

Universidade de São Paulo
Escola Politécnica
Curso de Engenharia de Computação



O Efeito Borboleta

Rafael Ribeiro Correia, rafael.correia.poli@gmail.com

Fabiano Shimura, fabianoshimura@hotmail.com

RELATÓRIO apresentado ao Professor Alexandre Roma do MAP/IME-USP como atividade da disciplina MAP3122 - Métodos Numéricos.

São Paulo - SP

31/03/2016

Resumo

Este trabalho tem sua motivação analisar o comportamento das soluções das equações de Lorenz (E. N. Lorenz, Journal of Atmospheric Sciences, 1963) através dos conhecimentos adquiridos na disciplina MAP3122 - MÉTODOS NUMÉRICOS E APLICAÇÕES, lecionada pelo prof. dr. Alexandre Roma na Escola Politécnica da USP em 2016. Vamos utilizar dois métodos de aproximação numérica (Euler explícito e Runge-Kutta Clássico), bem como a construção de um gráfico pelo método de Spline Cúbica, obtido pela construção das tabelas para a avaliação dos resultados.

PALAVRAS CHAVE: Efeito Borboleta, Atrator de Lorentz, Método de Euler Explícito, Método de Runge-Kutta Clássico, Spline Cúbica

Sumário

| | | |
|----------|-----------------------------------|-----------|
| 1 | Introdução | 2 |
| 2 | EDOs e Condições Iniciais | 3 |
| 3 | Metodologias | 4 |
| 3.1 | Euler | 4 |
| 3.1.1 | Algoritmo | 4 |
| 3.1.2 | Discretização | 4 |
| 3.2 | Runge-Kutta | 4 |
| 3.2.1 | Algoritmo | 4 |
| 3.2.2 | Discretização | 5 |
| 4 | Análise | 6 |
| 4.1 | Tabela de RK | 6 |
| 4.2 | Gráficos de RK | 11 |
| 4.3 | Solução Manufaturada | 14 |
| 5 | Splines | 15 |
| 6 | Conclusões | 17 |
| 7 | Apêndice | 19 |
| 7.1 | Definição Spline | 19 |
| 7.2 | Algoritmo Spline Cúbico | 19 |

1 Introdução

Lorenz estava questionando a fundamentação teórica dos métodos de previsão do tempo da época, baseados em regressão linear. Na sua opinião o fenômeno do tempo é demasiado não linear para que tais métodos possam dar resultados consistentes. Para testar a sua tese, comparou numericamente diversos métodos aplicados a certos modelos simplificados.

A complexidade do modelo era um aspecto crítico dos experimentos, porque os computadores da época eram lentos. Lorenz dispunha de um Royal McBee LGP-30 com 16k de memória interna, capaz de realizar 60 multiplicações por segundo. Para um sistema de doze equações diferenciais, cada passo da integração numérica tomava 1 segundo. Após diversas tentativas, Lorenz acabou adotando um modelo com 3 equações introduzido por B. Saltzman, que veio a ser chamado sistema de Lorenz. Esse modelo é uma simplificação do modelo de Rayleigh. Tais equações serão o modelo estudado no escopo deste trabalho.

Para acelerar os cálculos, Lorenz imprimia os resultados com apenas 3 dígitos decimais, embora os cálculos fossem realizados com 6 dígitos. Em algum momento reintroduziu um resultado como novo dado inicial. Para sua surpresa, o novo cálculo divergia do anterior: as previsões para 4 dias mais tarde eram totalmente distintas. Inicialmente, Lorenz acreditou que isso se devia a falha mecânica. As consequências desta descoberta de que o modelo é sensível aos dados iniciais foram profundas. A idéia de sensibilidade não era nova. Já J. C. Maxwell havia observado no século 19 que “as mesmas causas produzem os mesmos efeitos” não significa que “causas próximas produzem efeitos próximos”. A comunidade científica havia apelidado este efeito de Efeito Borboleta. Alguns anos depois (1971), D. Ruelle e F. Takens estavam questionando a interpretação matemática do fenômeno de turbulência predominante na época. E. Hopf e, posteriormente, L. Landau e E. Lifshitz haviam sugerido que turbulência corresponde a existência de toros invariantes de grande dimensão no espaço de configurações do fluido. Ruelle e Takens demonstraram que esse modelo não tem sustentação matemática. Em troca, propuseram que turbulência deve corresponder a existência no espaço de configurações de algum "atrator estranho". Um atrator é uma região do espaço de configurações que fica invariante quando o tempo passa e que atrai muitas (ou até todas as) configurações próximas. Ruelle e Takens não definiram "estranho", nem conheciam bons exemplos. De fato, o sistema de Lorenz era um exemplo espetacular dessa noção. O atrator estranho acabou significando um atrator tal que as trajetórias que convergem para ele dependem sensitivamente do ponto inicial. Mas o trabalho de Lorenz ainda era mal conhecido, e Ruelle e Takens só tinham como exemplos os atratores hiperbólicos de Smale.

Um dos aspectos mais surpreendentes desta construção é que ela é robusta: se modificarmos ligeiramente o fluxo, continua existindo um atrator. Isto é ainda mais

surpreendente porque o atrator contém um ponto estacionário, acumulada por trajetórias não estacionárias. Parecia que esse fenômeno deveria poder ser destruído por modificações do fluxo. Acreditava-se que os atratores robustos teriam que ser hiperbólicos. Este fenômeno de Lorenz mostrou que o problema de compreender o que faz um sistema dinâmico ser robusto é especialmente sutil para sistemas com tempo contínuo (fluxos).

Continuava em aberto saber se as equações originais de Lorenz realmente têm um atrator estranho. Isso foi resolvido em 1998 por W. Tucker (Suécia), que provou Teorema [W. Tucker]: As equações de Lorenz admitem um atrator estranho para os valores dos parâmetros originalmente considerados por Lorenz.

2 EDOs e Condições Iniciais

Apresentação das equações envolvidas:

$$\frac{dx}{dt} = \sigma(y - x)$$

$$\frac{dy}{dt} = x(\rho - z) - y$$

$$\frac{dz}{dt} = xy - \beta z$$

em que a σ se chama o número de Prandtl e a ρ se chama o número de Rayleigh.

Todos os $\sigma, \rho, \beta > 0$, mas usualmente $\sigma = 10$, $\beta = \frac{8}{3}$, enquanto ρ varia.

O sistema exibe comportamento caótico para $\rho = 28$ mas tem órbitas periódicas para outros valores de ρ .

Condições Iniciais

$$x_0 = 0$$

$$y_0 = 0$$

$$z_0 = 10$$

As condições iniciais são arbitrárias e foram escolhidas para o estudo do efeito caótico.

No caso, para demonstrar o efeito caótico, basta que um dos termos deve ser diferente dos demais.

Para condições iniciais nulas, $x_0 = 0$, $y_0 = 0$, $z_0 = 0$, o sistema permanece em repouso.

3 Metodologias

3.1 Euler

3.1.1 Algoritmo

```
for i=1:n-1
    t(i,:)=h*i
    x(i+1,:) = y(i,:)+dxdt (t(i,:),x(i,:),y(i,:),z(i,:))*h
    y(i+1,:) = y(i,:)+dydt (t(i,:),x(i,:),y(i,:),z(i,:))*h
    z(i+1,:) = z(i,:)+dzdt (t(i,:),x(i,:),y(i,:),z(i,:))*h
end
```

3.1.2 Discretização

$$\Delta t = \frac{t_f - t_i}{n} = h$$

Equações Euler

$$\frac{dx}{dt} = -10x + 10y$$

$$\frac{dy}{dt} = 28x - y - xz$$

$$\frac{dz}{dt} = xy - \frac{8}{3}z$$

Aplicando nas equações

$$x_{k+1} = x_k + h(-10x_k + 10y_k)$$

$$y_{k+1} = x_k + h(28x_k - y_k - x_k z_k)$$

$$z_{k+1} = z_k + h(x_k y_k - \frac{8}{3}y_k)$$

Matriz

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \\ z_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 - 10h & 10h & 0 \\ 28h & 1 - h & -hx \\ hy & -\frac{8}{3}h & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

3.2 Runge-Kutta

3.2.1 Algoritmo

```
for i=1:n-1
    k1 = dydt (t(i),y(i,:))
    ymid = y(i,:) + k1(h/2)
    k2 = dydt (t(i)+(h/2),ymid)
```

```

ymid = y(i,:) + k2(h/2)
k3 = dydt(t(i) + (h/2),ymid)
yend = y(i,:) + k3h
k4 = dydt(t(i)+h,yend) //como podemos perceber, o método eh de QUARTA ORDEM
phi = (1/6)(k1+2k2+2k3+k4)
y(i+1,:) = y(i,:)+phi*h
end

```

3.2.2 Discretização

$$\frac{dx}{dt} = -10x - 10y$$

RK4

$$k_1 = -10x_k + 10y$$

$$k_2 = -10(x_k + \frac{h}{2}k_1) + 10y$$

$$k_3 = -10(x_k + \frac{h}{2}k_2) + 10y$$

$$k_4 = -10(x_k + h * k_1) + 10y$$

$$x_{k+1} = h \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

$$\frac{dy}{dt} = 28x - y - xz$$

RK4

$$k_1 = 28x - y_l - xz$$

$$k_2 = 28x - (y_k + \frac{h}{2}k_1) - xz$$

$$k_3 = 28x - (y_k + \frac{h}{2}k_2) - xz$$

$$k_4 = 28x - (y_k + h * k_1) - xz$$

$$y_{k+1} = y_k + h \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

$$\frac{dz}{dt} = xy - \frac{8}{3}y$$

RK4

$$k_1 = xy - \frac{8}{3}y$$

$$k_2 = xy - \frac{8}{3}y$$

$$k_3 = xy - \frac{8}{3}y$$

$$k_4 = xy - \frac{8}{3}y$$

$$z_{k+1} = z_k + h \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

4 Análise

4.1 Tabela de RK

Tabela 1: $0 < t < 0.25$

| t | x | y | z |
|----------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 0.015625 | 0.1 | 0.1 | 10.0 |
| 0.03125 | 0.1 | 0.1265625 | 9.583489583333334 |
| 0.046875 | 0.104150390625 | 0.15336075846354166 | 9.184375271267362 |
| 0.0625 | 0.11183951059977214 | 0.18158410075865686 | 8.80194253990571 |
| 0.078125 | 0.12273710281209788 | 0.21229530779060363 | 8.43551225090383 |
| 0.09375 | 0.1367305723399894 | 0.2464983271114824 | 8.084439706767506 |
| 0.109375 | 0.15388178402303518 | 0.2851946963341975 | 7.748114675089904 |
| 0.125 | 0.17439942657165428 | 0.3294322205106489 | 7.425962286575729 |
| 0.140625 | 0.1986233006246222 | 0.3803489104946197 | 7.117444891150979 |
| 0.15625 | 0.2270179271668093 | 0.4392147403493156 | 6.8220650960403875 |
| 0.171875 | 0.2601736792265759 | 0.5074734300871471 | 6.539370346516859 |
| 0.1875 | 0.29881426529854016 | 0.5867862042336864 | 6.268959570038273 |
| 0.203125 | 0.3438098807571568 | 0.6790793085464708 | 6.0104926101695755 |
| 0.21875 | 0.3961957288492371 | 0.7865969742505293 | 5.7637034520806765 |
| 0.234375 | 0.457195923443189 | 0.911961485867094 | 5.528418615976125 |
| 0.25 | 0.5282530425719242 | 1.058242015808195 | 5.304582607086634 |

Tabela 2: $0.25 < t < 0.5$

| t | x | y | z |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0.265625 | 0.6110638196400915 | 1.2290339107212898 | 5.092293012488672 |
| 0.28125 | 0.7076216463715287 | 1.4285501141629053 | 4.891848795655069 |
| 0.296875 | 0.8202667194639313 | 1.6617263311263097 | 4.703816652873215 |
| 0.3125 | 0.9517447837861779 | 1.9343412929864916 | 4.529122086184953 |
| 0.328125 | 1.105275488348727 | 2.2531529231797602 | 4.369174278984467 |
| 0.34375 | 1.284631337541076 | 2.6260501031125623 | 4.226037142841758 |
| 0.359375 | 1.4942280196616209 | 3.062217721873976 | 4.102663297146446 |
| 0.375 | 1.7392264106323014 | 3.572309165230505 | 4.00321354813506 |
| 0.390625 | 2.0256455910382707 | 4.168614409014198 | 3.9334919593655684 |
| 0.40625 | 2.3604844688470092 | 4.865201932376449 | 3.901536076658017 |
| 0.421875 | 2.751846572523484 | 5.677996430528672 | 3.9184132234511058 |
| 0.4375 | 3.2090574878367946 | 6.624728236801238 | 3.9992862404346674 |
| 0.453125 | 3.742756042362489 | 7.724649205031856 | 4.164823278643497 |
| 0.46875 | 4.364926849029578 | 8.997846118931902 | 4.443030811105178 |
| 0.484375 | 5.088820484951816 | 10.463886762298115 | 4.871575466496042 |
| 0.5 | 5.928674590787175 | 12.139394790242786 | 5.500606300832646 |

Tabela 3: $0.5 < t < 0.75$

| t | x | y | z |
|----------|--------------------|---------------------|--------------------|
| 0.515625 | 6.899099621952114 | 14.033960242463532 | 6.395953769138265 |
| 0.53125 | 8.013921593907023 | 16.143561913424637 | 7.642294598600282 |
| 0.546875 | 9.28417789383165 | 18.440460241631673 | 9.345322522938321 |
| 0.5625 | 10.714847010675404 | 20.85847405424829 | 11.63100460522378 |
| 0.578125 | 12.299788736233667 | 23.273049168611244 | 14.63849438783028 |
| 0.59375 | 14.014360678792663 | 25.47727802890932 | 18.501269434512825 |
| 0.609375 | 15.805441514748392 | 27.159174249323385 | 23.3092545113719 |
| 0.625 | 17.579462254525733 | 27.893238768569603 | 29.04526588881278 |
| 0.640625 | 19.190989834845087 | 27.170294221586836 | 35.4967361344124 |
| 0.65625 | 20.437756145273486 | 24.497792953280413 | 42.164968590523706 |
| 0.671875 | 21.07213689652457 | 19.591574721845067 | 48.23121862544789 |
| 0.6875 | 20.840799056730898 | 12.624284359645058 | 52.67215239976062 |
| 0.703125 | 19.556968635311236 | 4.392852253081042 | 54.588419595203824 |
| 0.71875 | 17.18757545058777 | -3.800612439715472 | 53.656259514149426 |
| 0.734375 | 13.908171092727887 | -10.631366873146536 | 50.39990526773614 |
| 0.75 | 10.073868285560009 | -15.333091061450041 | 45.98955188020628 |

Tabela 4: $0.75 < t < 1$

| t | x | y | z |
|----------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 0.765625 | 6.104030887589688 | -17.925142391074985 | 41.659827743058955 |
| 0.78125 | 2.349472562798333 | -18.947874704695476 | 38.21438248054246 |
| 0.796875 | -0.9782379477475747 | -19.026789340309023 | 35.92653042288409 |
| 0.8125 | -3.798324102835301 | -18.608338993528555 | 34.720415520209066 |
| 0.828125 | -6.112388929506122 | -17.91873500532532 | 34.37811439196363 |
| 0.84375 | -7.957130503852872 | -17.02960608648333 | 34.65704104454802 |
| 0.859375 | -9.37470481363888 | -15.935847485741814 | 35.33029138736928 |
| 0.875 | -10.399883356154964 | -14.61311052573731 | 36.19247507123929 |
| 0.890625 | -11.058200101402205 | -13.053518405974291 | 37.05905910376477 |
| 0.90625 | -11.369968586491593 | -11.284293301195628 | 37.77037568111729 |
| 0.921875 | -11.356581823164099 | -9.372212709418744 | 38.20132972078977 |
| 0.9375 | -11.046524149141387 | -7.415580703346188 | 38.272674844381015 |
| 0.953125 | -10.479189235735888 | -5.526628649469965 | 37.957923673564416 |
| 0.96875 | -9.705351644131838 | -3.8097912241611245 | 37.28125894945916 |
| 0.984375 | -8.784170328511413 | -2.3427963330844386 | 36.30561321491729 |
| 1.0 | -7.777705641725948 | -1.166222622214858 | 35.11443436275655 |

Tabela 5: $1 < t < 1.25$

| t | x | y | z |
|----------|----------------------|----------------------|--------------------|
| 1.015625 | -6.74466141992734 | -0.28340701435367965 | 33.79306006016735 |
| 1.03125 | -5.735090419056455 | 0.33152479354454456 | 32.414882834053834 |
| 1.046875 | -4.787181792087549 | 0.7219658474397697 | 31.034554518044242 |
| 1.0625 | -3.926377473411405 | 0.9376689456966233 | 29.6874452398022 |
| 1.078125 | -3.166370220425776 | 1.0265420399384677 | 28.392942695030747 |
| 1.09375 | -2.511227679743863 | 1.0299429775625417 | 27.15911572630119 |
| 1.109375 | -1.9579197645397373 | 0.980855558169787 | 25.987073071343648 |
| 1.125 | -1.498736120366374 | 0.9039492304141569 | 24.874271539982985 |
| 1.140625 | -1.123316534306916 | 0.8166274901657378 | 23.81667510035975 |
| 1.15625 | -0.8202002804830639 | 0.7304427164421525 | 22.809980338437374 |
| 1.171875 | -0.5779123122134988 | 0.6525161805270208 | 21.85020340786338 |
| 1.1875 | -0.38565786022279264 | 0.5867886907030928 | 20.93388612314024 |
| 1.203125 | -0.233713086640623 | 0.535040393069602 | 20.058104935652217 |
| 1.21875 | -0.11359535543590034 | 0.4976784367831294 | 19.22039672049366 |
| 1.234375 | -0.01808382540167694 | 0.47431905253461615 | 18.418663514031646 |
| 1.25 | 0.05885412427586886 | 0.4642005170867789 | 17.651085177463703 |

Tabela 6: $1.25 < t < 1.5$

| t | x | y | z |
|----------|---------------------|---------------------|--------------------|
| 1.265625 | 0.12218949815257354 | 0.46646420149301565 | 16.91605017186503 |
| 1.28125 | 0.17598242054951763 | 0.4803372962673141 | 16.212105326579298 |
| 1.296875 | 0.22353786988042332 | 0.5052454984789395 | 15.537921733598036 |
| 1.3125 | 0.26755468684894146 | 0.5408783255332469 | 14.892273039007963 |
| 1.328125 | 0.31026150539336417 | 0.5872245045460032 | 14.274022826929684 |
| 1.34375 | 0.353536974010964 | 0.6445904082360929 | 13.682118643913618 |
| 1.359375 | 0.3990140731086404 | 0.7136108776211348 | 13.115591094308952 |
| 1.375 | 0.44816982381371767 | 0.7952589673969657 | 12.573557206778801 |
| 1.390625 | 0.5024025024986002 | 0.8908590796049871 | 12.055227912818818 |
| 1.40625 | 0.5630988426714731 | 1.002106490835685 | 11.559920028393563 |
| 1.421875 | 0.6316937876971312 | 1.131095295751347 | 11.087073647083777 |
| 1.4375 | 0.7097252733306024 | 1.280356150.265625 | 0.6110638196400915 |
| 1.453125 | 0.7988863491316097 | 1.452904866582673 | 10.20729667112974 |
| 1.46875 | 0.9010767424833384 | 1.652302412473303 | 9.80012867229881 |
| 1.484375 | 1.0184557534192704 | 1.8827270743031093 | 9.415053278798268 |
| 1.5 | 1.1534981473073702 | 2.1490586186921 | 9.052719926883896 |

Tabela 7: $1.5 < t < 1.75$

| t | x | y | z |
|----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1.515625 | 1.3090544709612342 | 2.4569741474758686 | 8.714256624749925 |
| 1.53125 | 1.4884169204166458 | 2.8130540606587786 | 8.401417489231013 |
| 1.546875 | 1.695391473579479 | 3.224894806979896 | 8.116780259397398 |
| 1.5625 | 1.9343763694232943 | 3.701222094613411 | 7.864010131281014 |
| 1.578125 | 2.21044601398425 | 4.251993358400652 | 7.648211113693382 |
| 1.59375 | 2.5294377865493125 | 4.888470503131664 | 7.476391928287891 |
| 1.609375 | 2.898036648515305 | 5.623231741722061 | 7.358080004334014 |
| 1.625 | 3.3238483818288604 | 6.470072505807043 | 7.306123519839968 |
| 1.640625 | 3.8154459012004516 | 7.443716808096719 | 7.3377257694623985 |
| 1.65625 | 4.382363230402993 | 8.559217944257464 | 7.47575436425276 |
| 1.671875 | 5.034996779442754 | 9.830866092094968 | 7.750352130324302 |
| 1.6875 | 5.7843513595446625 | 11.270335556416406 | 8.200832965198776 |
| 1.703125 | 6.641536390305872 | 12.883694981403718 | 8.87775004162198 |
| 1.71875 | 7.61687367016491 | 14.666779731117606 | 9.84483643145951 |
| 1.734375 | 8.718421492188769 | 16.598323600361912 | 11.18018191910794 |
| 1.75 | 9.949656196590823 | 18.630260160530547 | 12.975453212244577 |

Tabela 8: $1.75 < t < 2.0$

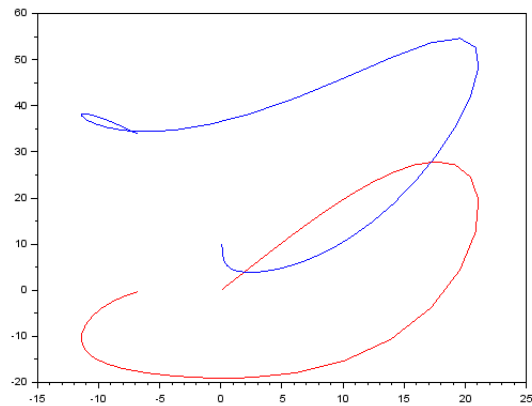
| t | x | y | z |
|----------|--------------------|---------------------|--------------------|
| 1.765625 | 11.306000565956404 | 20.674929143143498 | 15.331132507312333 |
| 1.78125 | 12.769895656141887 | 22.589918110318653 | 18.344690953780916 |
| 1.796875 | 14.304274164607007 | 24.163470781220244 | 22.087686598668572 |
| 1.8125 | 15.844773635952825 | 25.10734392275938 | 26.568005555334125 |
| 1.828125 | 17.29205024326635 | 25.06956710871115 | 31.676945652864028 |
| 1.84375 | 18.5072872534921 | 23.684387482464345 | 37.13057626140257 |
| 1.859375 | 19.31620916426901 | 20.673972089618132 | 42.43243395719278 |
| 1.875 | 19.528359621354813 | 15.995005134051686 | 46.90414664344501 |
| 1.890625 | 18.9762729827137 | 9.97684921026929 | 49.83037301876779 |
| 1.90625 | 17.57011301826926 | 3.3481622270056253 | 50.71228582196665 |
| 1.921875 | 15.347933207134318 | -2.93942513271616 | 49.51845498665537 |
| 1.9375 | 12.490533466532682 | -8.053868644016111 | 46.75027820693588 |
| 1.953125 | 9.280470636759432 | -11.587417219117906 | 43.230520013420715 |
| 1.96875 | 6.019863159278598 | -13.614901227680562 | 39.748987639040095 |
| 1.984375 | 2.951931223816229 | -14.507282424858634 | 36.812157284532205 |

4.2 Gráficos de RK

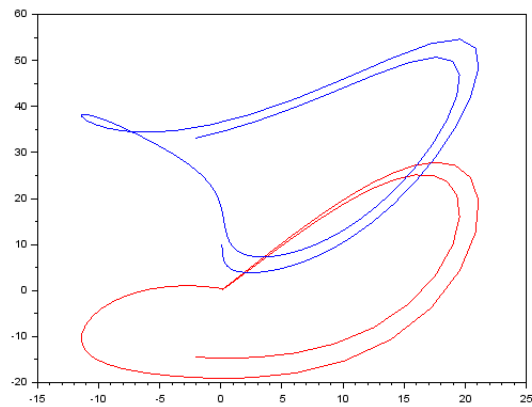
A seguir apresentaremos os gráficos obtidos a partir da resolução das equações diferenciais pelas metodologias apresentadas no item anterior.

É importante notar que apresentaremos apenas um gráfico para cada intervalo de tempo (apesar de termos duas metodologias) pois os resultados foram extremamente parecidos.

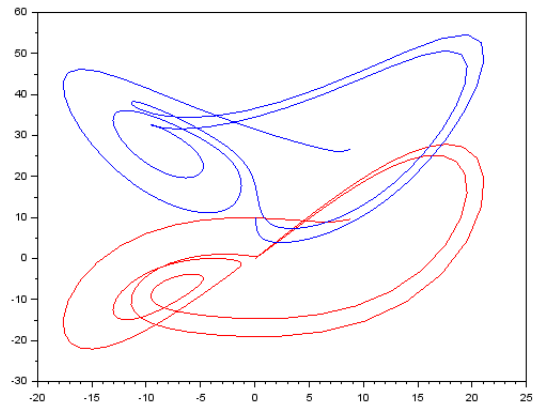
$0 < t < 1$



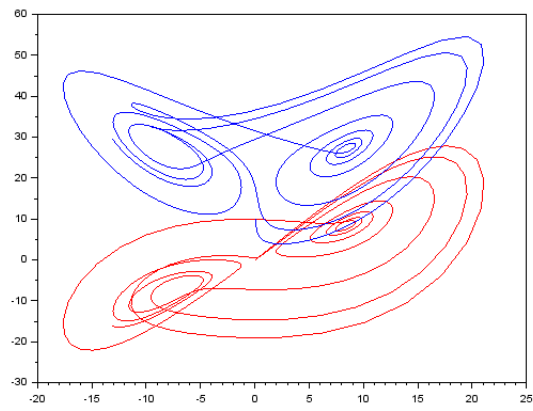
$0 < t < 2$



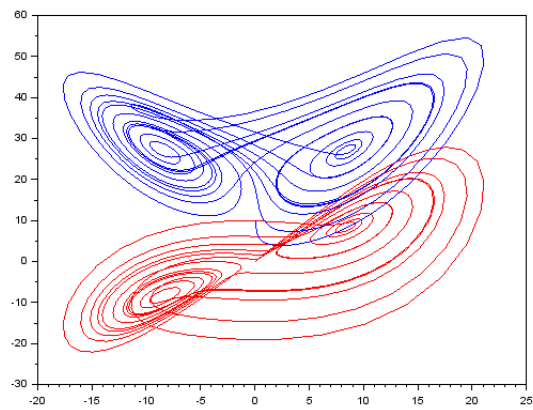
$$0 < t < 4$$



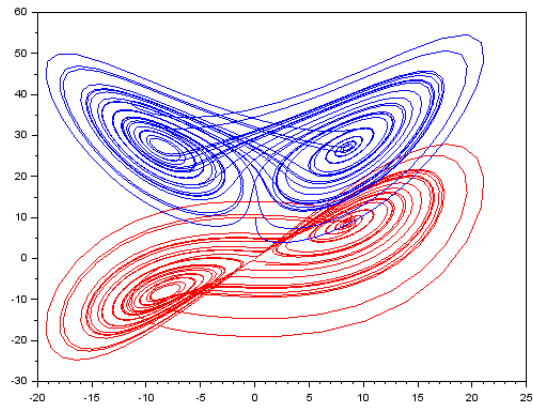
$$0 < t < 8$$



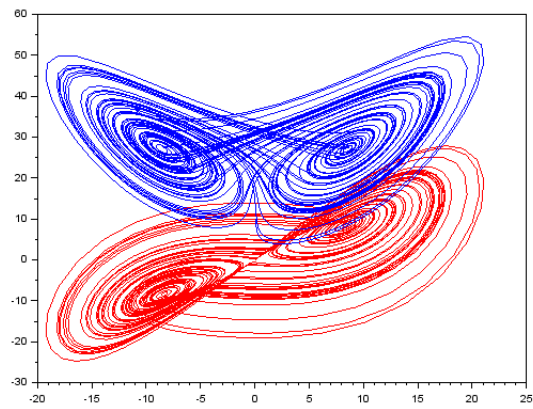
$$0 < t < 16$$



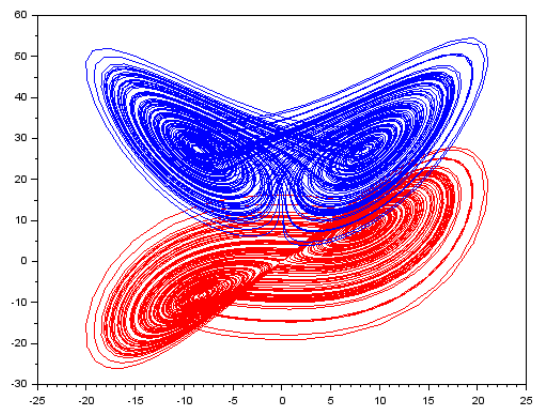
$$0 < t < 32$$



$$0 < t < 64$$



$$0 < t < 128$$



4.3 Solução Manufaturada

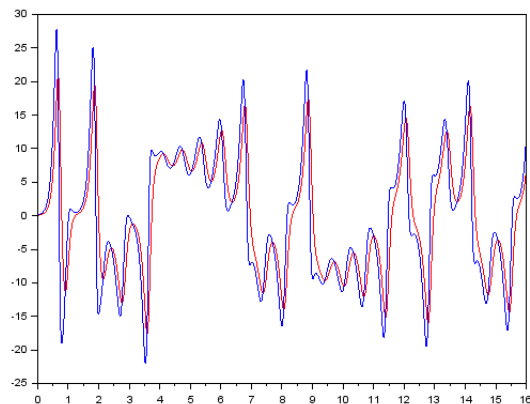
$$x(t) = -\frac{y}{10}e^{(-10t)} + \frac{y}{10}$$

$$y(t) = (-28x + xz)e^{(-t)} + 28x - xz$$

$$z(t) = 10 + xyt - \frac{8}{3}y * t$$

Utilizando Euler, obtemos o gráfico abaixo, com $h = \frac{1}{4}$

Gráfico de (x,t)



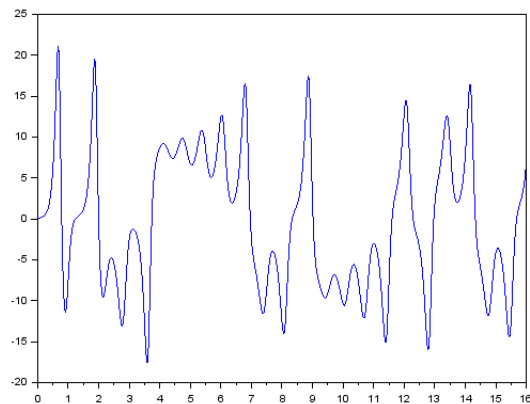
Vermelho: Aproximação RK

Azul: Solução Manufaturada

Temos que a ordem de convergência do método de Euler Explícito é 1

Utilizando RK clássico, obtemos o gráfico abaixo, com $h = \frac{1}{4}$

Gráfico de (x,t)

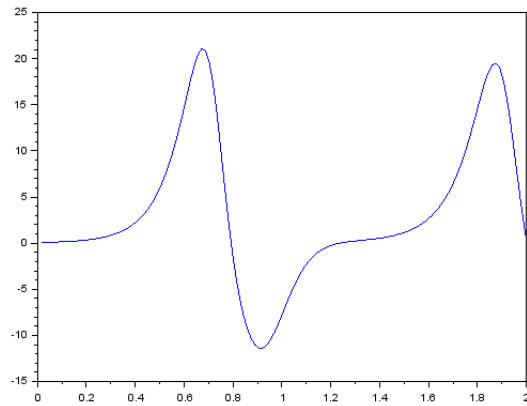


O qual já é próximo ao esperado.

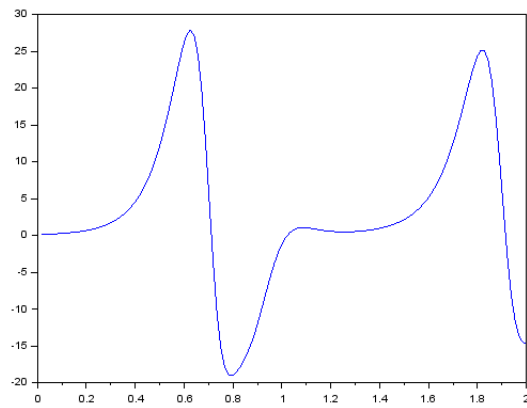
Temos que a ordem de convergência do método de Runge-Kutta Clássico é 4

5 Splines

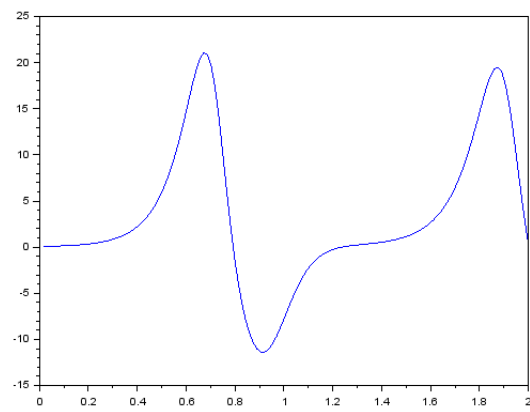
(t, x)



(t, y)



(t, z)



6 Conclusões

O escopo deste trabalho consistiu na resolução das três equações diferenciais de Lorentz através de métodos numéricos aprendidos na disciplina.

Para tanto, utilizamos o método de Euler explícito pela sua facilidade do algoritmo e pela obtenção de uma boa aproximação inicial, na qual podemos comparar com o gráfico da solução manufaturada.

Em seguida, implementamos o método de Runge-Kutta Clássico, e já observamos uma aproximação muito mais consistente e próxima do esperado, já que este possui convergência de quarta ordem.

O estudo destas equações, além de ter despertado o interesse na aplicação de métodos numéricos para sua resolução, tem forte aplicação em diversas áreas no estudo da teoria do caos como mencionado anteriormente, apesar do modelo ser derivado de uma simplificação de equações mais complexas.

Agradecimentos Agradecimentos ao Prof. Dr. Alexandre Roma

Referências

- [1] Richard L. Burden. Numerical analysis. NINTH EDITION.
 - [2] Robert C. Hilborn. Chaos and nonlinear dynamics: an introduction for scientists and enginers.
 - [3] E. N. Lorenz. Deterministic nonperiodic flow.
 - [4] J. Sotomayor. Lições de equações diferenciais ordinárias. pages 189–252. IMPA, 1979.
 - [5] Marcelo Viana. Atratores estranhos de lorenz.
- [5], [1], [2], [3], [4].

7 Apêndice

7.1 Definição Spline

Dada uma função f definida em $[a, b]$ e um conjunto de nós $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$, um spline cúbico interpolador S para f é uma função que satisfaz as seguintes condições:

$S(x)$ é um polinômio cúbico, indicado por $S_j(x)$, no subintervalo $[x_j, x_{j+1}]$ para cada $j = 0, 1, \dots, n-1$;

$$S(x_j) = f(x_j) \text{ para cada } j = 0, 1, \dots, n-2;$$

$$S_{j+1}(x_{j+1}) = S_j(x_{j+1}) \text{ para cada } j = 0, 1, \dots, n-2;$$

$$S'_{j+1}(x_{j+1}) = S'_j(x_{j+1}) \text{ para cada } j = 0, 1, \dots, n-2;$$

$$S''_{j+1}(x_{j+1}) = S''_j(x_{j+1}) \text{ para cada } j = 0, 1, \dots, n-2;$$

Um dos seguintes conjuntos de condições de contorno é satisfeito:

$$S''(x_0) = S''(x_n) = 0 \text{ (contorno livre ou natural);}$$

$$S'(x_0) = f'(x_0) \text{ e } S'(x_n) = f'(x_n) \text{ (contorno restrito).}$$

Este trabalho utiliza a condição livre, ou seja, o método do Spline Cúbico Natural. O polinômio gerado tem a forma

$$S(x) = S_j(x) = a_j + b_j(x - x_j) + c_j(x - x_j)^2 + d_j(x - x_j)^3$$

Para a montagem do gráfico na parte de análise de resultados por Spline, utilizamos a função "splin" do SciLab, cujo algoritmo é fechado ao uso do software.

A fim de propor uma melhor explicação da utilização do método, um algoritmo alternativo (adaptado do arquivo fonte de Matlab) encontra-se abaixo com comentários em cada etapa importante.

7.2 Algoritmo Spline Cúbico

```
#include <fstream>
#include "Parametros.h"
#include "Spline.h"
```

```
using namespace std;
```

```
int main(){
```

```
    Spline spl(nPontos); //declaracao e passagem de parametro para construtor da Classe Spl
    spl.leituraPontos(); //Le do arquivo pontos.txt, os pontos que serão interpolados.
```

```

    spl.exibePontos(); //Exibe na tela os pontos
    spl.passo1(); // gera os h's, pela equacao  $h_i = x_{i+1} - x_i$ 
/* spl.passo2(); // passo de 2 a 6 a resolução do sistema linear.
    spl.passo3e4();
    spl.passo5e6();*/
    spl.preparandoThomas(); // prepara o sistema e utiliza o algoritmo de thomas pra resolver
    spl.saidaSpline(); // saida na tela e em arquivo .txt, dos coeficientes das do spline C
    spl.splineCubicoGNU(); // gera um arquivo .gnu para desenhar o gráfico da solucao.

    system("PAUSE");
    return EXIT_SUCCESS;
}

```

Spline.h

```

// Classe Spline
#include "Parametros.h"

#ifndef SPLINE

#define SPLINE

class Spline{
    private: //Atributos Privados
        int n;
        double* x;
        double* y;
        double* h;
        double* a;
        double* b;
        double* c;
        double* d;
        double* alfa;
        double* beta;
        double* gama;
        double* delta;
    public: //Metodos Publicos

        Spline(int ns); // Construtor da Classe Spline
        void leituraPontos(void); // Le os pontos do arquivo "ponto.txt"
        void exibePontos(void); // Exibe na tela esses pontos

```

```

    /** Gera os h's, espaçõs entre os x's
    void passo1(void);

    /** Metodos usados para resolver o Sistema Linear
    void passo2(void);
    void passo3e4(void);
    void passo5e6(void);
    /*******

    /** Metodos usados para resolver o Sistema Linear, usando algoritmo de Thomas
    void algoritmoThomas(double *A,double *B, double *C, double *D, double *X, long int N
    void preparandoThomas(void);
    /*******

    /** Exibe os coeficientes dos polinomios
    void saidaSpline(void);
    /** Gera um arquivo .gnu para ser plotado
    void splineCubicoGNU(void);

};

#endif

```

Spline.cpp

```

#include "Spline.h"
#include <fstream>
#include <iostream>

using std::cout;
using std::cin;
using std::endl;

using namespace std;

Spline::Spline(int ns){ // Construtor
    n = ns - 1; // sao ns pontos(qntdade de pontos), mas a referencia sera de ns-1 para os
    x = new double[n+1]; // vetor x, armazena os valores do eixo x
    y = new double[n+1]; // vetor y, armazena os valores do eixo y, os f(x).

```

```

h = new double[n+1]; // vetor h, que armazena os espaçõs entres os x's.
a = new double[n+1]; // equivale aos f(x), aj = f(xj), sao termos independentes dos pol
b = new double[n+1]; // sao os valores que multiplicam o termo linear, bj*(x-xj)
c = new double[n+1]; // sao os valores que multiplicam o termo quadratico, cj*(x-xj)^2
d = new double[n+1]; // sao os valores que multiplicam o termo cubico, dj*(x-xj)^3
//Nota: S(x) = Sj(x) = aj + bj(x - xj) + cj(x - xj)^2 + dj(x - xj)^3

// Sao variaveis auxiliares usadas no algoritmo 1, para resolver o sistema linear
alfa = new double[n+1];
beta = new double[n+1];
gama = new double[n+1];
delta = new double[n+1];
}

void Spline::leituraPontos(void){
    // classe ifstream, de leitura
    ifstream arq("pontos.txt"); //Leitura dos pontos do problema, no arquivo pontos.txt
    for (int i=0; i <= n; i++){
        if (! arq.eof()){
            arq >> x[i];
            arq >> y[i];
            a[i] = y[i]; // ai = f(xi)
        }
    }
}

void Spline::exibePontos(void){ // Exibe na tela os pontos q foram lidos.
    cout << "j      xj      f(xj) \n";
    cout << "-----\n";
    for (int i=0; i <= n; i++){
        printf("%d\t%0.2f\t%0.2f\n",i,x[i],y[i]);
    }
    cout << "\nPrecione Enter pra executar o metodo Spline Cubica.";
    getchar();
    cout << "\n\n";
}

//Nota: S(x) = Sj(x) = aj + bj(x - xj) + cj(x - xj)^2 + dj(x - xj)^3
void Spline::passo1(void){ // Calcula os h's, distancia entres os x's
    for (int i=0; i < n; i++){
        h[i] = x[i+1] - x[i];
    }
}

```



```

    }
}

/** ALGORITMO 1 - Resolucao do Sistema Linear **/
// Consiste nos Passos de 2 a 6
void Spline::passo2(void){
    for (int i=1; i < n; i++){
        alfa[i] = (3.0/h[i])*(a[i+1] - a[i]) - (3.0/h[i-1])*(a[i] - a[i-1]);
    }
}

void Spline::passo3e4(void){
    beta[0] = 1.0;
    gama[0] = 0.0;
    delta[0] = 0.0;
    for (int i=1; i < n; i++){
        beta[i] = 2.0*(x[i+1] - x[i-1]) - h[i-1]*gama[i-1];
        gama[i] = h[i]/beta[i];
        delta[i] = (alfa[i] - h[i-1]*delta[i-1])/beta[i];
    }
}

void Spline::passo5e6(void){
    beta[n] = 1.0;
    gama[n] = 0.0;
    delta[n] = 0.0;
    for (int j=n-1; j >=0 ; j--){
        c[j] = delta[j] - gama[j]*c[j+1];
        b[j] = (a[j+1] - a[j])/h[j] - h[j]*(c[j+1] + 2.0*c[j])/3.0;
        d[j] = (c[j+1] - c[j])/(3*h[j]);
    }
}

```