

# EDUCAÇÃO

---

# e

# TECNOLOGIA



Revista do Instituto Politécnico da Guarda

## **EDUCAÇÃO E TECNOLOGIA**

Propriedade : Instituto Politécnico da Guarda

Director : João Raimundo

Redacção : Serviços Centrais do IPG - Quinta do Zâmbito  
6300 Guarda \* Telf. 222634 \* Fax 222690

Composição : Gabinete Editorial do IPG

Execução Gráfica e Impressão : Secção de Reprografia do IPG

Depósito Legal nº 17.981/87

Periodicidade : Semestral

**nº X - Julho de 1992**

**Reprodução total ou parcial proibida**

Capa : Vista parcial do edifício do Pólo de Seia do  
Instituto Politécnico da Guarda

# UM PROJECTO, UMA OBRA...

A edição deste número coincide com o final de mais um ano lectivo e outrossim com o epílogo da nova estrutura física do Instituto Politécnico da Guarda.

Símbolo da modernidade e do progresso, este Instituto é, já no presente, uma resposta credenciada às exigências das próximas décadas e uma via de futuro para os cerca de três milhares de jovens que o irão frequentar a partir de Outubro.

Será, então, ampliado neste estabelecimento de ensino superior o leque de cursos que são indispensáveis à actual e futura conjuntura de desenvolvimento regional, empresarial e industrial, cujo percurso tem de ser pautado pela necessidade de se marcar uma presença digna, activa e de qualidade no cenário europeu.

"Nómadas do mundo, teremos de ser agora sedentários conviventes nesta Europa onde sempre coubemos mal e nunca nos soubemos realizar", como escreveu Miguel Torga.

E esta presença tem sido bem afirmada pelo Politécnico da Guarda, através das suas múltiplas relações com estabelecimentos de ensino congéneres.

Cumpriu-se um projecto. O Instituto Politécnico é uma realidade resultante de um trabalho planificado, de uma ideia assumida, da resposta consciente a objectivos definidos, tendo subjacente a comunidade regional. O IPG é, bem poderemos dizer, uma obra impulsionada pela "força de um sonho inteiro".

**João Raimundo**

Presidente do IPG

# **CÁLCULO DE ESCOAMENTOS TURBULENTOS COM TRANSMISSÃO DE CALOR EM GEOMETRIAS INDUSTRIAIS COMPLEXAS**

---

M. G. Carvalho\*  
R. A. Pitarma\*\*

---

## **Sumário**

O propósito deste trabalho é expor um processo de cálculo de escoamentos tridimensionais turbulentos, não isotérmicos com impulsão, em geometrias industriais complexas. Como exemplo, o processo descrito é aplicado a um caso concreto.

## **1 - INTRODUÇÃO**

O alto custo da energia desencadeado pelo rápido aumento do preço do petróleo, motivou uma brusca inversão de estratégia nas indústrias ligadas ao escoamento de fluidos e transferência de calor. Assim, o desenvolvimento de projectos condicionados pelo critério do mínimo custo inicial, deu lugar a uma nova filosofia, dirigida no sentido da conservação de energia, na qual os custos de exploração adquirem relevante importância.

No entanto, se bem que tenha melhorado significativamente a qualidade e a eficiência dos equipamentos, muito haverá ainda para aprender, sobre a optimização de escoamentos em ambientes confinados. Em geral, os projectos são calculados de um modo empírico, prevalecendo a experiência

---

\* Prof. Associada com Agregação no Instituto Superior Técnico

\*\* Assistente na E.S.T.G.

do projeccionista, bem como o sucesso já adquirido por dimensionamentos análogos, em situações similares. Esta situação conduz, frequentemente, a situações claras de sobredimensionamento, embora compreensíveis.

O conhecimento da distribuição das propriedades relevantes — velocidade e temperatura, bem como a influência nesta distribuição da modificação dos parâmetros geométricos e (ou) de funcionamento, é fundamental para o projectista elaborar um correcto dimensionamento e, deste modo, conseguir um melhor compromisso entre a economia e as exigências requeridas.

O estudo de problemas físicos por via experimental, assegura, em regra geral, os resultados mais fidedignos. No entanto, o recurso a protótipos em escala real é, frequentemente, inviável pelos elevados custos associados. A utilização alternativa de modelos reduzidos está, também, condicionada por dificuldades associadas à necessária extrapolação de resultados para o sistema real. Estas dificuldades estão, especialmente, relacionadas com ensaios não isotérmicos e são justificadas por argumentos de análise dimensional. Outras condicionantes há, ainda, a considerar nos trabalhos experimentais. As condições adversas verificadas, em certos casos, limitam a presença de operadores por períodos longos de tempo e as investigações, para além de demoradas, são dispendiosas.

Associada à rápida evolução dos computadores digitais, bem como a progressos de análise numérica, a modelação numérica constitui válida alternativa. A versatilidade dos modelos na adaptação a novas situações, aliada à rapidez e economia, constituem fortes argumentos em prol deste método. Assim, a opção pela modelação numérica constitui um novo método de investigação complementar da via experimental. É este o método de estudo exposto no presente trabalho.

## **2 - MODELAÇÃO**

O modelo matemático, base do modelo numérico para previsão do escoamento turbulento e transferência de calor em geometrias complexas, consiste num conjunto de equações diferenciais às derivadas parciais, exprimindo conservação de massa, momento e entalpia.

Na prática, de um modo geral, predominam os escoamentos em regime turbulento. A turbulência é um mecanismo aleatório, tridimensional e dependente do tempo. Devido às pequenas escalas de tempo e comprimento associadas à turbulência, mesmo a solução numérica se inviabiliza, dado o tempo de cálculo e memória requeridos pelo exorbitante número de nós que seria necessário para permitir uma descrição correcta do escoamento. Tais valores superam largamente as possibilidades dos

supercomputadores actuais.

Felizmente, para a maioria dos problemas de engenharia, é suficiente o conhecimento das consequências médias no tempo da turbulência, isto é, o conhecimento dos valores médios temporais das propriedades sobrepõe-se ao conhecimento dos detalhes da turbulência. Deste modo, resolve-se, não as equações instantâneas, mas sim a média temporal das equações. Assumindo escoamento tridimensional, estacionário e incompressível:

Equação da continuidade

$$\frac{\delta \bar{u}}{\delta x} + \frac{\delta \bar{v}}{\delta y} + \frac{\delta \bar{w}}{\delta z} = 0$$

Equações da quantidade de movimento

$$\begin{aligned} \rho \left( \bar{u} \frac{\delta \bar{u}}{\delta x} + \bar{v} \frac{\delta \bar{u}}{\delta y} + \bar{w} \frac{\delta \bar{u}}{\delta z} \right) = - \frac{\delta \bar{P}}{\delta x} + \mu \left( \frac{\delta^2 \bar{u}}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \bar{u}}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \bar{u}}{\delta z^2} \right) - \\ - \rho \left[ \frac{\delta \overline{u'^2}}{\delta x} + \frac{\delta}{\delta y} (\overline{u'v'}) + \frac{\delta}{\delta z} (\overline{u'w'}) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho \left( \bar{u} \frac{\delta \bar{v}}{\delta x} + \bar{v} \frac{\delta \bar{v}}{\delta y} + \bar{w} \frac{\delta \bar{v}}{\delta z} \right) = - \frac{\delta \bar{P}}{\delta y} + \mu \left( \frac{\delta^2 \bar{v}}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \bar{v}}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \bar{v}}{\delta z^2} \right) - \\ - \rho \left[ \frac{\delta}{\delta x} (\overline{u'v'}) + \frac{\delta \overline{v'^2}}{\delta y} + \frac{\delta}{\delta z} (\overline{v'w'}) \right] + \beta \rho_0 g (T - T_0) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho \left( \bar{u} \frac{\delta \bar{w}}{\delta x} + \bar{v} \frac{\delta \bar{w}}{\delta y} + \bar{w} \frac{\delta \bar{w}}{\delta z} \right) = - \frac{\delta \bar{P}}{\delta z} + \mu \left( \frac{\delta^2 \bar{w}}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 \bar{w}}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 \bar{w}}{\delta z^2} \right) - \\ - \rho \left[ \frac{\delta}{\delta x} (\overline{u'w'}) + \frac{\delta}{\delta y} (\overline{v'w'}) + \frac{\delta \overline{w'^2}}{\delta z} \right] \end{aligned}$$

## Equação da energia

$$\bar{u} \frac{\delta T}{\delta x} + \bar{v} \frac{\delta T}{\delta y} + \bar{w} \frac{\delta T}{\delta z} = \frac{\lambda}{\rho c} \left( \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right) +$$

$$+ \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\delta}{\delta x} (-\rho \overline{u'T'}) + \frac{\delta}{\delta y} (-\rho \overline{v'T'}) + \frac{\delta}{\delta z} (-\rho \overline{w'T'}) \right]$$

onde u, v e w são as velocidades, segundo as três direções do espaço, de acordo com a seguinte notação: (·) representa os valores médios temporais e (') as flutuações.

A transformação das equações gerais em equações em função dos valores médios temporais, para se adaptarem ao tratamento matemático de escoamentos turbulentos, introduz correlações estatísticas cujos valores se desconhecem, constituindo, portanto, novas incógnitas. A determinação destas incógnitas adicionais, envolvendo produtos de flutuações de velocidade (equações de conservação de momento) e produtos de uma flutuação de velocidade pela flutuação da temperatura (equação da energia), constituem dificuldade a contornar.

Para a ultrapassar duas vias se afiguram. Uma, consiste em tentar determinar estas incógnitas com a resolução de mais equações diferenciais (equações de transporte para essas correlações). No entanto, apenas vem introduzir mais correlações, agora de ordem cada vez superior, não permitindo fechar o sistema (2). Deste modo, parece ser indicado que, para se conseguir o fecho, é necessário com base em informação semi-empírica, exprimir correlações de maior ordem em função de correlações de ordem inferior. De facto, a outra via consiste em exprimir directamente essas correlações, em função de grandezas conhecidas. Este processo é conhecido como "modelação da turbulência". Vários modelos de turbulência têm sido apresentados na literatura (3). Contudo, para aplicações de engenharia, como a apresentada neste trabalho, o modelo a duas equações K-ε tem sido largamente empregue com sucesso reconhecido.

O modelo físico-matemático é, assim, constituído por um conjunto de sete equações diferenciais às derivadas parciais: equação da continuidade, equação de Navier-Stokes (para as três componentes de velocidade), equação de transporte de entalpia, equação de transporte de energia cinética turbulenta e equação de transporte da taxa de dissipação de energia cinética turbulenta.

As equações referentes ao modelo físico e matemático para

a descrição do escoamento com transmissão de calor, não são resolúveis por via analítica. A solução, conseguida numericamente, passa pela discretização das equações diferenciais a resolver, por meio de diferenças finitas/volume de controlo. Deste modo, as equações são integradas em cada volume de controlo em que o domínio de cálculo foi subdividido originando, cada uma, um sistema de equações algébricas expressas em termos do valor da variável dependente nos nós da malha, que cobre todo o domínio. Assim, a equação discretizada para uma variável genérica  $\theta$ , traduz a conservação dessa variável em cada volume de controlo finito, tal como a equação diferencial o traduz para um volume de controlo infinitesimal.

O sistema de equações algébricas às diferenças finitas resultante, é resolvido por um processo iterativo, que combina o método directo TDMA (Tri Diagonal Matrix Algorithm) com o método de Gauss-Seidel. Uma descrição detalhada deste método é apresentada em (4).

### 3 - APLICAÇÃO PRÁTICA

O modelo foi aplicado a uma câmara frigorífica de convecção forçada, instalada numa viatura. Trata-se de uma auto-câmara para transporte de lacticínios (iogurtes), pertencente à empresa Gelgurte (Guarda).

#### 3.1 - A Câmara Frigorífica

As principais características da câmara são as seguintes:

##### a) Geometria

Dimensões e volume da câmara frigorífica (fig.1)

Comprimento	Largura	Altura
3400 mm	1840 mm	1540 mm
Volume	9.63 m <sup>3</sup>	

##### b) Esquema e Parâmetros de Funcionamento

A insuflação faz-se tangencialmente ao tecto, segundo a direcção de maior comprimento, e o retorno realiza-se verticalmente pela base da caixa do ventilo-convector (fig. 1). A circulação do ar processa-se em circuito fechado. O ar entra verticalmente na caixa do ventilo-convector aspirado pelo ventilador e sai, novamente, após a passagem num permutador que constitui o evaporador do circuito frigorífico.



## Parâmetros de Funcionamento

Velocidade de insuflação		1.9 m/s
Temperatura de insuflação		5.0 °C
Caudal insuflado	mássico	0.436 (kg/s)
	volúmico	1302.3 (m <sup>3</sup> /h)

### *c) Condição de Funcionamento*

As câmaras do tipo da analisada são utilizadas para transporte frigorífico de produtos frescos, em geral, armazenados em caixas (melhor manejo) de dimensão variável, agrupando embalagens ou quantidades unitárias. A disposição usual da carga no interior da câmara é, na prática, caracterizada pela deslocação de caixas no solo, de modo a cobrir o fundo em filas ligeiramente separadas. Deste modo, para efeitos de modelação, assume-se uma hipótese simplificada, na qual a fonte de calor (representando a carga armazenada), é a superfície constitutiva do solo da câmara, como a figura 2 sugere. Matematicamente, esta situação foi traduzida por uma condição de fronteira do tipo temperatura de parede imposta,  $T_w = 17^\circ \text{C}$ , para aquela superfície (solo da câmara).

### 3.2 - Pormenores Computacionais

A malha seleccionada para o caso em estudo, é uma malha cartesiana de 15x13x21 em x, y e z, respectivamente, num total de 4095 nós, sendo mais refinada nas zonas tidas como críticas, nomeadamente junto às aberturas de insuflação e retorno. O código de cálculo foi executado num IBM RT-PC, do Instituto Politécnico da Guarda, sendo a solução convergida obtida ao fim de 18h 40min. de CPU (calculada a partir de aproximações iniciais nulas).

### 3.3 - Resultados

Os resultados obtidos podem ser visualizados nas figuras 3 e 4. As variáveis apresentadas, representativas dos campos de velocidades (diagramas de vectores) e temperaturas (isotérmicas), são desenhadas usando interpolações entre valores nos nós calculados pelo código de cálculo. A orientação dos planos está em conformidade com o sistema de eixos utilizado (figura 1), representando cortes transversais da câmara segundo estas três direcções em diferentes coordenadas, genericamente identificadas por I=c.te, J=c.te ou K=c.te. As previsões obtidas permitem conhecer os pormenores do escoamento, nomeadamente as zonas de recirculação, bem como particularidades da distribuição de temperaturas no interior da

câmara.

Saliente-se, por fim, a fácil adaptação do modelo a novas situações de funcionamento, tais como outros caudais de insuflação, diferentes cargas térmicas e variação das geometrias envolvidas (câmara, disposição da carga, localização do ventilador-convector e aberturas de insuflação e retorno).

#### Bibliografia:

- (1)- FERREIRA, R. A. Pitarma- *Modelação dos Fenómenos de Transmissão de Calor e Massa em Câmaras Frigoríficas de Convecção Forçada*, I.S.T., Lisboa, 1992 (p/ discussão).
- (2)- LAUNDER, B. E.; Morse, A. P.; Rodi, W; Spalding, D. B. *The Prediction of Free Shear Flows - A Comparison of the Performance of Six Turbulence Models*, Proc. NASA Conf. on Free Shear Flows, Langley, 1972.
- (3)- LUMLEY, J. L., *Turbulence Modeling*, Journal of Applied Mechanics, Vol. 50, December, 1983.
- (4)- PATANKAR, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- (5)- LAUNDER, B. E.; Spalding, D. B. *The Numerical Computations of Turbulent Flows*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3, 1974.

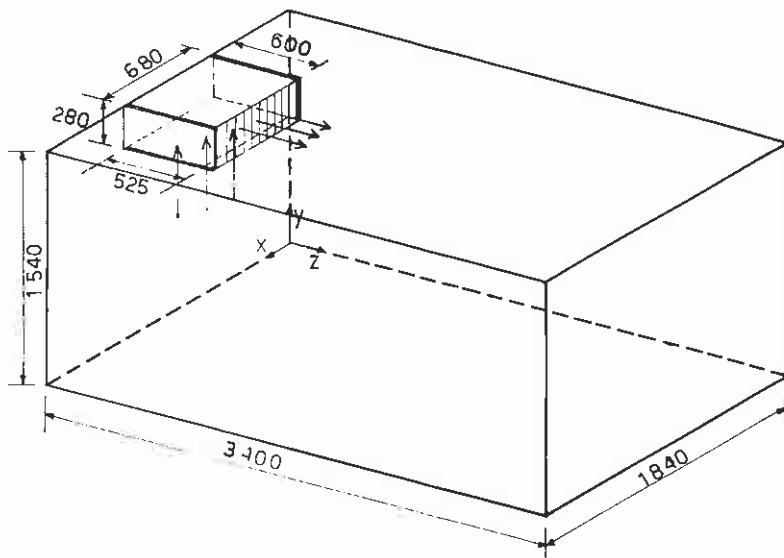


Figura 1 - Câmara Frigorífica em perspectiva e sistema de eixos utilizado

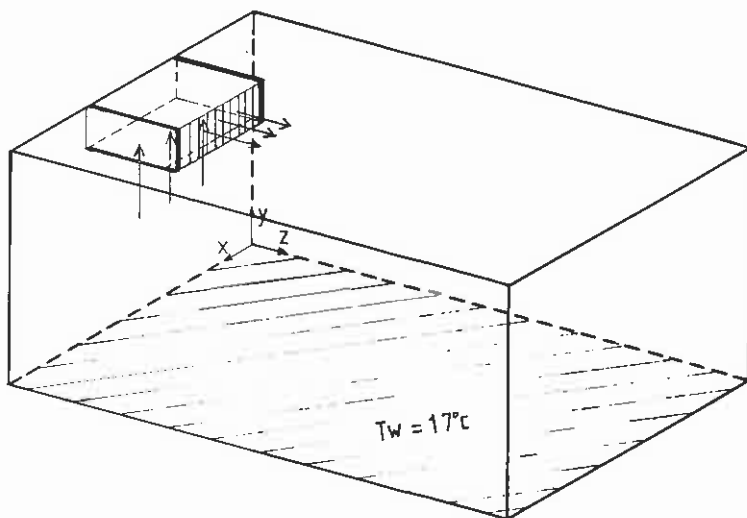


Figura 2 - Situação de funcionamento correspondente à aplicação prática do modelo

PLANO DE ISOTERMICAS I=cte.

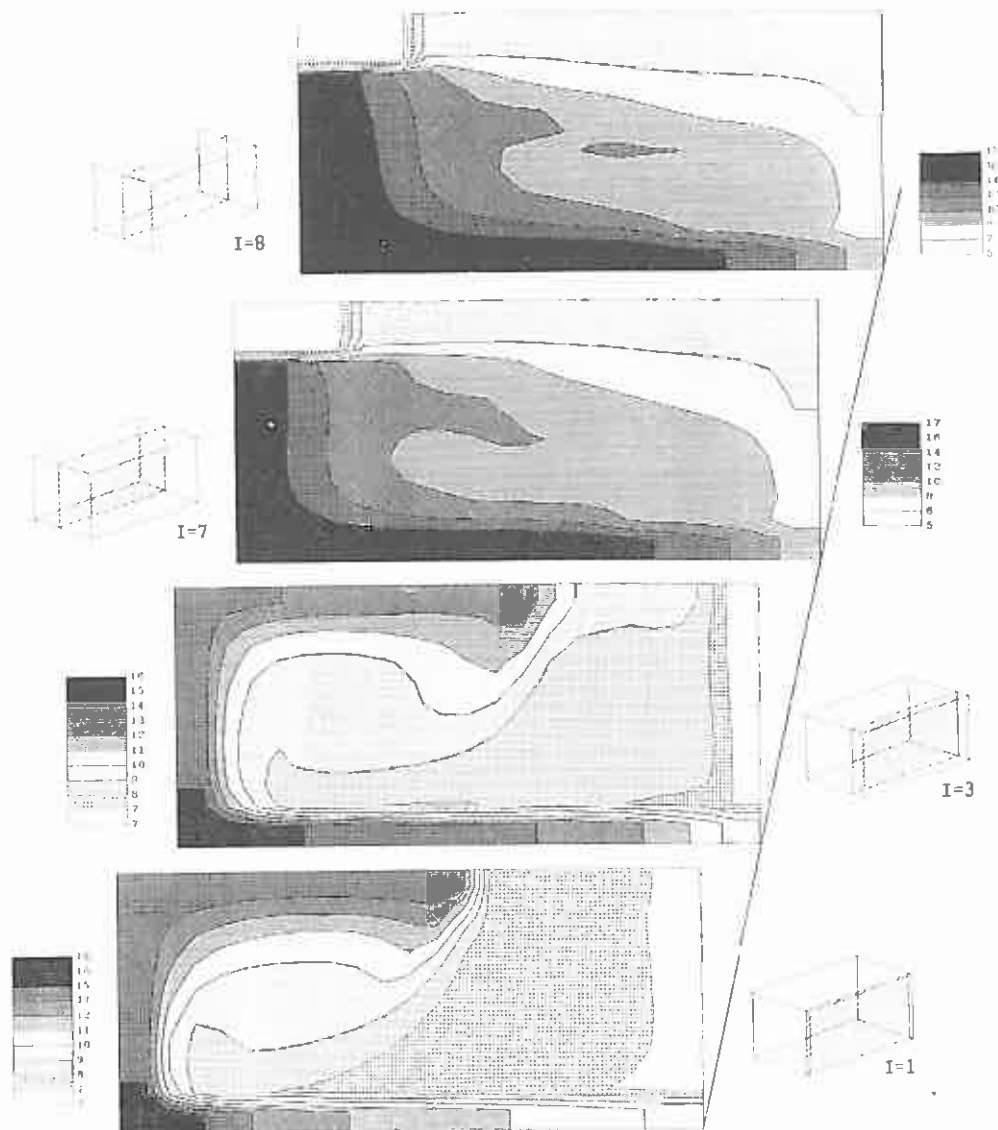


Figura 4.1

PLANO DE ISOTERMICAS  
 $J = \text{cte.}$

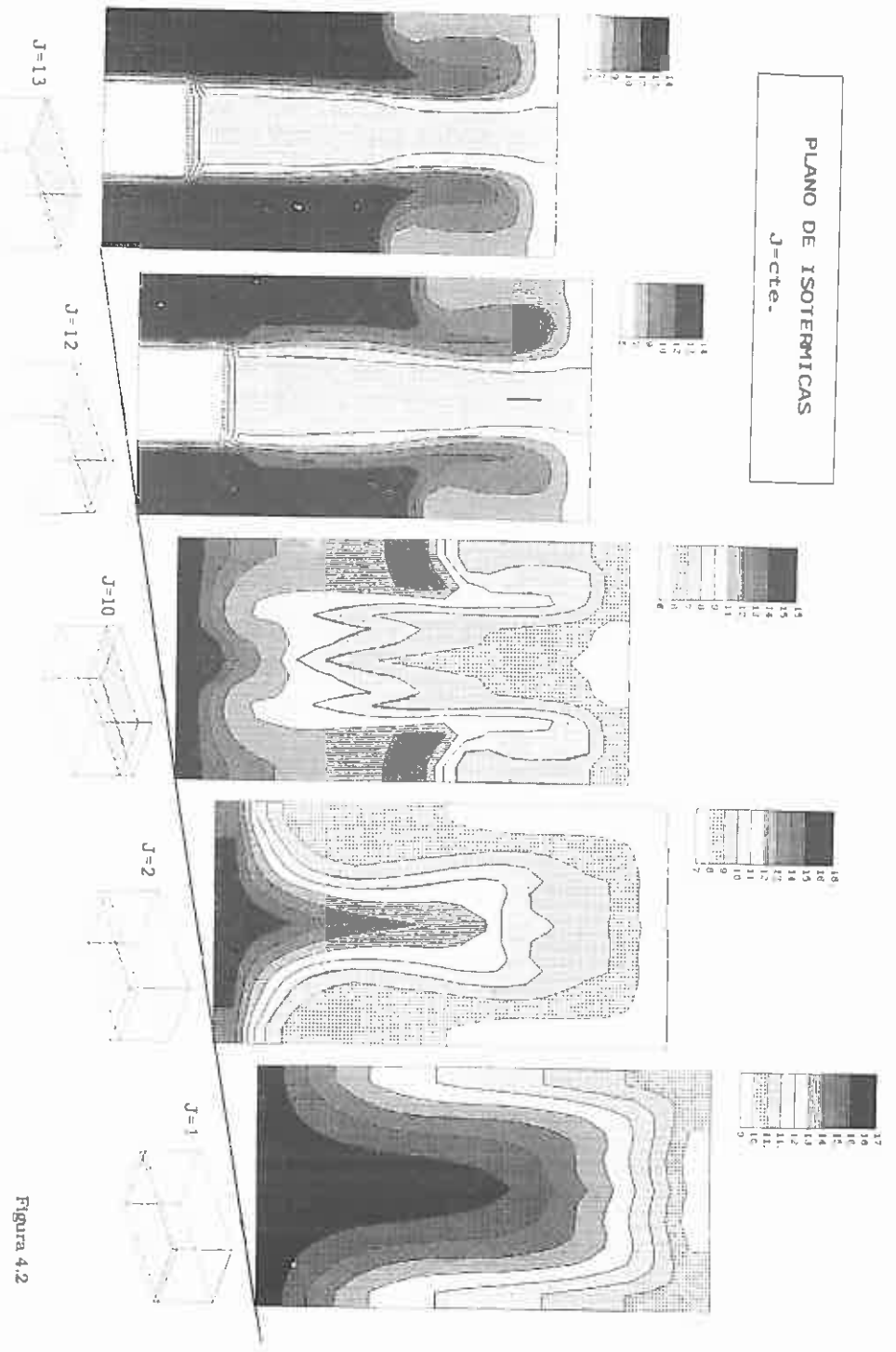


Figura 4.2

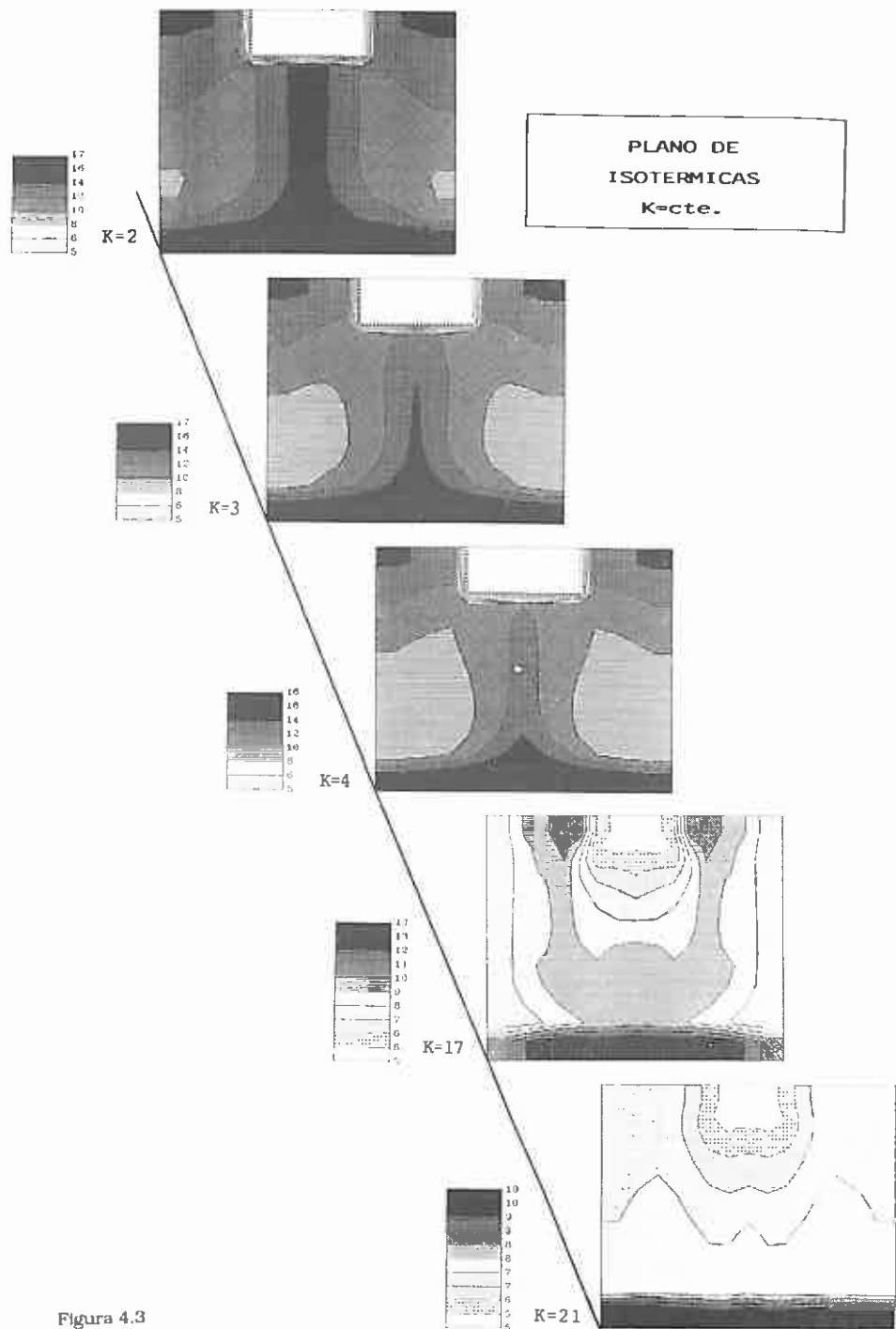


Figura 4.3

PLANO DE VELOCIDADES (V+W)

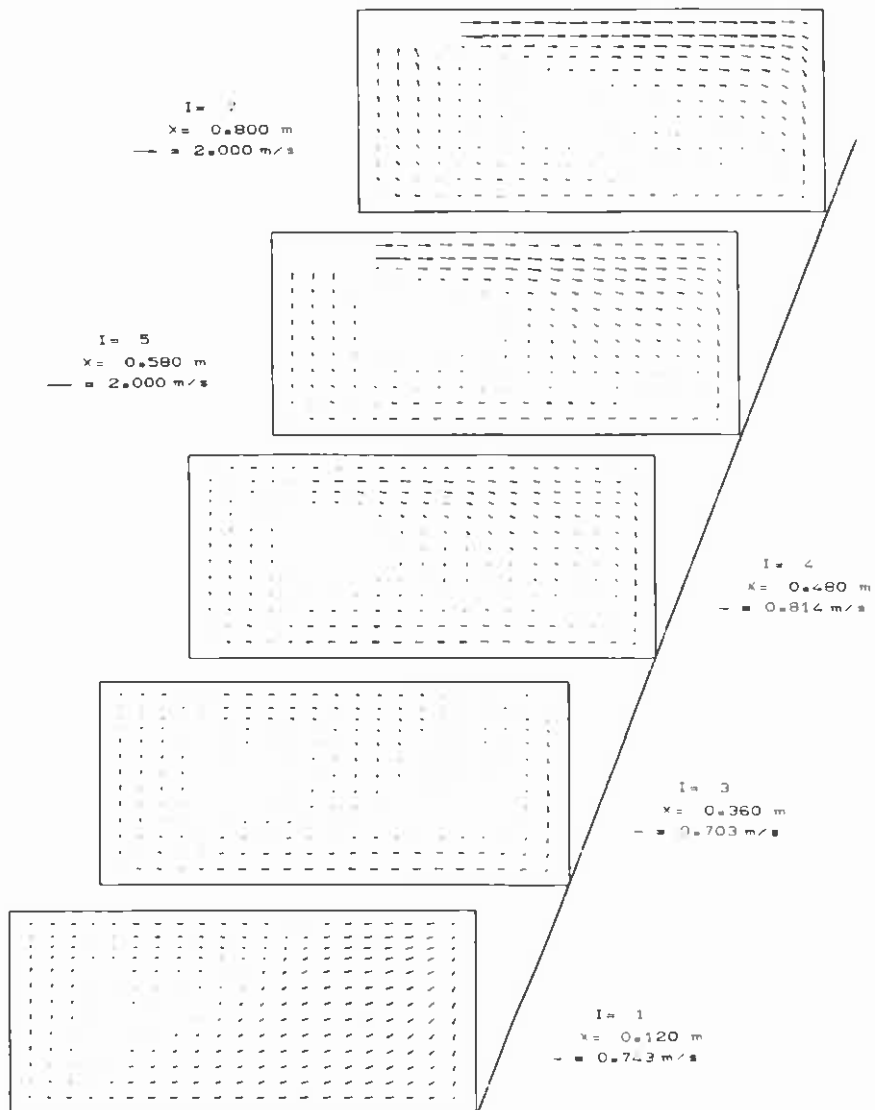


Figura 3.1

PLANO DE VELOCIDADES (U+H)

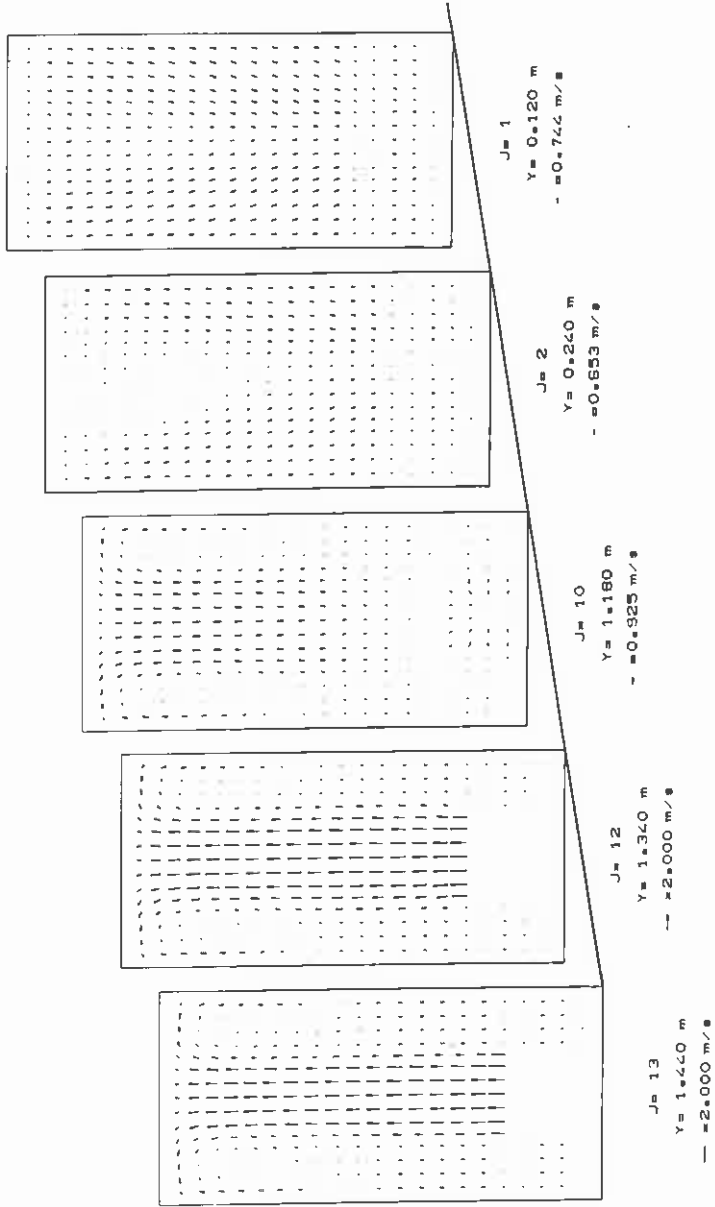


Figura 3.2



PLANO DE VELOCIDADES (U+V)

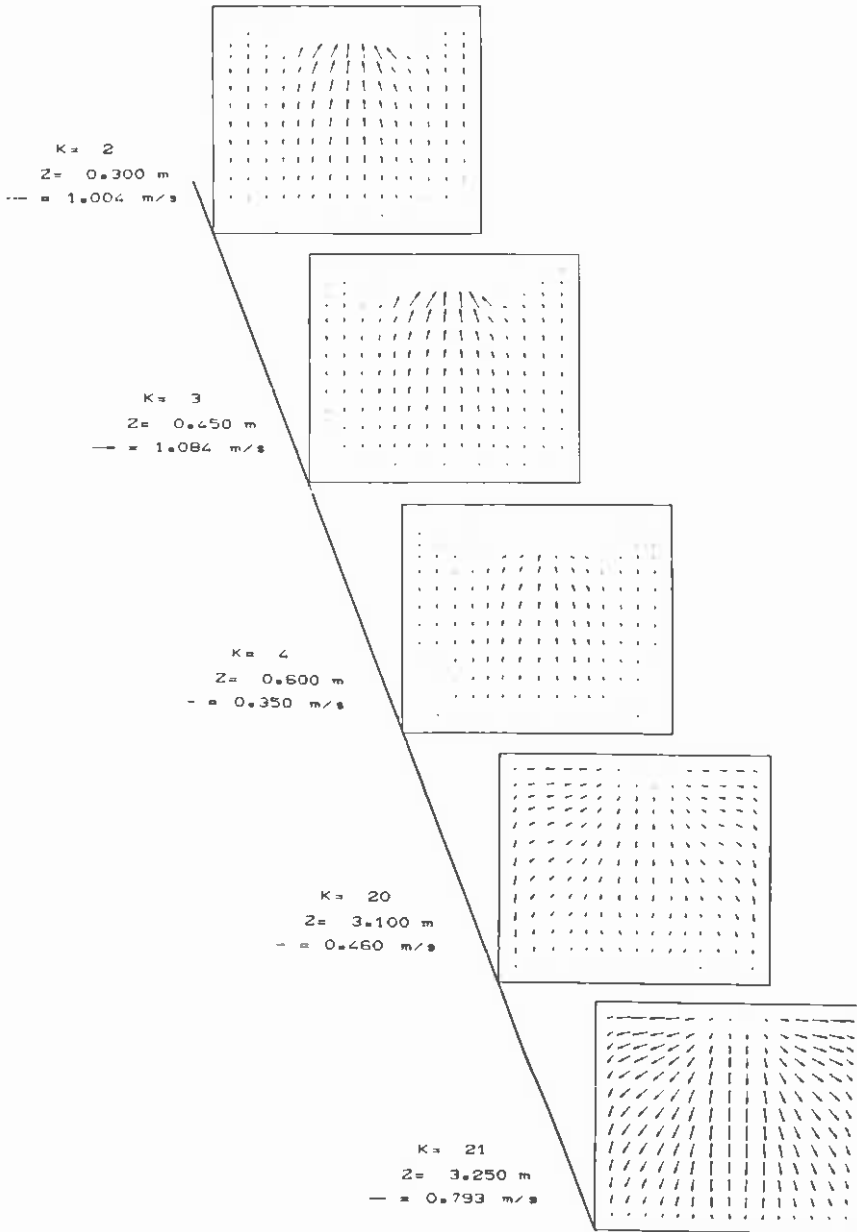


Figura 3.3