

# Relatório 4: Otimização do Código Mach2D - Verificação

Jonas Joacir Radtke

21 de novembro de 2012

## 1 Objetivo Geral

Verificação da solução numérica obtida pelo código Mach2D. Para tanto, foi utilizado o código sem efeito  $\Delta t$  e otimizado pelo Diego na etapa 3. Como critério de parada foi estabelecido que o resíduo deve permanecer abaixo da tolerância ( $10^{-15}$ ) por no mínimo 100 iterações consecutivas.

## 2 Caracterização do Computador e do Compilador

Tabela 1: Configuração dos computadores utilizados nas simulações numéricas.

Hardware	Processador	Intel(R) Core(TM) i5-2310
	Frequência [GHz]	2,90
	Arquitetura [bits]	64
	Memória RAM [GB]	8,0
Software	Sistema operacional	Linux
	Descrição	Ubuntu 12.04 LTS
	Kernel	3.2.0-23-generic
	Compilador	GFortran
	Versão	4.6.3

### 3 Dados de Entrada Fixos no Mach2D

Tabela 2: Parâmetros utilizados no arquivo de entrada de dados do Mach2D.

Descrição	Variável	Valor
Kind of grid (1=uniform; 2=Geometric Progression, 3=power law)	<i>kg</i>	1
Coordinate system (1=cylindrical; else cartesian)	<i>coord</i>	1
Perfect gas constant [ $J/(kg \cdot K)$ ]	<i>Rg</i>	286.9
Specific heat ratio (Cpo/Cvo in the chamber)	<i>gamma</i>	1.4
Stagnation pressure in the chamber [ $Pa$ ]	<i>po</i>	1.0E+06
Stagnation temperature in the chamber [ $K$ ]	<i>T0</i>	300
Atmospheric pressure at the sea level [ $Pa$ ]	<i>pr</i>	101325
Gravitational acceleration at the sea level [ $m/s^2$ ]	<i>go</i>	9.80665
Viscosity model (0=Euler; 1=Navier-Stokes)	<i>modvis</i>	0
Constant of the UDS/CDS mixing scheme	$\beta$	0
Turbulence model option (0=laminar; 1=Baldwin-Lomax)	<i>modtur</i>	0
Boundary condition (0=adiabatic; 1=prescribed temperature)	<i>ccTw</i>	0
Maximum number of iterations of the time evolution	<i>itmax</i>	50000
Parada com base no valor do resíduo	<i>tolerance</i>	1.0E-15
Upload backup data and continue computation (0=no; 1=yes)	<i>reload</i>	0
Frequency of saving backup data	<i>wbkp</i>	50000
Frequency of printing in the listing file	<i>wlf</i>	1
Open result files (1=no; 0=yes)	<i>sem_a</i>	1
Visualize the plot (0=yes; 1=no)	<i>sem_g</i>	1
Frequency of writing data for graphics	<i>w_g</i>	1
Write the fields (1=yes; 0=no)	<i>w_cam</i>	1

### 4 Resultados com $RA = 2$

Tabela 3: Tempo de CPU para as diferentes malhas consideradas para a tubeira de razão de expansão igual a 2.

Simulation	$n_x$	$n_y$	$\Delta t$	$it$	$t_{cpu}$
VerR020002	4	4	1.0E-05	18000	6.030000E-01
VerR020004	6	6	1.0E-05	1644	8.100000E-02
VerR020008	10	10	1.0E-05	1025	1.040000E-01
VerR020016	18	18	1.0E-05	901	2.620000E-01
VerR020032	34	34	1.0E-05	976	1.025000E+00
VerR020064	66	66	1.0E-05	977	3.880000E+00
VerR020128	130	130	1.0E-05	974	1.764700E+01
VerR020256	258	258	5.0E-06	2547	1.969770E+02
VerR020512	514	514	2.0E-06	8662	2.924374E+03
VerR021024	1026	1026	1.0E-06	19695	2.743702E+04

Tabela 4: Solução numérica, ordem aparente e estimativas para o coeficiente de descarga ( $C_d$ ).

$n_x$	$n_y$	$h$	$\phi$	$p_U$	$U_{ri}(\phi, p_U)$	$U_{GCI}(\phi, p_U)$
2	2	0.13137313	$1.57777432E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
4	4	0.06568656	$1.28441551E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.03284328	$1.12102860E + 00$	0.84437	$-2.05392739E - 01$	$6.16178216E - 01$
16	16	0.01642164	$1.06179288E + 00$	1.46375	$-3.36901580E - 02$	$1.01070474E - 01$
32	32	0.00821082	$1.03163200E + 00$	0.97379	$-3.12874999E - 02$	$9.38624996E - 02$
64	64	0.00410541	$1.01591010E + 00$	0.93990	$-1.71187924E - 02$	$5.13563772E - 02$
128	128	0.00205271	$1.00792360E + 00$	0.97714	$-8.24577349E - 03$	$2.47373205E - 02$
256	256	0.00102635	$1.00389182E + 00$	0.98615	$-4.11033291E - 03$	$1.23309987E - 02$
152	512	0.00051318	$1.00186328E + 00$	0.99098	$-2.05415480E - 03$	$6.16246439E - 03$
1024	1024	0.00025659	$1.00084475E + 00$	0.99396	$-1.02711667E - 03$	$3.08135001E - 03$

Tabela 5: Solução numérica, ordem aparente e estimativas para a eficiência do empuxo dinâmico ( $F_d^*$ ).

$n_x$	$n_y$	$h$	$\phi$	$p_U$	$U_{ri}(\phi, p_U)$	$U_{GCI}(\phi, p_U)$
2	2	0.13137313	$1.00715771E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
4	4	0.06568656	$8.92311128E - 01$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.03284328	$9.21484581E - 01$	---	---	---
16	16	0.01642164	$9.49860209E - 01$	0.04000	$1.00921409E + 00$	$3.02764227E + 00$
32	32	0.00821082	$9.65219359E - 01$	0.88555	$1.81234514E - 02$	$5.43703542E - 02$
64	64	0.00410541	$9.73394195E - 01$	0.90984	$9.30192220E - 03$	$2.79057666E - 02$
128	128	0.00205271	$9.77694166E - 01$	0.92686	$4.77171690E - 03$	$1.43151507E - 02$
256	256	0.00102635	$9.79900198E - 01$	0.96287	$2.32412419E - 03$	$6.97237258E - 03$
152	512	0.00051318	$9.81016095E - 01$	0.98325	$1.14226928E - 03$	$3.42680785E - 03$
1024	1024	0.00025659	$9.81576619E - 01$	0.99336	$5.65720403E - 04$	$1.69716121E - 03$

## 5 Resultados com $RA = 4$

Tabela 6: Tempo de CPU para as diferentes malhas consideradas para a tubeira de razão de expansão igual a 4.

Simulation	$n_x$	$n_y$	$\Delta t$	$it$	$t_{cpu}$
VerR040002	4	4	1.0E-05	3500	1.210000E-01
VerR040004	6	6	1.0E-05	2608	1.340000E-01
VerR040004b	6	4	1.0E-05	2468	2.090000E-01
VerR040008	10	10	1.0E-05	1800	1.830000E-01
VerR040008b	10	6	1.0E-05	1812	2.650000E-01
VerR040008c	10	4	1.0E-05	1683	1.310000E-01
VerR040016	18	18	1.0E-05	1407	3.910000E-01
VerR040016b	18	10	1.0E-05	1395	2.810000E-01
VerR040016c	18	6	1.0E-05	1367	1.720000E-01
VerR040032	34	34	1.0E-05	1419	1.454000E+00
VerR040032b	34	18	1.0E-05	1413	8.880000E-01
VerR040032c	34	10	1.0E-05	1409	4.390000E-01
VerR040064	66	66	1.0E-05	1476	5.835000E+00
VerR040064b	66	34	1.0E-05	1465	3.688000E+00
VerR040064c	66	18	1.0E-05	1396	1.653000E+00
VerR040128	130	130	1.0E-05	1583	2.848000E+01
VerR040128b	130	66	1.0E-05	1552	1.689400E+01
VerR040128c	130	34	1.0E-05	1535	6.855000E+00
VerR040256	258	258	5.0E-06	5649	4.382210E+02
VerR040256b	258	130	1.0E-05	1631	8.623000E+01
VerR040256c	258	66	1.0E-05	1617	3.285700E+01
VerR040512	514	514	5.0E-06	5882	3.595699E+03
VerR040512b	514	258	5.0E-06	5910	1.945506E+03
VerR040512c	514	130	5.0E-06	5874	7.177810E+02
VerR041024	1026	1026	2.0E-06	32995	5.074872E+04
VerR041024b	1026	514	2.0E-06	33172	3.093827E+04
VerR041024c	1026	258	2.0E-06	33243	1.506347E+04
VerR042048b	2050	1026	1.0E-06	116378	3.512518E+05
VerR042048c	2050	514	1.0E-06	116041	1.776832E+05

Tabela 7: Solução numérica, ordem aparente e estimativas para o coeficiente de descarga ( $C_d$ ).

$n_x$	$n_y$	$h$	$\phi$	$p_U$	$U_{ri}(\phi, p_U)$	$U_{GCI}(\phi, p_U)$
2	2	0.20412415	$1.82678786E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
4	4	0.10206207	$1.35468676E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.05103104	$1.17241408E + 00$	1.37300	$-1.14631013E - 01$	$3.43893040E - 01$
16	16	0.02551552	$1.09350736E + 00$	1.20788	$-6.02352276E - 02$	$1.80705683E - 01$
32	32	0.01275776	$1.04785042E + 00$	0.78931	$-6.26938135E - 02$	$1.88081441E - 01$
64	64	0.00637888	$1.02419909E + 00$	0.94891	$-2.54201288E - 02$	$7.62603864E - 02$
128	128	0.00318944	$1.01211711E + 00$	0.96906	$-1.26173139E - 02$	$3.78519417E - 02$
256	256	0.00159472	$1.00599871E + 00$	0.98163	$-6.27724942E - 03$	$1.88317483E - 02$
512	512	0.00079736	$1.00291740E + 00$	0.98961	$-3.12617410E - 03$	$9.37852230E - 03$
1024	1024	0.00039868	$1.00137055E + 00$	0.99421	$-1.55933538E - 03$	$4.67800614E - 03$

Tabela 8: Solução numérica, ordem aparente e estimativas para a eficiência do empuxo dinâmico ( $F_d^*$ ).

$n_x$	$n_y$	$h$	$\phi$	$p_U$	$U_{ri}(\phi, p_U)$	$U_{GCI}(\phi, p_U)$
2	2	0.20412415	$8.00398999E - 01$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
4	4	0.10206207	$8.96027670E - 01$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.05103104	$9.25927597E - 01$	1.67730	$1.36014418E - 02$	$4.08043253E - 02$
16	16	0.02551552	$9.47062768E - 01$	0.50050	$5.09649543E - 02$	$1.52894863E - 01$
32	32	0.01275776	$9.55945845E - 01$	1.25051	$6.44045515E - 03$	$1.93213654E - 02$
64	64	0.00637888	$9.60901615E - 01$	0.84195	$6.25355979E - 03$	$1.87606794E - 02$
128	128	0.00318944	$9.63505730E - 01$	0.92832	$2.88368018E - 03$	$8.65104055E - 03$
256	256	0.00159472	$9.64833797E - 01$	0.97147	$1.38220470E - 03$	$4.14661411E - 03$
512	512	0.00079736	$9.65503087E - 01$	0.98862	$6.79972309E - 04$	$2.03991693E - 03$
1024	1024	0.00039868	$9.65838715E - 01$	0.99577	$3.37602703E - 04$	$1.01280811E - 03$

Tabela 9: Solução numérica, ordem aparente e estimativas para o coeficiente de descarga ( $C_d$ ).

$n_x$	$n_y$	$h$	$\phi$	$p_U$	$U_{ri}(\phi, p_U)$	$U_{GCI}(\phi, p_U)$
4	2	0.10206207	$1.36155204E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	4	0.05103104	$1.17296050E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
16	8	0.02551552	$1.09315044E + 00$	1.24062	$-5.85544888E - 02$	$1.75663466E - 01$
32	16	0.01275776	$1.04764929E + 00$	0.81067	$-6.03445606E - 02$	$1.81033682E - 01$
64	32	0.00637888	$1.02411914E + 00$	0.95139	$-2.51999212E - 02$	$7.55997635E - 02$
128	64	0.00318944	$1.01208791E + 00$	0.96773	$-1.25881728E - 02$	$3.77645184E - 02$
256	128	0.00159472	$1.00598804E + 00$	0.97993	$-6.27317301E - 03$	$1.88195190E - 02$
512	256	0.00079736	$1.00291336E + 00$	0.98834	$-3.12497913E - 03$	$9.37493739E - 03$
1024	512	0.00039868	$1.00136896E + 00$	0.99338	$-1.55867394E - 03$	$4.67602181E - 03$
2048	1024	0.00019934	$1.00059475E + 00$	0.99627	$-7.78222696E - 04$	$2.33466809E - 03$

Tabela 10: Solução numérica, ordem aparente e estimativas para o coeficiente de descarga ( $C_d$ ).

$n_x$	$n_y$	$h$	$\phi$	$p_U$	$U_{ri}(\phi, p_U)$	$U_{GCI}(\phi, p_U)$
8	2	0.05103104	$1.17556448E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
16	4	0.02551552	$1.09326273E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
32	8	0.01275776	$1.04747887E + 00$	0.84608	$-5.74009389E - 02$	$1.72202817E - 01$
64	16	0.00637888	$1.02402142E + 00$	0.96479	$-2.46458105E - 02$	$7.39374316E - 02$
128	32	0.00318944	$1.01204584E + 00$	0.96995	$-1.24905097E - 02$	$3.74715290E - 02$
256	64	0.00159472	$1.00597095E + 00$	0.97917	$-6.25423299E - 03$	$1.87626990E - 02$
512	128	0.00079736	$1.00290640E + 00$	0.98719	$-3.11971843E - 03$	$9.35915530E - 03$
1024	256	0.00039868	$1.00136606E + 00$	0.99242	$-1.55665908E - 03$	$4.66997724E - 03$
2048	512	0.00019934	$1.00059351E + 00$	0.99556	$-7.77329219E - 04$	$2.33198766E - 03$

## 6 Resultados com $RA = 8$

Tabela 11: Tempo de CPU para as diferentes malhas consideradas para a tubeira de razão de expansão igual a 8.

Simulation	$n_x$	$n_y$	$\Delta t$	$it$	$t_{cpu}$
VerR080002	4	4	1.0E-05	8000	4.320000E-01
VerR080004	6	6	1.0E-05	6504	3.980000E-01
VerR080008	10	10	1.0E-05	4100	4.720000E-01
VerR080016	18	18	1.0E-05	2713	7.970000E-01
VerR080032	34	34	1.0E-05	2274	2.436000E+00
VerR080064	66	66	1.0E-05	2279	9.895000E+00
VerR080128	130	130	1.0E-05	2358	4.881100E+01
VerR080256	258	258	5.0E-06	8229	9.714590E+02
VerR080512	514	514	2.0E-06	40510	1.822997E+04
VerR081024	1026	1026	1.0E-06	123337	2.190056E+05

Tabela 12: Solução numérica, ordem aparente e estimativas para o coeficiente de descarga ( $C_d$ ).

$n_x$	$n_y$	$h$	$\phi$	$p_U$	$U_{ri}(\phi, p_U)$	$U_{GCI}(\phi, p_U)$
2	2	0.27601533	$1.77587058E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
4	4	0.13800767	$1.44869186E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.06900383	$1.24781339E + 00$	0.70376	$-3.19493872E - 01$	$9.58481617E - 01$
16	16	0.03450192	$1.12793440E + 00$	0.74474	$-1.77420560E - 01$	$5.32261679E - 01$
32	32	0.01725096	$1.06464400E + 00$	0.92152	$-7.07858971E - 02$	$2.12357691E - 01$
64	64	0.00862548	$1.03266686E + 00$	0.98495	$-3.26551155E - 02$	$9.79653464E - 02$
128	128	0.00431274	$1.01638606E + 00$	0.97387	$-1.68870139E - 02$	$5.06610416E - 02$
256	256	0.00215637	$1.00814283E + 00$	0.98189	$-8.45413641E - 03$	$2.53624092E - 02$
512	512	0.00107818	$1.00399157E + 00$	0.98966	$-4.21144004E - 03$	$1.26343201E - 02$
1024	1024	0.00053909	$1.00190785E + 00$	0.99439	$-2.10000050E - 03$	$6.30000151E - 03$

Tabela 13: Solução numérica, ordem aparente e estimativas para a eficiência do empuxo dinâmico ( $F_d^*$ ).

$n_x$	$n_y$	$h$	$\phi$	$p_U$	$U_{ri}(\phi, p_U)$	$U_{GCI}(\phi, p_U)$
2	2	0.27601533	$7.83353406E - 01$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
4	4	0.13800767	$9.45821185E - 01$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.06900383	$9.54516397E - 01$	4.22379	$4.91678770E - 04$	$1.47503631E - 03$
16	16	0.03450192	$9.49829129E - 01$	---	---	---
32	32	0.01725096	$9.49044163E - 01$	2.57805	$-1.57899419E - 04$	$4.73698256E - 04$
64	64	0.00862548	$9.49479009E - 01$	---	---	---
128	128	0.00431274	$9.49722212E - 01$	0.83834	$3.08636844E - 04$	$9.25910533E - 04$
256	256	0.00215637	$9.49823556E - 01$	1.26292	$7.23980672E - 05$	$2.17194202E - 04$
512	512	0.00107818	$9.49865884E - 01$	1.25955	$3.03598670E - 05$	$9.10796010E - 05$
1024	1024	0.00053909	$9.49884452E - 01$	1.18877	$1.45114157E - 05$	$4.35342471E - 05$

## 7 Resultados com $RA = 16$

Tabela 14: Tempo de CPU para as diferentes malhas consideradas para a tubeira de razão de expansão igual a 16.

Simulation	$n_x$	$n_y$	$\Delta t$	$it$	$t_{cpu}$
VerR160002	4	4	1.0E-05	21000	8.950000E-01
VerR160004	6	6	1.0E-05	16007	9.470000E-01
VerR160008	10	10	1.0E-05	8326	1.037000E+00
VerR160016	18	18	1.0E-05	6263	1.878000E+00
VerR160032	34	34	1.0E-05	4636	4.574000E+00
VerR160064	66	66	1.0E-05	3851	1.578500E+01
VerR160128	130	130	1.0E-05	3834	7.327700E+01
VerR160256	258	258	5.0E-06	11100	9.004480E+02
VerR160512	514	514	5.0E-06	11277	6.608686E+03
VerR161024	1026	1026	2.0E-06	47136	9.284714E+04

Tabela 15: Solução numérica, ordem aparente e estimativas para o coeficiente de descarga ( $C_d$ ).

$n_x$	$n_y$	$h$	$\phi$	$p_U$	$U_{ri}(\phi, p_U)$	$U_{GCI}(\phi, p_U)$
2	2	0.35355339	$1.65737676E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
4	4	0.17677670	$1.57209365E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.08838835	$1.33886324E + 00$	---	---	---
16	16	0.04419417	$1.16549648E + 00$	0.42793	$-5.02074774E - 01$	$1.50622432E + 00$
32	32	0.02209709	$1.08271461E + 00$	1.06644	$-7.56510104E - 02$	$2.26953031E - 01$
64	64	0.01104854	$1.04177460E + 00$	1.01580	$-4.00575765E - 02$	$1.20172729E - 01$
128	128	0.00552427	$1.02099445E + 00$	0.97830	$-2.14195541E - 02$	$6.42586623E - 02$
256	256	0.00276214	$1.01046469E + 00$	0.98074	$-1.08167119E - 02$	$3.24501356E - 02$
512	512	0.00138107	$1.00515740E + 00$	0.98842	$-5.39351380E - 03$	$1.61805414E - 02$
1024	1024	0.00069053	$1.00249203E + 00$	0.99364	$-2.68902559E - 03$	$8.06707677E - 03$

Tabela 16: Solução numérica, ordem aparente e estimativas para a eficiência do empuxo dinâmico ( $F_d^*$ ).

$n_x$	$n_y$	$h$	$\phi$	$p_U$	$U_{ri}(\phi, p_U)$	$U_{GCI}(\phi, p_U)$
2	2	0.35355339	$8.74275653E - 01$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
4	4	0.17677670	$1.03106302E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.08838835	$9.96986966E - 01$	---	---	---
16	16	0.04419417	$9.56546494E - 01$	---	---	---
32	32	0.02209709	$9.44374974E - 01$	1.73229	$-5.24058672E - 03$	$1.57217602E - 02$
64	64	0.01104854	$9.39576599E - 01$	1.34289	$-3.12273912E - 03$	$9.36821736E - 03$
128	128	0.00552427	$9.37084554E - 01$	0.94522	$-2.69271420E - 03$	$8.07814261E - 03$
256	256	0.00276214	$9.35754169E - 01$	0.90549	$-1.52361639E - 03$	$4.57084917E - 03$
512	512	0.00138107	$9.35061036E - 01$	0.94064	$-7.53913305E - 04$	$2.26173992E - 03$
1024	1024	0.00069053	$9.34706611E - 01$	0.96765	$-3.70870251E - 04$	$1.11261075E - 03$

## 8 Resultados com $RA = 32$

Tabela 17: Tempo de CPU para as diferentes malhas consideradas para a tubeira de razão de expansão igual a 32.

Simulation	$n_x$	$n_y$	$\Delta t$	$it$	$t_{cpu}$
VerR320002	4	4	1.0E-05	40000	1.671000E+00
VerR320004	6	6	1.0E-05	23468	1.336000E+00
VerR320008	10	10	1.0E-05	17022	1.868000E+00
VerR320016	18	18	1.0E-05	14061	4.041000E+00
VerR320032	34	34	1.0E-05	11647	1.100900E+01
VerR320064	66	66	1.0E-05	10383	4.268400E+01
VerR320128	130	130	1.0E-05	8899	1.818170E+02
VerR320256	258	258	5.0E-06	14952	1.222230E+03
VerR320512	514	514	1.0E-05	7164	3.320472E+03
VerR321024	1026	1026	5.0E-06	13584	2.370262E+04
VerR322048	2050	2050	2.0E-06	143731	9.333993E+05

Tabela 18: Solução numérica, ordem aparente e estimativas para o coeficiente de descarga ( $C_d$ ).

$n_x$	$n_y$	$h$	$\phi$	$p_U$	$U_{ri}(\phi, p_U)$	$U_{GCI}(\phi, p_U)$
2	2	0.44049471	$1.60173449E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
4	4	0.22024736	$1.70952336E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.11012368	$1.44176106E + 00$	---	---	---
16	16	0.05506184	$1.20841303E + 00$	0.19847	$-1.58223055E + 00$	$4.74669166E + 00$
32	32	0.02753092	$1.10298419E + 00$	1.14621	$-8.68926548E - 02$	$2.60677964E - 01$
64	64	0.01376546	$1.05194662E + 00$	1.04664	$-4.78906696E - 02$	$1.43672009E - 01$
128	128	0.00688273	$1.02615088E + 00$	0.98443	$-2.63618022E - 02$	$7.90854067E - 02$
256	256	0.00344136	$1.01306776E + 00$	0.97943	$-1.34644301E - 02$	$4.03932903E - 02$
512	512	0.00172068	$1.00646593E + 00$	0.98677	$-6.72461392E - 03$	$2.01738418E - 02$
1024	1024	0.00086034	$1.00314818E + 00$	0.99266	$-3.35175425E - 03$	$1.00552627E - 02$
2048	2048	0.00043017	$1.00148475E + 00$	0.99605	$-1.67257574E - 03$	$5.01772723E - 03$

Tabela 19: Solução numérica, ordem aparente e estimativas para a eficiência do empuxo dinâmico ( $F_d^*$ ).

$n_x$	$n_y$	$h$	$\phi$	$p_U$	$U_{ri}(\phi, p_U)$	$U_{GCI}(\phi, p_U)$
2	2	0.44049471	$1.07376762E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
4	4	0.22024736	$1.14037124E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.11012368	$1.04912768E + 00$	---	---	---
16	16	0.05506184	$9.68243494E - 01$	0.17387	$-6.31529080E - 01$	$1.89458724E + 00$
32	32	0.02753092	$9.42608937E - 01$	1.65777	$-1.18938453E - 02$	$3.56815360E - 02$
64	64	0.01376546	$9.31933837E - 01$	1.26384	$-7.61777350E - 03$	$2.28533205E - 02$
128	128	0.00688273	$9.26449588E - 01$	0.96088	$-5.79422943E - 03$	$1.73826883E - 02$
256	256	0.00344136	$9.23564289E - 01$	0.92657	$-3.20319962E - 03$	$9.60959885E - 03$
512	512	0.00172068	$9.22075262E - 01$	0.95435	$-1.58794205E - 03$	$4.76382616E - 03$
1024	1024	0.00086034	$9.21318412E - 01$	0.97629	$-7.82354966E - 04$	$2.34706490E - 03$
2048	2048	0.00043017	$9.20936835E - 01$	0.98803	$-3.87987709E - 04$	$1.16396313E - 03$



## 9 Resultados com RA = 64

Tabela 20: Tempo de CPU para as diferentes malhas consideradas para a tubeira de razão de expansão igual a 64.

Simulation	$n_x$	$n_y$	$\Delta t$	$it$	$t_{cpu}$
VerR640002	4	4	1.0E-05	50000	2.013000E+00
VerR640004	6	6	1.0E-05	31615	1.829000E+00
VerR640008	10	10	1.0E-05	38622	4.462000E+00
VerR640016	18	18	1.0E-05	31364	1.088700E+01
VerR640032	34	34	1.0E-05	31247	4.123900E+01
VerR640064	66	66	1.0E-05	30313	1.302010E+02
VerR640128	130	130	1.0E-05	24219	4.605900E+02
VerR640256	258	258	5.0E-06	28871	3.841536E+03
VerR640512	514	514	2.0E-06	77843	4.075040E+04
VerR641024	1026	1026	2.0E-06	83925	1.560549E+05
VerR642048	2050	2050	1.0E-06	228265	1.312689E+06

Tabela 21: Solução numérica, ordem aparente e estimativas para o coeficiente de descarga ( $C_d$ ).

$n_x$	$n_y$	$h$	$\phi$	$p_U$	$U_{ri}(\phi, p_U)$	$U_{GCI}(\phi, p_U)$
2	2	0.54006172	$4.74702194E - 01$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
4	4	0.27003086	$1.86815221E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.13501543	$1.55291603E + 00$	---	---	---
16	16	0.06750772	$1.25916198E + 00$	0.10182	$-4.01689402E + 00$	$1.20506821E + 01$
32	32	0.03375386	$1.12636618E + 00$	1.14540	$-1.09560870E - 01$	$3.28682611E - 01$
64	64	0.01687693	$1.06356996E + 00$	1.08046	$-5.63341205E - 02$	$1.69002361E - 01$
128	128	0.00843846	$1.03204309E + 00$	0.99410	$-3.17865078E - 02$	$9.53595234E - 02$
256	256	0.00421923	$1.01604562E + 00$	0.97874	$-1.64796553E - 02$	$4.94389658E - 02$
512	512	0.00210962	$1.00796393E + 00$	0.98511	$-8.25107675E - 03$	$2.47532303E - 02$
1024	1024	0.00105481	$1.00389965E + 00$	0.99166	$-4.11168356E - 03$	$1.23350507E - 02$
2048	2048	0.00052740	$1.00186115E + 00$	0.99549	$-2.05131880E - 03$	$6.15395640E - 03$

Tabela 22: Solução numérica, ordem aparente e estimativas para a eficiência do empuxo dinâmico ( $F_d^*$ ).

$n_x$	$n_y$	$h$	$\phi$	$p_U$	$U_{ri}(\phi, p_U)$	$U_{GCI}(\phi, p_U)$
2	2	0.54006172	$5.09503546E - 01$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
4	4	0.27003086	$1.27787197E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.13501543	$1.10810959E + 00$	---	---	---
16	16	0.06750772	$9.86455706E - 01$	0.48073	$-3.07631129E - 01$	$9.22893387E - 01$
32	32	0.03375386	$9.44405315E - 01$	1.53259	$-2.22130362E - 02$	$6.66391087E - 02$
64	64	0.01687693	$9.27075545E - 01$	1.27887	$-1.21486002E - 02$	$3.64458007E - 02$
128	128	0.00843846	$9.18376850E - 01$	0.99438	$-8.76684361E - 03$	$2.63005308E - 02$
256	256	0.00421923	$9.13853222E - 01$	0.94332	$-4.90128930E - 03$	$1.47038679E - 02$
512	512	0.00210962	$9.11533120E - 01$	0.96329	$-2.44284633E - 03$	$7.32853899E - 03$
1024	1024	0.00105481	$9.10358414E - 01$	0.98189	$-1.20476612E - 03$	$3.61429835E - 03$
2048	2048	0.00052740	$9.09767595E - 01$	0.99151	$-5.97832378E - 04$	$1.79349713E - 03$

## 10 Geometrias e Malhas

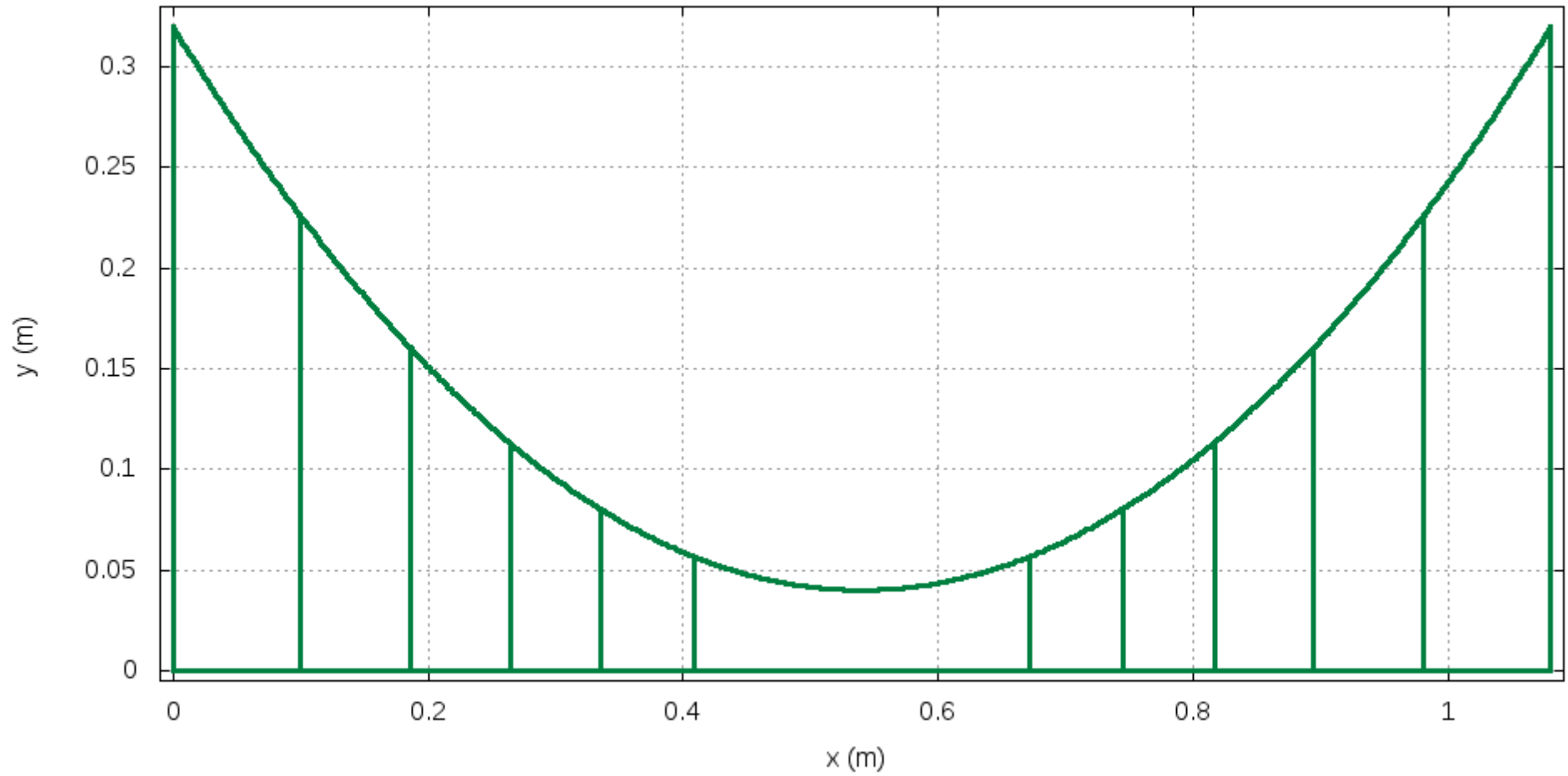
A geometria da tubeira é definida pela seguinte equação (Araki, 2007):

$$y = 0,96x^2 + 0,04 \quad (\text{em metros}) \quad (1)$$

O perfil da parede norte da tubeira, definida pela equação acima, é transladado ao longo do eixo  $x$  para que a entrada da tubeira fique sobre o eixo  $y$  ( $x = 0$ ). Os diferentes valores para a razão de expansão ( $RA = \frac{A_{exit}}{A_g}$ , razão entre as áreas na saída e na garganta) são obtidos truncando a parábola em um comprimento adequado.

O perfil das tubeiras com as diferentes razões de área são apresentados na figura (1). As figuras (2)-(7) apresentam as malhas geradas para a tubeira de razão de expansão igual a 8 para diferentes valores de NX e NY.

Grid Boundary RA = 2, 4, 8, 16, 32 e 64



Tue Nov 20 14:25:35 2012

Figura 1: Geometria da tubeira parabólica com RA = 2, 4, 8, 16, 32 e 64.

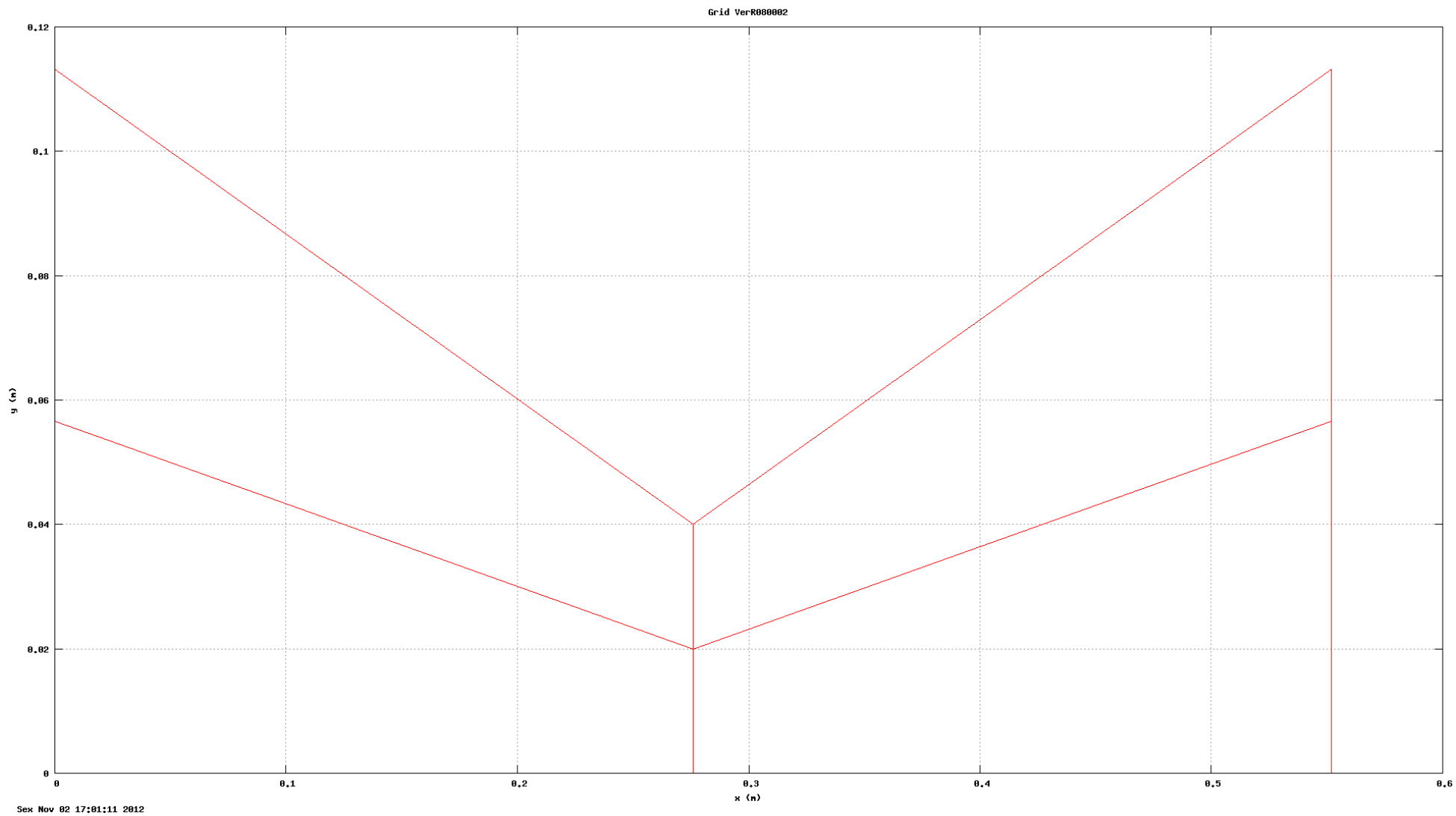


Figura 2: Malha 2x2 da tubeira parabólica de  $RA = 8$ .

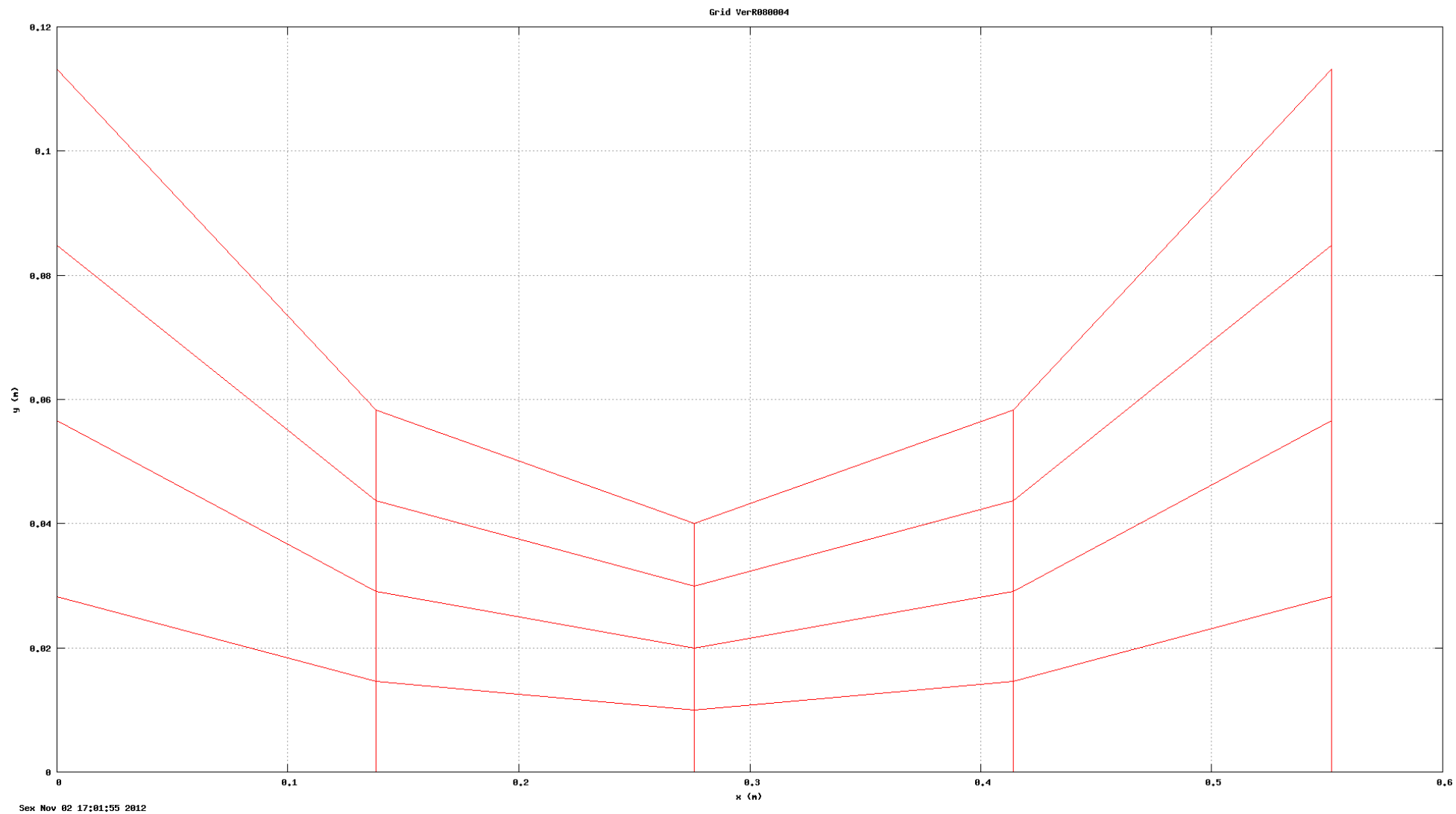


Figura 3: Malha 4x4 da tubeira parabólica de  $RA = 8$ .

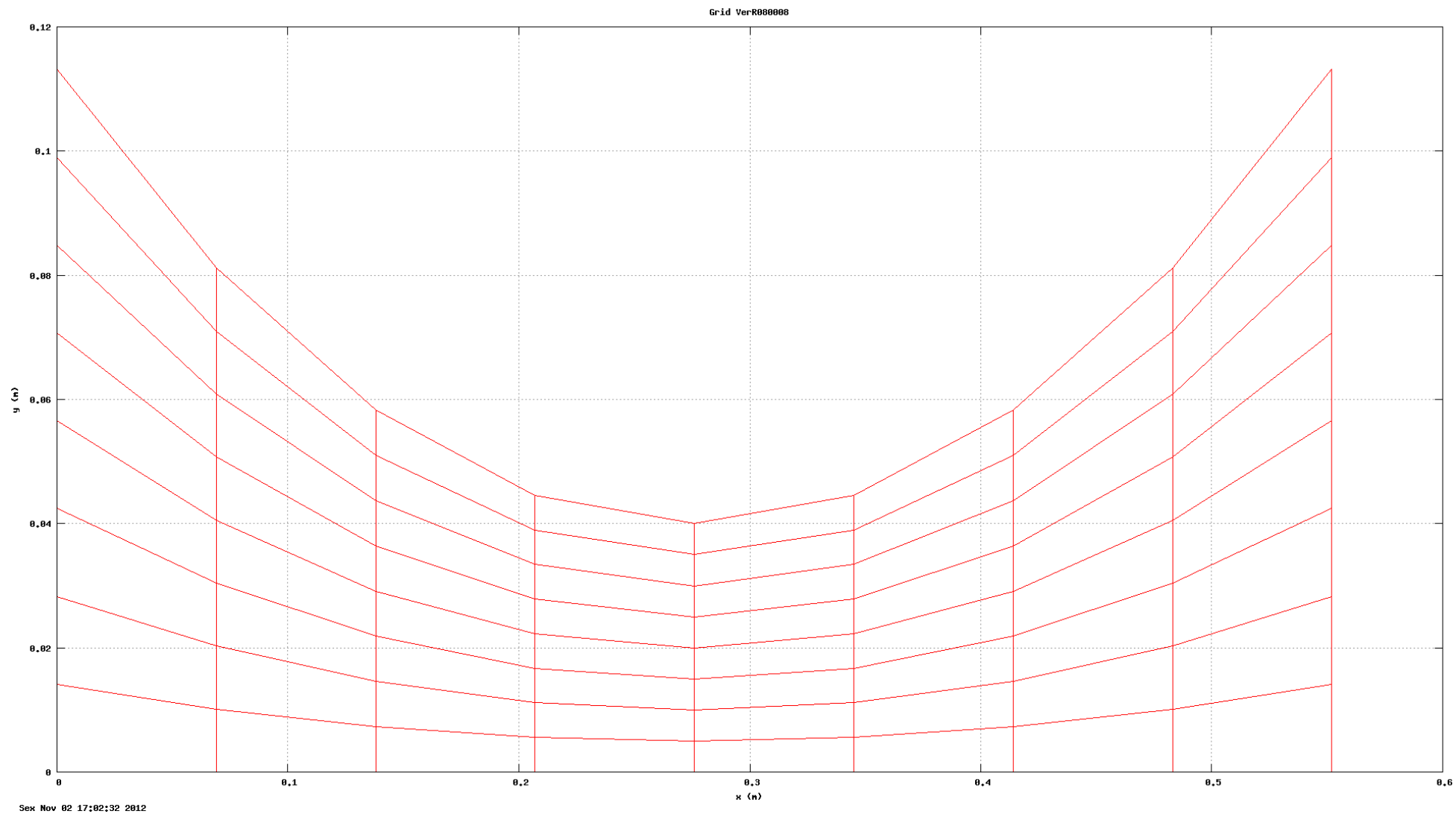


Figura 4: Malha 8x8 da tubeira parabólica de  $RA = 8$ .

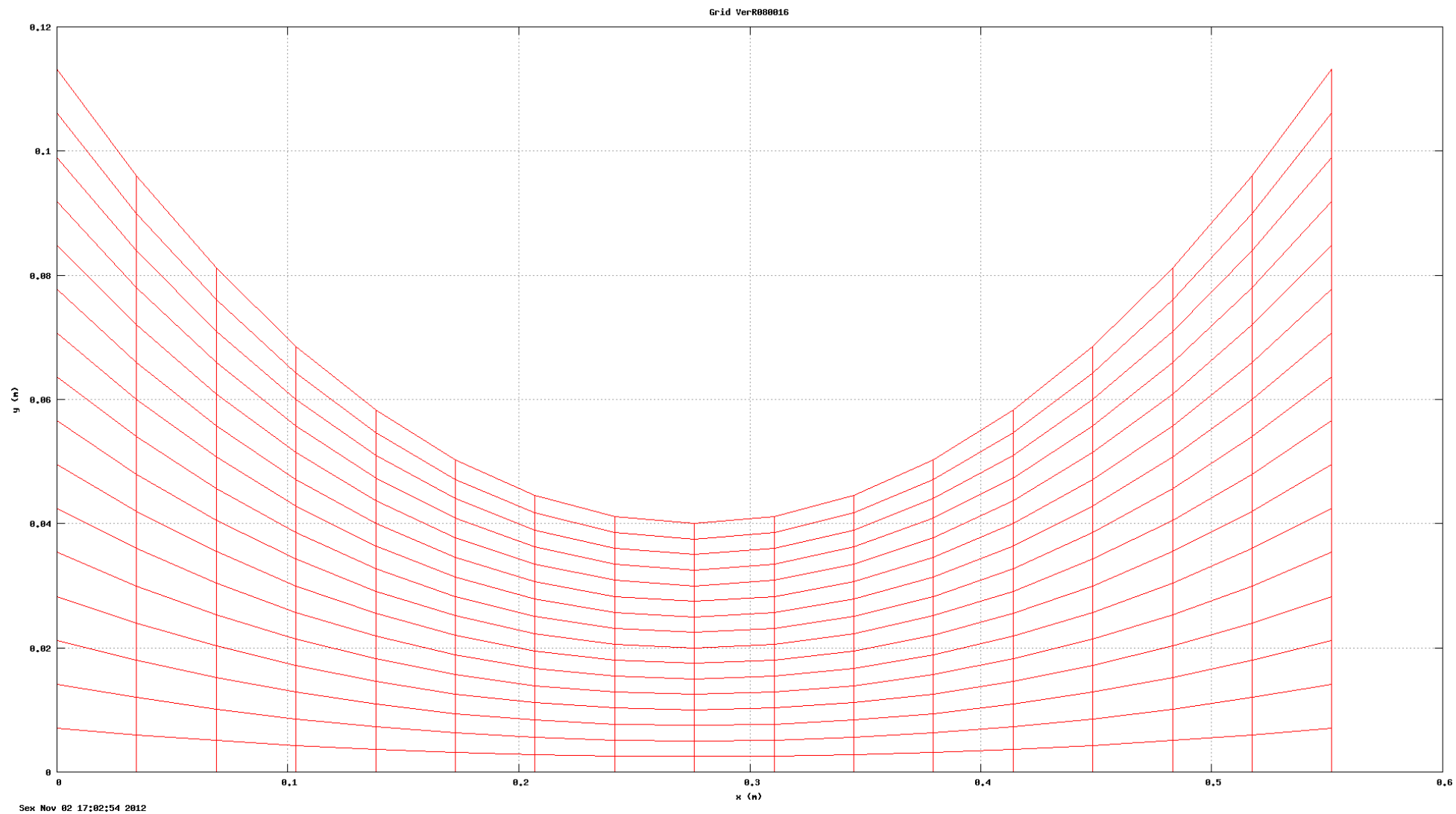


Figura 5: Malha 16x16 da tubeira parabólica de  $RA = 8$ .

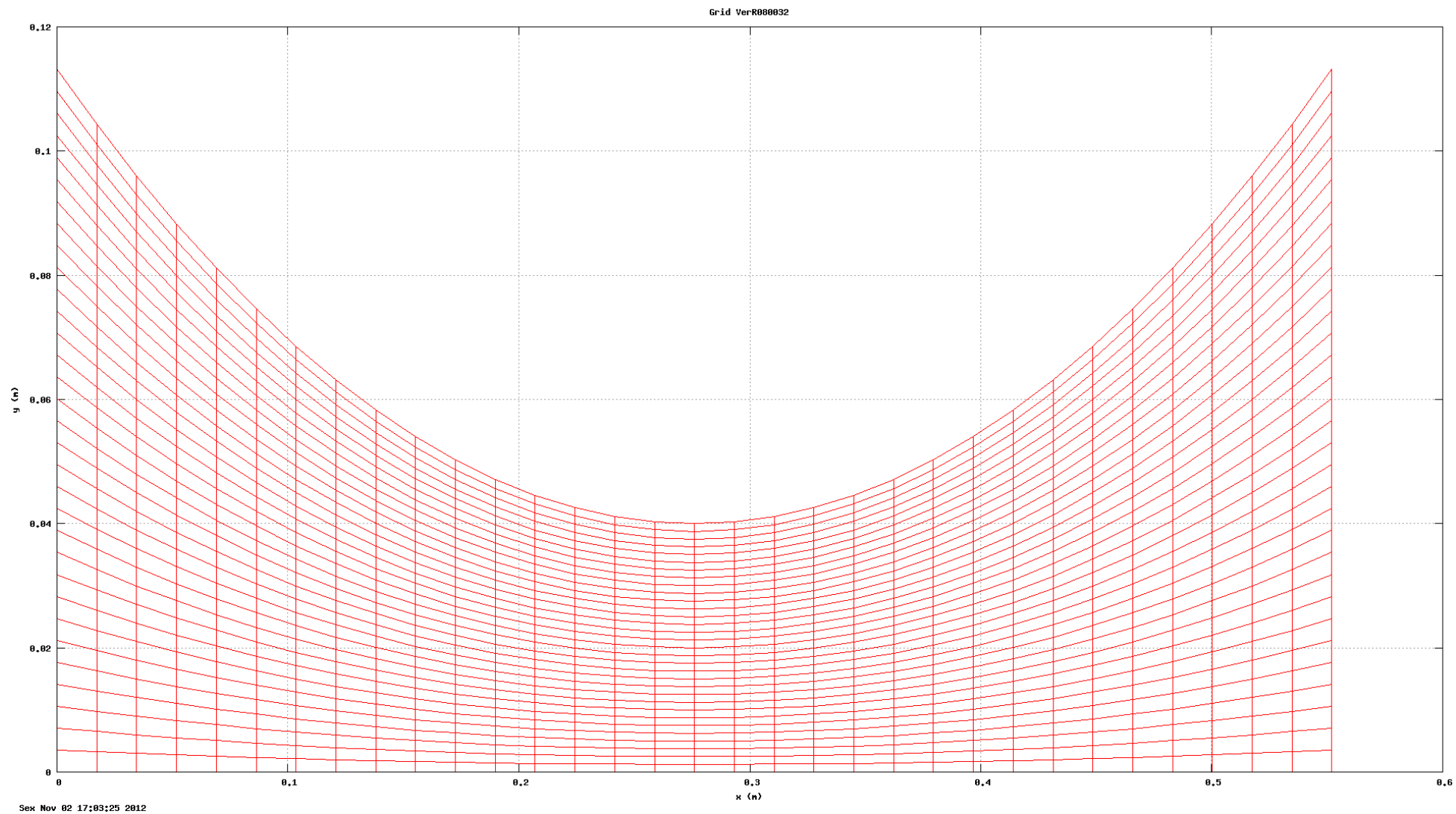


Figura 6: Malha 32x32 da tubeira parabólica de  $RA = 8$ .



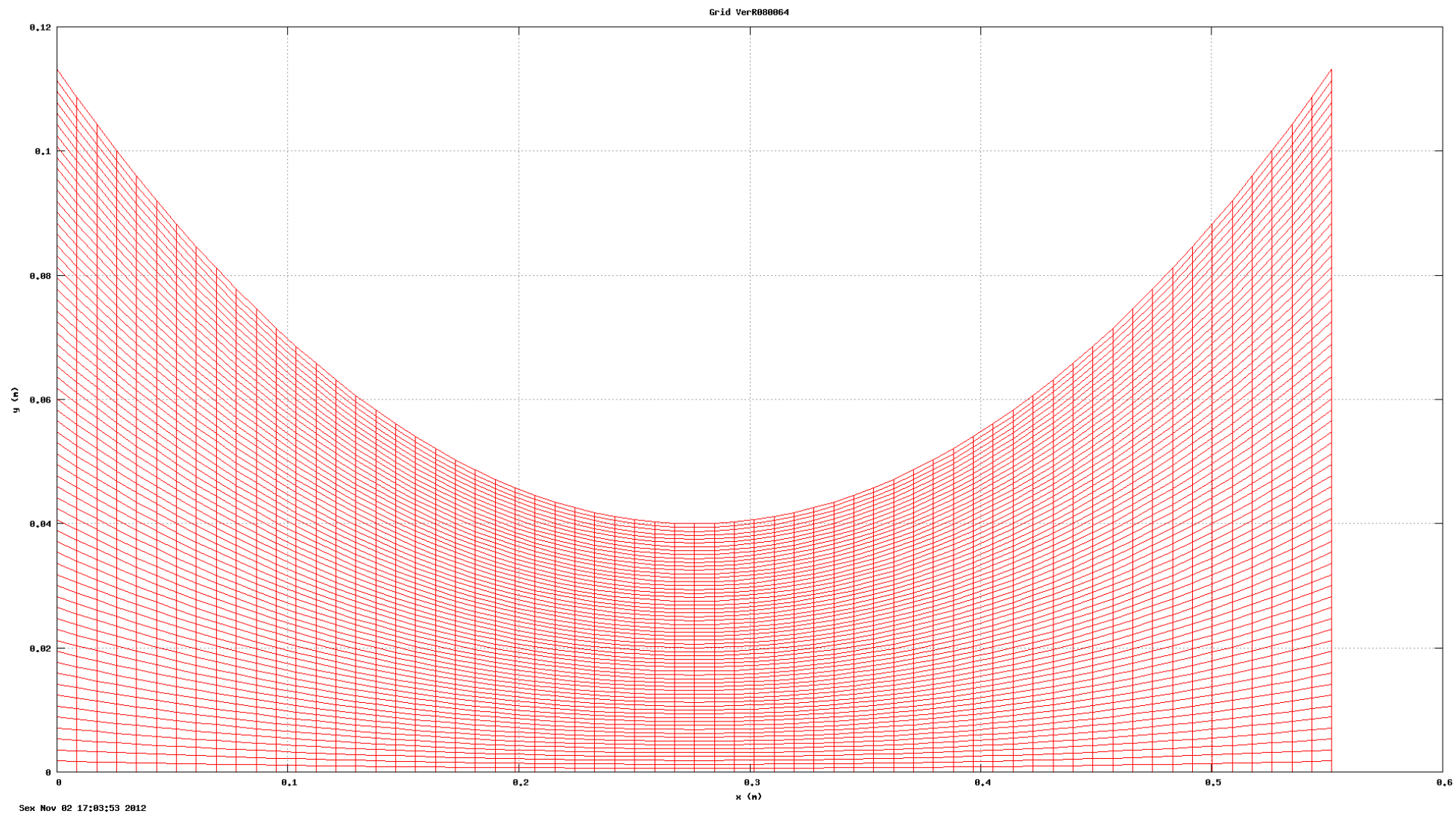


Figura 7: Malha 64x64 da tubeira parabólica de  $RA = 8$ .