

Resolución numérica de ecuaciones diferenciales. Historia y algunos problemas actuales

Ricardo G. Durán

Departamento de Matemática
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad de Buenos Aires
Argentina
UMA, Córdoba

19 de Septiembre de 2007

<http://mate.dm.uba.ar/~rduran/>

RESUMEN

- Un poco de historia.
- Cálculo variacional. El problema de la braquistocrona.
- Métodos de elementos finitos y diferencias finitas.
- Teoría moderna: estimaciones a priori y a posteriori.
- Algunos problemas y ejemplos.

Las soluciones llamadas “exactas” (o sea, dadas por expresiones explícitas) pueden obtenerse solamente en casos muy particulares.

OBJETIVOS DE LOS MÉTODOS NUMÉRICOS:

Encontrar aproximaciones a las soluciones de ecuaciones diferenciales.

Estimar el error de aproximación y en especial saber de qué depende y cómo.

OBSERVACIÓN:

EN REALIDAD,

EXACTA VS. APROXIMADA ES UNA FALSA ANTINOMIA!!

○

LO DE EXACTA ES UNA FALACIA!!

EJEMPLO:

$$y' = y \quad , \quad y(0) = 1$$

SOLUCIÓN “EXACTA”:

$$y(1) = e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$$

SOLUCIÓN APROXIMADA:

MÉTODO DE EULER:

$$y'(x) \sim \frac{y(x+h) - y(x)}{h}$$

Por lo tanto, si $x_j = jh$ con $h = \frac{1}{n}$, $j = 0, \dots, n$

$$y_j \sim y(x_j)$$

se define por

$$y_{j+1} = y_j + hy_j = (1 + h)y_j = \left(1 + \frac{1}{n}\right) y_j$$

Entonces,

$$y(1) \sim y_n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$$

o sea

$$y(1) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$$

IGUAL A LA "EXACTA" !!!!

MÉTODOS

1. ELEMENTOS FINITOS

2. DIFERENCIAS FINITAS

3. ESPECTRALES

4. VOLÚMENES FINITOS

5. COLOCACIÓN

Voy a hablar de los dos primeros

1. ELEMENTOS FINITOS:

Se basa en la formulación variacional o débil de las ecuaciones diferenciales.

2. DIFERENCIAS FINITAS:

Se basa en reemplazar derivadas por cocientes incrementales.

Los otros pueden verse como generalizaciones.

Gottfried Wilhelm von LEIBNIZ (1646-1716)

ES BIEN SABIDO QUE DESARROLLÓ EL CÁLCULO AL MISMO TIEMPO QUE NEWTON.

PERO ES MENOS CONOCIDO LO SIGUIENTE:

Extracto del abstract de

Trzesicki K., "LEIBNIZ'S IDEAS IN INFORMATICS": Filozofia Nauki (Philosophy of Science) vol: 14, number: 3(55), 21-48 , 2006.

LEIBNIZ MAY BE CONSIDERED AS THE FIRST COMPUTER SCIENTIST. HE MADE MAJOR CONTRIBUTIONS TO ENGINEERING AND INFORMATION SCIENCE. HE INVENTED THE BINARY SYSTEM, FUNDAMENTAL FOR VIRTUALLY ALL MODERN COMPUTER ARCHITECTURES. HE BUILT A DECIMAL BASED MACHINE THAT EXECUTED ALL FOUR ARITHMETICAL OPERATIONS AND OUTLINED A BINARY COMPUTER.

CÁLCULO VARIACIONAL

EL PROBLEMA DE LA BRAQUISTOCRONA

Dados dos puntos A y B a distinta altura el problema consiste en encontrar la curva que minimiza el tiempo de caída de una partícula al desplazarse de A a B bajo la acción de la gravedad. Esta curva se conoce con el nombre de braquistocrona (del griego: braquistos (el más corto), cronos (tiempo))

Este problema fue planteado por Galileo (1564-1642) en 1638, quien dió una solución errónea creyendo que estas curvas eran arcos de circunferencia.

En 1696 fue resuelto por Johann Bernoulli (1667-1748) quien antes de presentar su solución desafió a sus colegas a resolverlo.

Varios de los más célebres matemáticos del siglo XVII:

Jacob BERNOULLI (1654-1705)

NEWTON (1642-1727)

LEIBNIZ (1646-1716)

L'HOSPITAL (1661-1704)

resolvieron el problema de distintas formas.

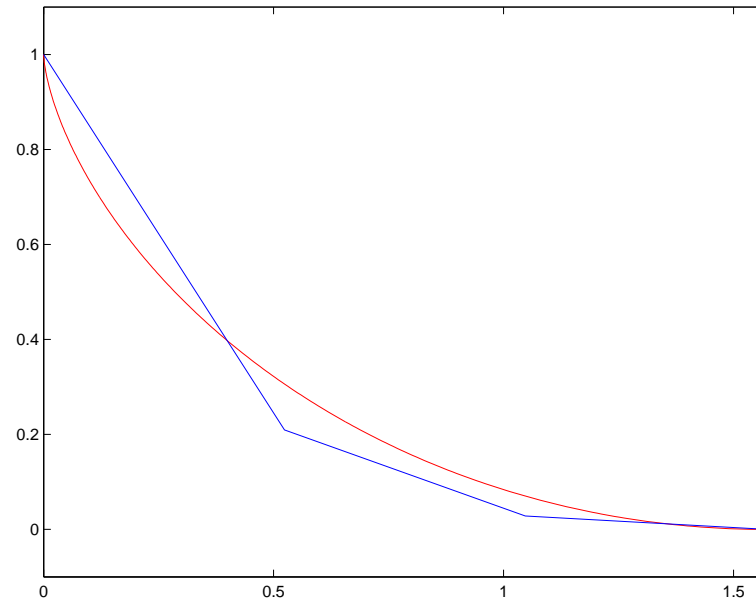
Las ideas y métodos introducidos dieron comienzo a lo que hoy conocemos como "Cálculo de Variaciones".

IDEA DE LEIBNIZ

En una carta a Johann Bernoulli, Leibniz muestra que la y buscada debe ser solución de una ecuación diferencial (lo que hoy conocemos como ecuación de Euler asociada al funcional)

La idea que usa Leibniz para encontrar esta ecuación diferencial es análoga a la que hoy se utiliza en el método de Elementos Finitos:

REEMPLAZAR LA FUNCIÓN BUSCADA POR UNA POLIGONAL



Leibniz consideró los casos de uno y de dos nodos internos y encontró la posición de estos nodos para que el tiempo de caída fuera mínimo (esto es lo que hoy llamamos “aproximación numérica”).

Luego hizo decrecer formalmente la longitud de los intervalos (o sea, aumentó la cantidad de nodos) y obtuvo la ecuación diferencial.

Observemos que la idea es la de los métodos numéricos pero con otro objetivo (encontrar la ecuación diferencial).

En general, a lo largo de la historia, los matemáticos han usado métodos de aproximación (lo que hoy llamamos “métodos numéricos”) para distintos objetivos: por ejemplo, para demostrar existencia de solución. Un caso típico es la demostración de existencia de solución de ecuaciones ordinarias mediante el Método de Euler.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

HALLAR

$$y : [0, L] \rightarrow \mathbb{R} \quad , \quad y(0) = 1 \quad , \quad y(L) = 0$$

que minimice

$$T = T(y) = \int_0^L \sqrt{\frac{1 + y'(x)^2}{2g(1 - y(x))}} dx$$

Dado N se introducen una partición

$$x_j = \frac{jL}{N}, j = 0, \dots, N$$

y el espacio de poligonales asociado,

$$\mathcal{S}_N = \left\{ y \in C^0([0, L]) : y|_{[x_j, x_{j+1}]} \in \mathcal{P}_1([x_j, x_{j+1}]) \forall j \right\}.$$

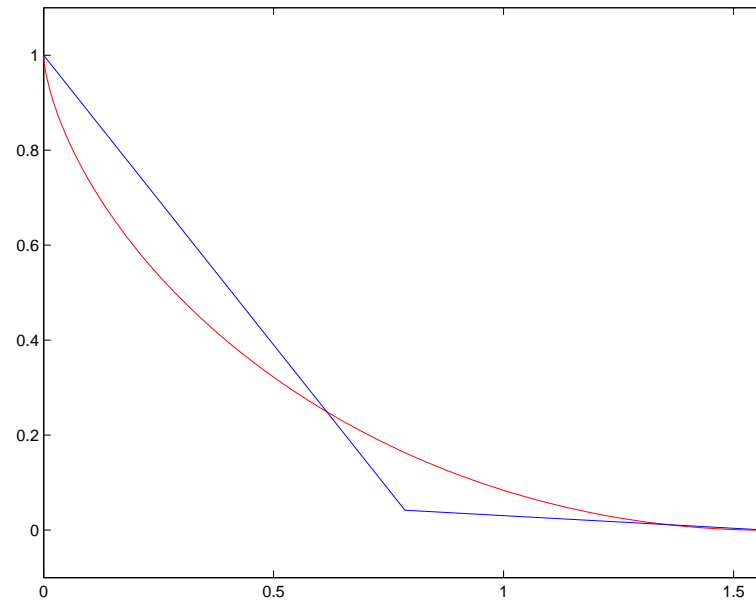
y se busca $y_N \in \mathcal{S}_N$ tal que

$$T(y_N) = \min_{y \in \mathcal{S}_N} T(y) = \min_{y \in \mathcal{S}_N} \int_0^L \sqrt{\frac{1 + y'(x)^2}{2g(1 - y(x))}} dx$$

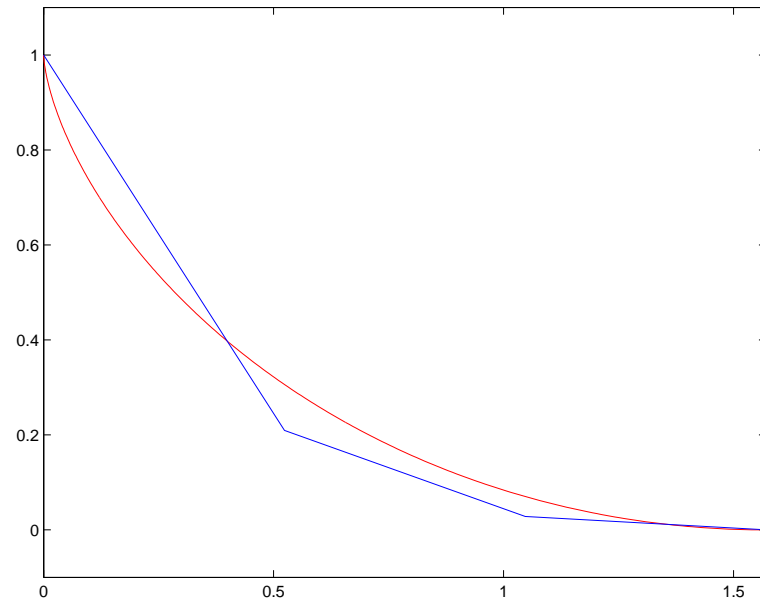
RESULTADOS NUMÉRICOS

$N =$ Número de nodos interiores

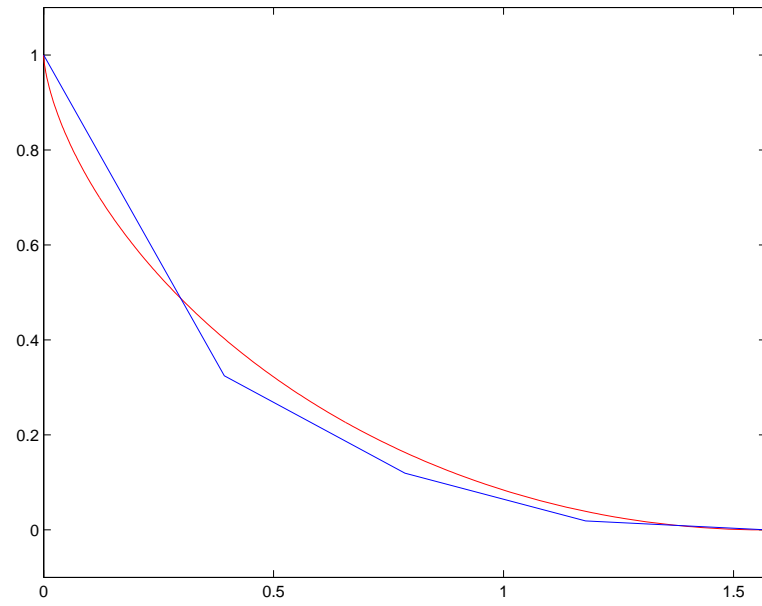
$$N = 1$$



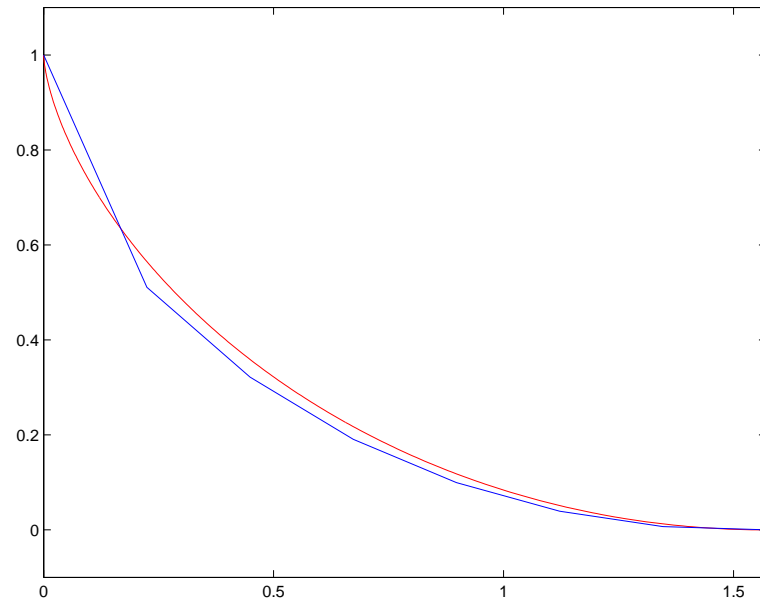
$$N = 2$$



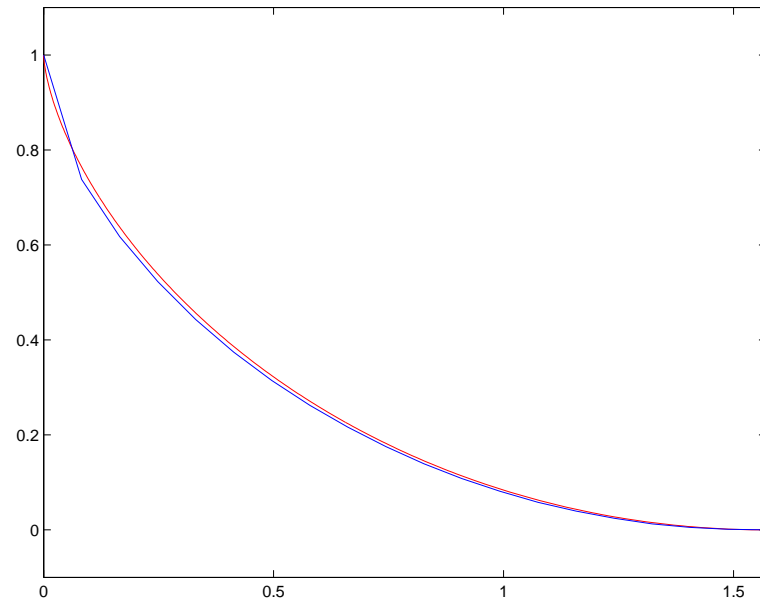
$N = 3$



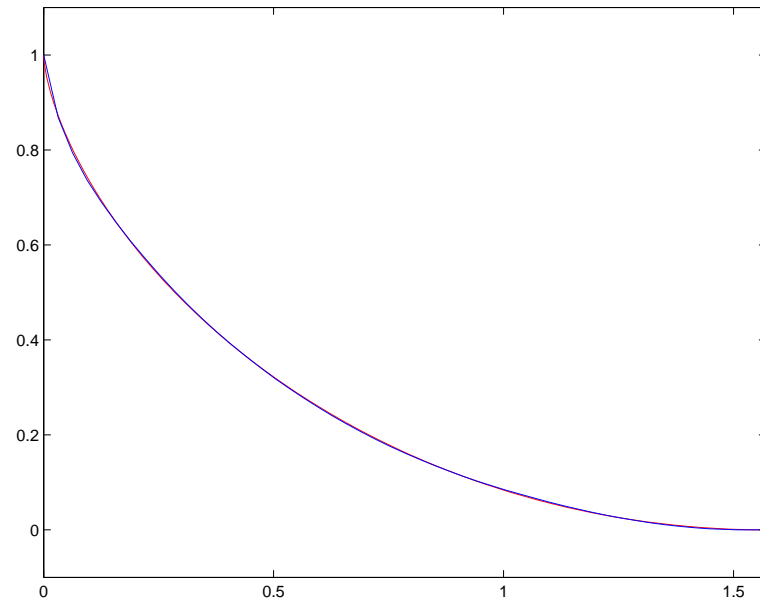
$N = 6$



$$N = 18$$



$$N = 49$$



ECUACIONES EN DERIVADAS PARCIALES

SE USAN LAS MISMAS IDEAS!

PROBLEMA DE DIRICHLET

$$\begin{aligned} -\Delta u &= 0 && \text{en } \Omega \\ u &= f && \text{en } \partial\Omega \end{aligned}$$

EQUIVALE A

$$\min_{u|_{\partial\Omega}=f} \int_{\Omega} |\nabla u|^2$$

Los métodos variacionales para resolver este problema y otros más generales (o para demostrar la existencia de solución) tienen una larga historia en el siglo XIX y principios del XX.

Por ejemplo Riemann trató de demostrar la existencia de solución de esta manera pero su prueba era errónea (Weierstrass encontró la falla). Esta demostración fue arreglada mucho después por Hilbert en 1901.

Faltaba la noción de Integral de Lebesgue y de “Compleitud” (algo así como si tratáramos de demostrar la existencia de $\sqrt{2}$ usando sólo los números racionales).

Las formulaciones variacional y débil pueden utilizarse para obtener soluciones aproximadas.

IDEA: Reemplazar el conjunto de “Todas las funciones” (intratable desde el punto de vista práctico: es un espacio de dimensión infinita) por un conjunto de funciones particulares (de dimensión finita).

EJEMPLOS DE FUNCIONES APROXIMANTES:

Polinomios, polinomios a trozos (generalización de las poligonales que usaba Leibniz!), trigonométricas, o variantes que tengan que ver con el problema considerado.

Los trabajos más conocidos que comienzan a usar estos métodos para aproximar soluciones son los de

[Rayleigh \(1842 - 1919\)](#): Usa la forma variacional para problemas de autovalores en 1894.

[Ritz \(1878-1909\)](#): Usa la forma variacional en 1909.

[Galerkin \(1871-1945\)](#): Usa la forma débil en 1915.

Por esto, este tipo de aproximaciones se conocen como “aproximaciones de Ritz-Galerkin” .

Pero no usan las funciones polinomiales a trozos (las cuales tienen muchas ventajas desde el punto de vista práctico).

Por ejemplo para el problema de Dirichlet:

\mathcal{S}_N sucesión de espacios aproximantes

RITZ APPROXIMATIONS: $u_N \in \mathcal{S}_N$ solución de

$$\min_{v \in \mathcal{S}_N} \int_{\Omega} |\nabla v|^2$$

GALERKIN APPROXIMATIONS: $u_N \in \mathcal{S}_N$ solución de

$$\int_{\Omega} \nabla u_N \cdot \nabla v \, dx = 0 \quad \forall v \in \mathcal{S}_N$$

El segundo método es más general: puede aplicarse a ecuaciones que no provengan de una minimización.

EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS SE BASA EN ESTA IDEA Y UTILIZA FUNCIONES POLINOMIALES A TROZOS

MÉTODO DE DIFERENCIAS FINITAS

IDEA: REEMPLAZAR DERIVADAS POR COCIENTES INCREMENTALES

$$u'(x) \sim \frac{u(x+h) - u(x)}{h}$$

$$u''(x) \sim \frac{u(x+h) - 2u(x) + u(x-h)}{h^2}$$

ETC.....

TRABAJO FUNDAMENTAL:

COURANT-FRIEDRICHS-LEWY (1928)

Analizan la aproximación al problema de Dirichlet:

$$\begin{aligned} -\Delta u &= 0 && \text{en } \Omega \\ u &= f && \text{en } \partial\Omega \end{aligned}$$

(x_j, y_k) grilla uniforme $U_{j,k} \sim u(x_j, y_k)$

$$\frac{U_{j-1,k} - 2U_{j,k} + U_{j+1,k}}{h^2} + \frac{U_{j,k-1} - 2U_{j,k} + U_{j,k+1}}{h^2} = 0$$

$U_{j,k} = f(x_j, y_k)$ para (x_j, y_k) en el borde o “cerca”

Usando argumentos de compacidad Courant, Friedrichs, y Lewy demuestran convergencia de la solución del problema discreto a la del continuo.

En la segunda parte del paper analizan la aproximación del problema de valores iniciales ecuaciones hiperbólicas.

Primero consideran el modelo

$$u_{tt} - u_{xx} = 0 \quad \text{para } x \in \mathbb{R}, t \geq 0, \quad u(x, 0) \quad \text{y} \quad u_t(x, 0) \quad \text{dados}$$

Demuestran la necesidad de la condición de estabilidad

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

la cual se conoce como “Condición CFL”. Analizan también otros problemas, entre ellos la ecuación del calor,

$$u_t - au_{xx} = 0 \quad \text{para } x \in \mathbb{R}, t \geq 0, \quad u(x, 0) \text{ dado}$$

En este caso la condición es

$$\frac{a\Delta t}{\Delta x^2} \leq \frac{1}{2}$$

El análisis de métodos de diferencias finitas para problemas de evolución se basa en

CONSISTENCIA: La solución exacta no satisface el esquema numérico salvo términos que tienden a cero cuando los incrementos Δx y Δt tienden a cero.

ESTABILIDAD: Los valores en un tiempo T están controlados por los iniciales.

TEOREMA DE EQUIVALENCIA DE LAX:

Si un método para un problema lineal bien planteado es **consistente**, entonces

ESTABILIDAD \Leftrightarrow **CONVERGENCIA**

CONEXIÓN ENTRE AMBOS MÉTODOS

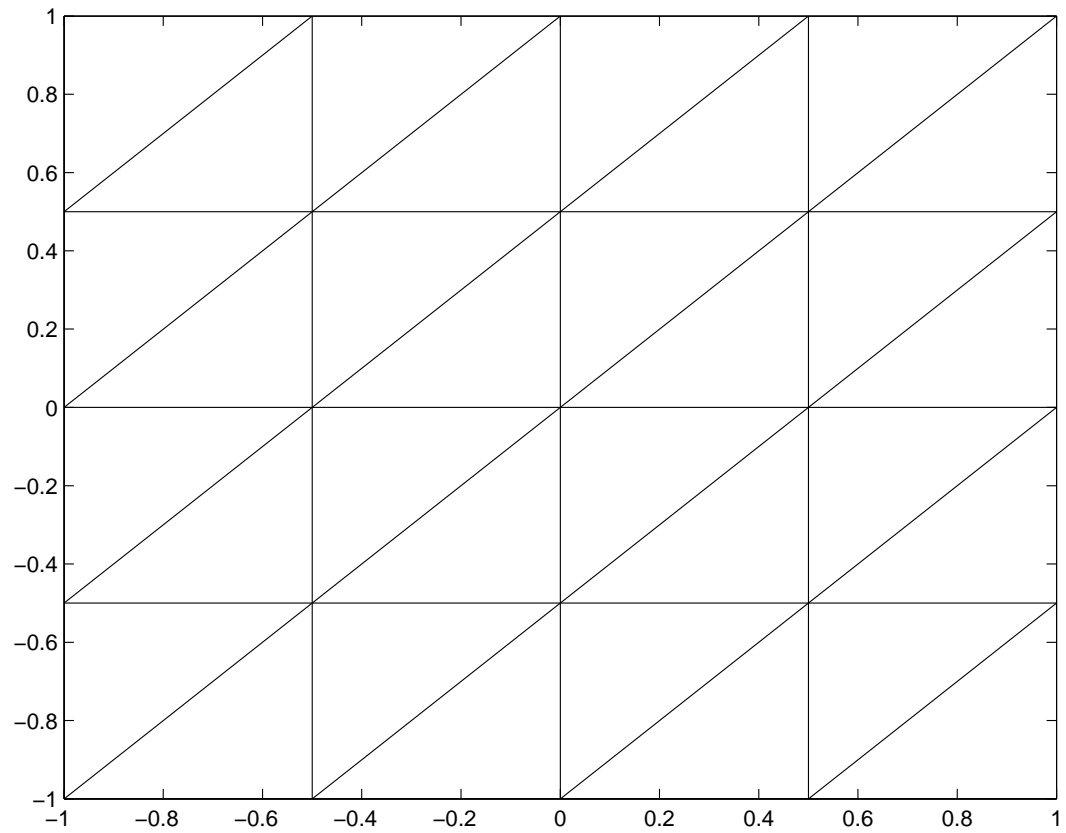
En su famoso paper de 1943,

“Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations”

Courant analiza el método variacional para el problema de Poisson

$$\begin{aligned} -\Delta u &= f && \text{en } \Omega \\ u &= 0 && \text{en } \partial\Omega \end{aligned}$$

y observa que utilizando las funciones lineales a trozos en una malla uniforme de triángulos



se obtiene el esquema de diferencias finitas de cinco puntos usual

$$\frac{-U_{j-1,k} + 2U_{j,k} - U_{j+1,k}}{h^2} + \frac{-U_{j,k-1} + 2U_{j,k} - U_{j,k+1}}{h^2} = f(x_j, y_k)$$

Salvo que el valor de f se aproxima por un promedio.

Courant hace un comentario de que esto sugiere una generalización que le parece ser interesante y tener muchas aplicaciones posibles:

USAR LAS FUNCIONES LINEALES A TROZOS PERO EN TRIANGULACIONES MAS GENERALES

If the variational problems contain derivatives not higher than the first order the method of finite difference can be subordinated to the Rayleigh-Ritz method by considering in the competition only functions ϕ which are linear in the meshes of a sub-division of our net into triangles formed by diagonals of the squares of the net. For such polyhedral functions the integrals become sums expressed by the finite number of values of ϕ in the net-points and the minimum conditions become our difference equations. Such an interpretation suggests a *wide generalization* which provides great flexibility and seems to have considerable practical value. Instead of starting with a quadratic or rectangular net we may consider from the outset any polyhedral surfaces with edges over an *arbitrarily chosen* (preferably triangular) *net*. Our integrals again become finite sums, and the minimum condition will be equations for the values of ϕ in the net-points. While these equations seem less simple than the original difference equations, we gain the enormous advantage of better adaptability to the data of the problem and thus we can often obtain good results with very little numerical calculation. (See appendix.)

Esto es exactamente el caso mas simple de lo que hoy se conoce como Método de Elementos Finitos.

Por esto, muchos consideran a Courant como el que introdujo el método.

Sin embargo, hay trabajos anteriores que utilizan el método:

En un artículo sobre historia del Método de Elementos Finitos, Babuska cita una referencia mucho más vieja donde se utilizan las funciones polinomiales a trozos: [Schellbach \(1851\)](#).

Posteriormente, especialmente a partir de ~ 1960 comenzó el desarrollo sistemático del método y su aplicación a distintos problemas de Ingeniería.

El desarrollo principal en los comienzos fue especialmente en Cálculo de Estructuras. Más adelante (en los 80) se extendió su aplicación a otros campos (por ejemplo Fluidos).

Paralelamente a las aplicaciones se desarrolló la teoría matemática.

OBJETIVOS: Demostrar la convergencia, estimar el error, decidir cuál método es más adecuado para un problema dado (tipo de funciones aproximantes, forma de los elementos, mallas, etc.)

TEORÍA MODERNA DE ELEMENTOS FINITOS

FORMULACIÓN GENERAL ABSTRACTA:

V Espacio de Hilbert , $u \in V$

$$B(u, v) = F(v) \quad \forall v \in V$$

B forma bilineal continua , F forma lineal continua

SOLUCIÓN APROXIMADA:

V_h espacio de dimension finita , $u_h \in V_h$

$$B(u_h, v) = F(v) \quad \forall v \in V_h$$

ESTIMACIONES DE ERROR

Se dividen en dos clases

- ESTIMACIONES A PRIORI
- ESTIMACIONES A POSTERIORI

ESTIMACIONES A PRIORI

Estas son las primeras que se desarrollaron.

OBJETIVOS:

- Demostrar convergencia y saber el orden del error.
- Conocer la dependencia del error respecto de diferentes cosas (geometría de los elementos, regularidad de la solución, grado de la aproximación).

Típicamente son de la forma

$$\|u - u_h\| \leq Ch^\alpha \|u\|$$

donde h es un parámetro que mide el grosor de la malla.

Si se tiene información sobre el comportamiento de la solución puede utilizarse para diseñar mallas adecuadas.

CASO 1:

FORMAS COERCITIVAS Y MÉTODOS CONFORMES

$$V_h \subset V$$

Si

$$B(v, v) \geq \alpha \|v\|^2 \quad \forall v \in V$$

entonces

$$\|u - u_h\| \leq C \inf_{v \in V_h} \|u - v\|$$

La solución calculada es, salvo constante, como la mejor aproximación.

EJEMPLOS CLÁSICOS

Ecuaciones elípticas de segundo orden:

$$\begin{cases} -\sum_{i,j=1}^n \frac{\partial}{\partial x_i} (a_{ij} \frac{\partial u}{\partial x_j}) = f & \text{in } \Omega \subset \mathbb{R}^n \\ u = 0 & \text{on } \partial\Omega \end{cases}$$

$$\gamma|\xi|^2 \leq \sum_{i,j=1}^n a_{ij} \xi_i \xi_j \leq M|\xi|^2 \quad \forall x \in \Omega \quad \forall \xi \in \mathbb{R}^n$$

$$V = H_0^1(\Omega)$$

Ecuaciones de elasticidad lineal:

$$\begin{cases} -\mu\Delta\mathbf{u} - (\lambda + \mu)\nabla\operatorname{div}\mathbf{u} = \mathbf{f} & \text{in } \Omega \subset \mathbb{R}^n \\ \mathbf{u} = 0 & \text{on } \partial\Omega \end{cases}$$

$$B(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \int_{\Omega} \{2\mu\varepsilon_{i,j}(\mathbf{u})\varepsilon_{i,j}(\mathbf{v}) + \lambda\operatorname{div}\mathbf{u}\operatorname{div}\mathbf{v}\} dx$$

where

$$\varepsilon_{i,j}(\mathbf{v}) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right)$$

$$V = H_0^1(\Omega)^n$$

CASO 2:

FORMAS NO COERCITIVAS PERO QUE SATISFACEN LA
CONDICIÓN INF-SUP

$$\inf_{u \in V_h} \sup_{v \in V_h} \frac{B(u, v)}{\|u\| \|v\|} \geq \alpha > 0$$

También se tiene

$$\|u - u_h\| \leq C \inf_{v \in V_h} \|u - v\|$$

EJEMPLO CLÁSICO

2- Ecuaciones de Stokes

$$\begin{cases} -\nu \Delta \mathbf{u} + \nabla p = \mathbf{f} & \text{in } \Omega \subset \mathbb{R}^n \\ \operatorname{div} \mathbf{u} = 0 & \text{in } \Omega \subset \mathbb{R}^n \\ \mathbf{u} = 0 & \text{on } \partial\Omega \end{cases}$$

$$B((\mathbf{u}, p), (\mathbf{v}, q)) = F(v)$$

$$B((\mathbf{u}, p), (\mathbf{v}, q)) := \int_{\Omega} \nabla \mathbf{u} : \nabla \mathbf{v} - \int_{\Omega} p \operatorname{div} \mathbf{v} - \int_{\Omega} q \operatorname{div} \mathbf{u}$$

$$V = H_0^1(\Omega)^n \times L_0^2(\Omega)$$

CASO 3:

FORMAS ESTABLES Y MÉTODOS NO CONFORMES

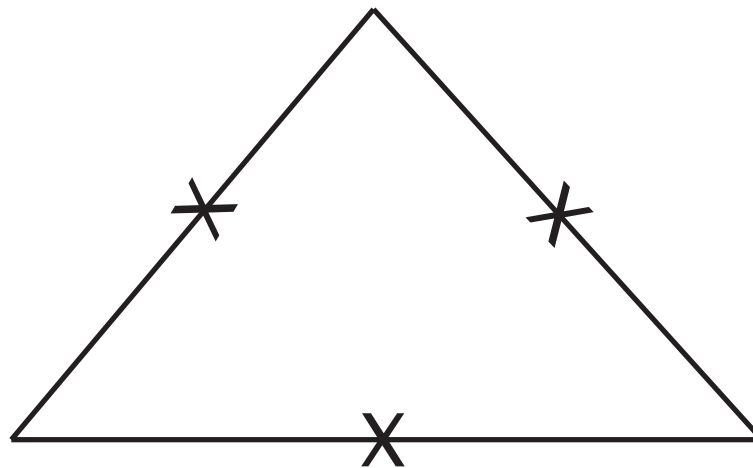
$$V_h \not\subset V$$

LEMA DE STRANG:

$$\|u - u_h\| \leq C \left\{ \inf_{v \in V_h} \|u - v\| + \sup_{w \in V_h} \frac{|B_h(u, w) - F(w)|}{\|w\|} \right\}$$

EJEMPLO CLÁSICO

Método no conforme de Crouzeix-Raviart



Para la ecuación de Poisson:

$$B_h(u, v) = \sum_K \int_K \nabla u \cdot \nabla v$$

ESTIMACIONES A POSTERIORI

Se empezaron a desarrollar a partir de fines de los 70. Se llaman así porque se calculan a partir de la solución aproximante calculada.

OBJETIVOS:

- Obtener información cuantitativa.
- Generación automática de mallas adaptadas.

ESTIMADOR DE ERROR TÍPICO:

$$\eta = \left(\sum_T \eta_T^2 \right)^{1/2} .$$

donde la suma es sobre todos los elementos T de la malla.

Por ejemplo, para el problema de Poisson, un estimador usual está dado por:

$$\eta_T^2 = h_T^2 \|f\|_{L^2(T)}^2 + \frac{1}{2} \sum_{F \in \mathcal{F}_T} h_F \|J_F\|_{L^2(F)}^2$$

siendo J_F el salto de la derivada normal de u_h .

PROBLEMAS ACTUALES

- Aplicación y Análisis para problemas cada vez más complicados (especialmente problemas no lineales).
- Convergencia de los métodos adaptivos.
- Problemas que involucran parámetros de distinto orden (por ejemplo [ecuaciones de convección-difusión](#)).
- Problemas con restricciones (aparece el fenómeno llamado “bloqueo”). Por ejemplo, en fluidos y en cálculo de estructuras delgadas (placas y cáscaras).

Para concluir la charla vamos a ver dos ejemplos de aplicación de mallas graduadas.

En ambos ejemplos las mallas utilizadas fueron diseñadas *a-priori* usando propiedades conocidas de las soluciones.

Aunque en muchos casos se tiene información del comportamiento de las soluciones (gracias a la teoría de ecuaciones diferenciales) en muchos otros no. Por lo tanto este tipo de mallas deben ser obtenidas mediante el uso de estimadores *a-posteriori* y métodos adaptivos de refinamiento de mallas.

VOLVAMOS AL CASO DE FORMAS COERCITIVAS

Si

$$B(u, v) \leq M \|u\| \|v\| \quad \text{continuidad}$$

y

$$\alpha \|u\|^2 \leq B(u, u) \quad \text{coercitividad}$$

entonces,

$$\|u - u_h\| \leq \frac{M}{\alpha} \|u - v\| \quad \forall v \in V_h$$

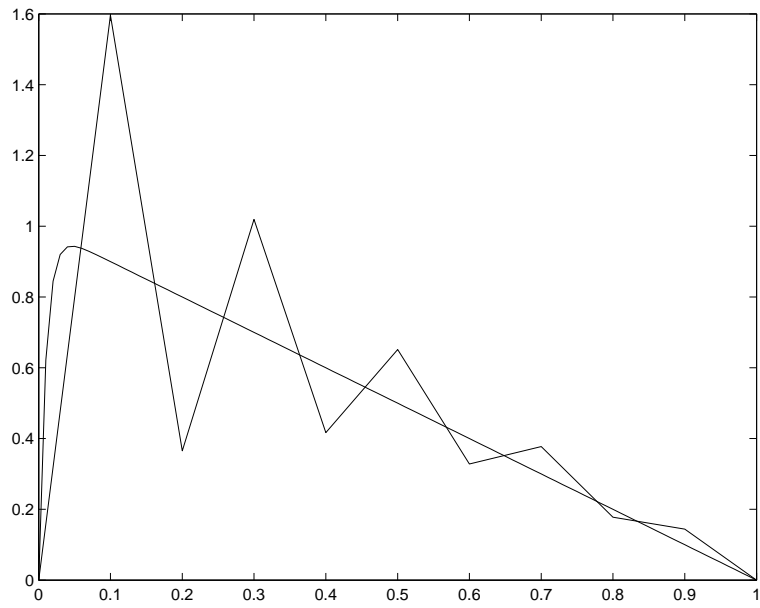
En problemas en los cuales el cociente $\frac{M}{\alpha}$ es muy grande esta estimación no dice demasiado y se requiere un análisis diferente.

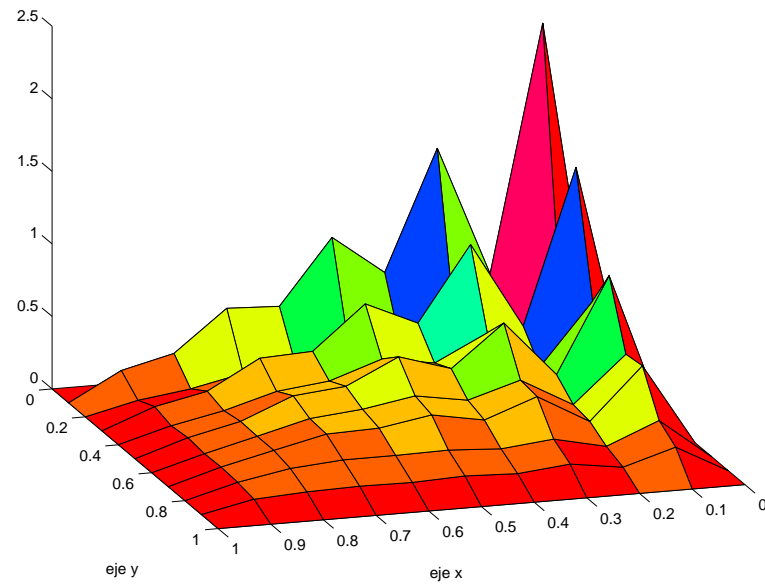
Consideremos el problema de Convección-Difusión

$$\begin{aligned} -\varepsilon \Delta u + b \cdot \nabla u + cu &= f && \text{in } \Omega \\ u &= 0 && \text{on } \partial\Omega \end{aligned} \quad (1)$$

$$b_i < -\gamma \quad \text{con} \quad \gamma > 0 \quad \text{para} \quad i = 1, 2. \quad (2)$$

Se sabe que si se aplica el método de elementos finitos con una malla uniforme aparecen oscilaciones a menos que la malla sea demasiado fina.





¿SOLUCIONES?

Se han introducido muchos métodos especiales: up-wind, streamline diffusion, Petrov-Galerkin, etc.

Pero, ¿Se puede aplicar el método standard utilizando mallas adecuadas?

Al menos en un ejemplo modelo se pueden obtener estimaciones de error válidas uniformemente en ε si se construyen mallas adecuadas.

¿Cuál es el problema desde el punto de vista del análisis?

En este problema la forma bilineal es:

$$B(v, w) = \int_{\Omega} (\varepsilon \nabla v \cdot \nabla w + b \cdot \nabla v w + c v w) dx.$$

Considerando la norma

$$\|v\|_{\varepsilon}^2 = \|v\|_{L^2(\Omega)}^2 + \varepsilon \|\nabla v\|_{L^2(\Omega)}^2.$$

y suponiendo

$$c - \frac{\operatorname{div} b}{2} \geq \mu > 0$$

se cumple la condición de coercitividad con un α independiente de ε .

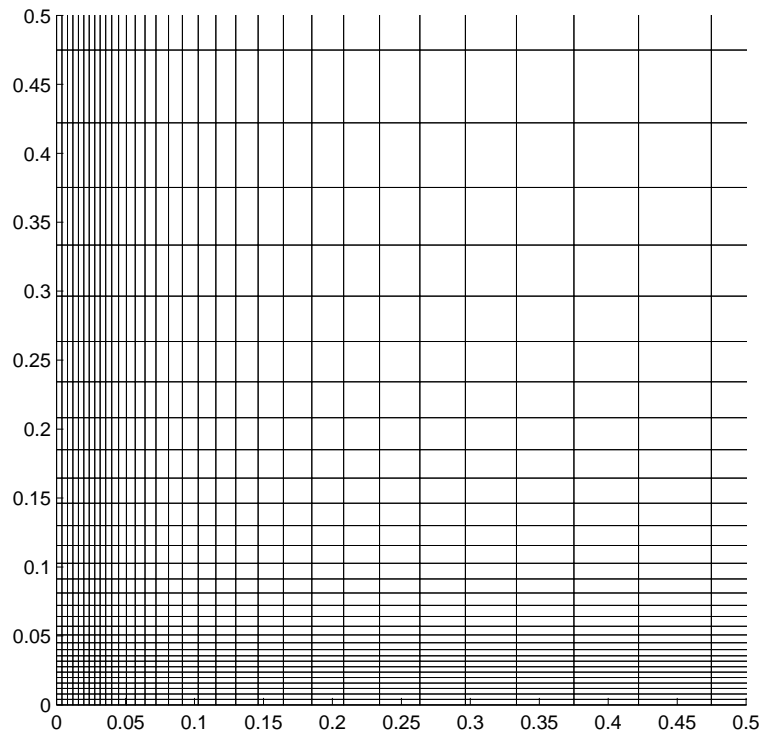
¿Qué es lo que falla si se quiere aplicar la teoría?

Dos cosas:

1- La constante M de la continuidad de la forma depende de ε .

2- Las derivadas segundas que aparecen en la cota del error de interpolación también dependen de ε .

Para solucionar 2 se utiliza una malla graduada que tenga en cuenta el comportamiento de la solución. (A. Lombardi, R. Durán, Appl. Num. Math. 2006)



Con estas mallas se obtiene

$$\|u - u_I\|_\varepsilon \leq C \frac{\log(1/\varepsilon)}{\sqrt{N}}$$

siendo N el número de nodos de la malla.

El orden respecto del número de nodos es óptimo en el sentido de que coincide con el que se obtiene en un problema con solución suave y mallas uniformes.

El problema 1 (o sea que la constante M depende de ϵ puede resolverse pero aparece otro factor logaritmico. Se obtiene la estimación de error

$$\|u - u_N\|_\epsilon \leq C \frac{(\log(1/\epsilon))^2}{\sqrt{N}},$$

siendo u_N la aproximación obtenida con el método standard de elementos bilineales con la malla graduada.

EJEMPLOS NUMÉRICOS

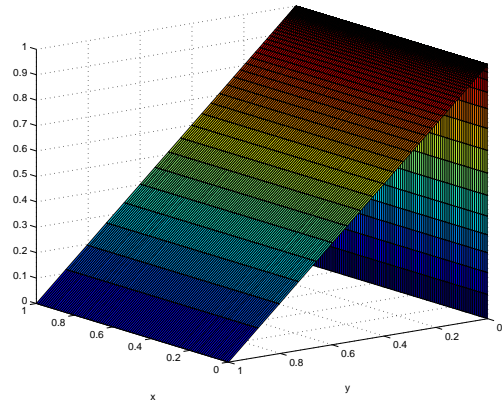
Resolvimos

$$\begin{aligned} -\varepsilon\Delta u + b \cdot \nabla u + cu &= f && \text{en } \Omega = [0, 1]^2 \\ u &= u_D && \text{en } \Gamma_D \\ \frac{\partial u}{\partial n} &= g && \text{en } \Gamma_N, \end{aligned}$$

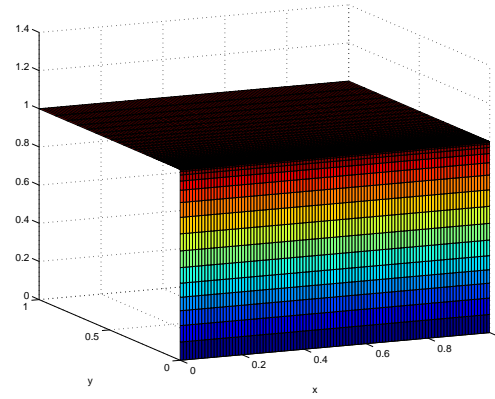
con diferentes coeficientes y datos.

No se observan oscilaciones.

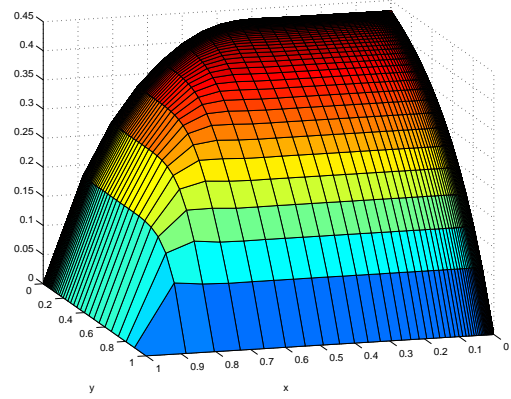
En las figuras se muestran los resultados para los cuatro ejemplos con $\varepsilon = 10^{-6}$.



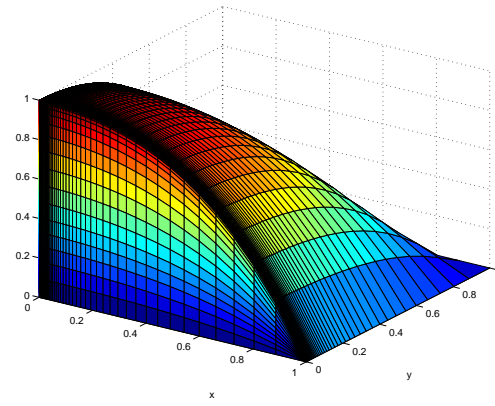
(1)



(2)



(3)



(4)

Para uno de los ejemplos conocemos la solución exacta y podemos entonces calcular el orden de convergencia respecto del número de nodos.

La tabla muestra la norma del error para diferentes valores de N con $\varepsilon = 10^{-4}$ y $\varepsilon = 10^{-6}$. Los ordenes calculados son 0.513738 y 0.507040 coincidiendo con lo que predice la teoría.

N	Error
324	0.16855
961	0.097606
3249	0.052696
12100	0.025912
45796	0.013419

$$\varepsilon = 10^{-4}$$

N	Error
676	0.16494
2025	0.094645
6889	0.050256
25281	0.026023
96100	0.013427

$$\varepsilon = 10^{-6}$$

TERMINAMOS CON EL MISMO EJEMPLO CON EL QUE EMPEZAMOS

HALLAR

$$y : [0, L] \rightarrow \mathbb{R} \quad , \quad y(0) = 1 \quad , \quad y(L) = 0$$

que minimice

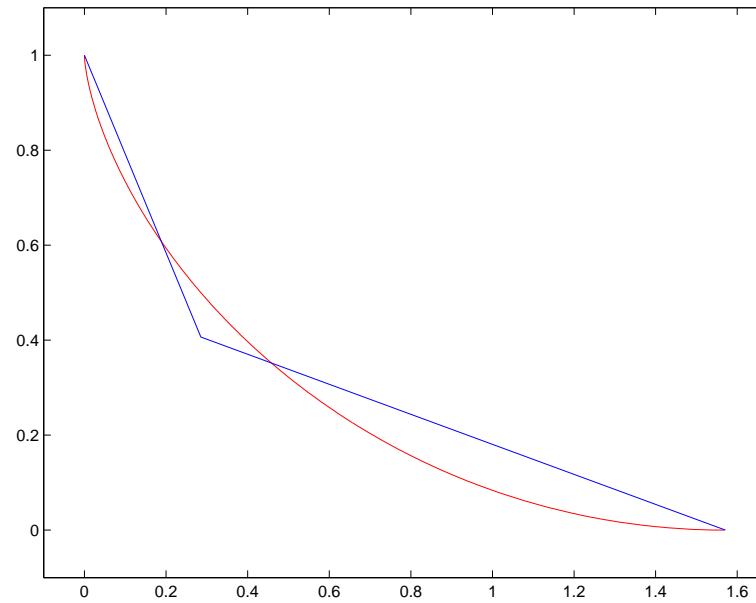
$$T = T(y) = \int_0^L \sqrt{\frac{1 + y'(x)^2}{2g(1 - y(x))}} dx$$

También en este caso vemos la ventaja de usar mallas graduadas!

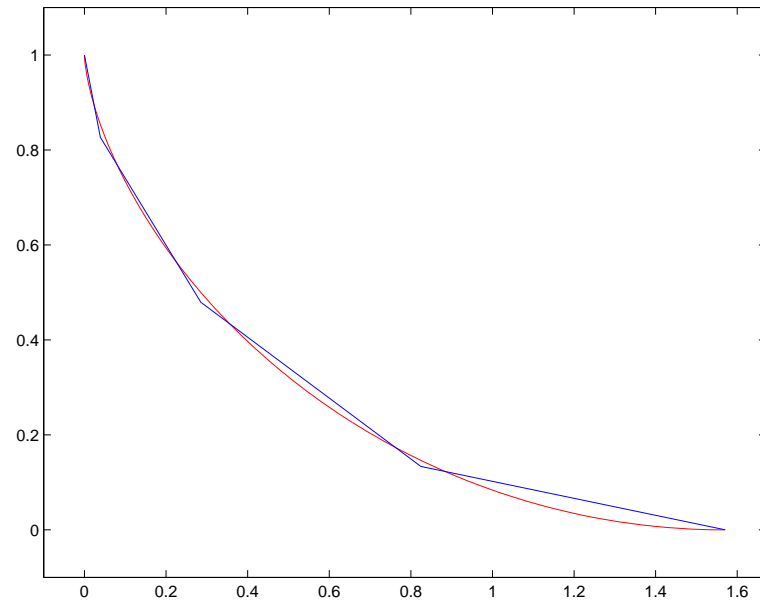
RESULTADOS NUMÉRICOS CON MALLAS GRADUADAS

$N =$ Número de nodos interiores

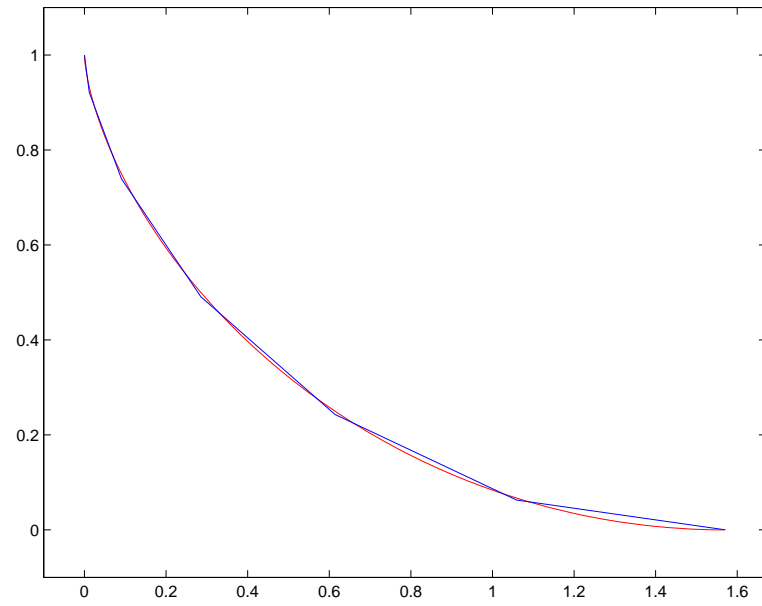
$$N = 1$$



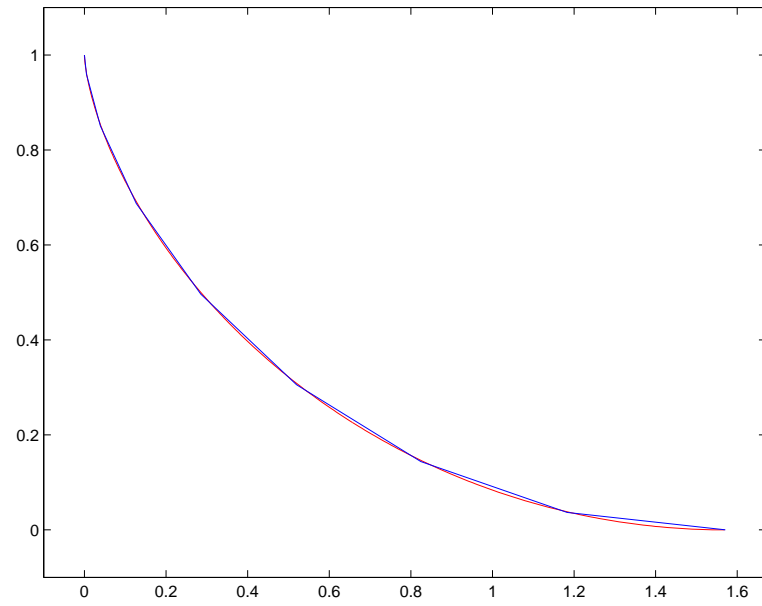
$$N = 3$$



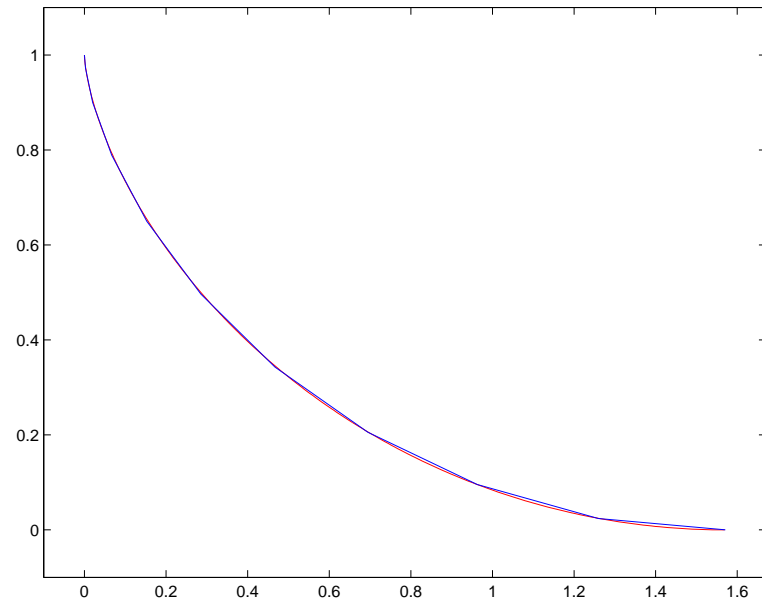
$$N = 5$$



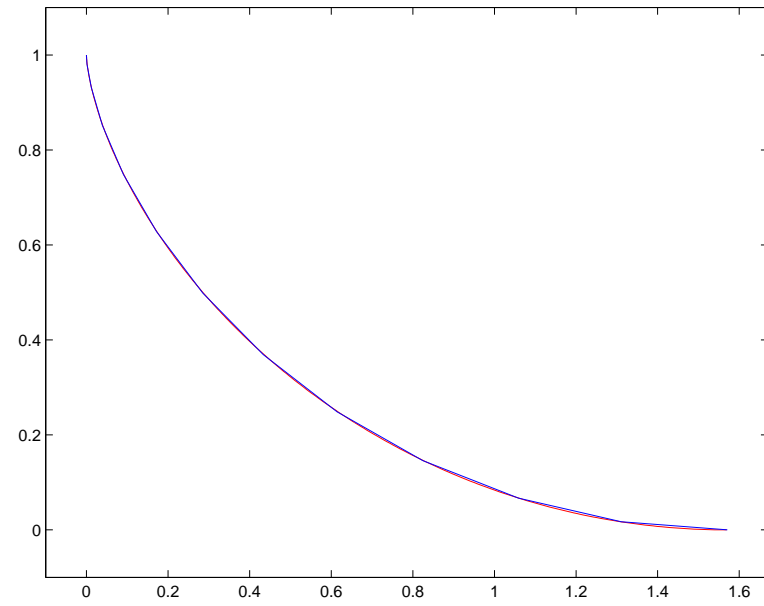
$$N = 7$$



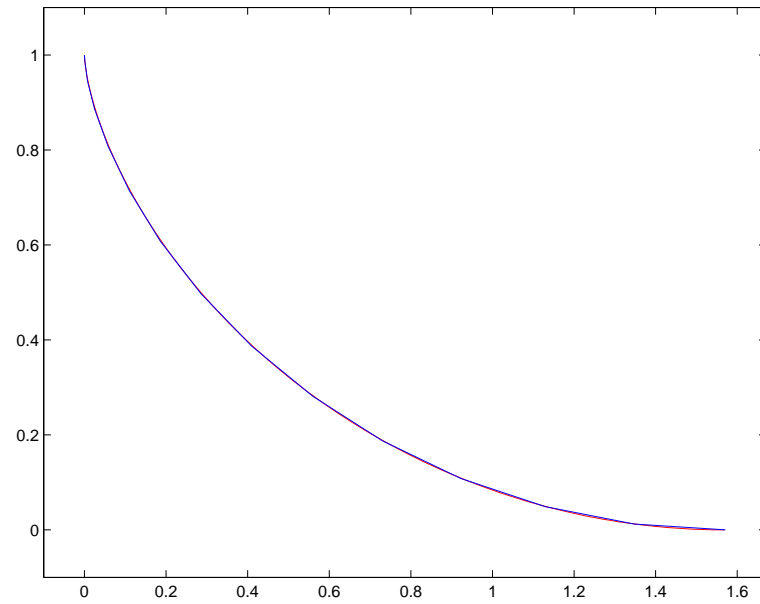
$$N = 9$$



$$N = 11$$

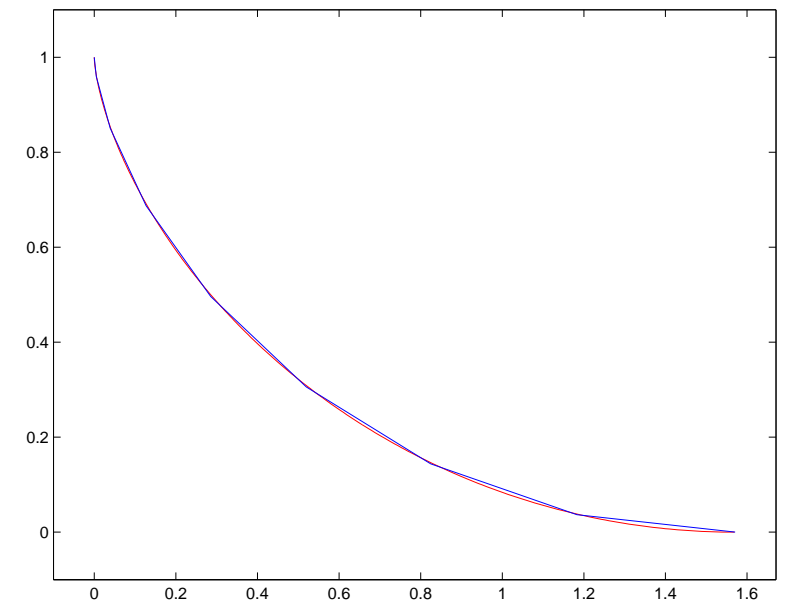
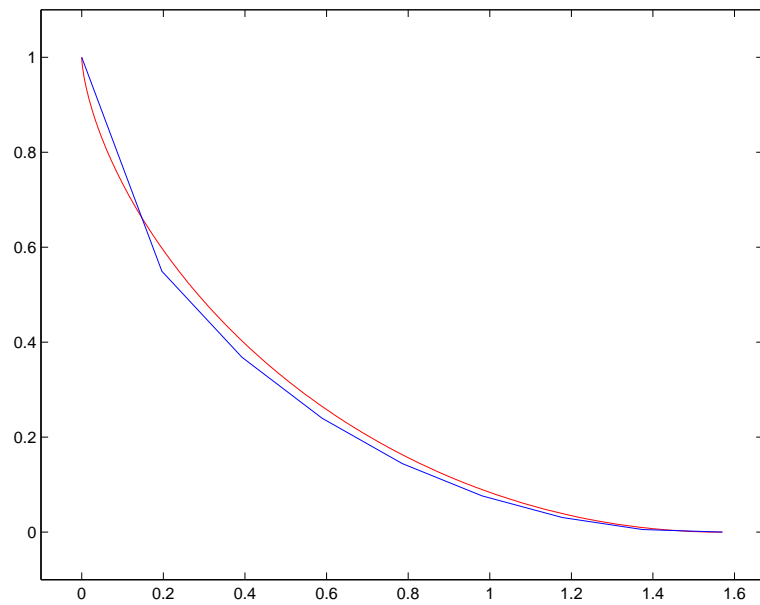


$$N = 13$$



COMPARACIÓN ENTRE MALLAS UNIFORME Y GRADUADA

N=7



Las tablas muestran el error en L^2 para mallas uniformes y graduadas. Los órdenes obtenidos son 1 para las uniformes y 2 para las graduadas.

N	Error
1	1.076545e-001
4	4.420605e-002
7	2.855271e-002
10	2.12148e-002
13	1.67093e-002

mallla uniforme

N	Error
1	8.25196e-002
4	1.46244e-002
7	6.37591e-003
10	3.11401e-003
13	2.06552e-003

mallla graduada