

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos implícitos

Problema de

Dirichlet

# Resolución numérica de ecuaciones diferenciales - problemas de valores en la frontera

José Luis Bravo



# Índice

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos implícitos

Problema de

Dirichlet

## 1 Ecuaciones de segundo orden

- Introducción
- Métodos de tiro
- Método de las diferencias finitas

## 2 Ecuaciones en derivadas parciales

- Ecuaciones parabólicas. Métodos explícitos
- Ecuaciones parabólicas. Métodos implícitos
- Problema de Dirichlet

# Problema de valores en la frontera

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

Dados,  $t_0 < t_1 \in \mathbb{R}$ ,  $f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ , en  $\mathcal{C}^1([t_0, t_1] \times \mathbb{R}^2)$ , y  $c_1, c_2 \in \mathbb{R}$ , consideremos el problema de encontrar una función  $u(t)$ , de clase 2 en  $[t_0, t_1]$  tal que

$$u''(t) = f(t, u(t), u'(t)) \quad \text{si } t_0 < t < t_1,$$

$$u(t_0) = c_0, \quad u(t_1) = c_1.$$

Nótese que sin pérdida de generalidad (mediante cambios de coordenadas lineales), podemos considerar  $t_0 = 0$ ,  $t_1 = 1$  y  $c_1 = c_2 = 0$ .

En general el problema anterior puede no tener solución o no tener una única solución.

# Métodos de tiro

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.  
Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.  
Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

Consideremos el problema de valor inicial

$$u''(t) = f(t, u(t), u'(t)) \quad \text{si } 0 < t < 1,$$

$$u(0) = 0, u'(0) = x.$$

Por el Teorema de Existencia y Unicidad, el problema anterior tiene solución única para cada valor de  $x \in \mathbb{R}$ . Sea  $u(t, x)$  dicha solución y denotemos

$$\phi(x) := u(1, x).$$

Entonces el problema de valores frontera es equivalente a encontrar un cero de la función  $\phi$ .

# Métodos de tiro

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.  
Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.  
Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

## Ejemplo

Aplicando el método de la secante, encontrar la solución del problema de valores frontera

$$-u''(t) + u(t) = t \quad \text{si } 0 < t < 1,$$

$$u(0) = 0, u(1) = 0.$$

# Diferenciabilidad respecto de las condiciones iniciales

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.  
Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.  
Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

Consideremos el sistema autónomo

$$x' = f(x)$$

y sea  $\varphi : D \rightarrow \mathbb{R}^n$  el flujo asociado.

**Teorema (Dif. resp. de las condiciones iniciales)**

Supongamos que  $f \in \mathcal{C}^1$ . Entonces el flujo  $\varphi$  es de clase 1.

La derivada parcial  $\varphi_x(t, x)$  es, para cada  $(t, x) \in D$ , la solución matricial  $Z$  de (la primera ecuación variacional)

$$Z' = Df(\varphi(t, x))Z, \quad Z(0) = I.$$

# Diferencias finitas

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.  
Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.  
Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

Para  $N \in \mathbb{N}$  definimos

$$h = \frac{1}{N+1}, \quad t_j = jh, \quad j = 0, \dots, N+1.$$

lo que nos da una partición del intervalo  $[0, 1]$  en  $N+1$  trozos,  
siendo  $t_0 = 0$  y  $t_{N+1} = 1$ .

En el método de las **diferencias finitas**, aproximaremos el  
valor de  $u$  en los puntos  $t_0, t_1, \dots, t_{N+1}$ .

Para ello, sustituiremos  $u''$  por una aproximación numérica en  
términos de los valores de  $u$  y pediremos que los valores  
aproximados  $u_0, \dots, u_{N+1}$  verifiquen el sistema de ecuaciones  
correspondiente.

# Diferencias finitas

## Aproximación numérica de las derivadas

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.  
Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.  
Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

### Proposición

Supongamos que  $u \in \mathcal{C}^3([0, 1])$ . Entonces, existe  $\xi \in (0, 1)$  tal que

$$u'(t) = \frac{u(t+h) - u(t-h)}{2h} - h^2 \frac{u'''(\xi)}{6}$$

### Proposición

Supongamos que  $u \in \mathcal{C}^4([0, 1])$ . Entonces, existe  $\tau \in (0, 1)$  tal que

$$u''(x) = \frac{u(x-h) - 2u(x) + u(x+h)}{h^2} - h^2 \frac{u^{(4)}(\tau)}{12}.$$

# Diferencias finitas

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

Aproximaremos la solución de  $u'' = f(t, u, u')$ ,  $u(t_j)$ ,  
 $j = 1, \dots, N$ , por  $u_j$ ,  $j = 1, \dots, N$ , tales que

$$\frac{u_{j-1} - 2u_j + u_{j+1}}{h^2} = f\left(t_j, u_j, \frac{u_{j+1} - u_{j-1}}{2h}\right), \quad j = 1, \dots, N,$$

$$u_0 = u_{N+1} = 0.$$

Este problema se denomina **problema aproximado** o  
**problema discreto** y al problema original, **problema continuo**.

# Problema de valores en la frontera

## Ecuación de prueba

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

Dada una función  $f$  continua en el intervalo  $[0, 1]$ , consideraremos el problema de valores en la frontera

$$-u''(t) = f(t) \quad \text{si } 0 < t < 1,$$

$$u(0) = u(1) = 0,$$

El problema anterior tiene solución única,

$$u(t) = \int_0^1 G(t, s)f(s) ds,$$

donde  $G(t, s)$  es la (una) función de Green

$$G(t, s) = \begin{cases} s(1-t) & \text{si } 0 \leq s \leq t \leq 1, \\ t(1-s) & \text{si } 0 \leq t < s \leq 1, \end{cases}$$

# Diferencias finitas

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

En el caso anterior, tenemos que el método de las diferencias finitas es

$$\frac{-u_{j-1} + 2u_j - u_{j+1}}{h^2} = f(t_j), \quad j = 1, \dots, N,$$

$$u_0 = u_{N+1} = 0,$$

# Diferencias finitas

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

Si  $U$  es el vector de coordenadas  $u_1, \dots, u_N$ ,  $F$  el vector de coordenadas  $f(t_1), \dots, f(t_N)$  y

$$A = \frac{1}{h^2} \begin{pmatrix} 2 & -1 & & & \\ -1 & 2 & -1 & & \\ & -1 & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & \ddots & -1 \\ & & & -1 & 2 \end{pmatrix}$$

entonces el problema discreto es equivalente a encontrar un vector  $U$  tal que

$$AU = F. \tag{1}$$

# Diferencias finitas

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

## Lema

*Si  $\alpha_1 \geq 2, \dots, \alpha_n \geq 2$ , entonces la matriz*

$$B = \begin{pmatrix} \alpha_1 & -1 & & & \\ -1 & \alpha_2 & -1 & & \\ & -1 & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & \ddots & -1 \\ & & & -1 & \alpha_n \end{pmatrix}$$

*es definida positiva.*

Como consecuencia,  $A$  es invertible y el método está bien definido.

# Convergencia

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

## Lemma

Sea  $U = (u_1, \dots, u_N)$  solución de  $AU = F$ . Entonces

$$u_j = h \sum_{k=1}^N G(t_j, t_k) f(t_k).$$

## Teorema

Si la solución  $u(t)$  del problema continuo es de clase 4, entonces existe una constante  $C \geq 0$ , independiente de  $N$  tal que

$$\max_{1 \leq j \leq N} |u(t_j) - u_j| \leq Ch^2.$$

# Diferencias finitas

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.  
Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

Vamos a utilizar una idea similar para aproximar las soluciones de una ecuación diferencial de tipo parabólico.

Partimos de la ecuación del calor en una barra de longitud uno,

$$\begin{cases} u_{xx}(t, x) = u_t(t, x), & (t \geq 0, \quad 0 \leq x \leq 1) \\ u(0, x) = g(x), & (0 \leq x \leq 1) \\ u(t, 0) = a(t), & (t \geq 0) \\ u(t, 1) = b(t), & (t \geq 0) \end{cases}$$

donde  $u(t, x)$  es la temperatura del punto  $x$  en el instante  $t$ ,  $g(x)$  describe la temperatura inicial de cada punto y  $a, b$  son las temperaturas de los extremos.

# Problema discreto

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.  
Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.  
Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

Comenzamos discretizando el dominio de  $u$ . Para ello, fijamos  $n \in \mathbb{N}$ ,  $k > 0$ , definimos  $h = 1/(n + 1)$  y tomamos

$$t_j = jk, \quad j = 0, 1, \dots,$$

$$x_i = ih, \quad i = 0, 1, \dots, n.$$

A continuación, elegimos aproximaciones de las derivadas en los puntos de la malla. En este caso, tomamos

$$u_t(t, x) \approx \frac{u(t + k, x) - u(t, x)}{k},$$

$$u_{xx}(t, x) \approx \frac{u(t, x + h) - 2u(t, x) + u(t, x - h)}{h^2}.$$

# Problema discreto

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción  
Métodos de tiro  
Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.  
Métodos explícitos  
Ecuaciones  
parabólicas.  
Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

Planteamos ahora una aproximación discreta del problema original. Para ello, denotamos  $u_{j,i}$  a la aproximación de  $u(t_j, x_i)$ . Entonces

$$u_{0,i} = f(x_i), \quad 0 \leq i \leq n + 1,$$

$$u_{j,0} = a(t_j), \quad u_{j,n} = b(t_j), \quad j = 0, 1, \dots$$

y en el resto de puntos, imponemos que se verifique

$$\frac{u_{j,i+1} - 2u_{j,i} + u_{j,i-1}}{h^2} = \frac{u_{j+1,i} - u_{j,i}}{k}, \quad 1 \leq i \leq n, \quad j \geq 1.$$

# Problema discreto

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

Despejando  $u_{j+1,i}$  de la última ecuación, obtenemos

$$u_{j+1,i} = su_{j,i+1} + (1 - 2s)u_{j,i} + su_{j,i-1}, \quad 1 \leq i \leq n, \quad j \geq 1,$$

donde  $s = k/h^2$ .

Es decir, conocidos  $u_{j,i}$ ,  $0 \leq i \leq n$ , podemos utilizar la ecuación anterior para obtener  $u_{j+1,i}$ ,  $1 \leq i \leq n - 1$ . Por esto se denomina **método explícito**.

# Estabilidad

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.  
Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

El proceso anterior puede verse como un sistema dinámico discreto. Si las condiciones frontera son cero, partiendo de los valores en  $t = 0$ , en cada paso multiplicamos por la matriz tridiagonal  $B$ ,

$$B = \begin{pmatrix} 1 - 2s & s & & & \\ s & 1 - 2s & s & & \\ & s & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & \ddots & s \\ & & & s & 1 - 2s \end{pmatrix}$$

Como en estas condiciones, la solución de la EDP tiende a cero, para que el método converja a la misma solución, la sucesión  $B^k u$  debe converger a cero. Es decir, el radiopectral de  $B$  debe ser menor que 1.

# Estabilidad

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción  
Métodos de tiro  
Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.  
Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.  
Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

## Lema

*Los autovalores de la matriz  $B$  son*

$$1 - 2s(1 - \cos \theta_j), \quad \theta_j = \frac{j\pi}{n+1}, \quad (1 \leq j \leq n).$$

*(con autovectores asociados  $(\sin(\theta_j), \sin(2\theta_j), \dots, \sin(n\theta_j))$ ).*

Como consecuencia, para que el método sea estable es condición suficiente que  $s \leq 1/2$ , es decir,  $2k \leq h^2$ .

# Ecuación del calor

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos implícitos

Problema de

Dirichlet

Recordemos que queremos aproximar las soluciones de una ecuación diferencial de tipo parabólico.

Partimos de la ecuación del calor en una barra de longitud uno,

$$\begin{cases} u_{xx}(t, x) = u_t(t, x), & (t \geq 0, \quad 0 \leq x \leq 1) \\ u(0, x) = g(x), & (0 \leq x \leq 1) \\ u(t, 0) = a(t), & (t \geq 0) \\ u(t, 1) = b(t), & (t \geq 0) \end{cases}$$

donde  $u(t, x)$  es la temperatura del punto  $x$  en el instante  $t$ ,  $g(x)$  describe la temperatura inicial de cada punto y  $a, b$  son las temperaturas de los extremos.

# Problema discreto

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

Consideremos ahora una aproximación discreta de la forma

$$\frac{u_{j,i+1} - 2u_{j,i} + u_{j,i-1}}{h^2} = \frac{u_{j,i} - u_{j-1,i}}{k}, \quad 1 \leq i \leq n, \quad j \geq 1,$$

y en el resto de los puntos, los valores dados por las condiciones en la frontera,

$$u_{0,i} = f(x_i), \quad 0 \leq i \leq n,$$

$$u_{j,0} = a(t_j), \quad u_{j,n+1} = b(t_j), \quad j = 0, 1, \dots$$

# Problema discreto

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

Conocidos los valores de la aproximación en el nivel  $j - 1$  de la malla, tenemos que los valores en el nivel  $j$  vienen dados por las soluciones al sistema lineal

$$-su_{j,i+1} + (1 + 2s)u_{j,i} - su_{j,i-1} = u_{j-1,i}, \quad 1 \leq i \leq n,$$

donde  $s = k/h^2$ .

Es decir, los valores de  $u_{j,i}$  se obtienen resolviendo el sistema anterior. Por esto se denomina **método implícito**.

# Estabilidad

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

Si las condiciones frontera son  $a(t) = b(t) = 0$ , definimos la matriz

$$A = \begin{pmatrix} 1 + 2s & -s & & & \\ -s & 1 + 2s & -s & & \\ & -s & \ddots & \ddots & \\ & & \ddots & \ddots & -s \\ & & & -s & 1 + 2s \end{pmatrix}$$

y  $v_j$  denota el vector  $(u_{1j}, \dots, u_{nj})$ , entonces se verifica

$$Av_j = v_{j-1}.$$

# Estabilidad

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción  
Métodos de tiro  
Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.  
Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.  
Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

Tenemos que

$$v_j = A^{-1}v_{j-1}.$$

El sistema será estable si  $v_j \rightarrow 0$ , es decir,

$$v_j = A^{-1}v_{j-1} = \dots = A^{-j}v_0 \rightarrow 0,$$

o, equivalentemente,  $\rho(A^{-1}) < 1$ .

# Estabilidad

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

## Lema

*Los autovalores de la matriz A son*

$$1 + 2s(1 - \cos \theta_j), \quad \theta_j = \frac{j\pi}{n+1}, \quad (1 \leq j \leq n).$$

Como consecuencia, los autovalores de  $A^{-1}$  están entre 0 y 1 y el método implícito siempre es convergente.

# Orden del método explícito

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.  
Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.  
Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

Consideremos  $u_{i,j}$  las aproximaciones al problema de valores en la frontera de la ecuación del calor definidas por

$$u_{0,i} = f(x_i), \quad u_{j,0} = a(t_j), \quad u_{j,n} = b(t_j), \\ u_{j,i} = su_{j-1,i+1} + (1 - 2s)u_{j-1,i} + su_{j-1,i-1},$$

con  $s = k/h^2 < 1/2$ .

## Proposición

Sea  $u(t, x)$  la solución del problema de valores en la frontera para  $t \in [0, T]$ . Se verifica que

$$u(t_j, x_i) = u_{j,i} + \mathcal{O}(h^2), \quad t_j \in [0, T], \quad x_i \in [0, 1].$$

# Método de Crank-Nicolson

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

Combinando los dos métodos anteriores, podemos definir las aproximaciones mediante las ecuaciones

$$-su_{j,i-1} + (2+2s)u_{j,i} - su_{j,i+1} = su_{j-1,i-1} + (2-2s)u_{j-1,i} + su_{j-1,i+1}$$

con las mismas condiciones en los puntos frontera.

Nótese que podemos obtener los valores en el nivel  $j$  a partir de los valores en el nivel  $j-1$  resolviendo un sistema lineal.

Se demuestra que el método de Crank-Nicolson es estable y el orden del error es

$$u(t_j, x_i) = u_{j,i} + \mathcal{O}(k^2, h^2).$$

# Problema de Dirichlet

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

Consideraremos la ecuación de Laplace en un cuadrado,

$$\begin{cases} \nabla^2 u = 0 \\ u(x, 0) = a(x), \quad u(x, 1) = b(x), \\ u(0, y) = c(y), \quad u(1, y) = d(y). \end{cases}$$

Consideraremos la discretización definida por  $h = 1/(n + 1)$ ,

$$(x_i, y_j) = (ih, jh), \quad 0 \leq i, j \leq n + 1.$$

Y la aproximación

$$f''(x) = \frac{f(x + h) - 2f(x) + f(x - h)}{h^2} + \mathcal{O}(h^2).$$

# Diferencias finitas

Problemas de  
valores en la  
frontera

José Luis  
Bravo

Ecuaciones de  
segundo  
orden

Introducción

Métodos de tiro

Método de las  
diferencias finitas

Ecuaciones en  
derivadas  
parciales

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos explícitos

Ecuaciones  
parabólicas.

Métodos implícitos

Problema de  
Dirichlet

Con la discretización anterior, definimos las aproximaciones a la solución del problema de Dirichlet mediante diferencias finitas,  $u_{i,j} \approx u(t_i, t_j)$ , donde  $u_{i,j}$  está determinado por

$$4u_{i,j} - u_{i-1,j} - u_{i,j-1} - u_{i+1,j} - u_{i,j+1} = 0, \quad 1 \leq i, j \leq n,$$

$$u_{i,0} = a(x_i), \quad u_{i,n+1} = b(x_i), \quad u_{0,j} = c(y_i), \quad u_{n+1,j} = d(y_i).$$