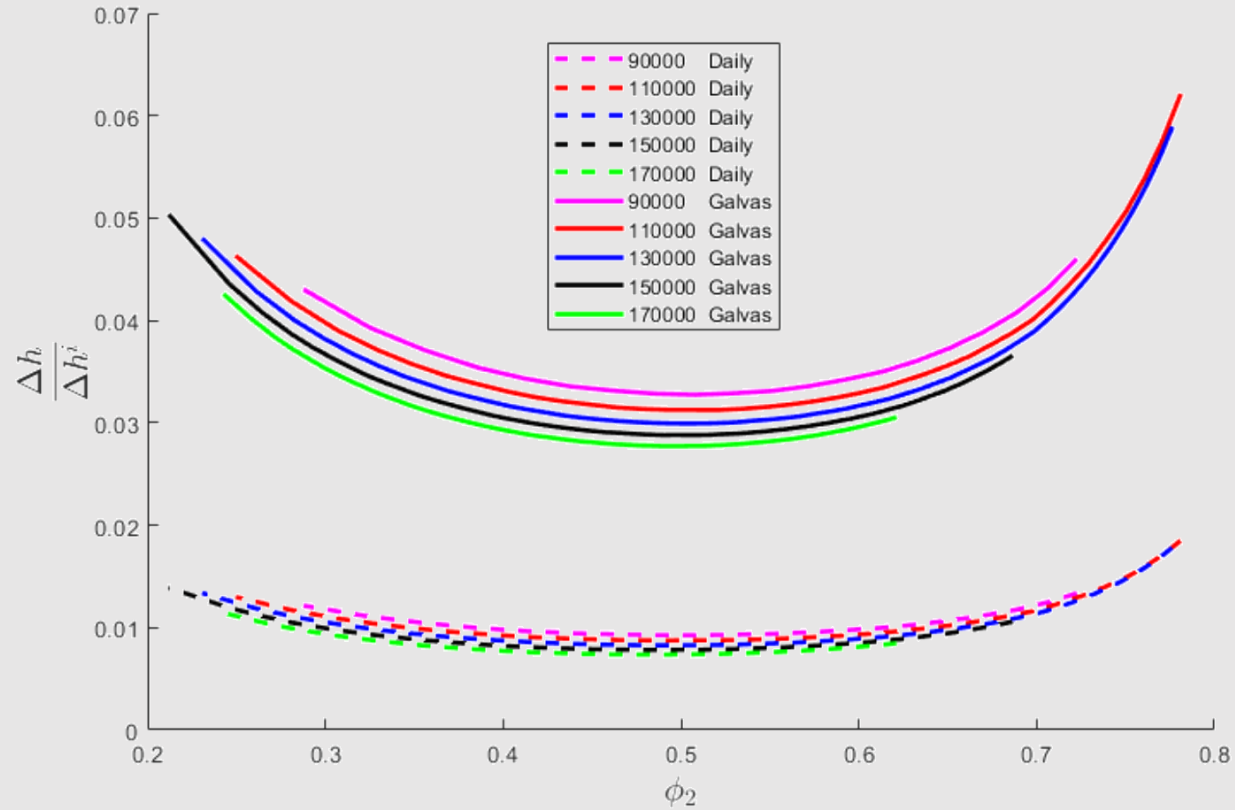
# Pérdidas: incidencia y fricción



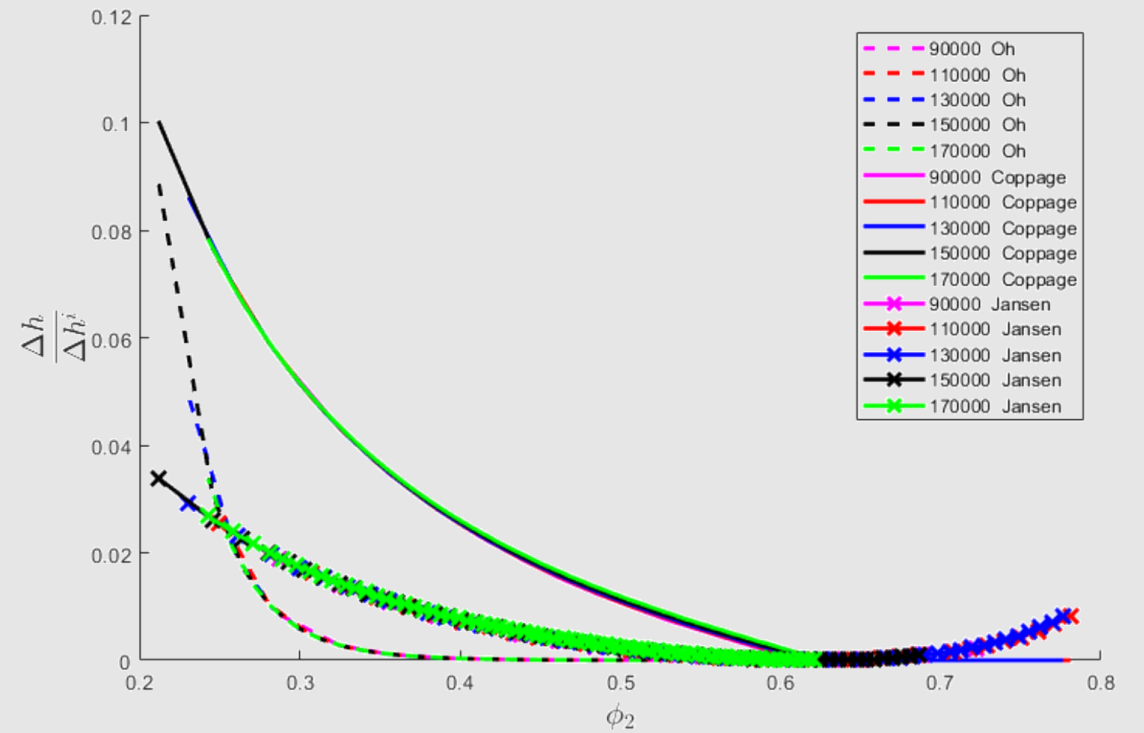
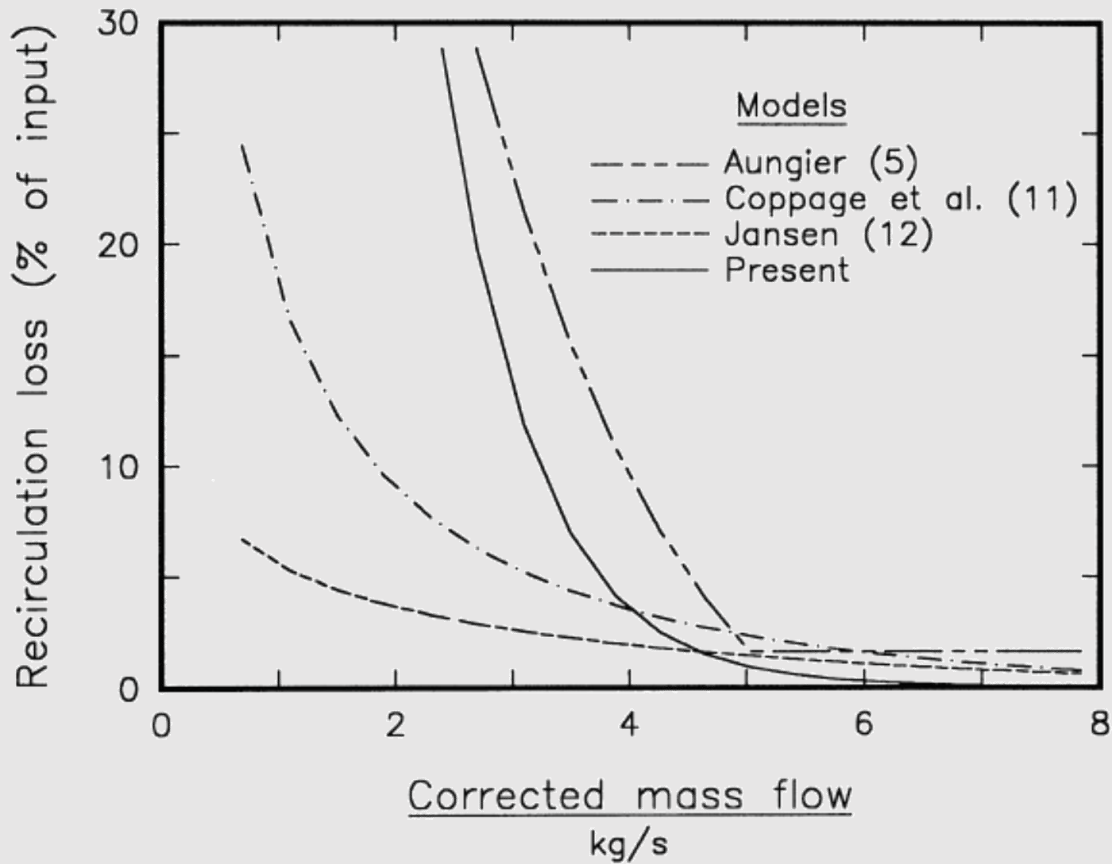
# Pérdidas: flujo intersticial y carga



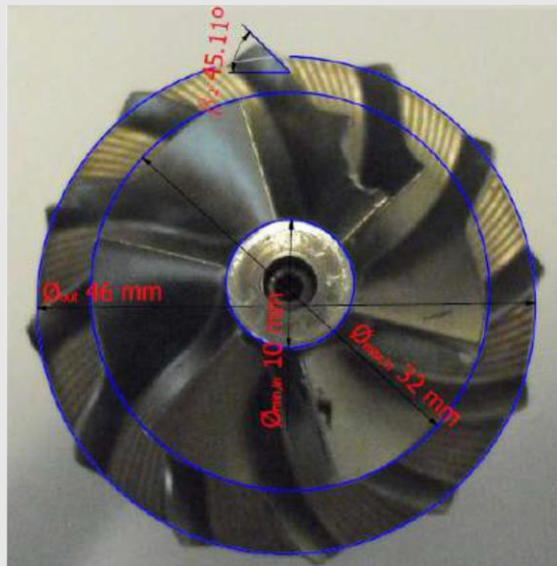
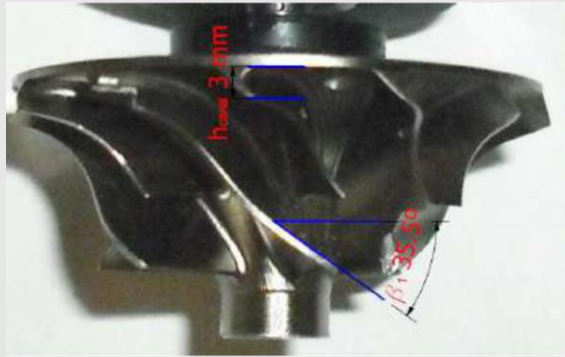
# Pérdidas: fricción del disco



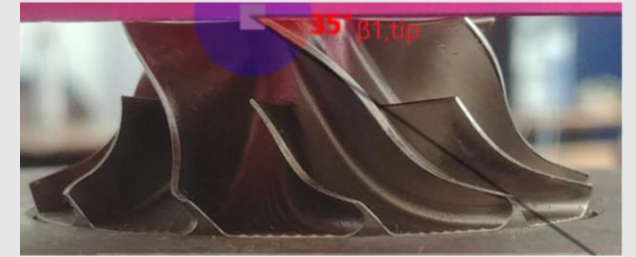
# Pérdidas: recirculación



# Caracterización geométrica



Parámetro	Valor	Unidad
$R_{1,hub}$	0,0050	[m]
$R_{1,med}$	0,0105	[m]
$R_{1,tip}$	0,0160	[m]
$R_2$	0,0230	[m]
$A_1$	$7,26 \cdot 10^{-4}$	[m <sup>2</sup> ]
$A_2$	$4,22 \cdot 10^{-4}$	[m <sup>2</sup> ]
$A_{th}$	$5,55 \cdot 10^{-4}$	[m <sup>2</sup> ]
$b$	0,003	[m]
$t_{bl}$	0,001	[m]
Nº Álabes	6	[-]
Nº Splitters	6	[-]
$R_n$	0,007	[m]
$\Delta X$	0,0155	[m]
$L_H$	0,0255	[m]
$\beta_{1,bl}$	47,5	[°]
$\beta_{2,bl}$	45	[°]
$d\beta/dm$	-3,6	[°/mm]





# Costes

Categoría	Tiempo [h]	Coste [€/h]	Total
Ingeniero técnico	380	15	5700
Profesor Doctor	22	30	660

Software	Licencia [€]
MatLab	800
Texmaker	0
AutoCAD	1900

Categoría	Coste [€]
Personal	6360
Software	2700
Subtotal	9060
IVA	1902,6
Electricidad	18,3
Amortización	30,2
<b>TOTAL</b>	<b>11011,1</b>