

# Relatório 4b: Otimização do Código Mach2D - Verificação

Jonas Joacir Radtke

24 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
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	$n_x$	$n_y$	$\Delta t$	$it$	$t_{cpu}$
VevR020002	4	4	5.0E-05	15000	5.000000E-01
VevR020004	6	6	5.0E-05	1326	6.900000E-02
VevR020008	10	10	5.0E-05	810	1.210000E-01
VevR020016	18	18	5.0E-05	752	2.710000E-01
VevR020032	34	34	5.0E-05	758	8.440000E-01
VevR020064	66	66	5.0E-05	750	3.032000E+00
VevR020128	130	130	2.0E-05	1594	2.922300E+01
VevR020256	258	258	2.0E-05	1515	1.184650E+02
VevR020512	514	514	1.0E-05	2853	1.078319E+03
VevR021024	1026	1026	5.0E-06	5436	7.475341E+03

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	0.50000000	$1.57481188E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
4	4	0.25000000	$1.29555583E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.12500000	$1.12820685E + 00$	0.73873	$-2.50258413E - 01$	$7.50775238E - 01$
16	16	0.06250000	$1.06584894E + 00$	1.42422	$-3.70365613E - 02$	$1.11109684E - 01$
32	32	0.03125000	$1.03373621E + 00$	0.95743	$-3.40955785E - 02$	$1.02286735E - 01$
64	64	0.01562500	$1.01694933E + 00$	0.93581	$-1.83872146E - 02$	$5.51616439E - 02$
128	128	0.00781250	$1.00846281E + 00$	0.98409	$-8.67684365E - 03$	$2.60305309E - 02$
256	256	0.00390625	$1.00420606E + 00$	0.99542	$-4.28391908E - 03$	$1.28517572E - 02$
512	512	0.00195313	$1.00207770E + 00$	1.00001	$-2.12833164E - 03$	$6.38499493E - 03$
1024	1024	0.00097656	$1.00101467E + 00$	1.00156	$-1.06072550E - 03$	$3.18217650E - 03$

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	0.50000000	$1.02779265E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
4	4	0.25000000	$9.10658058E - 01$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.12500000	$9.41011798E - 01$	---	---	---
16	16	0.06250000	$9.69042264E - 01$	0.11488	$3.38189729E - 01$	$1.01456919E + 00$
32	32	0.03125000	$9.83337110E - 01$	0.97150	$1.48768397E - 02$	$4.46305192E - 02$
64	64	0.01562500	$9.90693397E - 01$	0.95845	$7.79916542E - 03$	$2.33974963E - 02$
128	128	0.00781250	$9.94550251E - 01$	0.93155	$4.25077872E - 03$	$1.27523362E - 02$
256	256	0.00390625	$9.96542445E - 01$	0.95307	$2.12845253E - 03$	$6.38535759E - 03$
512	512	0.00195313	$9.97559777E - 01$	0.96957	$1.06165171E - 03$	$3.18495512E - 03$
1024	1024	0.00097656	$9.98075350E - 01$	0.98054	$5.29766747E - 04$	$1.58930024E - 03$

## 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	$n_x$	$n_y$	$\Delta t$	$it$	$t_{cpu}$
VevR040002	4	4	5.0E-05	1800	1.810000E-01
VevR040004	6	6	5.0E-05	1264	1.900000E-01
VevR040008	10	10	5.0E-05	929	1.470000E-01
VevR040016	18	18	5.0E-05	739	2.630000E-01
VevR040032	34	34	5.0E-05	745	8.280000E-01
VevR040064	66	66	5.0E-05	742	2.999000E+00
VevR040128	130	130	5.0E-05	730	1.325100E+01
VevR040256	258	258	2.0E-05	1625	1.378670E+02
VevR040512	514	514	2.0E-05	1624	6.145770E+02
VevR041024	1026	1026	1.0E-05	3071	4.211701E+03
VevR042048	2050	2050	5.0E-06	7358	4.222258E+04

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	0.50000000	$1.83703421E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
4	4	0.25000000	$1.36458503E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.12500000	$1.17740651E + 00$	1.33574	$-1.22815996E - 01$	$3.68447989E - 01$
16	16	0.06250000	$1.09628238E + 00$	1.20621	$-6.20542430E - 02$	$1.86162729E - 01$
32	32	0.03125000	$1.04919222E + 00$	0.78471	$-6.51549949E - 02$	$1.95464985E - 01$
64	64	0.01562500	$1.02486862E + 00$	0.95307	$-2.59871098E - 02$	$7.79613293E - 02$
128	128	0.00781250	$1.01249063E + 00$	0.97458	$-1.28260502E - 02$	$3.84781505E - 02$
256	256	0.00390625	$1.00624166E + 00$	0.98609	$-6.37124196E - 03$	$1.91137259E - 02$
512	512	0.00195313	$1.00310106E + 00$	0.99257	$-3.17318925E - 03$	$9.51956774E - 03$
1024	1024	0.00097656	$1.00152644E + 00$	0.99604	$-1.58328308E - 03$	$4.74984923E - 03$
2048	2048	0.00048828	$1.00073798E + 00$	0.99789	$-7.90777266E - 04$	$2.37233180E - 03$

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	0.50000000	$8.12379916E - 01$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
4	4	0.25000000	$9.19165306E - 01$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.12500000	$9.53384240E - 01$	1.64185	$1.61360426E - 02$	$4.84081279E - 02$
16	16	0.06250000	$9.75638813E - 01$	0.62069	$4.13951100E - 02$	$1.24185330E - 01$
32	32	0.03125000	$9.83927913E - 01$	1.42481	$4.91993123E - 03$	$1.47597937E - 02$
64	64	0.01562500	$9.88391647E - 01$	0.89296	$5.20863105E - 03$	$1.56258932E - 02$
128	128	0.00781250	$9.90734076E - 01$	0.93025	$2.58660597E - 03$	$7.75981790E - 03$
256	256	0.00390625	$9.91936634E - 01$	0.96190	$1.26869121E - 03$	$3.80607362E - 03$
512	512	0.00195313	$9.92546273E - 01$	0.98008	$6.26830402E - 04$	$1.88049121E - 03$
1024	1024	0.00097656	$9.92853258E - 01$	0.98979	$3.11376251E - 04$	$9.34128754E - 04$
2048	2048	0.00048828	$9.93007311E - 01$	0.99473	$1.55185308E - 04$	$4.65555924E - 04$

## 6 Resultados com $RA = 8$

Tabela 9: Tempo de CPU para as diferentes malhas consideradas para a tubeira de razão de expansão igual a 8.

Simulation	$n_x$	$n_y$	$\Delta t$	$it$	$t_{cpu}$
VevR080002	4	4	5.0E-05	3300	2.400000E-01
VevR080004	6	6	5.0E-05	2340	1.720000E-01
VevR080008	10	10	5.0E-05	1638	2.130000E-01
VevR080016	18	18	5.0E-05	974	3.380000E-01
VevR080032	34	34	5.0E-05	852	9.530000E-01
VevR080064	66	66	5.0E-05	849	3.424000E+00
VevR080128	130	130	5.0E-05	846	1.531600E+01
VevR080256	258	258	5.0E-05	844	6.655400E+01
VevR080512	514	514	2.0E-05	1988	8.337400E+02
VevR081024	1026	1026	1.0E-05	3856	5.472278E+03
VevR082048	2050	2050	5.0E-06	11729	6.803984E+04

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

$n_x$	$n_y$	$h$	$\phi$	$p_U$	$U_{ri}(\phi, p_U)$	$U_{GCI}(\phi, p_U)$
2	2	0.50000000	$1.78954675E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
4	4	0.25000000	$1.45793842E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.12500000	$1.25127986E + 00$	0.68223	$-3.41799443E - 01$	$1.02539833E + 00$
16	16	0.06250000	$1.12995652E + 00$	0.76839	$-1.72488598E - 01$	$5.17465793E - 01$
32	32	0.03125000	$1.06569395E + 00$	0.91681	$-7.23733385E - 02$	$2.17120016E - 01$
64	64	0.01562500	$1.03324361E + 00$	0.98575	$-3.31012392E - 02$	$9.93037177E - 02$
128	128	0.00781250	$1.01673483E + 00$	0.97500	$-1.70961927E - 02$	$5.12885782E - 02$
256	256	0.00390625	$1.00837839E + 00$	0.98227	$-8.56563514E - 03$	$2.56969054E - 02$
512	512	0.00195312	$1.00416997E + 00$	0.98961	$-4.26970712E - 03$	$1.28091214E - 02$
1024	1024	0.00097656	$1.00205743E + 00$	0.99430	$-2.12933749E - 03$	$6.38801246E - 03$
2048	2048	0.00048828	$1.00099892E + 00$	0.99695	$-1.06298914E - 03$	$3.18896742E - 03$

Tabela 11: 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	0.50000000	$7.96931237E - 01$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
4	4	0.25000000	$9.74115188E - 01$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.12500000	$9.87003947E - 01$	3.78106	$1.01110754E - 03$	$3.03332262E - 03$
16	16	0.06250000	$9.82883469E - 01$	---	---	---
32	32	0.03125000	$9.81187050E - 01$	1.28032	$-1.18719878E - 03$	$3.56159635E - 03$
64	64	0.01562500	$9.80965417E - 01$	2.93625	$-3.33072571E - 05$	$9.99217714E - 05$
128	128	0.00781250	$9.80842205E - 01$	0.84703	$-1.54247733E - 04$	$4.62743198E - 04$
256	256	0.00390625	$9.80750669E - 01$	0.42874	$-2.64511167E - 04$	$7.93533502E - 04$
512	512	0.00195312	$9.80693598E - 01$	0.68156	$-9.45102604E - 05$	$2.83530781E - 04$
1024	1024	0.00097656	$9.80661699E - 01$	0.83927	$-4.04217211E - 05$	$1.21265163E - 04$
2048	2048	0.00048828	$9.80644824E - 01$	0.91863	$-1.89536389E - 05$	$5.68609166E - 05$

## 7 Resultados com $RA = 16$

Tabela 12: Tempo de CPU para as diferentes malhas consideradas para a tubeira de razão de expansão igual a 16.

Simulation	$n_x$	$n_y$	$\Delta t$	$it$	$t_{cpu}$
VevR160002	4	4	5.0E-05	5600	1.920000E-01
VevR160004	6	6	5.0E-05	3801	1.870000E-01
VevR160008	10	10	5.0E-05	2737	2.750000E-01
VevR160016	18	18	5.0E-05	1788	5.290000E-01
VevR160032	34	34	5.0E-05	1232	1.280000E+00
VevR160064	66	66	5.0E-05	1091	4.405000E+00
VevR160128	130	130	5.0E-05	1079	1.995700E+01
VevR160256	258	258	5.0E-05	1080	8.497500E+01
VevR160512	514	514	5.0E-05	1170	4.069220E+02
VevR161024	1026	1026	2.0E-05	2676	4.091314E+03
VevR162048	2050	2050	1.0E-05	6655	3.705551E+04

Tabela 13: 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	0.50000000	$1.67315675E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
4	4	0.25000000	$1.57909186E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.12500000	$1.34167283E + 00$	---	---	---
16	16	0.06250000	$1.16715095E + 00$	0.44403	$-4.84248946E - 01$	$1.45274684E + 00$
32	32	0.03125000	$1.08358861E + 00$	1.06248	$-7.67667392E - 02$	$2.30300217E - 01$
64	64	0.01562500	$1.04226904E + 00$	1.01603	$-4.04165234E - 02$	$1.21249570E - 01$
128	128	0.00781250	$1.02129756E + 00$	0.97840	$-2.16139907E - 02$	$6.48419722E - 02$
256	256	0.00390625	$1.01066837E + 00$	0.98040	$-1.09240453E - 02$	$3.27721358E - 02$
512	512	0.00195313	$1.00530935E + 00$	0.98799	$-5.44935684E - 03$	$1.63480705E - 02$
1024	1024	0.00097656	$1.00261752E + 00$	0.99338	$-2.71668704E - 03$	$8.15006113E - 03$
2048	2048	0.00048828	$1.00126834E + 00$	0.99650	$-1.35575864E - 03$	$4.06727592E - 03$

Tabela 14: 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	0.50000000	$8.90357581E - 01$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
4	4	0.25000000	$1.05764175E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.12500000	$1.02690852E + 00$	---	---	---
16	16	0.06250000	$9.85093813E - 01$	---	---	---
32	32	0.03125000	$9.71337329E - 01$	1.60390	$-6.74457779E - 03$	$2.02337334E - 02$
64	64	0.01562500	$9.65596066E - 01$	1.26067	$-4.11243804E - 03$	$1.23373141E - 02$
128	128	0.00781250	$9.62586962E - 01$	0.93203	$-3.31412008E - 03$	$9.94236024E - 03$
256	256	0.00390625	$9.60981205E - 01$	0.90608	$-1.83736062E - 03$	$5.51208187E - 03$
512	512	0.00195313	$9.60144464E - 01$	0.94040	$-9.10431854E - 04$	$2.73129556E - 03$
1024	1024	0.00097656	$9.59716477E - 01$	0.96722	$-4.48123205E - 04$	$1.34436962E - 03$
2048	2048	0.00048828	$9.59499897E - 01$	0.98266	$-2.21881860E - 04$	$6.65645581E - 04$

## 8 Resultados com $RA = 32$

Tabela 15: Tempo de CPU para as diferentes malhas consideradas para a tubeira de razão de expansão igual a 32.

Simulation	$n_x$	$n_y$	$\Delta t$	$it$	$t_{cpu}$
VevR320002	4	4	5.0E-05	7500	3.810000E-01
VevR320004	6	6	5.0E-05	3971	2.560000E-01
VevR320008	10	10	5.0E-05	4234	4.620000E-01
VevR320016	18	18	5.0E-05	3362	1.029000E+00
VevR320032	34	34	5.0E-05	2648	2.792000E+00
VevR320064	66	66	5.0E-05	2218	8.745000E+00
VevR320128	130	130	5.0E-05	1871	3.363900E+01
VevR320256	258	258	2.0E-05	3735	3.356930E+02
VevR320512	514	514	1.0E-05	7455	2.873240E+03
VevR321024	1026	1026	5.0E-06	16415	2.355357E+04
VevR322048	2050	2050	3.0E-06	35145	1.971796E+05

Tabela 16: 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	0.50000000	$1.59784340E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
4	4	0.25000000	$1.71184028E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.12500000	$1.44368598E + 00$	---	---	---
16	16	0.06250000	$1.20932889E + 00$	0.19435	$-1.62508220E + 00$	$4.87524659E + 00$
32	32	0.03125000	$1.10344521E + 00$	1.14623	$-8.72659612E - 02$	$2.61797884E - 01$
64	64	0.01562500	$1.05220722E + 00$	1.04719	$-4.80427819E - 02$	$1.44128346E - 01$
128	128	0.00781250	$1.02631153E + 00$	0.98450	$-2.64611770E - 02$	$7.93835310E - 02$
256	256	0.00390625	$1.01317594E + 00$	0.97923	$-1.35221222E - 02$	$4.05663666E - 02$
512	512	0.00195312	$1.00654642E + 00$	0.98651	$-6.75529592E - 03$	$2.02658877E - 02$
1024	1024	0.00097656	$1.00321433E + 00$	0.99248	$-3.36712325E - 03$	$1.01013697E - 02$
2048	2048	0.00048828	$1.00154362E + 00$	0.99596	$-1.68010877E - 03$	$5.04032631E - 03$

Tabela 17: 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	0.50000000	$1.07758955E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
4	4	0.25000000	$1.15293295E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.12500000	$1.06450962E + 00$	---	---	---
16	16	0.06250000	$9.81723057E - 01$	0.09503	$-1.21587558E + 00$	$3.64762673E + 00$
32	32	0.03125000	$9.54869844E - 01$	1.62430	$-1.28920419E - 02$	$3.86761256E - 02$
64	64	0.01562500	$9.43541626E - 01$	1.24517	$-8.26592910E - 03$	$2.47977873E - 02$
128	128	0.00781250	$9.37702693E - 01$	0.95614	$-6.21085508E - 03$	$1.86325652E - 02$
256	256	0.00390625	$9.34626057E - 01$	0.92435	$-3.42674355E - 03$	$1.02802307E - 02$
512	512	0.00195312	$9.33035706E - 01$	0.95201	$-1.70170259E - 03$	$5.10510778E - 03$
1024	1024	0.00097656	$9.32226262E - 01$	0.97434	$-8.39025817E - 04$	$2.51707745E - 03$
2048	2048	0.00048828	$9.31817806E - 01$	0.98675	$-4.16062796E - 04$	$1.24818839E - 03$

## 9 Resultados com $RA = 64$

Tabela 18: Tempo de CPU para as diferentes malhas consideradas para a tubeira de razão de expansão igual a 64.

Simulation	$n_x$	$n_y$	$\Delta t$	$it$	$t_{cpu}$
VevR640004	6	6	5.0E-05	5321	3.220000E-01
VevR640008	10	10	5.0E-05	7119	7.540000E-01
VevR640016	18	18	5.0E-05	7268	2.219000E+00
VevR640032	34	34	5.0E-05	7295	7.488000E+00
VevR640064	66	66	5.0E-05	5775	2.259700E+01
VevR640128	130	130	2.0E-05	12578	2.271160E+02
VevR640256	258	258	2.0E-05	11805	1.508050E+03
VevR640512	514	514	1.0E-05	18540	8.612692E+03
VevR641024	1026	1026	2.0E-06	92433	1.415334E+05

Tabela 19: 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	4	0.25000000	$1.86963819E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.12500000	$1.55081389E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
16	16	0.06250000	$1.25829622E + 00$	0.12424	$-3.25266124E + 00$	$9.75798372E + 00$
32	32	0.03125000	$1.12596112E + 00$	1.14433	$-1.09328856E - 01$	$3.27986568E - 01$
64	64	0.01562500	$1.06334521E + 00$	1.07959	$-5.62363711E - 02$	$1.68709113E - 01$
128	128	0.00781250	$1.03190378E + 00$	0.99386	$-3.17106262E - 02$	$9.51318786E - 02$
256	256	0.00390625	$1.01595071E + 00$	0.97883	$-1.64317495E - 02$	$4.92952486E - 02$
512	512	0.00195313	$1.00789280E + 00$	0.98536	$-8.22402430E - 03$	$2.46720729E - 02$
1024	1024	0.00097656	$1.00384107E + 00$	0.99187	$-4.09778409E - 03$	$1.22933523E - 02$

Tabela 20: Solução numérica, ordem aparente e estimativas para a eficiência do empuxo dinâmico ( $F_d^*$ ).

$n_x$	$n_y$	$h$	$\phi$	$p_U$	$U_{ri}(\phi, p_U)$	$U_{GCI}(\phi, p_U)$
4	4	0.25000000	$1.27034211E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
8	8	0.12500000	$1.09630966E + 00$	não se aplica	não se aplica	não se aplica
16	16	0.06250000	$9.76825579E - 01$	0.54254	$-2.61720845E - 01$	$7.85162536E - 01$
32	32	0.03125000	$9.35985561E - 01$	1.54876	$-2.12083027E - 02$	$6.36249080E - 02$
64	64	0.01562500	$9.19257802E - 01$	1.28774	$-1.16048008E - 02$	$3.48144023E - 02$
128	128	0.00781250	$9.10885683E - 01$	0.99858	$-8.38862843E - 03$	$2.51658853E - 02$
256	256	0.00390625	$9.06540489E - 01$	0.94617	$-4.68861675E - 03$	$1.40658502E - 02$
512	512	0.00195313	$9.04315958E - 01$	0.96592	$-2.33348637E - 03$	$7.00045910E - 03$
1024	1024	0.00097656	$9.03191285E - 01$	0.98400	$-1.15004918E - 03$	$3.45014755E - 03$

## 10 Geometrias e Malhas

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

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

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  $y$  ( $x = 0$ ). Diferentes valores para  $a$  são utilizados para gerar tubeiras com razão de expansão ( $RA = \frac{A_{exit}}{A_g}$ ) igual a 2, 4, 8, 16, 32 e 64, conforme tabela 21. O comprimento da tubeira é igual a 1 metro para todas as razões.

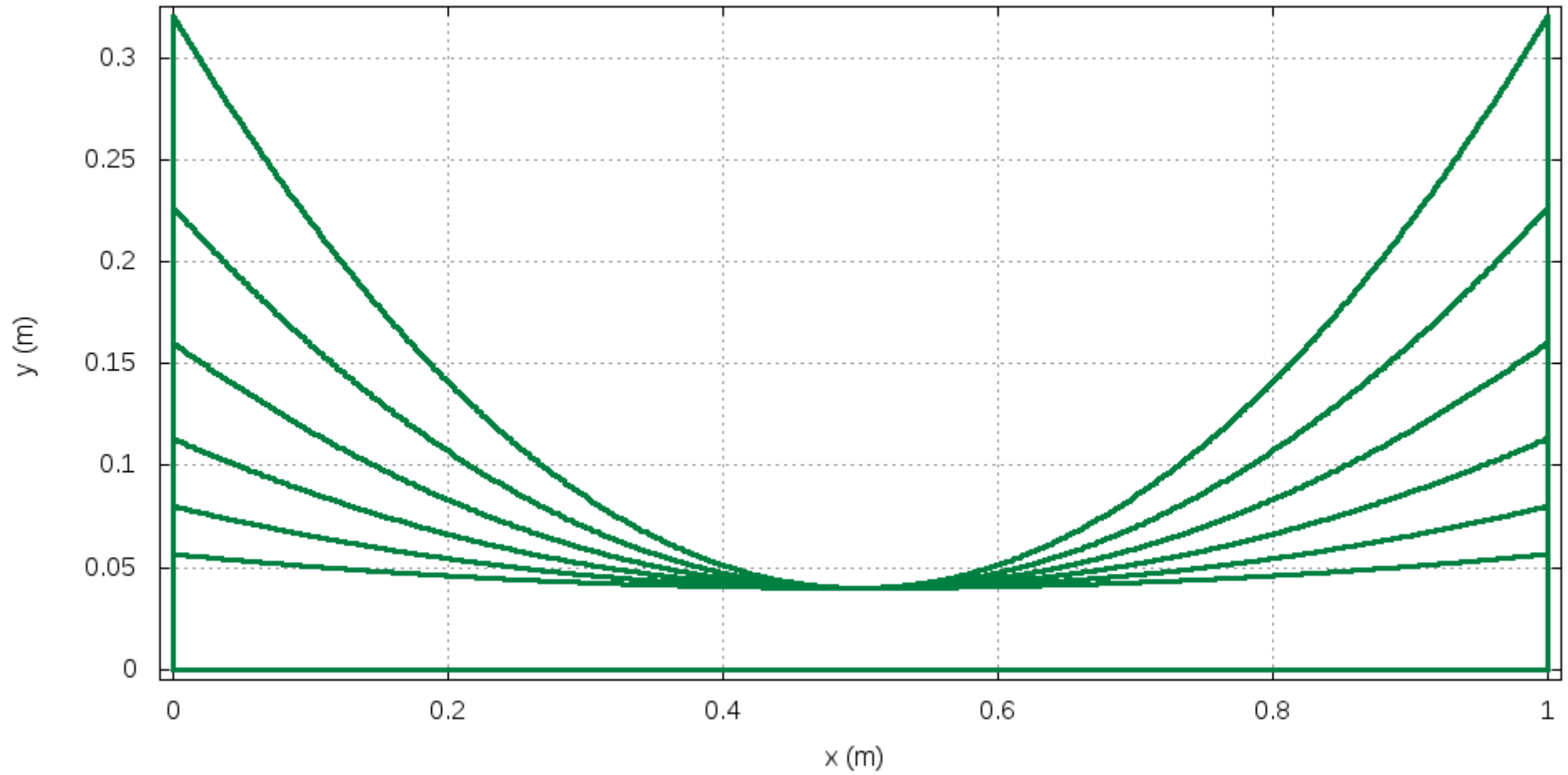
Tabela 21: Valores de  $a$  para as tubeiras com diferentes razões de expansão.

$RA$	$a$
2	0.0662741699796952
4	0.1600000000000000
8	0.2925483399594000
16	0.4800000000000000
32	0.7450966799187820
64	1.1200000000000000



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



Thu Nov 22 21:26:52 2012

Figura 1: Geometria das tubeiras parabólicas com  $RA = 2, 4, 8, 16, 32$  e  $64$ .

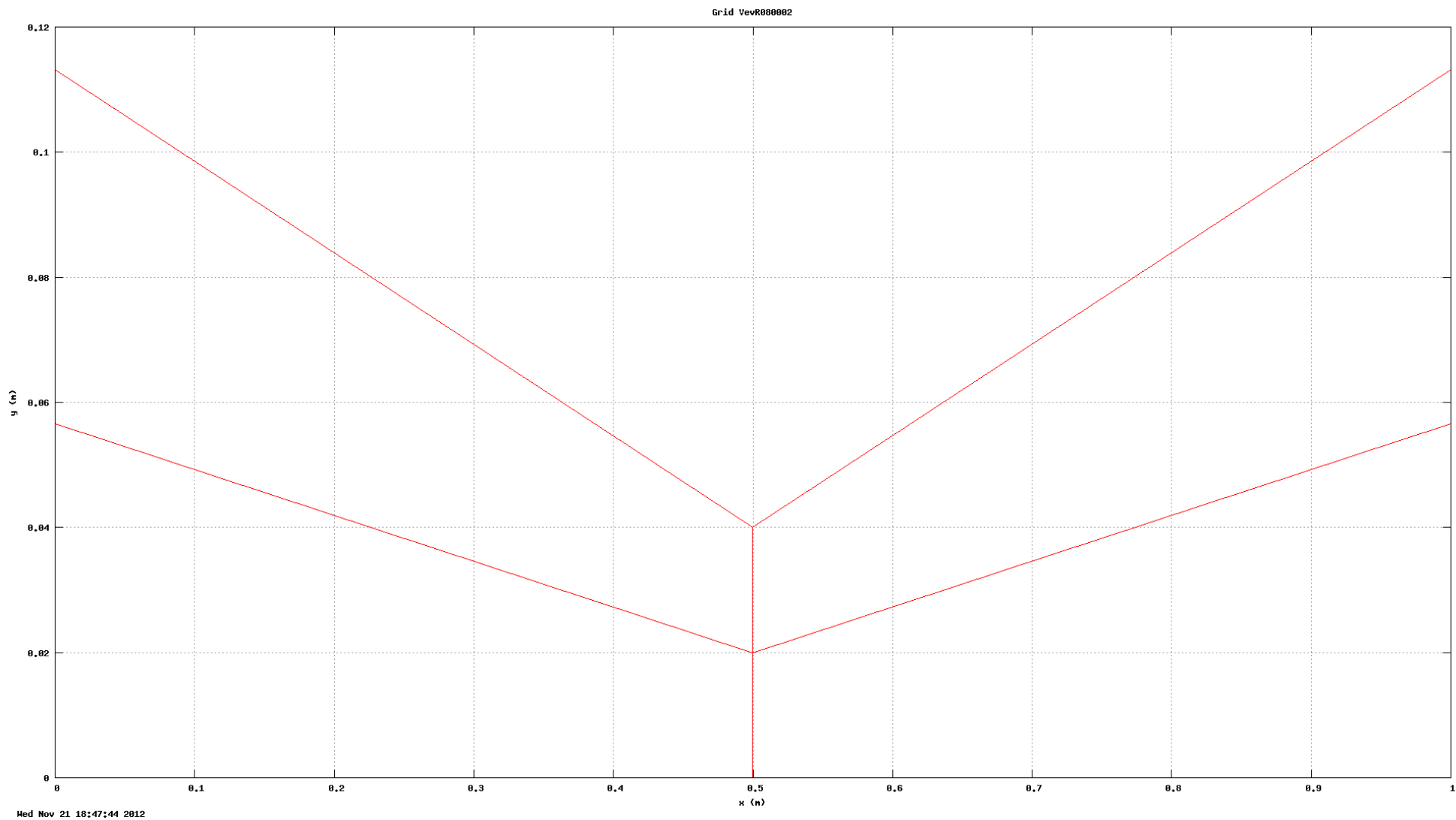


Figura 2: Malha 2x2 da tubeira parabólica de  $RA = 8$ .

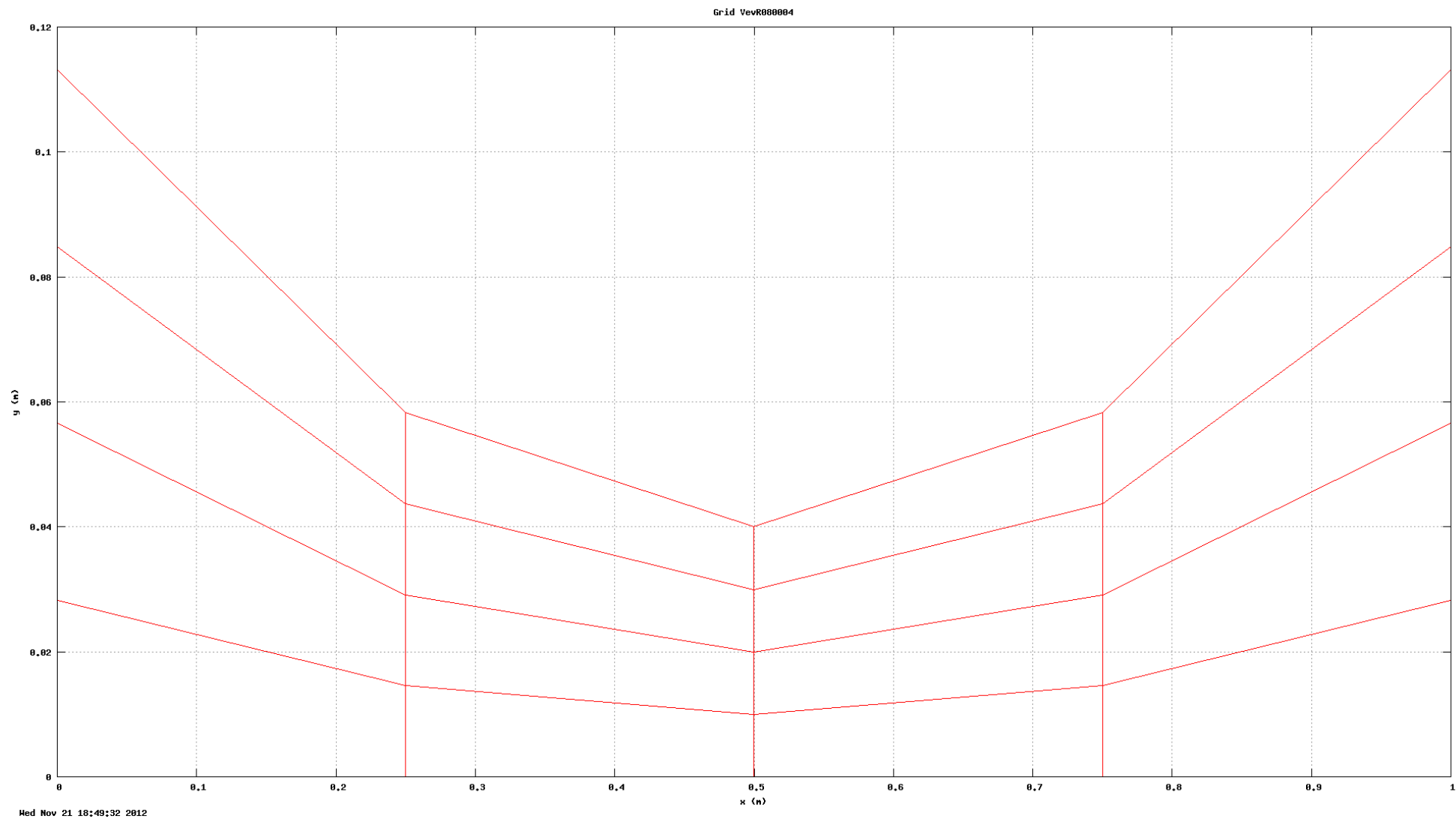


Figura 3: Malha 4x4 da tubeira parabólica de  $RA = 8$ .

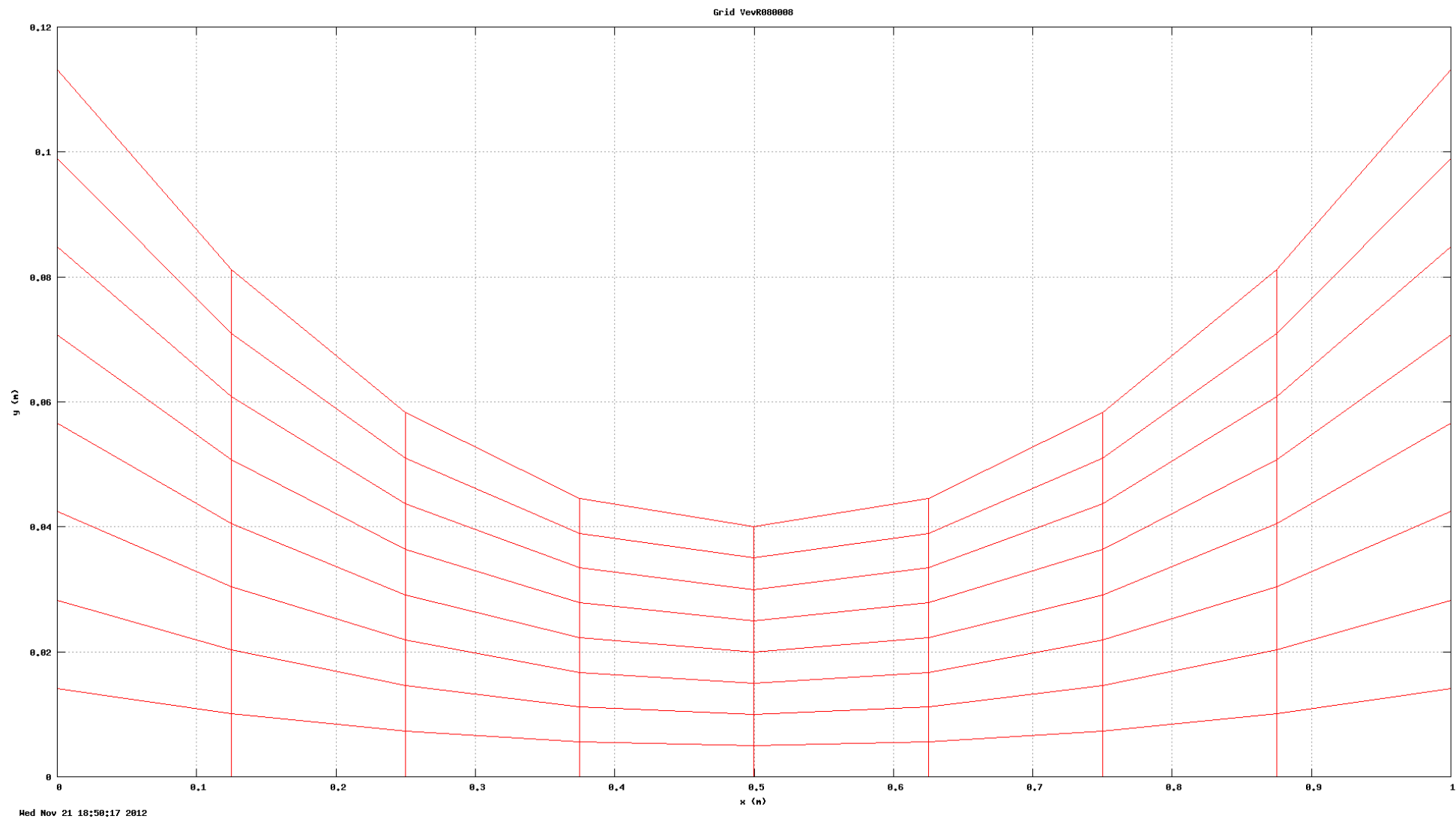


Figura 4: Malha 8x8 da tubeira parabólica de  $RA = 8$ .

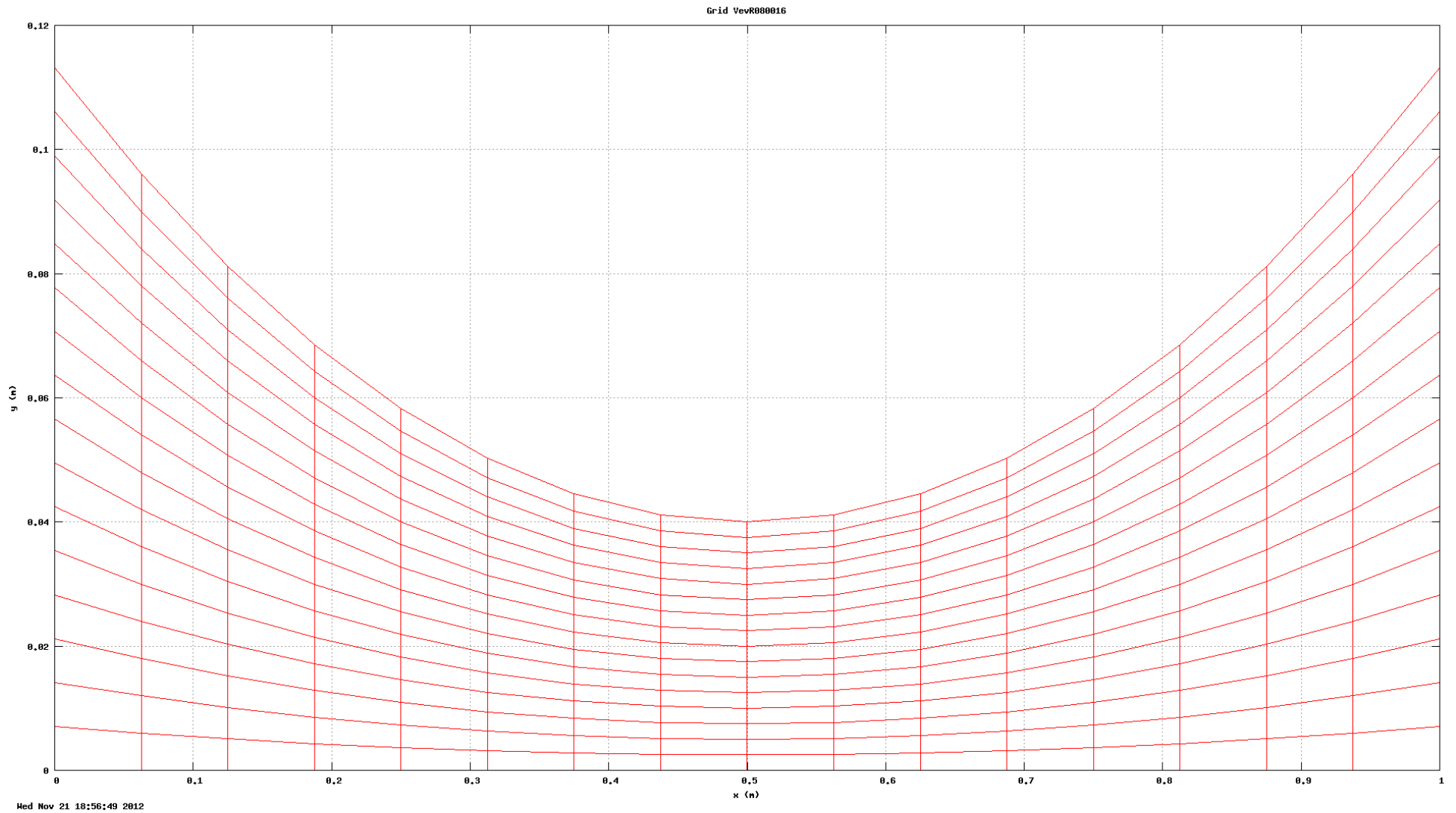


Figura 5: Malha 16x16 da tubeira parabólica de  $RA = 8$ .

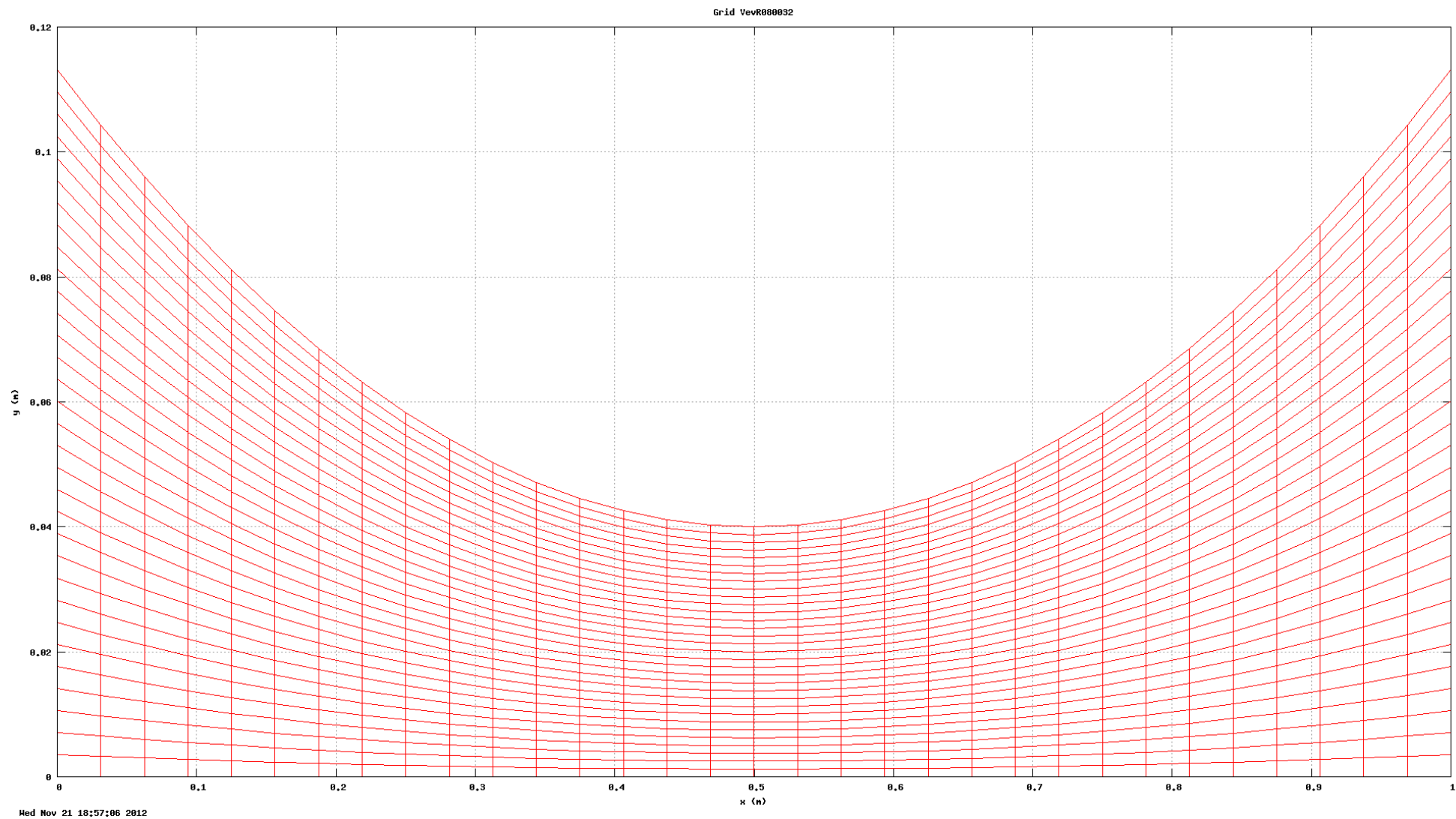


Figura 6: Malha 32x32 da tubeira parabólica de  $RA = 8$ .

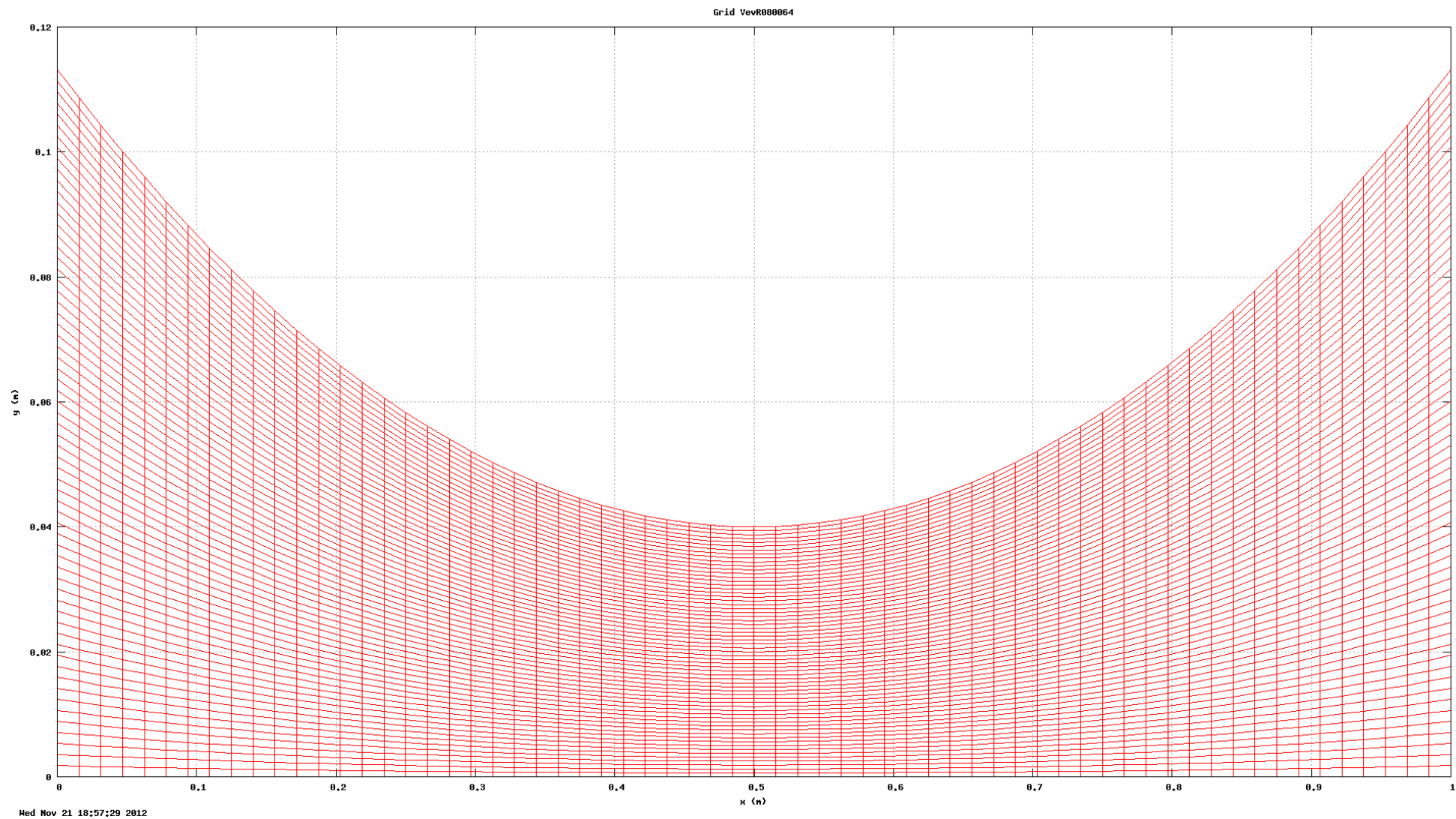


Figura 7: Malha 64x64 da tubeira parabólica de  $RA = 8$ .