

# Método de Elementos Finitos

Pedro H A Konzen

17 de setembro de 2018

# Licença

Este trabalho está licenciado sob a Licença Atribuição-CompartilhaIgual 4.0 Internacional Creative Commons. Para visualizar uma cópia desta licença, visite [http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.pt\\_BR](http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.pt_BR) ou mande uma carta para Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

# Prefácio

Nestas notas de aula são abordados temas introdutórios sobre o método de elementos finitos para a simulação de equações diferenciais. Como ferramenta computacional de apoio didático, faço uso de códigos em [python](#) com suporte da biblioteca [FEniCS](#).

Agradeço aos(às) estudantes e colegas que assiduamente ou esporadicamente contribuem com correções, sugestões e críticas em prol do desenvolvimento deste material didático.

Pedro H A Konzen

# Sumário

Capa	i
Licença	ii
Prefácio	iii
Sumário	iv
<b>1 Método de elementos finitos em 1D</b>	<b>1</b>
1.1 Interpolação e projeção . . . . .	1
1.1.1 Interpolação . . . . .	2
1.1.2 Projeção $L^2$ . . . . .	9
1.2 Problema modelo . . . . .	14
1.2.1 Formulação fraca . . . . .	15
1.2.2 Formulação de elementos finitos . . . . .	15
1.2.3 Estimativa <i>a priori</i> . . . . .	19
<b>Respostas dos Exercícios</b>	<b>24</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>25</b>
<b>Índice Remissivo</b>	<b>26</b>

# Capítulo 1

## Método de elementos finitos em 1D

### 1.1 Interpolação e projeção

Seja dado um intervalo  $I = [x_0, x_1] \subset \mathbb{R}$ ,  $x_0 \neq x_1$ . O espaço vetorial das funções lineares em  $I$  é definido por

$$P_1(I) := \{v : v(x) = c_0 + c_1x, x \in I, c_0, c_1 \in \mathbb{R}\}. \quad (1.1)$$

Observamos que dado  $v \in P_1(I)$ , temos que  $v$  é unicamente determinada pelos valores  $\alpha_0 = v(x_0)$  e  $\alpha_1 = v(x_1)$ . Como consequência, existe exatamente uma única função  $v \in P_1(I)$  para quaisquer dados valores  $\alpha_0$  e  $\alpha_1$ . Desta observação, introduzimos a chamada base nodal  $\{\varphi_0, \varphi_1\}$  para  $P_1(I)$ , definida por

$$\varphi_j(x_i) = \begin{cases} 1 & , i = j, \\ 0 & , i \neq j \end{cases}, \quad (1.2)$$

com  $i, j = 0, 1$ . Com esta base, toda função  $v \in P_1(I)$  pode ser escrita como uma combinação linear das funções  $\varphi_0$  e  $\varphi_1$  com coeficientes  $\alpha_0$  e  $\alpha_1$  (**graus de liberdade**), i.e.

$$v(x) = \alpha_0\varphi_0(x) + \alpha_1\varphi_1(x). \quad (1.3)$$

Além disso, observamos que

$$\varphi_0(x) = \frac{x_1 - x}{x_1 - x_0}, \quad \varphi_1(x) = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}. \quad (1.4)$$

Uma extensão do espaço  $P_1(I)$  é o espaço das funções lineares por partes. Dado  $I = [l_0, l_1]$ ,  $l_0 \neq l_1$ , consideremos uma partição (**malha**) de  $I$  com  $n + 1$  pontos  $\mathcal{I} = \{l_0 = x_0, x_1, \dots, x_n = l_1\}$  e, portanto, com  $n$  subintervalos  $I_i = [x_{i-1}, x_i]$  de comprimento  $h_i = x_i - x_{i-1}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . Na malha  $\mathcal{I}$  definimos o seguinte espaço das funções lineares por partes

$$V_h := \{v : v \in C^0(\mathcal{I}), v|_{I_i} \in P_1(I_i), i = 1, 2, \dots, n\}. \quad (1.5)$$

Observamos que toda função  $v \in V_h$  é unicamente determinada por seus valores nodais  $\{\alpha_i = v(x_i)\}_{i=0}^n$ . Reciprocamente, todo conjunto de valores nodais  $\{\alpha_i\}_{i=0}^n$  determina unicamente uma função  $v \in V_h$ . Desta observação, temos que os valores nodais determinam os graus de liberdade com a base nodal  $\{\varphi_j\}_{j=0}^n$  para  $V_h$  definida por

$$\varphi_j(x_i) = \begin{cases} 1 & , i = j, \\ 0 & , i \neq j \end{cases}, \quad (1.6)$$

com  $i, j = 0, 1, \dots, n$ . Podemos verificar que

$$\varphi_i(x) = \begin{cases} (x - x_{i-1})/h_i & , x \in I_i, \\ (x_{i+1} - x)/h_{i+1} & , x \in I_{i+1}, \\ 0 & , \text{noutros casos} \end{cases} \quad (1.7)$$

veja, Figura 1.1. É notável que  $\phi_i(x)$  tem suporte compacto  $I_i \cup I_{i+1}$ .

### 1.1.1 Interpolação

A interpolação é uma das técnicas de aproximação de funções. Dada uma função contínua  $f$  em  $I = [x_0, x_1]$ , definimos o **operador de interpolação linear**  $\pi : C^0(I) \rightarrow P_1(I)$  por

$$\pi f(x) = f(x_0)\varphi_0(x) + f(x_1)\varphi_1(x). \quad (1.8)$$

Observamos que  $\pi f$  é igual a  $f$  nos nodos  $x_0$  e  $x_1$ .

**Exemplo 1.1.1.** A Figura 1.2 ilustra a interpolação da função  $f(x) = 3 \sin(2\pi x)$  no espaço  $P_1([1/4, 3/4])$ . Neste caso

$$\pi f(x) = f\left(\frac{1}{4}\right) \frac{3/4 - x}{1/2} + f\left(\frac{3}{4}\right) \frac{x - 1/4}{1/2}. \quad (1.9)$$

Com o [FENiCS](#), podemos computar a função interpolada  $\pi f$  com o seguinte código:

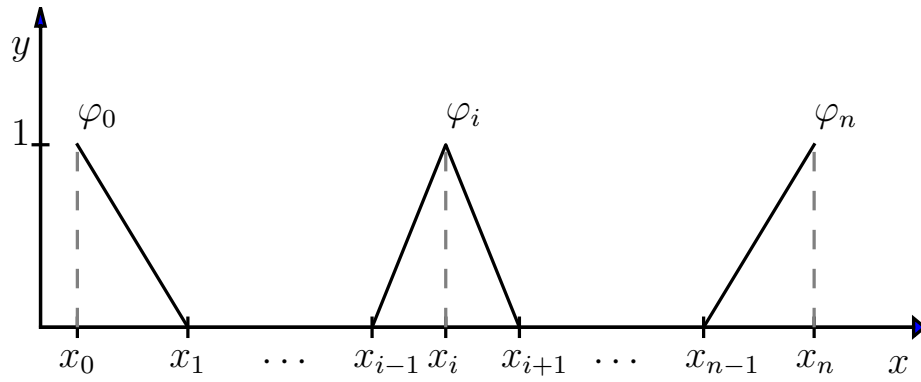


Figura 1.1: Base nodal para o espaço das funções lineares por parte.

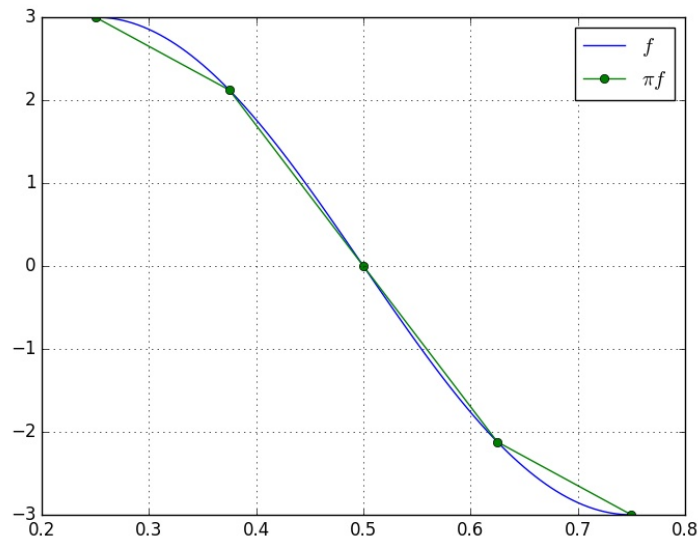


Figura 1.2: Interpolação linear de  $f(x) = 3 \sin(2\pi x)$  no espaço  $P_1([1/4, 3/4])$ .

```
from __future__ import print_function, division
from fenics import *
import numpy as np
```

```

import matplotlib.pyplot as plt

# malha
mesh = IntervalMesh(4,0.25,0.75)

# espaco
V = FunctionSpace(mesh, 'P', 1)

# funcao
f = Expression('3*sin(2*pi*x[0])',
               degree=10)

# interpolacao
pif = interpolate(f,V)

# grafico
xx = IntervalMesh(100,0.25,0.75)
plot(f,mesh=xx,label="$f$")
plot(pif,mesh=mesh,
     marker='o',label="$\pi f$")
plt.legend(numpoints=1)
plt.grid('on')
plt.show()

```

Agora, vamos buscar medir o erro de interpolação, i.e.  $f - \pi f$ . Para tanto, podemos usar a norma  $L^2$  definida por

$$\|v\|_{L^2(I)} = \left( \int_I v^2 dx \right)^{1/2}. \quad (1.10)$$

Lembramos que valem as desigualdades triangular

$$\|v + w\|_{L^2(I)} \leq \|v\|_{L^2(I)} + \|w\|_{L^2(I)} \quad (1.11)$$

e a de Cauchy-Schwarz

$$\int_I vw dx \leq \|v\|_{L^2(I)} \|w\|_{L^2(I)}, \quad (1.12)$$

para qualquer funções  $v, w \in L^2(I)$ .



**Proposição 1.1.1.** (Erro da interpolação linear) O interpolador  $\pi f$  satisfaz as estimativas

$$\|f - \pi f\|_{L^2(I)} \leq Ch^2 \|f''\|_{L^2(I)}, \quad (1.13)$$

$$\|(f - \pi f)'\|_{L^2(I)} \leq Ch \|f''\|_{L^2(I)}, \quad (1.14)$$

onde  $C$  é uma constante e  $h = x_1 - x_0$ .

*Demonstração.* Denotemos o erro de interpolação por  $e = f - \pi f$ . Do teorema fundamental do cálculo, temos

$$e(y) = e(x_0) + \int_{x_0}^y e'(x) dx, \quad (1.15)$$

onde  $e(x_0) = f(x_0) - \pi f(x_0) = 0$ . Daí, usando a desigualdade de Cauchy-Schwarz (1.12), temos

$$e(y) = \int_{x_0}^y e' dx \quad (1.16)$$

$$\leq \int_{x_0}^y |e'| dx \quad (1.17)$$

$$\leq \int_I 1 \cdot |e'| dx \quad (1.18)$$

$$\leq \left( \int_I 1^2 dx \right)^{1/2} \left( \int_I e'^2 dx \right)^{1/2} \quad (1.19)$$

$$= h^{1/2} \left( \int_I e'^2 dx \right)^{1/2}, \quad (1.20)$$

donde

$$e(y)^2 \leq h \int_I e'^2 dx = h \|e'\|_{L^2(I)}^2. \quad (1.21)$$

Então, integrando em  $I$  obtemos

$$\|e\|_{L^2(I)}^2 = \int_I e^2(y) dy \leq \int_I h \|e'\|_{L^2(I)}^2 dy = h^2 \|e'\|_{L^2(I)}^2, \quad (1.22)$$

ou seja,

$$\|e\|_{L^2(I)} \leq h \|e'\|_{L^2(I)}. \quad (1.23)$$

Agora, observando que  $e(x_0) = e(x_1) = 0$ , o teorema de Rolle garante a existência de um ponto  $\tilde{x} \in I$  tal que  $e'(\tilde{x}) = 0$ , donde do teorema fundamental

do cálculo e da desigualdade de Cauchy-Schwarz, segue

$$e'(y) = e'(\tilde{x}) + \int_{\tilde{x}}^y e'' dx \quad (1.24)$$

$$= \int_{\tilde{x}}^y e'' dx \quad (1.25)$$

$$\leq \int_I 1 \cdot |e''| dx \quad (1.26)$$

$$\leq h^{1/2} \left( \int_I e''^2 \right)^{1/2}. \quad (1.27)$$

Então, integrando em  $I$ , obtemos

$$\|e'\|_{L^2(I)}^2 \leq h^2 \|e''\|_{L^2(I)}^2, \quad (1.28)$$

a qual, observando que  $e'' = f''$ , equivale a segunda estimativa procurada, i.e.

$$\|(f - \pi f)'\|_{L^2(I)} \leq Ch \|f''\|_{L^2(I)}. \quad (1.29)$$

Por fim, de (1.23) e de (1.29), obtemos a primeira estimativa desejada

$$\|f - \pi f\|_{L^2(I)} \leq Ch^2 \|f''\|_{L^2(I)}. \quad (1.30)$$

□

**Exemplo 1.1.2.** A Figura 1.3 mostra a evolução do erro na norma  $L^2$  da interpolação de  $f(x) = 3 \sin(2\pi x)$  no espaço  $P_1([0, h])$  para  $h = 10^{-5}, 10^{-4}, \dots, 10^{-1}$ . Com o FENiCS, podemos computar os erros de interpolação com o seguinte código:

```
from __future__ import print_function, division
from fenics import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# funcao
f = Expression('3*sin(2*pi*x[0])',
               degree=10)

n=5
for k in np.arange(1,n+1):
```

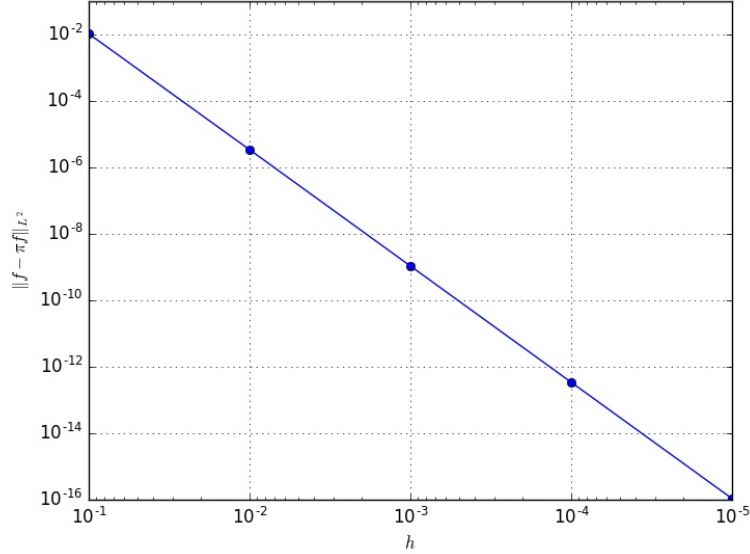


Figura 1.3: Erro de interpolação de  $f(x) = 3\sin(2\pi x)$  no espaço  $P_1([0, h])$ .

```
h = 10**-k
mesh = IntervalMesh(1,0,h)
V = FunctionSpace(mesh, 'P', 1)
pif = interpolate(f,V)
e = errornorm(f,pif,'L2')
print("%d %1.0E %1.1E" % (k,h,e))
```

Vamos, agora, generalizar o resultado da Proposição 1.1.1 para a interpolação no espaço  $V_h$  das funções lineares por parte. Dada uma função contínua  $f$  em  $I = [l_0, l_1]$ , definimos o operador interpolador  $\pi : C^0(I) \rightarrow V_h$  na malha  $\mathcal{I}$  de  $I$  por

$$\pi f(x) = \sum_{i=0}^n f(x_i) \varphi_i(x). \quad (1.31)$$

**Exemplo 1.1.3.** A Figura 1.4 ilustra a interpolação da função  $f(x) = 3\sin(2\pi x)$  no espaço  $V_h$  das funções lineares por partes em uma malha uniforme do intervalo  $I = [1/4, 3/4]$  com  $n = 4$  subintervalos (5 pontos). Com o **FENiCS**, podemos computar a função interpolada  $\pi f$  com o seguinte código:

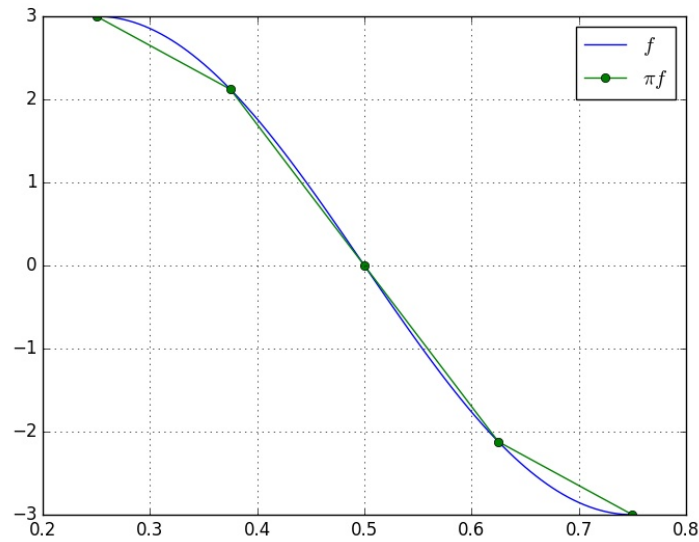


Figura 1.4: Interpolação linear de  $f(x) = 3 \sin(2\pi x)$  no espaço  $V_h$  das funções lineares por partes sobre uma malha com 5 pontos.

```
from __future__ import print_function, division
from fenics import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# malha
mesh = IntervalMesh(4, 0.25, 0.75)

# espaco
V = FunctionSpace(mesh, 'P', 1)

# funcao
f = Expression('3*sin(2*pi*x[0])',
               degree=10)

# interpolacao
pif = interpolate(f, V)
```

```

# grafico
xx = IntervalMesh(100,0.25,0.75)
plot(f,mesh=xx,label="$f$")
plot(pif,mesh=mesh,
      marker='o',label="$\pi f$")
plt.legend(numpoints=1)
plt.grid('on')
plt.show()

```

O seguinte resultado fornece uma estimativa do erro de interpolação em relação ao tamanho  $h_i$  de cada elemento da malha.

**Proposição 1.1.2.** *O interpolador  $\pi f$  satisfaz as estimativas*

$$\|f - \pi f\|_{L^2(I)}^2 \leq C \sum_{i=1}^n h_i^4 \|f''\|_{L^2(I)}^2, \quad (1.32)$$

$$\|(f - \pi f)'\|_{L^2(I)}^2 \leq C \sum_{i=1}^n h_i^2 \|f''\|_{L^2(I)}^2. \quad (1.33)$$

$$(1.34)$$

*Demonstração.* Ambas desigualdades seguem da desigualdade triangular e da Proposição 1.1.1. Por exemplo, para a primeira desigualdade, temos

$$\|f - \pi f\|_{L^2(I)}^2 \leq \sum_{i=1}^n \|f - \pi f\|_{L^2(I_i)}^2 \quad (1.35)$$

$$\leq \sum_{i=1}^n C h_i^4 \|f''\|_{L^2(I_i)}^2. \quad (1.36)$$

□

### 1.1.2 Projeção $L^2$

Dada uma função  $f \in L^2(I)$ , definimos o **operador de projeção**  $L^2$   $P_h : L^2(I) \rightarrow V_h$  por

$$\int_I (f - P_h f) v \, dx = 0, \quad \forall v \in V_h. \quad (1.37)$$

Como  $V_h$  é um espaço de dimensão finita, a condição (1.38) é equivalente a

$$\int_I (f - P_h f) \varphi_i \, dx = 0, \quad i = 0, 1, \dots, n, \quad (1.38)$$

onde  $\varphi_i$  é a  $i$ -ésima função base de  $V_h$ . Além disso, como  $P_h f \in V_h$ , temos

$$P_h f = \sum_{j=0}^n \xi_j \varphi_j, \quad (1.39)$$

onde  $\xi_j$ ,  $j = 0, 1, \dots, n$ , são  $n + 1$  incógnitas a determinar. Logo,

$$\int_I (f - P_h f) \varphi_i dx = 0 \Leftrightarrow \int_I f \varphi_i dx = \int_I P_h f \varphi_i dx \quad (1.40)$$

$$\Leftrightarrow \int_I f \varphi_i dx = \int_I \left( \sum_{j=0}^n \xi_j \varphi_j \right) \varphi_i dx \quad (1.41)$$

$$\Leftrightarrow \sum_{j=0}^n \xi_j \int_I \varphi_j \varphi_i dx = \int_I f \varphi_i dx, \quad (1.42)$$

para  $i = 0, 1, \dots, n$ .

Observemos, agora, que (1.42) consiste em um sistema de  $n + 1$  equações lineares para as  $n + 1$  incógnitas  $\xi_j$ ,  $j = 0, 1, \dots, n$ . Este, por sua vez, pode ser escrito na seguinte forma matricial

$$M\xi = b, \quad (1.43)$$

onde  $M = [m_{i,j}]_{i,j=0}^{n+1}$  é chamada de matriz de massa

$$m_{i,j} = \int_I \varphi_j \varphi_i dx \quad (1.44)$$

e  $b = (b_0, b_1, \dots, b_n)$  é chamado de vetor de carregamento

$$b_i = \int_I f \varphi_i dx. \quad (1.45)$$

Ou seja, a projeção  $L^2$  de  $f$  no espaço  $V_h$  é

$$P_h f = \sum_{j=0}^n \xi_j \varphi_j, \quad (1.46)$$

onde  $\xi = (\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_n)$  é solução do sistema (1.43).

**Exemplo 1.1.4.** A Figura 1.5 ilustra a projeção  $L^2$  da função  $f(x) = 3 \sin(2\pi x)$  no espaço  $V_h$  das funções lineares por partes em uma malha uniforme do intervalo  $I = [1/4, 3/4]$  com  $n = 4$  subintervalos (5 pontos).

Com o FENiCS, podemos computar  $P_h f$  com o seguinte código:

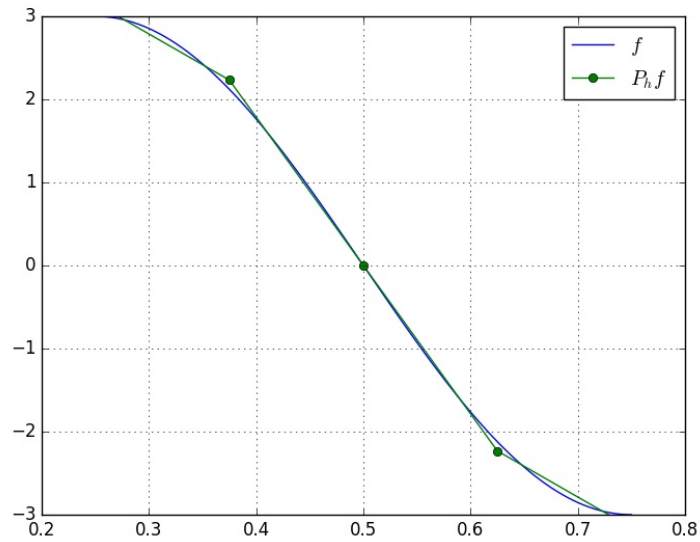


Figura 1.5: Projeção  $L^2$  de  $f(x) = 3\sin(2\pi x)$  no espaço  $V_h$  das funções lineares por partes sobre uma malha com 5 pontos.

```
from __future__ import print_function, division
from fenics import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# malha
mesh = IntervalMesh(4, 0.25, 0.75)

# espaco
V = FunctionSpace(mesh, 'P', 1)

# funcao
f = Expression('3*sin(2*pi*x[0])',
               degree=10)

# projecao
Phf = project(f, V)
```

```
# grafico
xx = IntervalMesh(100,0.25,0.75)
plot(f,mesh=xx,label="$f$")
plot(Phf,mesh=mesh,
     marker='o',label="$P_h f$")
plt.legend(numpoints=1)
plt.grid('on')
plt.show()
```

O próximo teorema mostra que  $P_h f$  é a função que melhor aproxima  $f$  dentre todas as funções do espaço  $V_h$ .

**Teorema 1.1.1.** (A melhor aproximação.) A projeção  $L^2$  satisfaz

$$\|f - P_h f\|_{L^2(I)} \leq \|f - v\|_{L^2(I)}, \quad \forall v \in V_h. \quad (1.47)$$

*Demonstração.* Dado  $v \in V_h$ , temos

$$\|f - P_h f\|_{L^2(I)}^2 = \int_I |f - P_h f|^2 dx \quad (1.48)$$

$$= \int_I (f - P_h f)(f - v + v - P_h f) dx \quad (1.49)$$

$$= \int_I (f - P_h f)(f - v) dx + \int_I (f - P_h f)(v - P_h f) dx \quad (1.50)$$

$$= \int_I (f - P_h f)(f - v) dx \quad (1.51)$$

$$\leq \|f - P_h f\|_{L^2(I)} \|f - v\|_{L^2(I)}, \quad (1.52)$$

donde segue o resultado.  $\square$

O próximo teorema fornece uma estimativa *a-priori* do erro  $\|f - P_h f\|_{L^2(I)}$  em relação ao tamanho da malha.

**Teorema 1.1.2.** A projeção  $L^2$  satisfaz

$$\|f - P_h f\|_{L^2(I)} \leq C \sum_{i=1}^n h_i^4 \|f''\|_{L^2(I_i)}. \quad (1.53)$$

*Demonstração.* Tomando a interpolação  $\pi f \in V_h$ , temos do Teorema da melhor aproximação (Teorema 1.1.1) e da estimativa do erro de interpolação



(Proposição 1.1.2) que

$$\|f - P_h f\|_{L^2(I)}^2 \leq \|f - \pi f\|_{L^2(I)}^2 \quad (1.54)$$

$$\leq C \sum_{i=1}^n h_i^4 \|f''\|_{L^2(I_i)}^2. \quad (1.55)$$

□

**Exemplo 1.1.5.** A Figura 1.6 mostra a evolução do erro na norma  $L^2$  da projeção de  $f(x) = 3 \sin(2\pi x)$  no espaço  $V_h$  em malhas uniformes de  $h = 10^{-5}, 10^{-4}, \dots, 10^{-1}$  no intervalo  $[1/4, 3/4]$ .

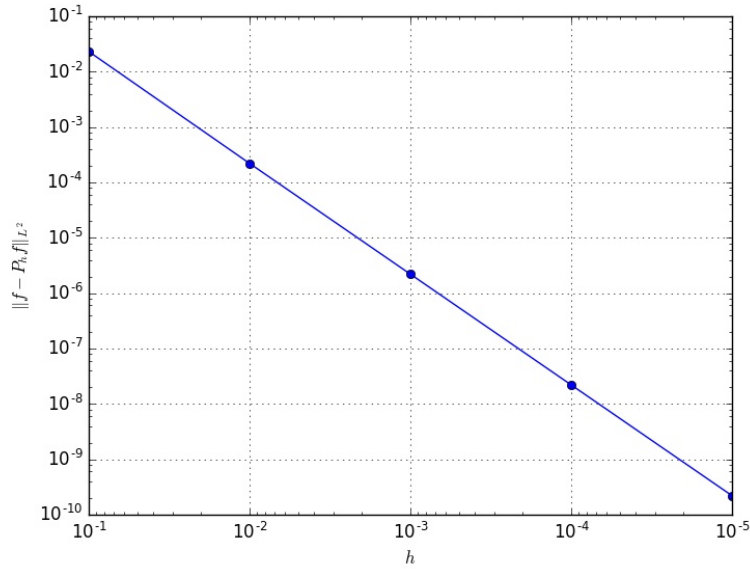


Figura 1.6: Erro de interpolação de  $f(x) = 3 \sin(2\pi x)$  no espaço  $V_h$ .

Com o [FENiCS](#), podemos computar os erros de projeção com o seguinte código:

```
from __future__ import print_function, division
from fenics import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
```

```

# funcao
f = Expression('3*sin(2*pi*x[0])',
               degree=10)

n=5
for k in np.arange(0,n):
    mesh = IntervalMesh(5*10**k,0.25,0.75)
    h = mesh.hmax()
    V = FunctionSpace(mesh, 'P', 1)
    Phf = project(f,V)
    e = errornorm(f,Phf,'L2')

    print("%d %1.0E %1.1E" % (k,h,e))

```

## Exercícios

**E 1.1.1.** Faça um código para verificar a segunda estimativa da Proposição 1.1.1 no caso da interpolação da função  $f(x) = 3\sin(2\pi x)$  no espaço  $P_1$  das funções lineares.

**E 1.1.2.** Faça um código para verificar as estimativas da Proposição 1.1.2 no caso da interpolação da função  $f(x) = 3\sin(2\pi x)$  no espaço  $V_h$  das funções lineares por partes.

**E 1.1.3.** Faça um código para computar a projeção  $L^2$   $P_h f$  da função  $f(x) = x - \cos(x)$  no espaço  $V_h$  das funções lineares por partes em uma malha com 10 células no intervalo  $[0, \pi]$ . Faça o esboço dos gráficos de  $f$  e  $P_h f$  e compute o erro  $\|f - P_h f\|_{L^2}$ .

## 1.2 Problema modelo

Nesta seção, discutiremos sobre a aplicação do método de elementos finitos para o seguinte problema de valor de contorno: encontrar  $u$  tal que

$$-u'' = f, \quad x \in I = [0, L], \quad (1.56)$$

$$u(0) = u(L) = 0, \quad (1.57)$$

onde  $f$  é uma função dada.

### 1.2.1 Formulação fraca

A derivação de um método de elementos finitos inicia-se da formulação fraca do problema em um espaço de funções apropriado. No caso do problema (1.56)-(1.57), tomamos o espaço

$$V_0 = \{v \in H^1(I) : v(0) = v(1) = 0\}. \quad (1.58)$$

Ou seja, se  $v \in H^1(I)$ , então  $\|v\|_{L^2(I)} < \infty$ ,  $\|v'\|_{L^2(I)} < \infty$ , bem como  $v$  satisfaz as condições de contorno do problema.

A formulação fraca é, então, obtida multiplicando-se a equação (1.56) por uma função teste  $v \in V_0$  (arbitrária) e integrando-se por partes, i.e.

$$\int_I f v \, dx = - \int_I u'' v \, dx \quad (1.59)$$

$$= \int_I u' v' \, dx - u'(L)v'(L) + u(0)v(0) \quad (1.60)$$

$$(1.61)$$

Donde, das condições de contorno, temos

$$\int_I u' v' \, dx = \int_I f v \, dx. \quad (1.62)$$

Desta forma, o problema fraco associado a (1.56)-(1.57) lê-se: encontrar  $u \in V_0$  tal que

$$a(u, v) = L(v), \quad \forall v \in V_0, \quad (1.63)$$

onde

$$a(u, v) = \int_I u' v' \, dx \quad (1.64)$$

$$L(v) = \int_I f v \, dx, \quad (1.65)$$

são chamadas de forma bilinear e forma linear, respectivamente.

### 1.2.2 Formulação de elementos finitos

Uma formulação de elementos finitos é uma aproximação do problema fraco (1.63) em um espaço de dimensão finita. Aqui, vamos usar o espaço  $V_{h,0}$  das funções lineares por partes em  $I$  que satisfazem as condições de contorno, i.e.

$$V_{h,0} = \{v \in V_h : v(0) = v(L) = 0\}. \quad (1.66)$$

Então, substituindo o espaço  $V_0$  pelo subespaço  $V_{h,0} \subset V_0$  em (1.63), obtemos o seguinte problema de elementos finitos: encontrar  $u_h \in V_{h,0}$  tal que

$$a(u_h, v) = L(v), \quad \forall v \in V_{h,0}. \quad (1.67)$$

**Observação 1.2.1.** A formulação de elementos finitos não é única, podendo-se trabalhar com outros espaços de funções. No caso em que o espaço da solução é igual ao espaço das funções testes, a abordagem é chamada de método de Galerkin<sup>1</sup>.

Observemos que o problema (1.67) é equivalente a: encontrar  $u_h \in V_{h,0}$  tal que

$$a(u_h, \varphi_i) = L(\varphi_i), \quad i = 1, \dots, n-1, \quad (1.68)$$

onde  $\varphi_i$ ,  $i = 1, \dots, n-1$ , são as funções base de  $V_{h,0}$ . Então, como  $u_h \in V_{h,0}$ , temos

$$u_h = \sum_{j=1}^{n-1} \xi_j \varphi_j, \quad (1.69)$$

onde  $\xi_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, n-1$ , são incógnitas a determinar. I.e., ao computarmos  $\xi_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, n-1$ , temos obtido a solução  $u_h$  do problema de elementos finitos 1.67.

Agora, da forma bilinear (1.64), temos

$$a(u_h, \varphi_i) = a\left(\sum_{j=1}^{n-1} \xi_j \varphi_j, \varphi_i\right) \quad (1.70)$$

$$= \sum_{j=1}^{n-1} \xi_j a(\varphi_j, \varphi_i). \quad (1.71)$$

Daí, o problema (1.67) é equivalente a resolvermos o seguinte sistema de equações lineares

$$A\xi = b, \quad (1.72)$$

onde  $A = [a_{i,j}]_{i,j=1}^{n-1}$  é a matriz de rigidez com

$$a_{i,j} = a(\varphi_j, \varphi_i) = \int_I \varphi_j' \varphi_i' dx, \quad (1.73)$$

$\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{n-1})$  é o vetor das incógnitas e  $b = (b_i)_{i=1}^{n-1}$  é o vetor de carregamento com

$$b_i = L(\varphi_i) = \int_I \varphi_i dx. \quad (1.74)$$

---

<sup>1</sup>Boris Grigoryevich Galerkin, matemático e engenheiro soviético. Fonte: [Wikipédia](#).

**Exemplo 1.2.1.** Consideremos o problema (1.56)-(1.57) com  $f \equiv 1$  e  $L = 1$ , i.e.

$$-u'' = 1, \quad x \in I = [0,1], \quad (1.75)$$

$$u(0) = u(1) = 0. \quad (1.76)$$

Neste caso, a solução analítica  $u(x) = -x^2/2 + x/2$  pode ser facilmente obtida por integração. Agora, vamos computar uma aproximação de elementos finitos no espaço das funções contínuas por partes  $V_{h,0}$  construído numa malha uniforme de 5 células no intervalo  $I = [0, 1]$ . Para tanto, montamos o sistema de elementos finitos (1.72), resolvemo-lo e computamos a solução com

$$u_h = \sum_{j=1}^n \xi_j \varphi_j, \quad (1.77)$$

onde a  $j$ -ésima função de base é

$$\varphi_j = \begin{cases} (x - x_{j-1})/(x_j - x_{j-1}) & , x_{j-1} \leq x < x_j, \\ (x_j - x)/(x_j - x_{j+1}) & , x_j \leq x \leq x_{j+1} \end{cases} \quad (1.78)$$

A Figura 1.8 apresenta o esboço dos gráficos da solução analítica  $u$  e da sua aproximação de elementos finitos  $u_h$ .

Com o FENiCS, a computação do problema de elementos finitos pode ser feita com o seguinte código:

```
from __future__ import print_function, division
from fenics import *
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# malha
mesh = IntervalMesh(5,0,1)

# espaco
V = FunctionSpace(mesh, 'P', 1)

# condicoes de contorno
def boundary(x,on_boundary):
    return on_boundary
```



Figura 1.7: Esboço dos gráficos das soluções referentes ao Exemplo 1.2.1.

```
bc = DirichletBC(V,Constant(0.0),boundary)

#MEF problem
u = TrialFunction(V)
v = TestFunction(V)
f = Constant(1.0)
a = dot(grad(u), grad(v))*dx
L = f*v*dx

#computa a sol
u = Function(V)
solve(a == L, u, bc)

#grafico
plot(u,marker="o",label="$u_h$")

#sol analitica
```

```

ua = Expression('-x[0]*x[0]/2+x[0]/2',
                degree=2)
xx = IntervalMesh(100,0,1)
plot(ua,mesh=xx,label="$u$")
plt.legend(numpoints=1)
plt.grid('on')
plt.show()

```

### 1.2.3 Estimativa *a priori*

Existem dois tipos de estimativas do erro  $e := u - u_h$ . Estimativas *a priori*, são aqueles em que o erro é dado em relação da solução  $u$ , enquanto que nas estimativas *a posteriori* o erro é expresso em relação a solução de elementos finitos  $u_h$ .

**Teorema 1.2.1.** (Ortogonalidade de Galerkin) A solução de elementos finitos  $u_h$  de (1.67) satisfaz a seguinte propriedade de orthogonalidade

$$a(u - u_h, v) := \int_I (u - u_h)' v' dx = 0, \quad v \in V_{h,0}, \quad (1.79)$$

onde  $u$  é a solução de (1.63).

*Demonstração.* De (1.67), (1.63) e lembrando que  $V_{h,0} \subset V_0$ , temos

$$a(u, v) = L(v) = a(u_h, v) \Rightarrow a(u - u_h, v) = 0, \quad (1.80)$$

para todo  $v \in V_{h,0}$ . □

**Teorema 1.2.2.** (A melhor aproximação) A solução de elementos finitos  $u_h$  dada por (1.67) satisfaz a seguinte propriedade de melhor aproximação

$$\|(u - u_h)'\|_{L^2(I)} \leq \|(u - v)'\|_{L^2(I)}, \quad v \in V_{h,0}, \quad (1.81)$$

onde  $u$  é a solução de (1.63).

*Demonstração.* Escrevendo  $u - u_h = u - v + v - u_h$  para qualquer  $v \in V_{h,0}$

e usando a ortogonalidade de Galerkin (Teorema 1.2.1), temos

$$\|(u - u_h)'\|^2 = \int_I (u - u_h)'(u - u_h)' dx \quad (1.82)$$

$$= \int_I (u - u_h)'(u - v + v - u_h)' dx \quad (1.83)$$

$$= \int_I (u - u_h)'(u - v)' dx + \int_I (u - u_h)'(v - u_h)' dx \quad (1.84)$$

$$= \int_I (u - u_h)'(u - v)' dx \quad (1.85)$$

$$\leq \|(u - u_h)'\|_{L^2(I)} \|(u - v)'\|_{L^2(I)}. \quad (1.86)$$

□

**Teorema 1.2.3.** (Estimativa *a priori*) O erro em se aproximar a solução  $u$  de (1.63) pela solução de elementos finitos  $u_h$  dada por (1.67) satisfaz a seguinte estimativa *a priori*

$$\|(u - u_h)'\|_{L^2(I)}^2 \leq C \sum_{i=1}^n h_i^2 \|u''\|_{L^2(I)}^2. \quad (1.87)$$

*Demonstração.* Tomando  $v = \pi u$  no teorema da melhor aproximação (Teorema 1.2.2), obtemos

$$\|(u - u_h)'\|_{L^2(I)} \leq \|(u - \pi u)'\|_{L^2(I)}. \quad (1.88)$$

Daí, da estimativa do erro de interpolação (Proposição 1.1.2), temos

$$\|(u - u_h)'\|_{L^2(I)}^2 \leq C \sum_{i=1}^n h_i^2 \|u''\|_{L^2(I)}^2. \quad (1.89)$$

□

**Exemplo 1.2.2.** Consideremos o problema (1.56)-(1.57) com  $f \equiv 1$  e  $L = 1$ , i.e.

$$-u'' = 1, \quad x \in I = [0,1], \quad (1.90)$$

$$u(0) = u(1) = 0. \quad (1.91)$$

Neste caso, a solução analítica  $u(x) = -x^2/2 + x/2$  pode ser facilmente obtida por integração. Agora, vamos computar uma aproximação de elementos finitos no espaço das funções contínuas por partes  $V_{h,0}$  construído numa malha



uniforme de 5 células no intervalo  $I = [0, 1]$ . Para tanto, montamos o sistema de elementos finitos (1.72), resolvemo-lo e computamos a solução com

$$u_h = \sum_{j=1}^n \xi_j \varphi_j, \quad (1.92)$$

onde a  $j$ -ésima função de base é

$$\varphi_j = \begin{cases} (x - x_{j-1})/(x_j - x_{j-1}) & , x_{j-1} \leq x < x_j, \\ (x_j - x)/(x_j - x_{j+1}) & , x_j \leq x \leq x_{j+1} \end{cases} \quad (1.93)$$

A Figura 1.8 apresenta o esboço dos gráficos da solução analítica  $u$  e da sua aproximação de elementos finitos  $u_h$ .

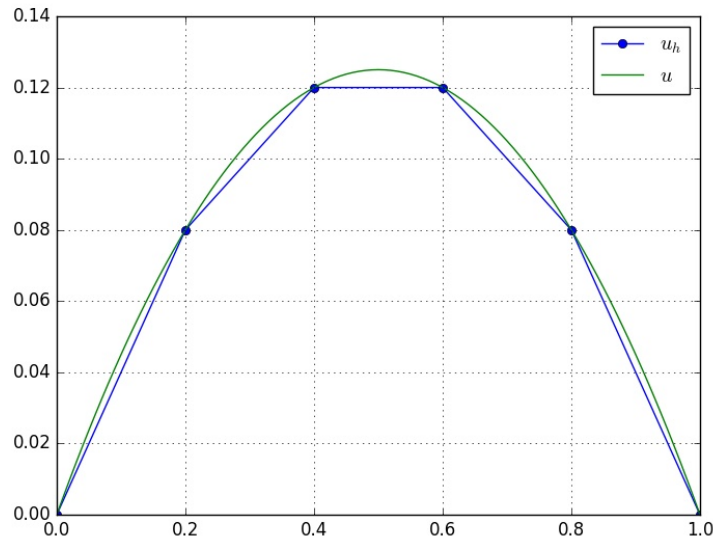


Figura 1.8: Esboço dos gráficos das soluções referentes ao Exemplo 1.2.1.

Com o FENiCS, a computação do problema de elementos finitos pode ser feita com o seguinte código:

```
from __future__ import print_function, division
from fenics import *
import numpy as np
```

```

import matplotlib.pyplot as plt

# malha
mesh = IntervalMesh(5,0,1)

# espaco
V = FunctionSpace(mesh, 'P', 1)

# condicoes de contorno
def boundary(x,on_boundary):
    return on_boundary

bc = DirichletBC(V,Constant(0.0),boundary)

#MEF problem
u = TrialFunction(V)
v = TestFunction(V)
f = Constant(1.0)
a = dot(grad(u), grad(v))*dx
L = f*v*dx

#computa a sol
u = Function(V)
solve(a == L, u, bc)

#grafico
plot(u,marker="o",label="$u_h$")

#sol analitica
ua = Expression('-x[0]*x[0]/2+x[0]/2',
                degree=2)
xx = IntervalMesh(100,0,1)
plot(ua,mesh=xx,label="$u$")
plt.legend(numpoints=1)
plt.grid('on')
plt.show()

```

## **Exercícios**

Em construção ...

# Resposta dos Exercícios

# Referências Bibliográficas

- [1] Hans Petter Langtangen and Anders Logg. *Solving PDEs in Python*. Springer, 2017.
- [2] M.G. Larson and F. Bengson. *The Finite Element Method: Theory, Implementation, and Applications*. Springer, 2013.

# Índice Remissivo

graus de liberdade, [1](#)

malha, [2](#)

operador

interpolação linear, [2](#)

operador de

projeção  $L^2$ , [9](#)