

RELATÓRIO – ATIVIDADE #4B

Autor: Eduardo Germer

Objetivos:

- Simulações em bocal de perfil parabólico
- Análise dos resultados com programa Richardson3p2

Data: 29.Dez.2012

Para a realização desta atividade foi definida uma tubeira parabólica cujas características são:

- Razão de áreas (RA): 4
- Raio da garganta (R_g): $4 \cdot 10^{-2}$ m
- Comprimento da tubeira (L): $5 \cdot 10^{-1}$ m
- Raio de entrada = raio de saída
- Entrada da tubeira em $x=0$
- Saída da tubeira em $x=L$
- Posição da garganta em $x=L/2$

Foram abordadas seis situações, que diferem na pressão e temperatura de estagnação. São elas:

- Caso 1: $p_0 = 5d5$ $T_0 = 3d2$
- Caso 2: $p_0 = 1d6$ $T_0 = 3d2$
- Caso 3: $p_0 = 2d6$ $T_0 = 5d2$
- Caso 4: $p_0 = 5d6$ $T_0 = 1d3$
- Caso 5: $p_0 = 1d7$ $T_0 = 2d3$
- Caso 6: $p_0 = 2d7$ $T_0 = 3d3$

As simulações foram feitas com a malha inicial de 2×2 sendo posteriormente refinada com razão de refino constante e igual a 2, em ambas as direções, desta forma as malhas seguintes foram 4×4 , 8×8 e assim por diante.

A geração da malha foi feita de forma uniforme na direção “x” e uniforme (por seção) na direção “r”. A Fig.1 mostra um exemplo de malha, no caso a de 32×32 .

A função de interpolação considerada para todas as simulações foi a UDS, e a condição inicial é a solução analítica 1D.

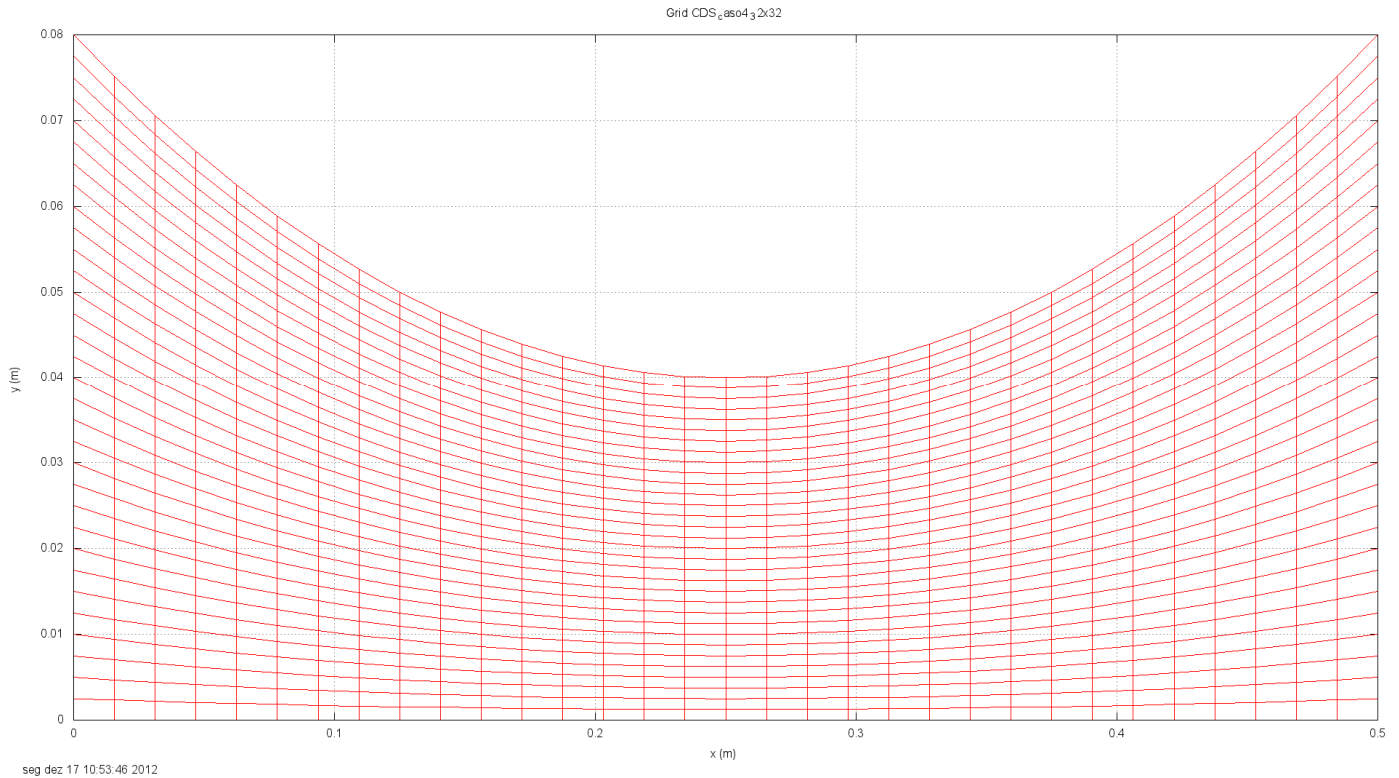


Figura 1 – Tubeira parabólica – malha 32 x 32

Hardware e Software das simulações:

Computador (H1): HP Pavilion dv5-1260, 4GB RAM, 64bit, AMD Turion X-2 Dual Core RM-74, 2.2 GHz

Sistema operacional: Windows 7

Computador (H2): HP Pavilion dv6, 4GB RAM, 64bit, AMD Quad Core, 1.6 GHz

Sistema operacional: Windows 7

Computador (CFD-9): CFD-9, 8GB RAM, 64bit, Intel Core 2 Quad, 2.4 GHz

Sistema operacional: Windows 7

Compilador: Intel Visual Fortran 11.1.065 [Intel 64].

Observação: o computador H1 foi utilizado para as malhas 2x2 até 256x256 e no caso 2 da malha 1024x1024; o computador H2 foi utilizado para todos os casos na malha 512x512; e o CFD-9 foi utilizado para malhas 1024x1024 (exceto caso 2).

Programa: Mach2D-5p8 (versão GB DM 2012 10 11)

Dados constantes nas simulações: kg=4; a1=1.d-6; coord=1; Rg=2.869E+02; gamma=1.4d0; pr=101325.d0; g0=9.80665d0; beta1=beta2=0; itb1=itb2=1000; modvis=0; modtur=0; ccTw=0; it1=it2=5; reload=0; tolerance=-1d-10; wbkp=1000; wlf=1; sem_a=1; sem_g=1; w_g=1; w_cam=0; vertela=1; num=1; Eu=3. d0; Ev=-3.d0; Ep=-350.d0; Et=-350.d0.

Para avaliar a ordem aparente foram analisadas duas variáveis, o coeficiente de descarga (adimensional) e o empuxo dinâmico (adimensional). Ao longo do texto referiu-se algumas vezes ao empuxo dinâmico como variável 1 e o coeficiente de descarga como variável 2.

Conforme esperado, a ordem aparente (p_U) da incerteza tende à ordem assintótica (p_L) à medida que a malha é refinada ($h \rightarrow 0$). Isto foi verificado para as duas variáveis e em todos os casos, sendo a ordem assintótica a mesma para ambas, e cujo valor é $p_L = 1$.

A tabela 1 mostra os valores de ordem aparente para cada caso e cada malha, da variável empuxo dinâmico, indicando que esta ordem tende à ordem assintótica à medida que a malha é refinada. O solver utilizado neste caso foi o MSI.

Tabela 1 – Ordem aparente da variável 1 (Empuxo dinâmico [adimensional])

Malha	h	caso 1	caso2	caso3	caso4	caso5	caso6
2x2	2.50E-01						
4x4	1.25E-01						
8x8	6.25E-02	1.66737548644689E+00	1.66737548644572E+00	1.66737548644669E+00	1.66737548644688E+00	1.66737548644717E+00	1.66737548644710E+00
16x16	3.13E-02	5.56404063781052E-01	5.56404063781568E-01	5.56404063781030E-01	5.56404063781087E-01	5.56404063781147E-01	5.56404063781134E-01
32x32	1.56E-02	1.30709144942161E+00	1.30709144942484E+00	1.30709144942193E+00	1.30709144942133E+00	1.30709144942108E+00	1.30709144942164E+00
64x64	7.81E-03	8.50733220717094E-01	8.50733220707676E-01	8.50733220715454E-01	8.50733220716872E-01	8.50733220717804E-01	8.50733220717074E-01
128x128	3.91E-03	9.25226366884223E-01	9.25226366890368E-01	9.25226366884006E-01	9.25226366884187E-01	9.25226366883601E-01	9.25226366883583E-01
256x256	1.95E-03	9.68587555281164E-01	9.68587555279714E-01	9.68587555260000E+00	9.68587555264350E-01	9.68587555260195E-01	9.68587555260424E-01
512x512	9.77E-04	9.87404447079441E-01	9.87404447081235E-01	9.87404447186267E-01	9.87404447144079E-01	9.87404447162237E-01	9.87404447089076E-01
1024x1024	4.88E-04	9.95429524886155E-01	9.95429525247921E-01	9.95429525664840E-01	9.95429523995996E-01	9.95429524957116E-01	9.95429525214707E-01

As Figs. 2, 3, 4, 5, 6 e 7 mostram os resultados da tabela 1 em representação gráfica.

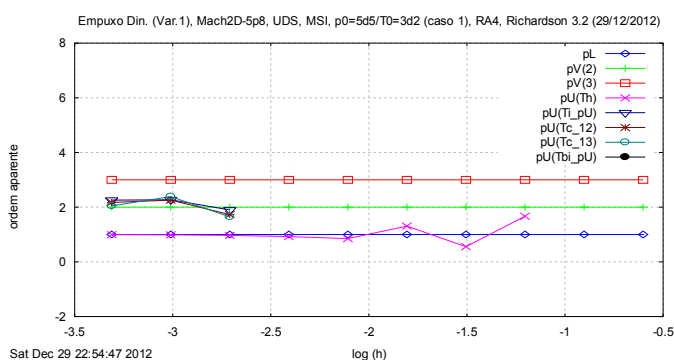


Figura 2 – Ordem aparente: caso 1 / variável 1 / MSI

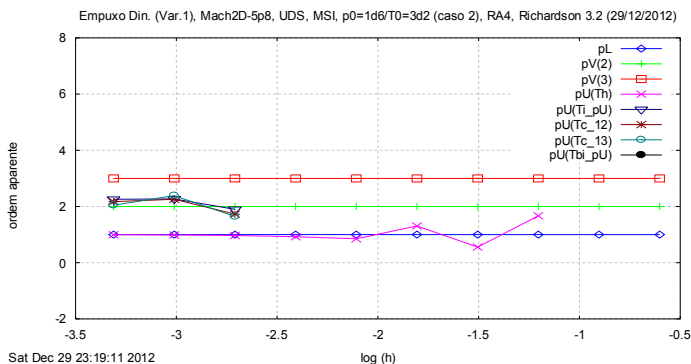


Figura 3 – Ordem aparente: caso 2 / variável 1 / MSI

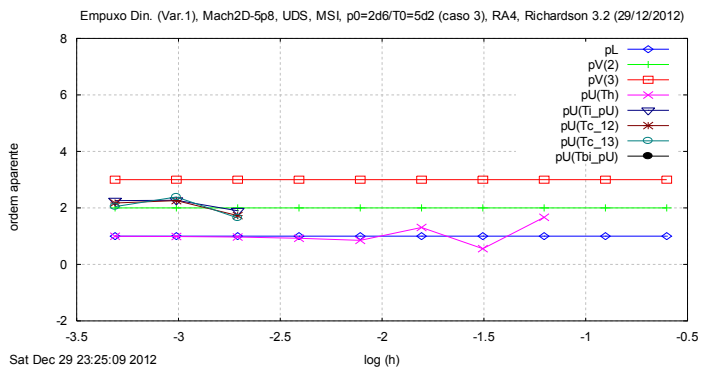


Figura 4 – Ordem aparente: caso 3 / variável 1 / MSI

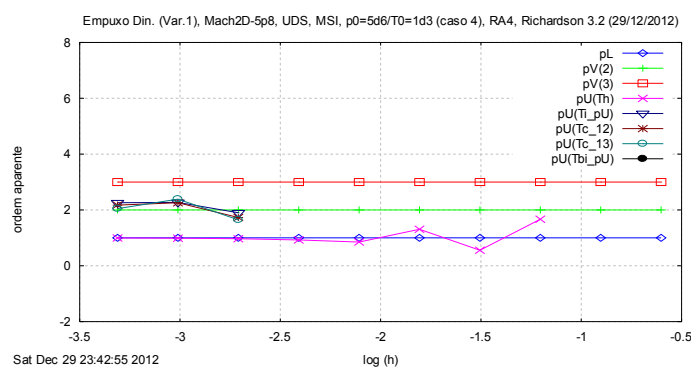


Figura 5 – Ordem aparente: caso 4 / variável 1 / MSI

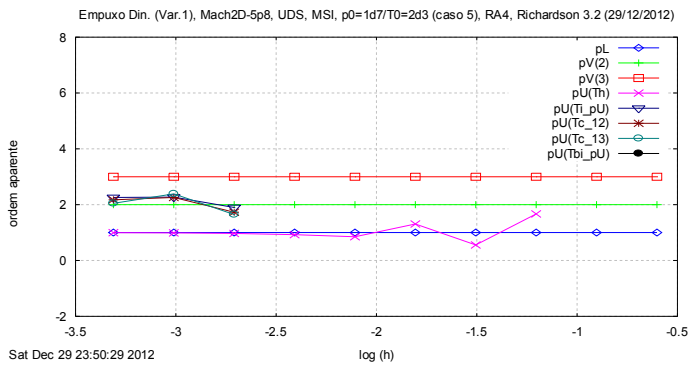


Figura 6 – Ordem aparente: caso 5 / variável 1 / MSI

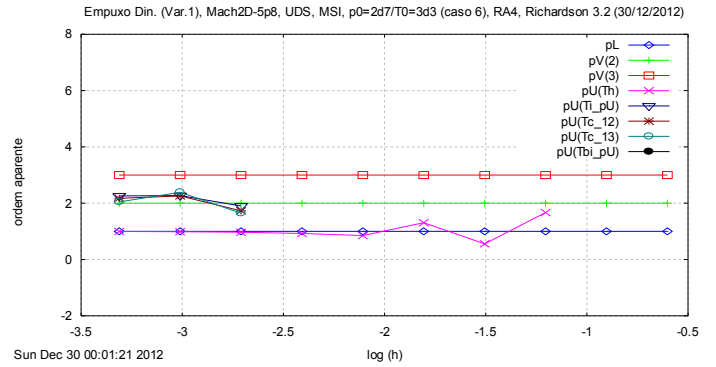


Figura 7 – Ordem aparente: caso 6 / variável 1 / MSI

A tabela 2 mostra os valores de ordem aparente para cada caso e cada malha, do coeficiente de descarga, indicando que esta ordem tende à ordem assintótica à medida que a malha é refinada. O solver utilizado neste caso foi o MSI.

Tabela 2 – Ordem aparente da variável 2 (Coeficiente de descarga [adimensional])

Malha	h	caso 1	caso2	caso3	caso4	caso5	caso6
2x2	2.50E-01						
4x4	1.25E-01						
8x8	6.25E-02	1.359164381649999E+00	1.35916438165021E+00	1.35916438165009E+00	1.35916438165004E+00	1.35916438164992E+00	1.35916438164994E+00
16x16	3.13E-02	1.20620985764060E+00	1.20620985764060E+00	1.20620985764066E+00	1.20620985764059E+00	1.20620985764057E+00	1.20620985764056E+00
32x32	1.56E-02	7.90566556037841E-01	7.90566556037272E-01	7.90566556037737E-01	7.90566556037810E-01	7.90566556037895E-01	7.90566556037864E-01
64x64	7.81E-03	9.51429870314135E-01	9.51429870315509E-01	9.51429870314348E-01	9.51429870314287E-01	9.51429870314135E-01	9.51429870314106E-01
128x128	3.91E-03	9.71077746579775E-01	9.71077746578807E-01	9.71077746579949E-01	9.71077746579772E-01	9.71077746579893E-01	9.71077746580072E-01
256x256	1.95E-03	9.82731266118628E-01	9.82731266118862E-01	9.82731266121551E-01	9.82731266120617E-01	9.82731266121788E-01	9.82731266121670E-01
512x512	9.77E-04	9.90069047071958E-01	9.90069047071724E-01	9.90069047056116E-01	9.90069047063801E-01	9.90069047059373E-01	9.90069047070540E-01
1024x1024	4.88E-04	9.94354815860721E-01	9.94354815804180E-01	9.94354815736101E-01	9.94354815996538E-01	9.94354815847781E-01	9.94354815807880E-01

As Figs. 8, 9, 10, 11, 12 e 13 mostram os resultados da tabela 2 em representação gráfica.

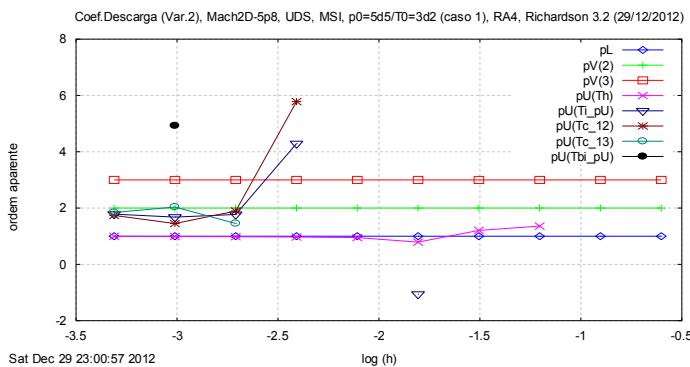


Figura 8 – Ordem aparente: caso 1 / variável 2 / MSI

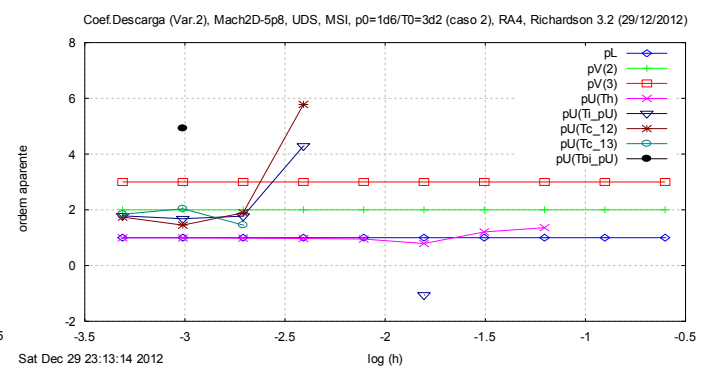


Figura 9 – Ordem aparente: caso 2 / variável 2 / MSI

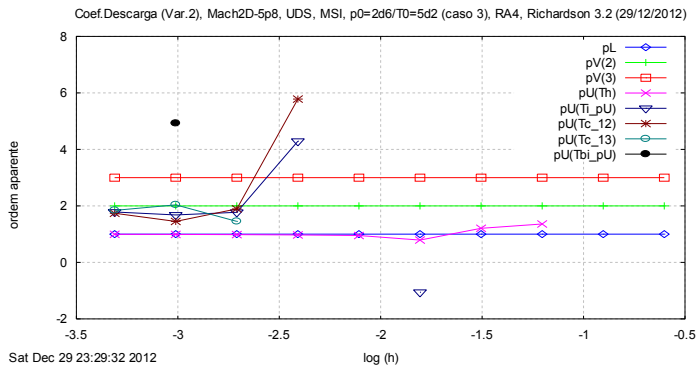


Figura 10 – Ordem aparente: caso 3 / variável 2 / MSI

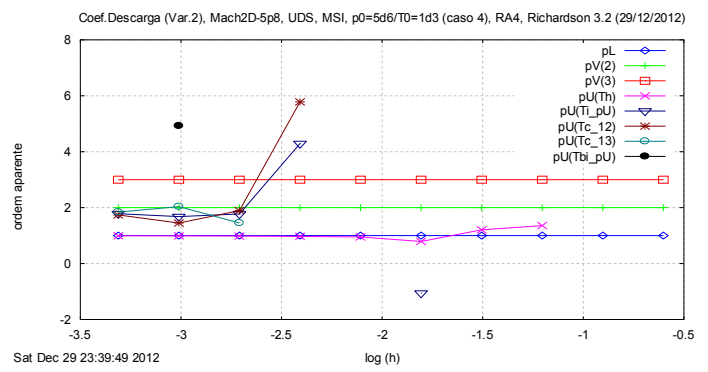


Figura 11 – Ordem aparente: caso 4 / variável 2 / MSI

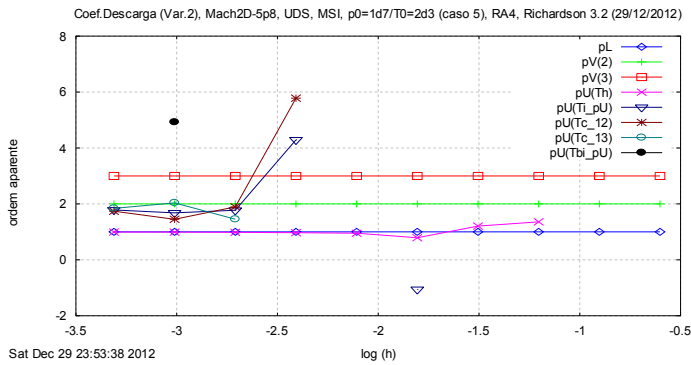


Figura 12 – Ordem aparente: caso 5 / variável 2 / MSI

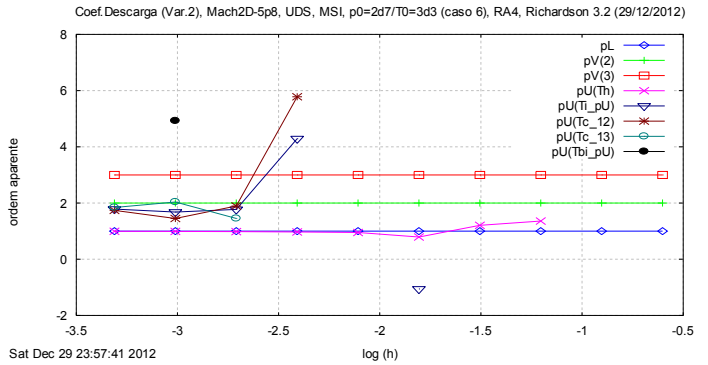


Figura 13 – Ordem aparente: caso 6 / variável 2 / MSI

Conclusões:

Conforme esperado, as variações das condições de estagnação não afetam de forma significativa¹ a tendência da ordem aparente à ordem assintótica à medida que a malha é refinada. Isto foi verificado para as duas variáveis e para todos os casos analisados.

Os valores dos parâmetros para solução como o “dt” não foram otimizados, ou seja, não houve preocupação em obter os melhores valores para cada simulação, e o critério de parada das simulações foi a estabilização do termo dFd^* . Sendo a estabilização definida por um contador de “zeros” para o valor de dFd^* , e no momento de surgimento do décimo quinto zero o programa é finalizado.

Pôde-se verificar que o valor máximo possível para “dt” vai reduzindo à medida que a malha é refinada, tendo variado de $5d^{-5}$ (malha mais grossa) até $1d^{-6}$ (malha mais fina).

No anexo I encontram-se os demais dados das simulações e no anexo II alguns outros gráficos resultantes do Richardson 3p2.

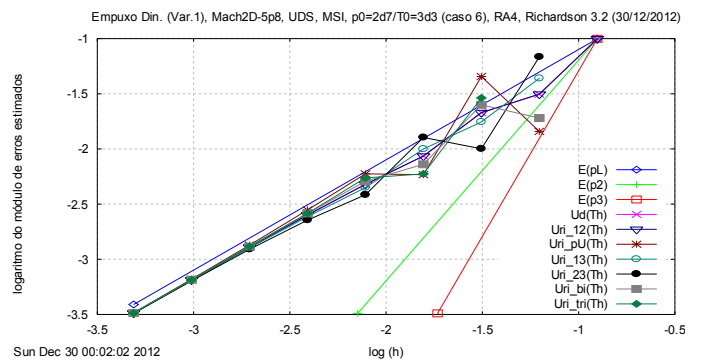
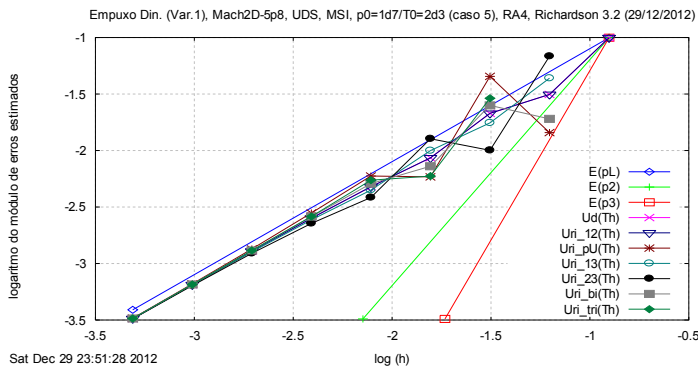
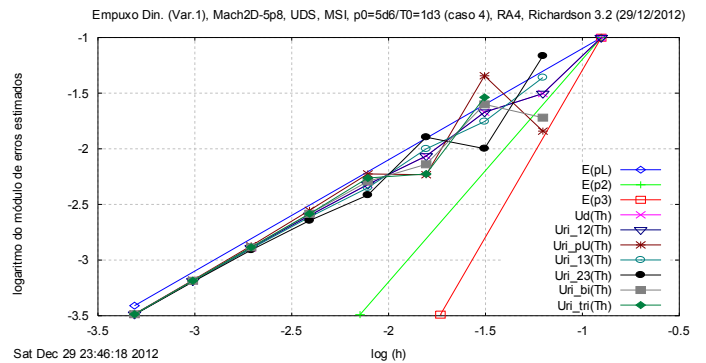
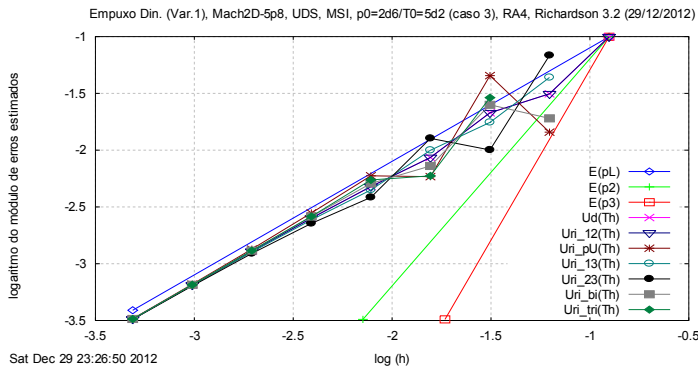
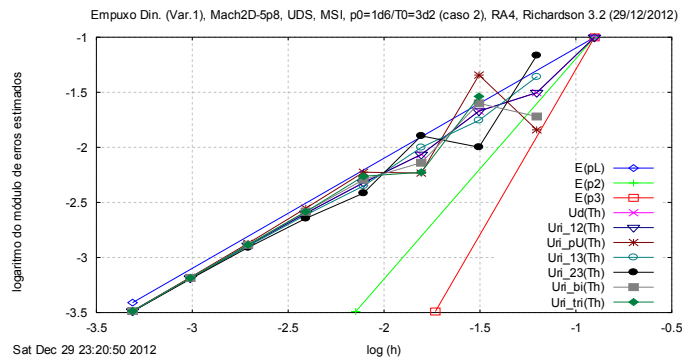
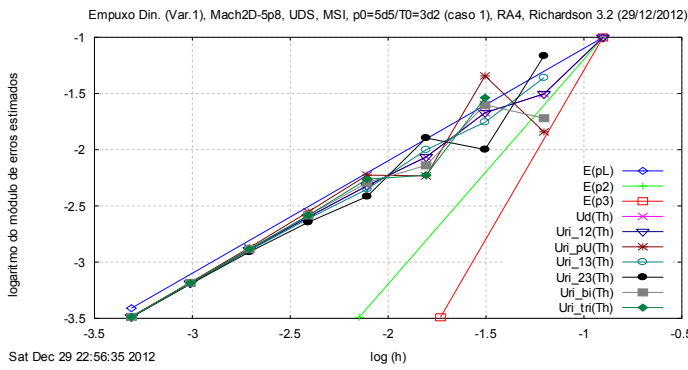
¹ A ordem aparente variou, entre os casos, aproximadamente no décimo algarismo significativo.

ANEXO I

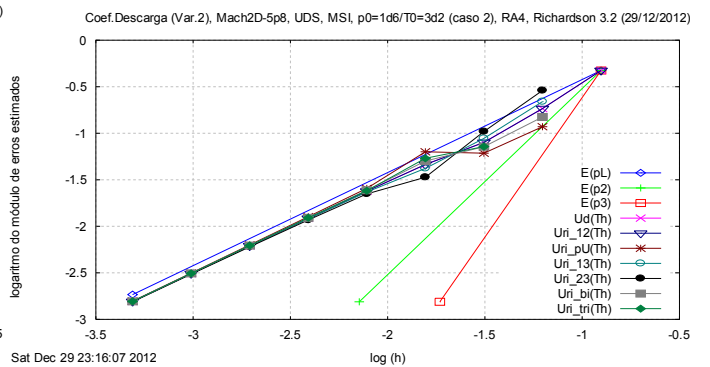
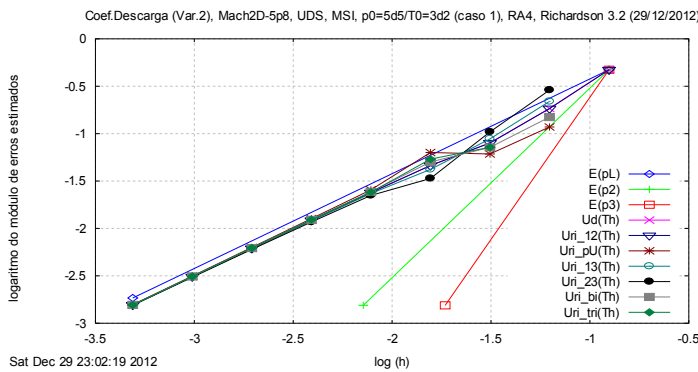
	Simulação	Malha	p0	T0	dt1=dt2	Cd	Fd*	it	t CPU	Memória	itmax	imax	nitm_u	nitm_p
Caso 1 - MSI	EG_4_82	2x2	5d5	3d2	2d-5	1.83079376282207E+00	8.05065191852139E-01	2188	5.07E+00	1.3	200000	6	2	4
	EG_4_83	4x4	5d5	3d2	2d-5	1.35839387351988E+00	9.04701466925413E-01	1669	3.20E+00	1.3	200000	6	2	4
	EG_4_84	8x8	5d5	3d2	2d-5	1.17424861568166E+00	9.36069511577498E-01	1164	3.43E+00	1.3	200000	6	2	4
	EG_4_85	16x16	5d5	3d2	2d-5	1.09443900522860E+00	9.57399623516255E-01	875	2.07E+00	1.6	200000	6	2	4
	EG_4_86	32x32	5d5	3d2	2d-5	1.04829971131105E+00	9.66019864386923E-01	881	6.65E+00	2.5	200000	6	2	4
	EG_4_87	64x64	5d5	3d2	2d-5	1.02444017417133E+00	9.70799812513048E-01	884	2.17E+01	5.6	200000	6	2	4
	EG_4_88	128x128	5d5	3d2	2d-5	1.01226883164491E+00	9.73316923088371E-01	895	1.25E+02	18.58	200000	6	2	4
	EG_4_89	256x256	5d5	3d2	5d-6	1.00610987856235E+00	9.74603181970407E-01	5740	2.64E+03	70	200000	6	2	4
	EG_4_90	512x512	5d5	3d2	5d-6	1.00300913097250E+00	9.75251950881389E-01	6045	4.93E+04	273	500000	6	2	4
	EG_4_91	1024x1024	5d5	3d2	2d-6	1.00145267876807E+00	9.75577364620238E-01	32960	1.39E+05	1,081	500000	6	2	4
Caso 2 - MSI	EG_4_92	2x2	1d6	3d2	5d-5	1.83079376282205E+00	8.05065191852135E-01	928	2.40E+00	1.3	200000	6	2	4
	EG_4_93	4x4	1d6	3d2	9.7d-6	1.35839387351985E+00	9.04701466925385E-01	3254	7.91E+00	1.3	200000	6	2	4
	EG_4_94	8x8	1d6	3d2	9.7d-6	1.17424861568165E+00	9.36069511577488E-01	2271	4.34E+00	1.3	200000	6	2	4
	EG_4_95	16x16	1d6	3d2	9.7d-6	1.09443900522859E+00	9.57399623516249E-01	1715	6.33E+00	1.6	200000	6	2	4
	EG_4_96	32x32	1d6	3d2	9.7d-6	1.04829971131103E+00	9.66019864386899E-01	1689	1.10E+01	2.5	200000	6	2	4
	EG_4_97	64x64	1d6	3d2	9.7d-6	1.02444017417133E+00	9.70799812513046E-01	1747	5.27E+01	5.6	200000	6	2	4
	EG_4_98	128x128	1d6	3d2	9.7d-6	1.01226883164490E+00	9.73316923088369E-01	1737	2.15E+02	18.58	200000	6	2	4
	EG_4_99	256x256	1d6	3d2	5d-6	1.00610987856235E+00	9.74603181970407E-01	5740	2.80E+03	70	200000	6	2	4
	EG_4_100	512x512	1d6	3d2	5d-6	1.00300913097250E+00	9.75251950881389E-01	6046	1.59E+04	273	500000	6	2	4
	EG_4_101	1024x1024	1d6	3d2	3d-6	1.00145267876801E+00	9.75577364620157E-01	15742	2.13E+05	1,081	500000	6	2	4
Caso 3 - MSI	EG_4_102	2x2	2d6	5d2	9.7d-6	1.83079376282209E+00	8.05065191852143E-01	3373	7.81E+00	1.3	200000	6	2	4
	EG_4_103	4x4	2d6	5d2	9.7d-6	1.35839387351987E+00	9.04701466925406E-01	2602	4.79E+00	1.3	200000	6	2	4
	EG_4_104	8x8	2d6	5d2	9.7d-6	1.17424861568165E+00	9.36069511577493E-01	1785	3.32E+00	1.3	200000	6	2	4
	EG_4_105	16x16	2d6	5d2	9.7d-6	1.09443900522859E+00	9.57399623516251E-01	1340	4.66E+00	1.6	200000	6	2	4
	EG_4_106	32x32	2d6	5d2	9.7d-6	1.04829971131104E+00	9.66019864386917E-01	1354	9.16E+00	2.5	200000	6	2	4
	EG_4_107	64x64	2d6	5d2	9.7d-6	1.02444017417133E+00	9.70799812513046E-01	1366	3.04E+01	5.6	200000	6	2	4
	EG_4_108	128x128	2d6	5d2	9.7d-6	1.01226883164491E+00	9.73316923088372E-01	1366	1.74E+02	18.58	200000	6	2	4
	EG_4_109	256x256	2d6	5d2	5.35d-6	1.00610987856236E+00	9.74603181970428E-01	3247	1.60E+03	70	200000	6	2	4
	EG_4_110	512x512	2d6	5d2	5.35d-6	1.00300913097249E+00	9.75251950881373E-01	3381	9.09E+03	273	500000	6	2	4
	EG_4_111	1024x1024	2d6	5d2	2d-6	1.00145267876792E+00	9.75577364620028E-01	20721	9.02E+04	1,081	500000	6	2	4
Caso 4 - MSI	EG_4_112	2x2	5d6	1d3	9.7d-6	1.83079376282208E+00	8.05065191852142E-01	2413	5.68E+00	1.3	200000	6	2	4
	EG_4_113	4x4	5d6	1d3	9.7d-6	1.35839387351988E+00	9.04701466925412E-01	1872	2.96E+00	1.3	200000	6	2	4
	EG_4_114	8x8	5d6	1d3	9.7d-6	1.17424861568166E+00	9.36069511577496E-01	1293	3.76E+00	1.3	200000	6	2	4
	EG_4_115	16x16	5d6	1d3	9.7d-6	1.09443900522859E+00	9.57399623516252E-01	959	2.59E+00	1.6	200000	6	2	4
	EG_4_116	32x32	5d6	1d3	9.7d-6	1.04829971131104E+00	9.66019864386921E-01	979	6.08E+00	2.5	200000	6	2	4
	EG_4_117	64x64	5d6	1d3	9.7d-6	1.02444017417133E+00	9.70799812513047E-01	985	2.17E+01	5.6	200000	6	2	4
	EG_4_118	128x128	5d6	1d3	9.7d-6	1.01226883164491E+00	9.73316923088371E-01	989	1.42E+02	18.58	200000	6	2	4
	EG_4_119	256x256	5d6	1d3	5.35d-6	1.00610987856236E+00	9.74603181970422E-01	1716	8.06E+02	70	200000	6	2	4
	EG_4_120	512x512	5d6	1d3	3d-6	1.00300913097249E+00	9.75251950881383E-01	5149	2.79E+04	273	500000	6	2	4
	EG_4_121	1024x1024	5d6	1d3	1d-6	1.00145267876821E+00	9.75577364620423E-01	37780	1.58E+05	1,081	500000	6	2	4
Caso 5 - MSI	EG_4_122	2x2	1d7	2d3	9.7d-6	1.83079376282206E+00	8.05065191852132E-01	1768	4.09E+00	1.3	200000	6	2	4
	EG_4_123	4x4	1d7	2d3	9.7d-6	1.35839387351989E+00	9.04701466925417E-01	1355	3.14E+00	1.3	200000	6	2	4
	EG_4_124	8x8	1d7	2d3	9.7d-6	1.17424861568166E+00	9.36069511577500E-01	938	1.92E+00	1.3	200000	6	2	4
	EG_4_125	16x16	1d7	2d3	9.7d-6	1.09443900522860E+00	9.57399623516254E-01	692	3.17E+00	1.6	200000	6	2	4
	EG_4_126	32x32	1d7	2d3	9.7d-6	1.04829971131105E+00	9.66019864386923E-01	721	4.69E+00	2.5	200000	6	2	4
	EG_4_127	64x64	1d7	2d3	9.7d-6	1.02444017417133E+00	9.70799812513047E-01	702	1.80E+01	5.6	200000	6	2	4
	EG_4_128	128x128	1d7	2d3	9.7d-6	1.01226883164491E+00	9.73316923088370E-01	706	1.13E+02	18.58	200000	6	2	4
	EG_4_129	256x256	1d7	2d3	5.35d-6	1.00610987856236E+00	9.74603181970425E-01	1243	7.31E+02	70	200000	6	2	4
	EG_4_130	512x512	1d7	2d3	3d-6	1.00300913097249E+00	9.75251950881380E-01	2681	7.48E+03	273	500000	6	2	4
	EG_4_131	1024x1024	1d7	2d3	1d-6	1.00145267876805E+00	9.75577364620199E-01	20520	8.96E+04	1,081	500000	6	2	4
Caso 6 - MSI	EG_4_132	2x2	2d7	3d3	9.7d-6	1.83079376282206E+00	8.05065191852135E-01	1450	2.09E+00	1.3	200000	6	2	4
	EG_4_133	4x4	2d7	3d3	9.7d-6	1.35839387351989E+00	9.04701466925418E-01	1120	2.15E+00	1.3	200000	6	2	4
	EG_4_134	8x8	2d7	3d3	9.7d-6	1.17424861568166E+00	9.36069511577502E-01	785	2.12E+00	1.3	200000	6	2	4
	EG_4_135	16x16	2d7	3d3	9.7d-6	1.09443900522860E+00	9.57399623516256E-01	593	2.26E+00	1.6	200000	6	2	4
	EG_4_136	32x32	2d7	3d3	9.7d-6	1.04829971131105E+00	9.66019864386922E-01	582	3.57E+00	2.5	200000	6	2	4
	EG_4_137	64x64	2d7	3d3	9.7d-6	1.02444017417133E+00	9.70799812513047E-01	580	1.55E+01	5.6	200000	6	2	4
	EG_4_138	128x128	2d7	3d3	9.7d-6	1.01226883164491E+00	9.73316923088370E-01	577	9.27E+01	18.58	200000	6	2	4
	EG_4_139	256x256	2d7	3d3	5.35d-6	1.00610987856236E+00	9.74603181970425E-01	1020	6.09E+02	70	200000	6	2	4
	EG_4_140	512x512	2d7	3d3	1d-6	1.00300913097252E+00	9.75251950881413E-01	13961	3.67E+04	273	500000	6	2	4
	EG_4_141	1024x1024	2d7	3d3	1d-6	1.00145267876804E+00	9.75577364620191E-01	13959	6.13E+04	1,081	500000	6	2	4

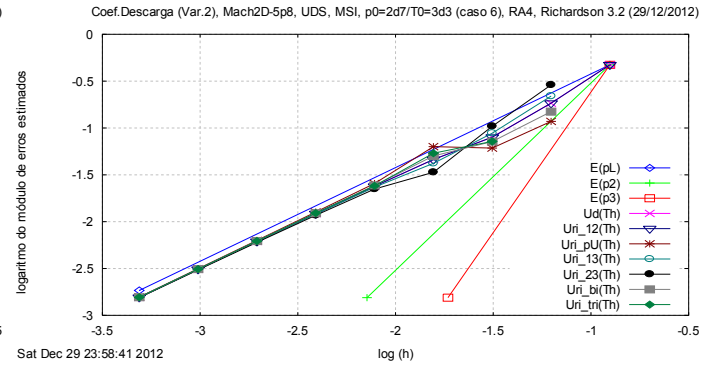
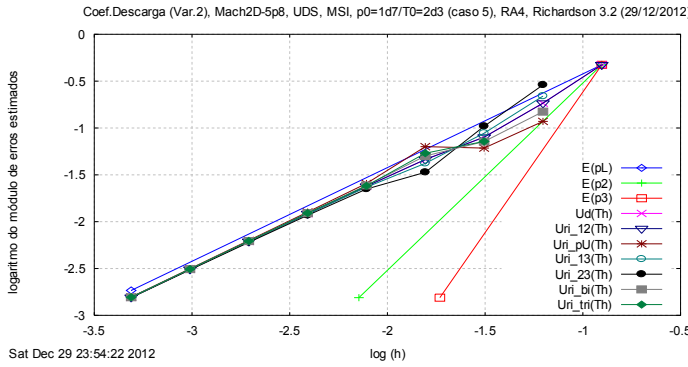
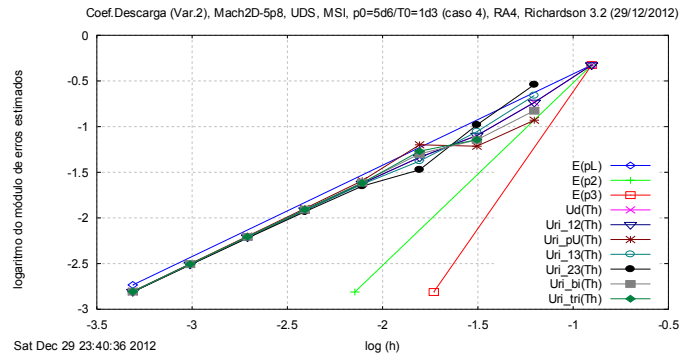
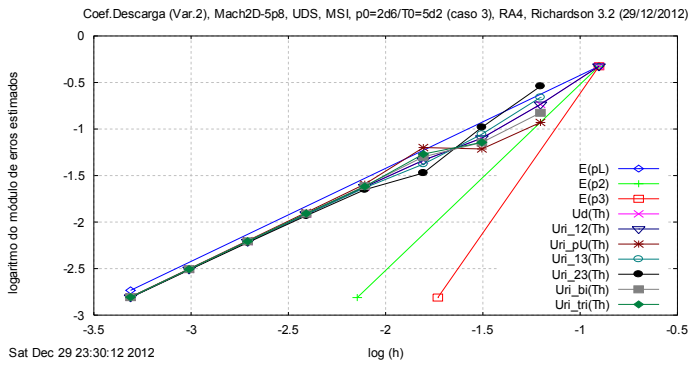
ANEXO II

Variável 1:

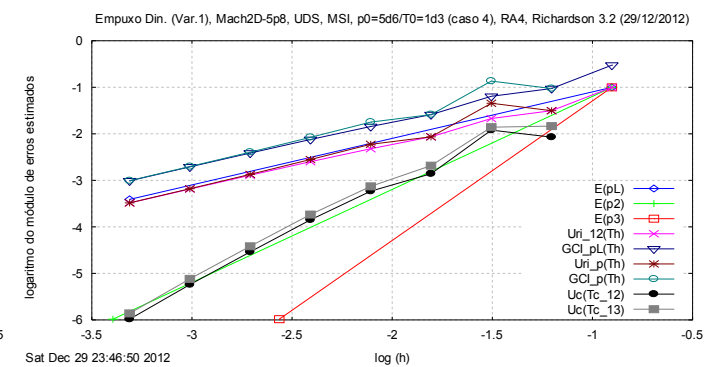
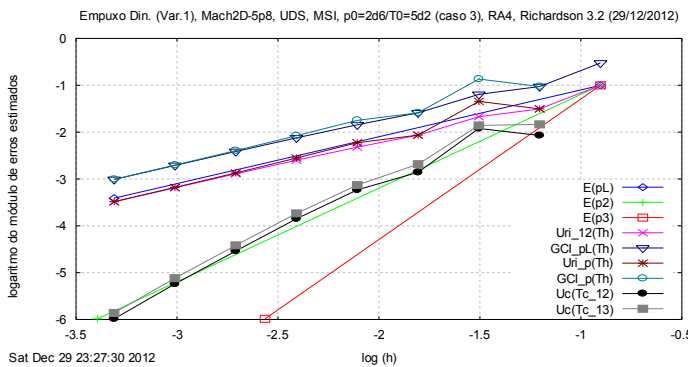
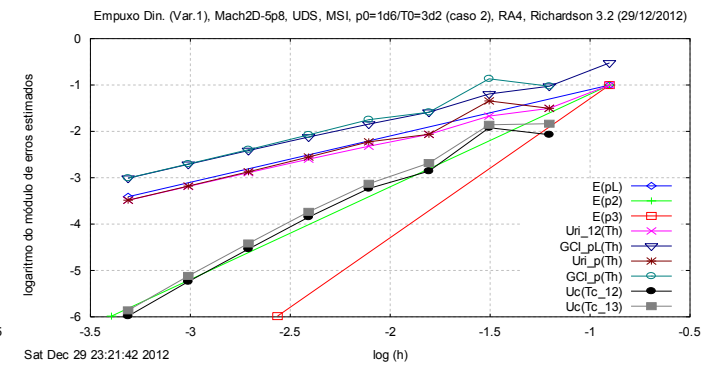
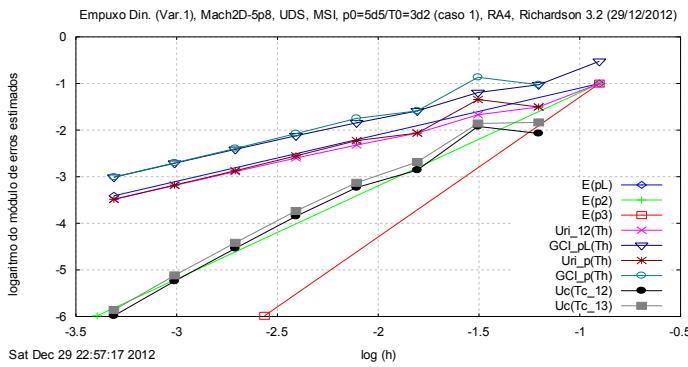


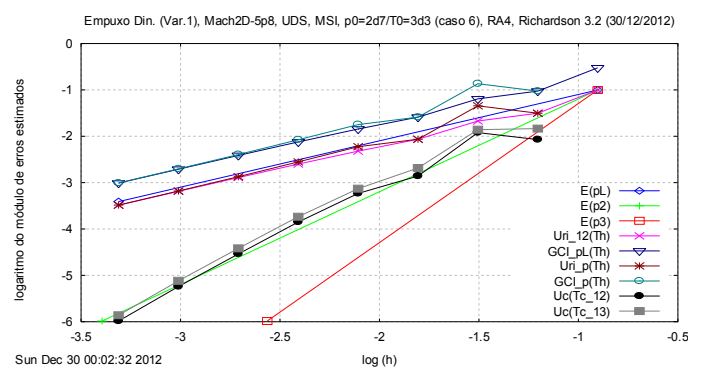
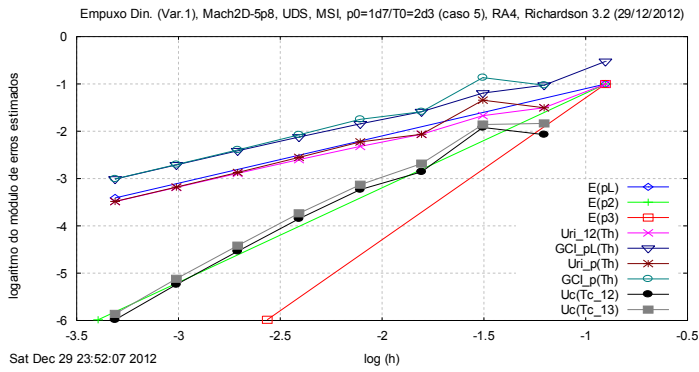
Variável 2:





Variável 1:





Variável 2:

