

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Pedro Pereira Martins

**SIMULAÇÃO GRÁFICA DE UM SISTEMA ESTELAR BINÁRIO
COMPACTO**

Alfenas, 8 de Julho de 2015.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**SIMULAÇÃO GRÁFICA DE UM SISTEMA ESTELAR BINÁRIO
COMPACTO**

Pedro Pereira Martins

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em
Ciência da Computação da Universidade Federal de
Alfenas como requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Ciência da Computação.

[Orientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre Bressan]

Alfenas, 8 de Julho de 2015.

Pedro Pereira Martins

**SIMULAÇÃO GRÁFICA DE UM SISTEMA ESTELAR BINÁRIO
COMPACTO**

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova a monografia apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Alfenas.

Prof. Dr. Flávio Barbieri Gonzaga
Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Artur Justiniano Roberto Jr.
Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Paulo Alexandre Bressan
Universidade Federal de Alfenas

Alfenas, 8 de Julho de 2015.

Dedico este trabalho à todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram com essa conquista.]

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiro à minha família, principalmente pelo suporte e apoio que me foi dado durante este período.

Agradeço à Lais, minha companheira, por ter estado ao meu lado durante boa parte desta jornada.

Agradeço Aos professores do Curso de Ciência da Computação pelo conhecimento que obtive através deles e pelas amizades que foram feitas.

Agradeço à Universidade Federal de Alfenas pelo crescimento intelectual e pessoal obtido durante esta graduação.

Agradeço ainda o Fundo para o Desenvolvimento Tecnológico das Telecomunicações (Funttel), o qual forneceu apoio financeiro durante o projeto de iniciação científica que resultou neste trabalho.

|

RESUMO

Um Sistema Estelar Binário Compacto é uma ocorrência especial de sistemas estelares no qual duas estrelas orbitam um centro em comum, onde a mais brilhante pode ser chamada de primária e a menos brilhante de secundária. Se as duas componentes de um sistema estelar binário estão suficientemente próximas uma da outra, as estrelas podem mutuamente distorcer gravitacionalmente a atmosfera da sua companheira e em alguns casos pode inclusive haver transferência de material da estrela de menor densidade para a outra mais densa. Em astrofísica, o estudo desses sistemas é uma etapa no estudo do caminho evolutivo para a formação de um tipo específico de supernova. Além disso, pode auxiliar na compreensão de algumas de reações nucleares. A observação desses sistemas é particularmente difícil, pois, a emissão de luz da componente mais brilhante pode causar distorções e inclusive ofuscar a luz da componente menos brilhante. Muitas vezes a própria órbita do sistema coloca uma das componentes em eclipse. Foi desenvolvido um aplicativo para simular tridimensionalmente um Sistema Estelar Binário (Silva; Bressan; Roberto Jr., 2011), utilizando para isso valores simulados para os componentes gráficos. Este trabalho desenvolveu uma solução baseada em uma implementação em Fortran para o sistema de coordenadas proposto por Edouard A. Roche. A visualização tridimensional das grandezas físicas destes sistemas é calculada a partir de equações matemáticas e proporcionou maior precisão para dados calculados nas simulações.

Palavras-Chave: Objeto Virtual de Aprendizagem, Lóbulo de Roche, Simulação Gráfica, Sistema Estelar Binário Compacto.

ABSTRACT

A Compact Binary Star System is a special type of star system in which two stars orbit a center in common, where the brighter can be called as primary and the dimmer as secondary. If two components of a binary star system are close enough, the stars can distort gravitationally their partner atmosphere and sometimes can there be transfer of material from the less dense star to the other. In astrophysics, studying these systems is a step to learn the evolutionary path to the formation of a specific type of supernova. beyond that, can helps the understanding of some nuclear reactions. The observation of these systems is particularly hard in due to the light from the brighter component can distort and even obfuscate the dimmer's component light. Sometimes the system's orbit causes an eclipse and hides one component. An app has been developed to simulate three-dimensionally a Compact Binary Star System (Silva; Bressan; Roberto Jr., 2011), using simulated values to the graphic components. These work has developed a solution based in a Fortran software about the coordinate system proposed by Edouard A. Roche. The three-dimensionally preview of the physical magnitudes in this system is calculated now from mathematical equations and has provided more accurate data to the simulation. |

Keywords: |Virtual Learning Object, Roche Lobule, Graphic Simulation, Compact Binary Star System. |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIGURA 1: DESCRIÇÃO GERAL DE UM SISTEMA ESTELAR BINÁRIO. IMAGEM ADAPTADA DE ASTROPT | 25 |
| FIGURA 2: ILUSTRAÇÃO DE UMA VARIÁVEL CATACLÍSMICA..... | 26 |
| FIGURA 3: ILUSTRAÇÃO DOS LÓBULOS DE ROCHE EM TORNO DAS COMPONENTES DE UM SISTEMA BINÁRIO. FONTE: IMAGEM ADAPTADA DE "KNOWING THE UNIVERSE AND IT'S SECRETS"..... | 27 |
| FIGURA 4: VISUALIZAÇÃO DE VARIÁVEL CATACLÍSMICA E SUAS COMPONENTES. FONTE: (SILVA; BRESSAN; ROBERTO JR, 2011). | 28 |
| FIGURA 5: FLUXO DE EXECUÇÃO E INTERAÇÃO ENTRE OS ARQUIVOS DE CÓDIGO FONTE DA SOLUÇÃO IMPLEMENTADA EM FORTRAN. | 33 |
| FIGURA 6: INTERAÇÃO ENTRE OS PACOTES DE CÓDIGOS IMPLEMENTADOS NESSE PROJETO..... | 33 |
| FIGURA 7: DIAGRAMA DE CLASSES DO PACOTE <i>GEOMETRY</i> | 34 |
| FIGURA 8: DIAGRAMA DE CLASSES DO PACOTE <i>TEMPERATURE</i> | 35 |
| FIGURA 9: DIAGRAMA DE CLASSES DO PACOTE <i>LIGHTCURVE</i> | 35 |
| FIGURA 10: FLUXO DE EXECUÇÃO PRINCIPAL DA NOVA VERSÃO DO APLICATIVO SEBC. | 37 |
| FIGURA 11: PLOTAGEM GRÁFICA PARA OS VALORES OBTIDOS NOS TESTES PARA OS CÁLCULOS DA GEOMETRIA. | 38 |
| FIGURA 12: EXIBIÇÃO DOS PONTOS PERTENCENTES AO DISCO DE ACREÇÃO GERADAS PELO PACOTE <i>LIGHTCURVE</i> EM CONJUNTO COM AS SAÍDAS GERADAS PELO PACOTE <i>GEOMETRY</i> | 40 |
| FIGURA 13: VALORES DE EMISSÃO DE LUZ GERADOS PELO PACOTE <i>LIGHTCURVE</i> PLOTADOS EM UM PLANO NO FORMATO DE CURVAS. | 41 |
| FIGURA 14: JANELA DE SIMULAÇÃO EXIBINDO OS RESULTADOS PROCESSADOS PELOS PACOTES PRODUZIDOS. | 42 |
| FIGURA 15: JANELAS DE CONFIGURAÇÃO E DE SIMULAÇÃO NA PRIMEIRA VERSÃO DO APLICATIVO SEBC. FONTE: (SILVA,2011) | 44 |
| FIGURA 16: NOVA JANELA DE SIMULAÇÃO GRÁFICA EXIBINDO TODAS AS COMPONENTES DO SISTEMA ESTELAR BINÁRIO. | 45 |
| FIGURA 17: TELA DE CONFIGURAÇÃO DE DADOS PARA O SIMULADOR REFORMULADA. | 46 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 19 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO | 19 |
| 1.2 PROBLEMATIZAÇÃO..... | 20 |
| 1.3 OBJETIVOS..... | 21 |
| 1.3.1 Gerais | 21 |
| 1.3.2 Específicos | 21 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 23 |
| 2.1 APLICATIVO SEBC..... | 23 |
| 2.2 SISTEMA ESTELAR BINÁRIO COMPACTO..... | 23 |
| 2.3 VARIÁVEIS CATACLÍSMICAS..... | 26 |
| 2.4 MODELO DE ROCHE..... | 26 |
| 2.5 PONTOS DE LAGRANGE | 27 |
| 2.6 UMA SOLUÇÃO EM FORTRAN..... | 28 |
| 2.7 SIMULAÇÃO GRÁFICA | 29 |
| 2.8 TRABALHOS CORRELATOS..... | 30 |
| 3 METODOLOGIA..... | 31 |
| 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS..... | 31 |
| 3.1.1 Fase 1: Implementação do Modelo Matemático | 32 |
| 3.1.2 Fase 2: Integração com o aplicativo SEBC..... | 36 |
| 3.2 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO..... | 37 |
| 3.2.1 Geometria do Sistema | 37 |
| 3.2.2 Temperatura..... | 38 |
| 3.2.3 Curva de Luz..... | 39 |
| 3.3 INTEGRAÇÃO COM O APLICATIVO SEBC | 41 |
| 4 RESULTADOS | 43 |
| 4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 43 |
| 4.2 PACOTES DE CÓDIGO..... | 43 |
| 4.3 APLICATIVO SEBC..... | 43 |
| 5 CONCLUSÕES..... | 47 |
| 5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS..... | 47 |
| 5.2 OBJETIVOS ALCANÇADOS | 47 |
| 5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 48 |
| 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 51 |

1

Introdução

Estrelas binárias são as vias mais confiáveis para determinação das massa de estrelas distantes. A atração gravitacional entre as duas estrelas faz com que ambas orbitem um centro de massa comum. Através da análise das órbitas de uma binária visual, ou da variação com o tempo do espectro de uma binária espectroscópica, as massas das estrelas componentes podem ser determinadas e, conseqüentemente, a relação entre a aparência da estrela (temperatura e raio) e sua massa podem ser calculadas, o que permite o cálculo das massas de estrelas solitárias de características similares. Como uma proporção significativa de estrelas está em sistemas binários, eles são particularmente importantes no entendimento dos processos de formação estelar. Em especial, o período e as massas das binárias fornecem informações sobre o momento angular no sistema. Considerando que o último é um valor conservado em física, sistemas binários fornecem informações importantes sobre as condições sob as quais as estrelas foram formadas. |

1.1 Justificativa e Motivação

Pesquisas envolvendo Sistemas Estelares Binários são importantes não só na Astrofísica, mas também em outras áreas da Física. Devido a interação entre as componentes do sistema, é possível calcular valores como massa e raio, o que torna possível as mesmas informações de estrelas solitárias com características parecidas.

Além disso, o estudo desses sistemas permite que sejam compreendidas algumas reações nucleares particulares e ainda estender alguns conceitos para o contexto micro, como partículas subatômicas.

Os estudos sobre esses sistemas são baseados principalmente em dados oriundos de observações e a didática aplicada para o ensino utiliza principalmente

de desenhos e outras abstrações bidimensionais, que não fornecem uma visão clara e de fácil compreensão desses sistemas.

A observação pode se tornar bastante difícil, visto que o ângulo relativo do observador e o próprio movimento orbital do sistema podem gerar distorções na luz ou colocar uma das componentes em eclipse. As ferramentas de *software* que abordam esse tema são bastante limitadas, em alguns casos faz-se o uso de imagens animadas, o que limita a observação das variáveis do sistema.

Nesse contexto, uma ferramenta que possibilite uma visualização tridimensional consistente com o comportamento de um sistema estelar observado, baseado em argumentos matemáticos, é de grande valia para pesquisadores, professores e alunos que trabalhem nessas áreas. |

1.2 Problematização

|Um aplicativo para simular o graficamente um Sistema Estelar Binário Compacto foi desenvolvido pela Universidade Federal de Alfenas no Laboratório de Tecnologia Educacional do curso de Ciência da Computação (Silva; Bressan; Roberto Jr., 2011).

Ainda que forneça uma abstração visual muito boa, esse aplicativo foi construído a partir de parâmetros simulados para a produzir a visualização tridimensional. Por esse motivo, os resultados obtidos após o processamento não eram muito precisos e poderiam ser melhorados.

Uma coleção de códigos que implementavam o modelo de Roche para um Sistema Estelar Binário Compacto foi utilizada em um outro projeto por Roberto Jr (INPE, 2008). Tais códigos foram implementados na linguagem Fortran e são consistentes com um modelo matemático, mas não apresentam recursos gráficos. Com o intuito de melhorar a precisão do aplicativo SEBC, esse trabalho desenvolveu uma nova implementação da solução que esta codificada em Fortran, a qual produz resultados mais próximos dos dados de observação e foi integrada ao aplicativo. |

1.3 Objetivos

1.3.1 Gerais

Esse trabalho realizou uma reformulação geral do aplicativo SEBC que foi desenvolvido no laboratório de tecnologia educacional. Essa reformulação proporcionou maior precisão dos cálculos, o que tornou a simulação visual mais realística e consistente. |

1.3.2 Específicos

- Estudar os códigos que implementam o modelo de Roche na linguagem Fortran;
- Estudar a implementação do aplicativo SEBC;
- Implementar as soluções para geometria, temperatura e curva de luz na plataforma Java em pacotes de códigos distintos;
- Integração dos pacotes implementados com o aplicativo SEBC;
- Modificações na simulação gráfica e na interface com o usuário para atender novas exigências. |

2

Revisão Bibliográfica

Este capítulo faz uma revisão do aplicativo SEBC e de alguns conceitos importantes de Sistemas Estelares Binários Compactos, e em especial de Variáveis Cataclísmicas.

2.1 Aplicativo SEBC

Em 2012, Foi desenvolvido na Universidade Federal de Alfenas um simulador gráfico para um SECB (Silva; Bressan; Roberto Jr, 2011). Motivados pela falta de ferramentas que realizassem essa simulação e pela necessidade para ensino e pesquisa, produziram nessa ocasião um aplicativo que modela tridimensionalmente um Sistema Estelar Binário Compacto. Esse aplicativo passou então a ser utilizado em aulas na Universidade Federal de Alfenas.

2.2 Sistema Estelar Binário Compacto

Um Sistema Estelar Binário Compacto é um conjunto de dois corpos estelares que estão unidos pela a atração gravitacional. Geralmente, um desses dois corpos possui densidade e temperatura maiores, e pode ser, por exemplo, uma anã branca, estrela de nêutrons ou até mesmo um buraco negro. A outra componente do sistema possui densidade e temperatura menores, e pode ter sua massa subtraída pela atração gravitacional do outro corpo.

Conforme consta na pagina Depois da Morte (Prof2000, 2015), "Uma anã branca é aquilo em que uma estrela semelhante ao Sol se torna quando esgota o seu combustível nuclear. Quando isto acontece, a estrela expelle parte do seu material mais exterior, dando origem a uma nebulosa planetária, arrefece e encolhe durante

cerca de 30 mil anos até atingir as dimensões de um planeta. Este núcleo transforma-se então numa jovem, densa e quente anã branca que, a não ser que consiga agregar matéria de uma estrela vizinha, continua o processo de arrefecimento que durará cerca de dez milhões de anos. Ao final desse período atinge a temperatura de 3 000 K e se transforma numa anã preta, deixando praticamente de ser visível". Em complemento, o Observatório Educativo Itinerante (2009) diz que por ser originalmente a região central de uma estrela, uma anã branca é inicialmente um objeto bastante quente de massa comparável à do sol, mas com de tamanho comparável ao da Terra. Anãs brancas são bastante comuns, sendo encontradas em sistemas binários e em aglomerados, mas por serem muito pouco luminosas é difícil detetá-las.

As estrelas de nêutrons ou neutrões são corpos celestes supermassivos, ultracompactos e com gravidade extremamente alta. São também um dos possíveis estágios finais na vida de uma estrela. Elas são criadas quando estrelas com massa superior a oito vezes a do Sol esgotam sua energia nuclear e passam por uma explosão de supernova. No caso de uma supernova ocorrer em um sistema binário, a companheira da supernova pode sofrer alguns danos em suas camadas superficiais e mesmo assim continuar sua vida. Com isso, uma estrela de nêutrons será formada próximo à outra estrela. Quando esta estrela evoluir para uma gigante vermelha, o seu gás irá espiralar em direção à estrela de nêutrons. Esse gás que é tragado pela estrela de nêutrons formará um espesso disco ao redor dela (Wikipédia, 2015).

De acordo com a Teoria Geral da Relatividade, um buraco negro é uma região do espaço da qual nada, nem mesmo partículas que se movam na velocidade da luz, podem escapar. Este é o resultado da deformação do espaço-tempo causada após o colapso gravitacional de uma estrela. Tal colapso é causado por uma matéria astronomicamente maciça e ao mesmo tempo infinitamente compacta, que logo depois desaparecerá dando lugar ao que a Física chama de Singularidade. O coração de um buraco negro é onde o tempo para e o espaço deixa de existir (Wikipédia, 2015).

Supernova é o nome dado aos corpos celestes surgidos após as explosões de estrelas com massa estimada em mais de 10 vezes a do sol, que produzem objetos extremamente brilhantes. Esses objetos declinam até se tornarem invisíveis após

algumas semanas ou meses. Em apenas alguns dias o seu brilho pode intensificar-se em 1 bilhão de vezes a partir de seu estado original, tornando a estrela tão brilhante quanto uma galáxia. Apesar disso, com o passar do tempo sua temperatura e brilho diminuem até chegarem a um grau inferior aos primeiros (Wikipédia, 2015).

Segundo Almeida (2009), "um Sistema Estelar Binário Compacto é um conjunto de estrelas em que uma anã branca, que é mais densa e quente, sofre um acréscimo de material de uma estrela de densidade e temperatura menores. O material acrescido pode sofrer uma configuração em forma de disco em torno da anã branca sem que o mesmo venha a se fundir na massa original."

Discos de acréscimo são formados quando a estrela secundária de uma Variável Cataclísmica preenche seu lóbulo de Roche e perde matéria pelo ponto interno de Lagrange. Sistemas binários semiligados, como Variáveis Cataclísmicas não magnéticas, são talvez os melhores ambientes encontrados para o estudo da física desses discos de acréscimo.

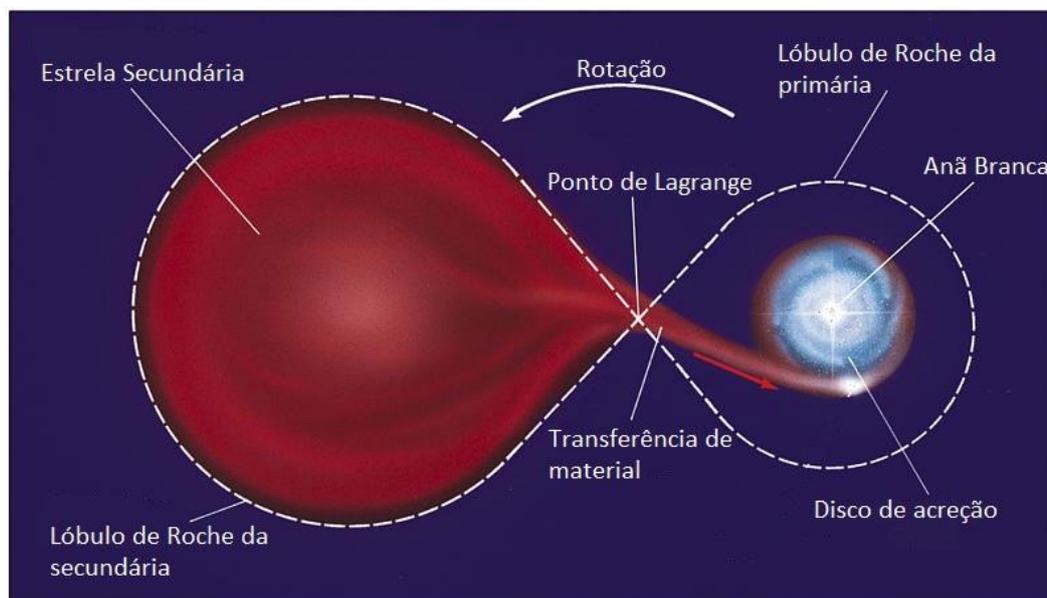


Figura 1: Descrição geral de um Sistema Estelar Binário. Imagem adaptada de AstroPT .

2.3 Variáveis Cataclísmicas

Variáveis cataclísmicas são um tipo especial de Sistemas Estelares Binários Compactos, onde uma estrela do tipo anã branca (primária) sofre um acréscimo de material de uma estrela de massa e densidade menores (secundária) ou de um objeto subestelar. Isto provoca o preenchimento da região do espaço em torno do corpo estelar, que é chamado lóbulo de Roche. O objeto mais frio em geral é a componente de menor massa no sistema, e por isso chamado de secundária. Em outra seção o Lóbulo de Roche será abordado de maneira mais detalhada



Figura 2: Ilustração de uma variável cataclísmica.
Fonte: Alem da Astronomia.

2.4 Modelo de Roche

O matemático francês Edouard A. Roche (1820-1883) utilizou um sistema de coordenadas para descrever a solução do problema de três corpos interagindo gravitacionalmente. Nesse modelo, ele supõe um sistema de duas massas puntiformes em órbitas circulares ao redor de um centro de massa comum, enquanto um terceiro corpo de massa desprezível move-se no campo gravitacional dos outros dois. "É possível mapear a estrutura tridimensional das regiões equipotenciais ao redor dos corpos massivos, a partir de valores do potencial gravitacional total experimentados pelo terceiro corpo. Essas superfícies

representam as regiões no espaço onde o movimento da terceira partícula, em relação ao sistema de coordenadas que está girando uniformemente com as duas massas, é zero" (Almeida, 2009). A distância entre essas massas puntiformes é normalizada para mapeamento no espaço com distância de valor 1.

O termo "lóbulo de Roche" se refere à superfície que delimita a forma de uma estrela (Ribeiro, 2007 apud Warner 1995). A matéria que ultrapassa essa superfície limite ou é transferida para a outra estrela, onde poderá formar um disco de acreção ou ser perdida pelo sistema. Esse trabalho estuda o caso particular onde a matéria que atravessa o lóbulo de Roche forma um disco em torno da estrela primária.

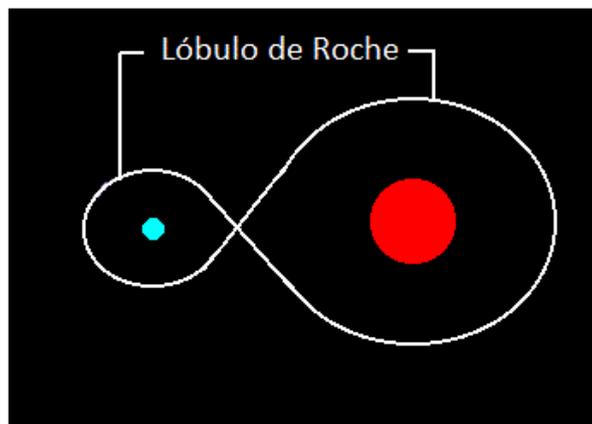


Figura 3: Ilustração dos lóbulos de Roche em torno das componentes de um sistema binário. Fonte: Imagem adaptada de "*Knowing the universe and it's secrets*".

2.5 Pontos de Lagrange

O matemático Italiano Joseph-Louis de Lagrange propôs a definição de pontos específicos em um sistema de corpos massivos. Pontos estes que apresentam características distintas em função das forças gravitacionais exercidas.

Um ponto de Lagrange é uma posição no espaço onde os campos gravitacionais de dois corpos em órbita se combinam para proporcionar um equilíbrio a um terceiro corpo de massa desprezível (Beutler, 2005).

Existem cinco pontos de Lagrange, dos quais três são instáveis. Esses pontos instáveis são chamados L_1 , L_2 e L_3 , e se posicionam ao longo de uma reta que conecta os centros de gravidade das duas massas. Nas variáveis cataclísmicas a estrela secundária perde material pelo ponto L_1 , que é atraído pela gravidade da estrela primária e forma um disco em torno desta. A Figura 4 é uma captura de tela do aplicativo desenvolvido e apresenta uma variável cataclísmica com todas as componentes massivas e os pontos de Lagrange em questão indicados pela legenda.

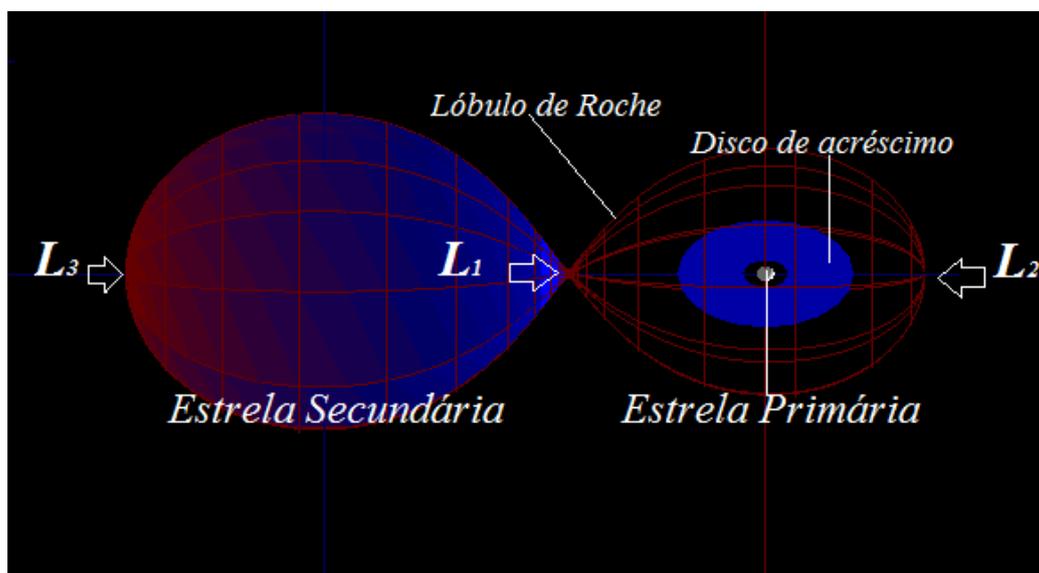


Figura 4: Visualização de Variável cataclísmica e suas componentes. Fonte: (Silva; Bressan; Roberto Jr, 2011).

2.6 Uma solução em Fortran

De acordo com a descrição encontrada em uma página da internet (Wikipédia, 2015), a linguagem de programação conhecida como Fortran (IBM) é na verdade uma família de linguagens desenvolvida a partir da década de 1950, que continua a ser usada hoje em dia. O nome é derivado da expressão "IBM Mathematical Formula Translation System".

As versões iniciais da linguagem eram conhecidas como FORTRAN, mas a capitalização foi ignorada em versões recentes da linguagem a partir do Fortran 90. Os padrões oficiais da linguagem referem-se a ela atualmente como "Fortran".

O Fortran permite a criação de programas que primam pela velocidade de execução. Daí reside seu uso em aplicações científicas computacionalmente intensivas como meteorologia, oceanografia, física, astronomia, geofísica, engenharia, economia entre outras.

Devido a essas características, Roberto Jr (INPE, 2008) fez uso de uma biblioteca de códigos fonte Fortran para desenvolver seu projeto de doutorado. Esses códigos são uma implementação antiga do modelo de Roche para um Sistema Estelar Binário Compacto. Embora o funcionamento desses códigos seja arcaico se comparado a maneira como utilizamos softwares atualmente, é uma solução já validada para o que foi proposto por Roche.

2.7 Simulação Gráfica

Definimos nesse trabalho simulação como sendo uma reprodução do funcionamento de um sistema qualquer em um ambiente virtual. Sendo o nosso ambiente virtual um aplicativo e o sistema a ser simulado um corpo estelar, tratamos o comportamento desse sistema através de equações matemáticas e definimos um modelo para representação gráfica.

Para simular matematicamente o comportamento de um Sistema Estelar Binário Compacto utilizamos o modelo matemático desenvolvido por Edouard A. Roche (1820-1883), que utilizou um sistema de coordenadas para tal representação. O modelo de Roche simula matematicamente o sistema, e para a simulação tridimensional utilizamos recursos de computação gráfica. É importante ressaltar que, devido ao modelo de Roche se basear em um sistema de coordenadas, é também adequado para abstração em um ambiente gráfico tridimensional.

No contexto específico de computação gráfica, a OpenGL (OpenGL Architecture Review Board), do inglês *Open Graphics Library*, é uma biblioteca livre amplamente utilizada na computação gráfica (OpenGL, 2015). A OpenGL foi produzida com C (Dennis Ritchie) e C++ (Bjarne Stroustrup) como base, mas pode ser utilizada para diversas outras com um alto nível de eficiência e permite o desenvolvimento de aplicativos gráficos, ambientes 3D, jogos, entre outros.

2.8 Trabalhos Correlatos

De acordo com Silva (2011), quando foi entregue a primeira versão do aplicativo SEBC não foram encontrados artigos científicos que abordassem o tema deste projeto. Também não foram encontrados softwares que simulassem de forma fiel, baseados em formulações matemáticas o funcionamento de um Sistema Estelar Binário Compacto.

Em paginas com conteúdo relacionado à Astrofísica foram encontradas algumas animações. No entanto, algumas não consideravam as equações matemáticas que expressam o comportamento de um Sistema Estelar Binário Compacto. Na página Astronomia e Astrofísica é possível visualizar um exemplo, que é na verdade uma imagem animada simulando de forma bem simples o Sistema Estelar Binário Compacto.

3

Metodologia

3.1 Considerações iniciais

Este trabalho pode ser considerado uma continuação de outro projeto do Laboratório de Tecnologia Educacional, o SEBC. Em conjunto com a Física, o desenvolvimento do aplicativo foi proposto com o intuito de facilitar pesquisas sobre Sistemas Estelares Binários Compactos e como ferramenta didática.

Cientes dos problemas e limitações da primeira versão do aplicativo, propusemos então uma reformulação na camada de *software* que efetua os cálculos e posiciona as componentes no espaço tridimensional. Essa reformulação inclui ainda mecanismos para cálculo da geometria do sistema, temperaturas e emissão de luz.

Os códigos utilizados por Roberto Jr (INPE,2008) implementam o modelo de Roche e que incluem os cálculos citados no parágrafo anterior, foram utilizados como base para esse trabalho, e os critérios para validação dos módulos desenvolvidos incluíam uma comparação com os valores gerados por aqueles códigos.

O desenvolvimento do projeto foi dividido em duas fases principais :

- Implementação do modelo matemático;
- Integração com o aplicativo SEBC.

As subseções a seguir vão explicar melhor a organização de cada uma dessas fases.

3.1.1 Fase 1: Implementação do Modelo Matemático

Essa primeira fase é a maior e a que consumiu mais tempo durante o desenvolvimento do projeto. O objetivo dessa etapa foi desenvolver um modelo matemático utilizado por Roberto Jr (INPE, 2008), o qual fora implementado na linguagem Fortran. Esse modelo matemático efetua os cálculos que geram valores de posicionamento, temperatura e emissão de luz do sistema baseados em parâmetros que representam propriedades ou comportamentos do sistema. Como essa coleção de códigos estava dividida em três arquivos principais, chamados *Geometry.f*, *Temperature.f* e *LightCurve.f*, foram definidas 3 etapas a serem cumpridas dentro dessa fase onde cada fase corresponde a implementação e validação para os cálculos de geometria, temperatura e curva de luz. Essa divisão de etapas foi proposta dessa forma com o intuito facilitar a definição de metas e a validação dos resultados.

As etapas dessa fase são:

- Geometria do Sistema;
- Temperatura;
- Curva de Luz.

Embora o desenvolvimento dessa fase tenha sido dividida em três etapas, elas são estritamente ligadas pelo modelo utilizado como base. Os códigos em Fortran correspondentes aos cálculos efetuados em cada uma dessas etapas são executados separadamente, e cada um alimenta a entrada da próxima execução através de arquivos de texto escritos durante a execução.

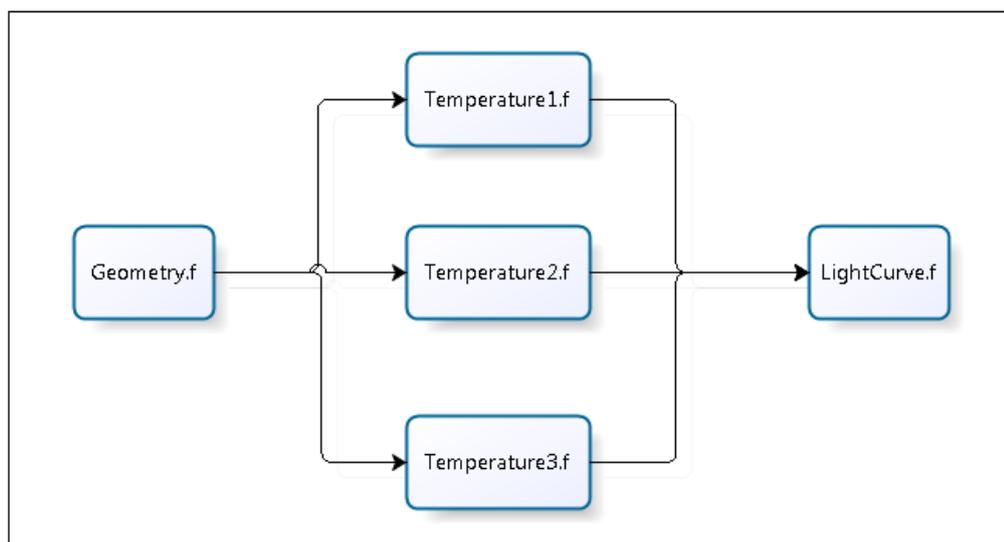


Figura 5: Fluxo de execução e interação entre os arquivos de código fonte da solução implementada em Fortran.

Na Figura 5 é possível observar 3 camadas principais de processamento, Geometria, temperatura e Curva de luz. A segunda, responsável pelos cálculos de temperatura, possui três caminhos possíveis no fluxo que se referem às temperaturas das componente de forma separada ou não. Para cada uma dessas camadas foi produzido em Java um pacote de códigos. Esses pacotes se interagem de forma parecida, porém as interações são transparentes e a comunicação entre os mesmos é feita por troca de mensagens entre as classes de controle.

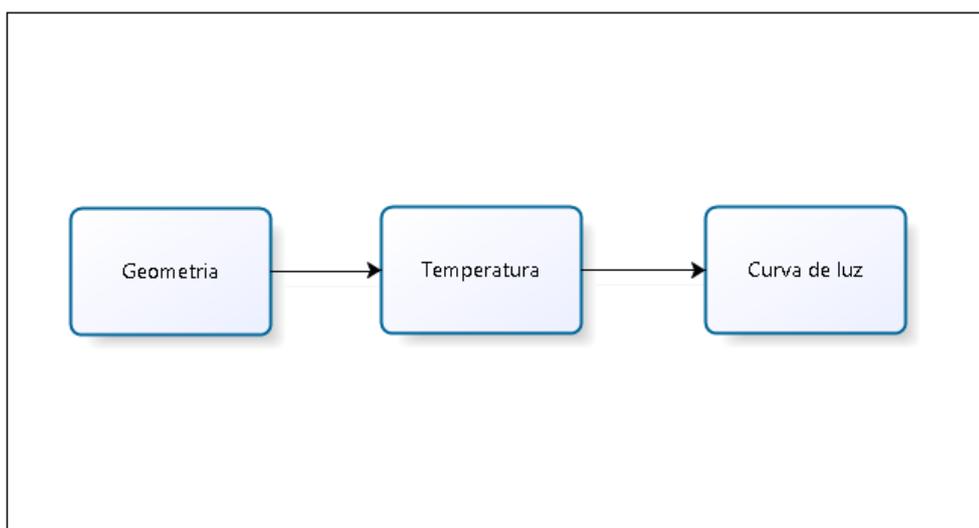


Figura 6: Interação entre os pacotes de códigos implementados nesse projeto.

A Figura 6 exibe o funcionamento do modelo proposto e implementado durante esse projeto, no qual os pacotes criados interagem de forma sequencial para, no final, fornecer os valores que serão utilizados para a simulação gráfica. As figuras a seguir são os diagramas de classes dos pacotes desenvolvidos, com a documentação dos metodos e atributos mais relevantes em cada uma das classes.

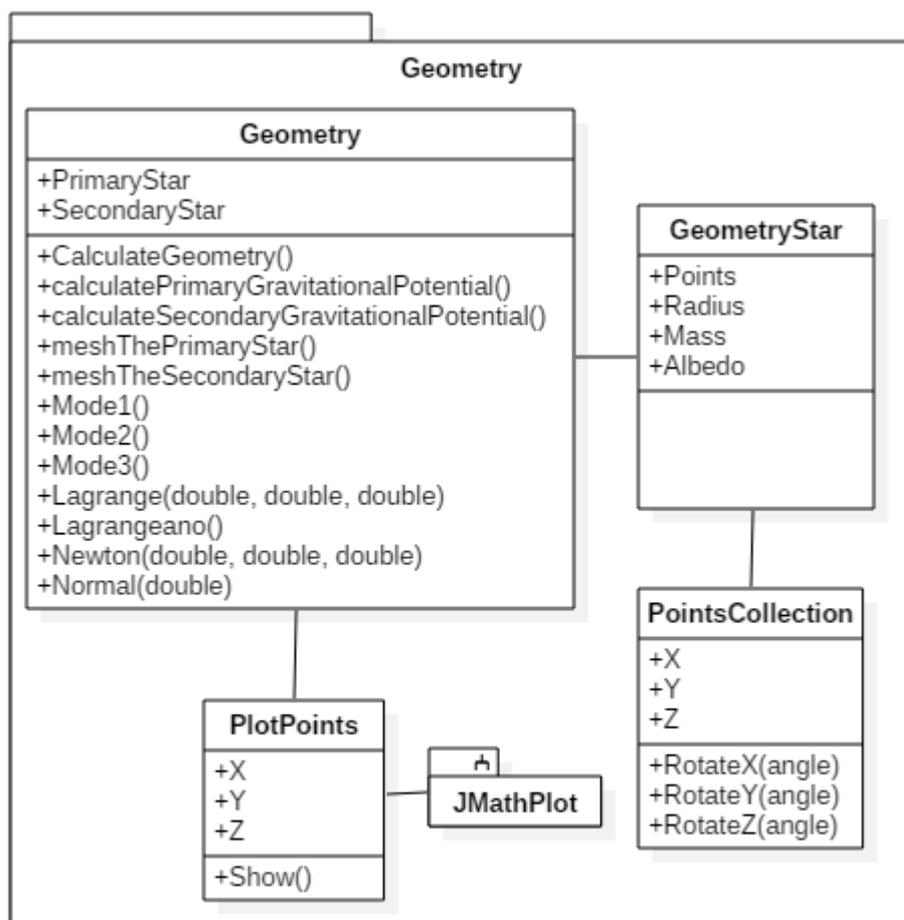


Figura 7: Diagrama de classes do pacote *Geometry*.

Dentro do pacote *Geometry*, temos uma classe chamada *PlotPoints*. Essa classe tem a responsabilidade de criar e exibir os gráficos com os resultados produzidos para possibilitar a validação visual dos dados. Nessa classe foi aplicado um padrão de projeto chamado Singleton, com o qual somente uma instancia desse objeto existe no software em execução.

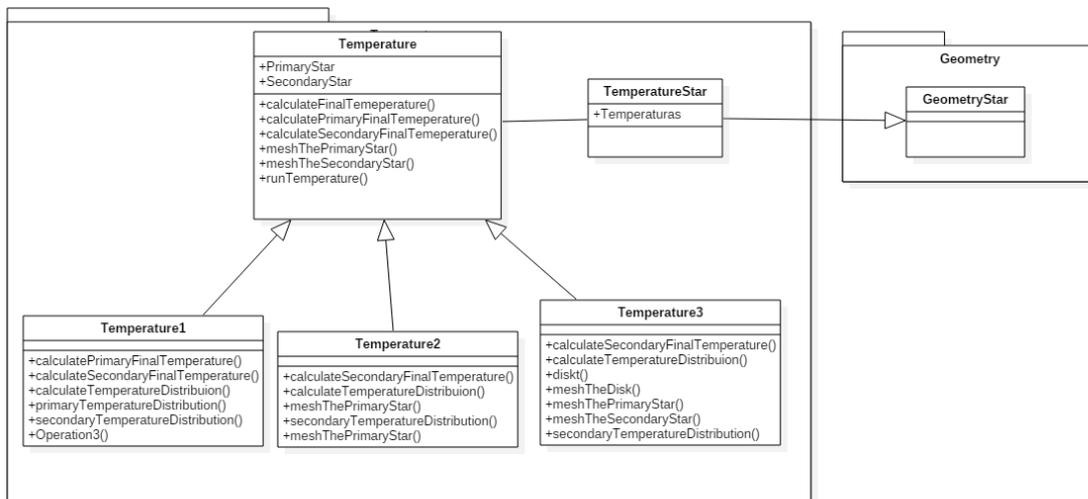


Figura 8: Diagrama de classes do pacote *Temperature*.

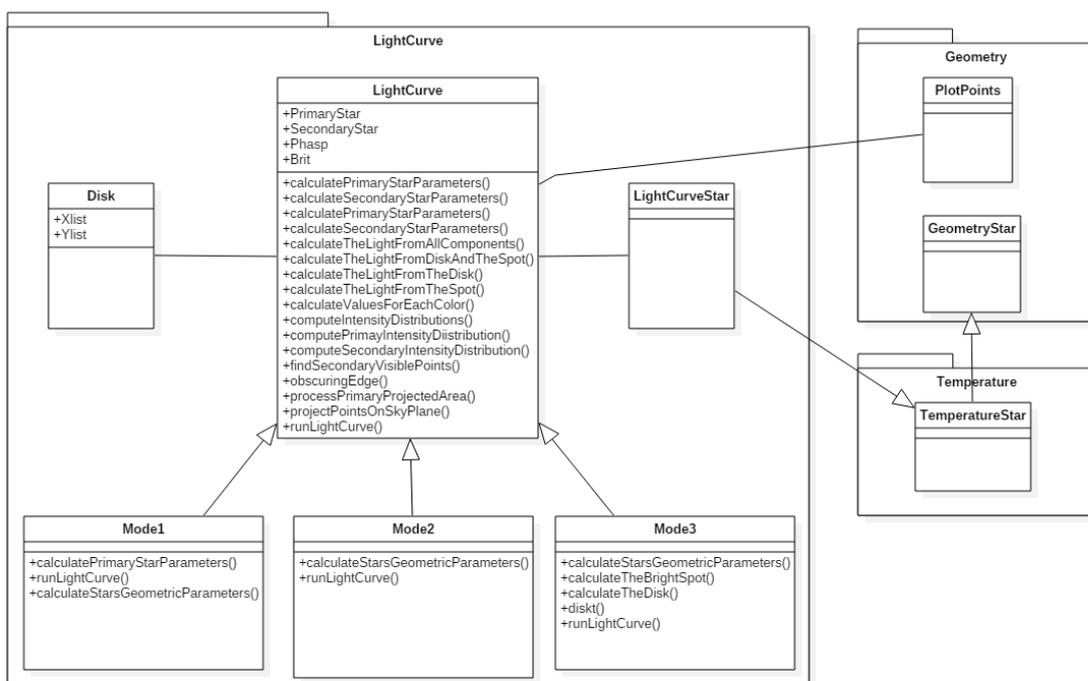


Figura 9: Diagrama de classes do pacote *LightCurve*.

Como pode ser observado nos diagramas de classes, alguns conceitos de orientação a objetos foram utilizados para uma melhor modelagem. Através da herança de classes e polimorfismo foi possível uma modelagem com alto reaproveitamento de códigos. A sobrecarga de métodos foi bastante utilizada

também, visto que em alguns casos as mesmas operações são calculadas de maneiras diferentes dependendo do fluxo de execução.

Partindo do fato que a implementação dos mecanismos de cálculo dessa fase estão estritamente ligadas à tradução de códigos, foi estipulada uma métrica de testes e validações comparando resultados a cada nova funcionalidade inserida. Ainda que essas validações levassem em conta apenas resultados parciais, elas apontaram problemas de cálculo que demandaram ajustes nos novos códigos. Java e Fortran são linguagens que foram separadas por algumas décadas, e se distinguem nas características da linguagem e no propósito de suas criações, o que gerou uma preocupação constante principalmente com a precisão numérica.

O projeto chamado JMathPlot (μ -Labs) é uma biblioteca *Open Source* para a plataforma Java que permite a construção de gráficos em duas e três dimensões. Devido às suas características, as funcionalidades que são herdadas e a natureza tridimensional do problema em questão, foi escolhido por fornecer os requisitos necessários para esse trabalho.

3.1.2 Fase 2: Integração com o aplicativo SEBC

Essa segunda fase do projeto é onde os cálculos implementados nesse trabalho foram inseridos no aplicativo SEBC, na camada responsável por gerar os dados de simulação. Para iniciar essa fase, os pacotes de código *Geometry*, *Temperature* e *LightCurve* estavam prontos e devidamente validados.

O fluxo de execução da primeira versão do aplicativo foi mantido, mas a camada responsável pelos cálculos foi substituída pelo novo mecanismo. Equipado agora de modelos e equações matemáticas e outras métricas de processamento, essa camada cresceu dentro do sistema e deve ser destacada no fluxo de execução. A Figura 10 ilustra o funcionamento interno do aplicativo atualizado, na qual o quadro "Camada de Processamento" representa a camada de software onde foram acoplados os pacotes de código desenvolvidos nesse trabalho.

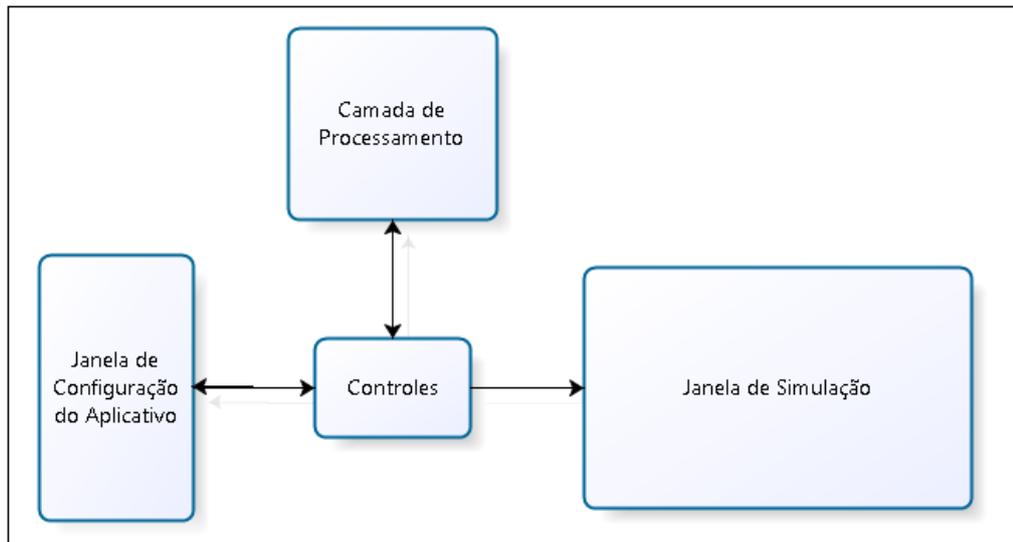


Figura 10: Fluxo de execução principal da nova versão do aplicativo SEBC.

3.2 Implementação do Modelo Matemático

3.2.1 Geometria do Sistema

A construção do mecanismo que calcula a geometria do sistema iniciou-se com o estudo do arquivo de código fonte *Geometry.f*, o primeiro dos códigos em Fortran que foram estudados nesse projeto, e que é responsável por construir a geometria do sistema estelar, gerando as coordenadas tridimensionais que dão forma a estrela secundária e ao lóbulo de Roche.

A execução dessa etapa produziu como resultado um pacote de códigos fonte na linguagem Java chamado *Geometry*. Para validação, em um primeiro momento, as saídas produzidas por esses códigos foram comparadas às do *Geometry.f*. Após essa validação, as saídas dos novos códigos foram plotadas em um gráfico tridimensional para uma validação visual. Conforme a Figura 11, foram gerados os pontos que formam os lóbulos de Roche da estrela primária e da secundária.

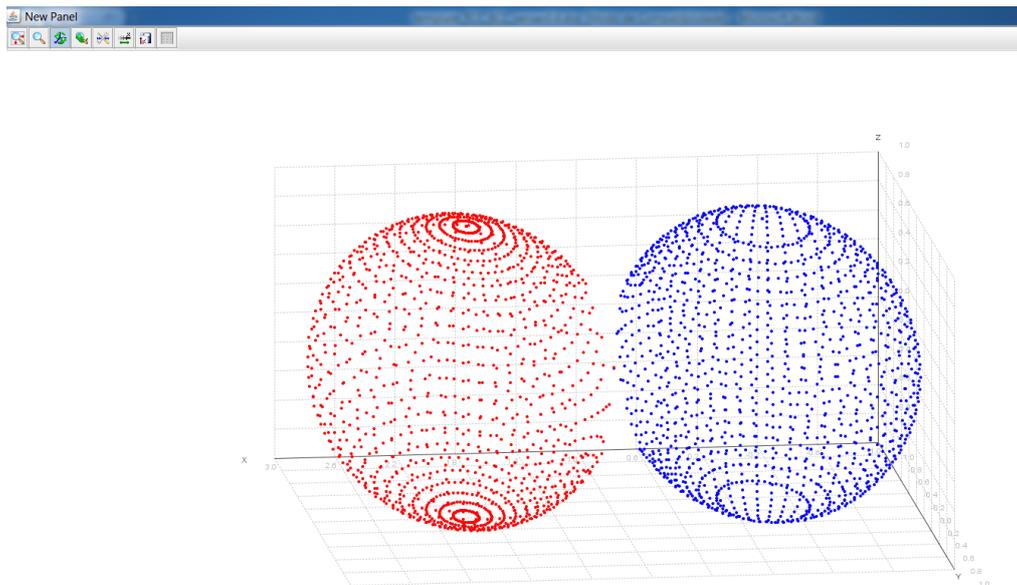


Figura 11: Plotagem gráfica para os valores obtidos nos testes para os cálculos da geometria.

3.2.2 Temperatura

Nessa etapa foram implementados os códigos que calculam a temperatura para alguns pontos do sistema. A base para esses cálculos são foram os arquivos *Temperature1.f*, *Temperature2.f* e *Temperature3.f*, e o produto final para essa fase foi um pacote de códigos fonte em Java, chamado *Temperature*. É importante ressaltar que, na solução em Fortran, a execução de cada código dependia da execução anterior, ou seja, a saída de uma execução alimentava a entrada da próxima. Portanto, os códigos produzidos em Java para o pacote *Temperature* dependem da de valores numéricos produzidos pela execução do pacote *Geometry*, pois os valores gerados por esse são utilizados como base para os cálculos.

Sobre a validação, essa etapa foi particularmente complicada. Um dos principais critérios de validação utilizados no projeto é a comparação dos resultados obtidos. A base de orientação que foi a solução implementada em Fortran apresentava erros de saída que inviabilizaram uma validação completa.

Nesse caso em específico, os códigos em Fortran apresentavam problemas de cálculo com divisões por zero, de modo que os valores de temperatura referentes à estrela secundária eram oriundos de um lançamento de exceção. Foram

gerados valores de saída NaN (*Not a Number*) para todos as temperaturas que eram esperadas para essa componente.

Por outro lado, a solução implementada em Java era capaz de calcular as temperaturas com valores numéricos válidos para todos os pontos esperados. Como o cronograma não incluía uma revisão desses códigos em Fortran e tão pouco uma correção para possíveis erros, não foi dedicado nenhum esforço para que isso fosse resolvido. Os valores gerados se encontravam em uma faixa válida para o sistema em questão, e por não termos qualquer outro meio de comparação, validamos esse pacote e passamos para a próxima etapa do projeto.

3.2.3 Curva de Luz

Essa etapa conclui a primeira fase do projeto. Ao final desta, a camada de *software* responsável por realizar os cálculos que expressam as características e os comportamentos do sistema deve estar validada e pronta para a segunda fase, onde será integrada ao aplicativo SEBC. É importante destacar uma importância particular dos códigos produzidos aqui pois, é a partir deles que serão calculados os valores que constroem o disco de acreção.

Baseada no código *LightCurve.f*, essa etapa produziu um pacote de códigos fonte Java chamado *LightCurve*, e suas principais responsabilidades são calcular o disco de acreção e medir a luz emitida pelo sistema. A luz emitida pelo sistema é recebida pelo observador, e calculada função do ângulo de observação. A validação nessa etapa é menos complicada e feita de maneira visual.

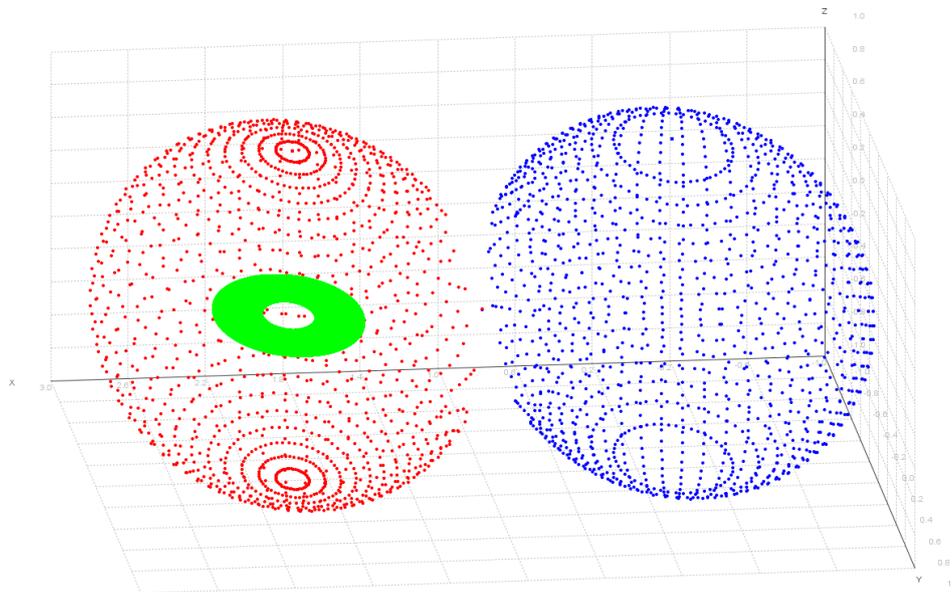


Figura 12: Exibição dos pontos pertencentes ao disco de acreção geradas pelo pacote *LightCurve* em conjunto com as saídas geradas pelo pacote *Geometry*

Com relação ao disco de acreção, são gerados os pontos que o compõem. Muito embora ele se assemelhe a um plano sólido na simulação, ele é na verdade um aglomerado de pontos no espaço. Devido ao alto número de pontos gerados e a proximidade entre eles, quando projetados no espaço ou na tela de simulação sua superfície aparenta ser contínua. Devido ao disco ser formado por material que a estrela secundária perde para a primária, cada ponto nesse disco representa algo como uma partícula ou um pequeno corpo massivo oriundo da estrela secundária.

Já em relação emissão de luz, é medida para cada fase de observação, que para o simulador é uma iteração durante o processamento. Para cada fase, é calculada a luz emitida em função do ângulo de observação. Para facilitar a interpretação desses valores visualizados em um plano na forma de curvas, onde o eixo x representa as fases e o eixo y a luz emitida.

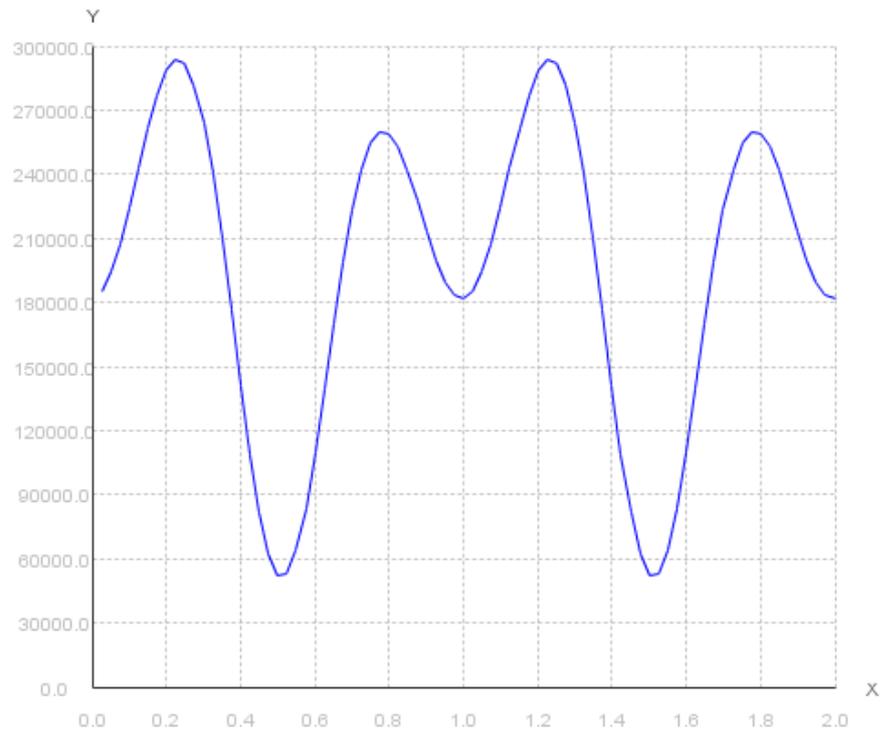


Figura 13: Valores de emissão de luz gerados pelo pacote *LightCurve* plotados em um plano no formato de curvas.

3.3 Integração com o aplicativo SEBC

Essa segunda fase foi onde o aplicativo SEBC foi de fato reformulado. Todos os pacotes gerados e testados na fase anterior foram finalmente acoplados ao aplicativo existente, substituindo a camada que simulava o comportamento do sistema, produzida no projeto anterior.

Para essa fase foi necessário uma dedicação para compreender o funcionamento do aplicativo SEBC para identificar onde os novos pacotes gerados deveriam ser acoplados e onde os seus valores calculados deveriam ser inseridos.

Como a computação gráfica do aplicativo já estava funcionando e foi validada, em tese deveria funcionar com os valores gerados pelo novo mecanismo. Na prática não foi o que aconteceu. Devido ao novo mecanismo ser baseado em um

modelo matemático, a quantidade de pontos gerados ao final do processamento se distinguiu de longe do modelo anterior. O resultado disso foi uma renderização confusa.

Em função disso foram necessárias algumas adaptações nos algoritmos responsáveis por exibir e ligar os pontos na tela do simulador. Algumas alterações na interface foram propostas para facilitar a interação com o usuário, além de outras que foram solicitadas durante o projeto. Feitas as alterações, o resultado foi uma janela de simulação exibindo uma abstração visualmente muito parecida com um Sistema Estelar Binário.

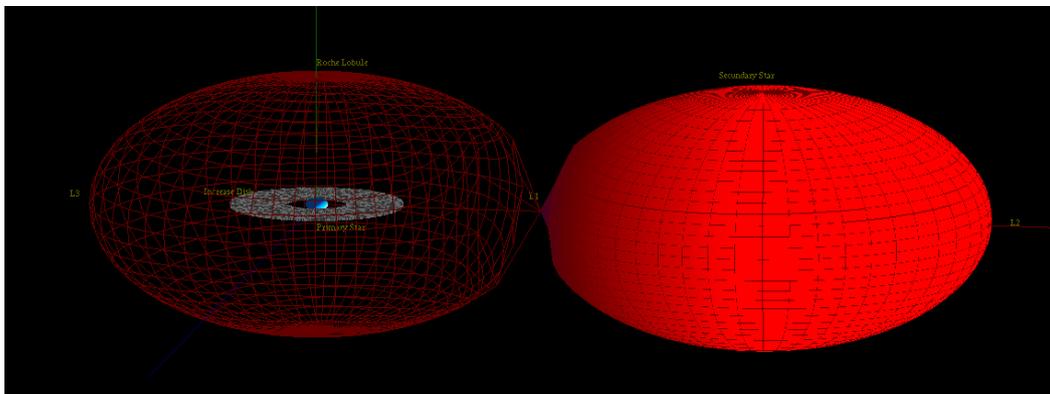


Figura 14: Janela de simulação exibindo os resultados processados pelos pacotes produzidos.

4

Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos ao final do projeto.

4.1 Considerações Iniciais

Ao fim do desenvolvimento desse trabalho podemos destacar dois produtos finais e seus resultados. O primeiro trata-se de uma coleção de códigos, constituindo três pacotes de códigos fonte em Java que são uma implementação do modelo de Roche. O segundo trata-se do aplicativo SEBC atualizado, que agora simula o funcionamento de um Sistema Estelar Binário Compacto a partir de equações matemáticas, provendo uma modelagem consistente com o problema.

4.2 Pacotes de Código

Ao fim do projeto três pacotes de código foram produzidos: *Geometry.f*, *Temperature.f*, *LightCurve.f*. Esses pacotes são a solução em Java para o modelo de Roche. No projeto esses pacotes foram acoplados no aplicativo com o intuito de processar os dados para a simulação, mas podem ser transformados em uma biblioteca facilmente caso desejado, e assim serem reaproveitados em qualquer outro projeto que necessite dessa solução.

4.3 Aplicativo SEBC

Conforme dito antes, a primeira versão do aplicativo não possuía mecanismos de processamento precisos como os dessa nova versão. A diferença na quantidade de

pontos que constituem cada um dos corpos que a versão anterior do aplicativo exibe na tela de simulação é notável quando comparada com o novo modelo implementado.

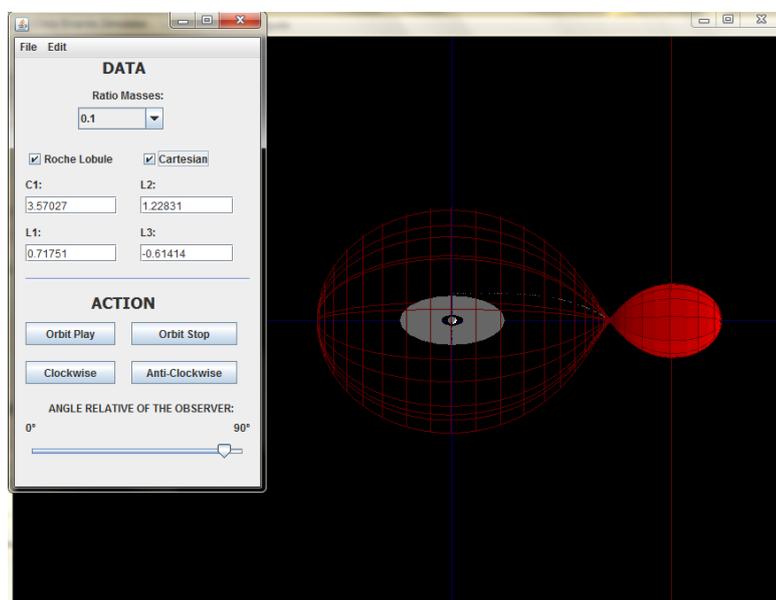


Figura 15: Janelas de configuração e de simulação na primeira versão do aplicativo SEBC. Fonte: (Silva,2011) .

O aplicativo SEBC foi atualizado com os novos pacotes de códigos fonte, que substituíram a camada que gerava os pontos dos corpos desenvolvida para a primeira versão. Com esse novo mecanismo o aplicativo proporciona uma simulação mais rica em detalhes e agradável visualmente, além de ser mais consistente com a observação de um Sistema Estelar Binário Compacto.

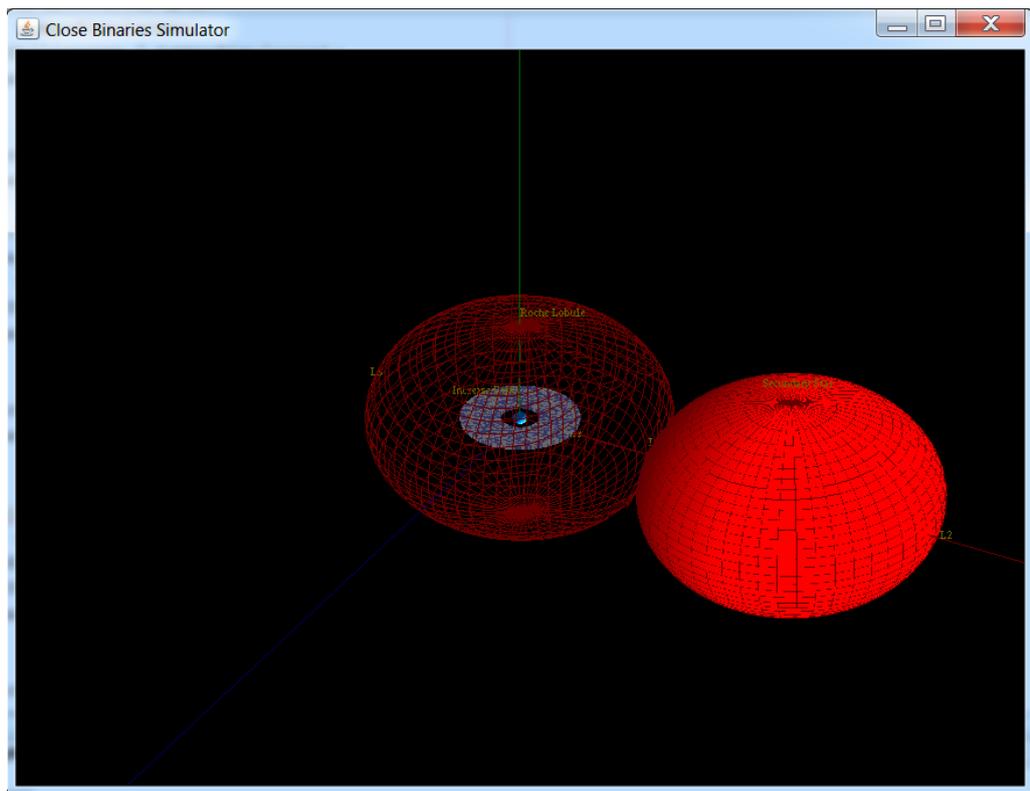


Figura 16: Nova janela de simulação gráfica exibindo todas as componentes do Sistema Estelar Binário.

A tela na qual o usuário seleciona as opções de simulação também sofreu algumas reformulações. Visualmente não mudou muita coisa além de uma opção que foi adicionada. Internamente foram incluídos alguns tratamentos e outros erros foram corrigidos. A Figura 15 exibe a janela de configuração e de simulação do aplicativo na versão anterior. As atualizações produzidas podem ser notadas observadas nas Figuras 16 e 17, que mostram como ficaram as telas de simulação e configuração, respectivamente.

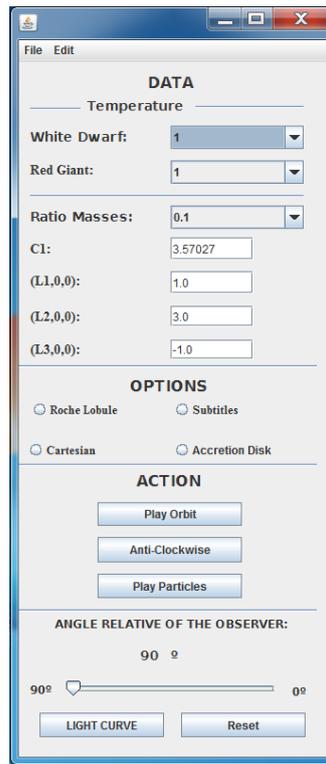


Figura 17: Tela de configuração de dados para o simulador reformulada.

5

Conclusões

Este capítulo apresenta as conclusões desta monografia.

5.1 Considerações iniciais

Ao final do projeto, pudemos contemplar os resultados obtidos verificar que os objetivos foram alcançados com sucesso. Nos próximos parágrafos serão abordadas as conclusões referentes a cada objetivo estabelecido para o desenvolvimento desse trabalho.

5.2 Objetivos alcançados

Com relação ao estudo dos códigos que implementam o modelo de Roche na linguagem Fortran, foi crucial para o sucesso de outros objetivos específicos e gerais do projeto. A compreensão do funcionamento desses códigos permitiu o desenvolvimento em outra linguagem produzindo saídas muito semelhantes e até idênticas em alguns casos. Tornou possível também uma melhor modelagem de software através da criação de classes que representam objetos reais de sistemas estelares. Os comportamentos modelados antes em uma linguagem procedural foram distribuídos entre classes distintas, nas quais a interação entre instancias das mesmas funcionam de maneira mais parecida com os relacionamentos entre componentes do Sistema Estelar Binário. Portanto, essa nova implementação do modelo de Roche utilizando orientação a objetos e alguns padrões de projeto, como Controller e Singleton, apresenta códigos de mais fácil compreensão e manutenção.

Estudar a implementação da primeira versão do aplicativo SEBC foi importante no sentido de definir como os novos mecanismos seriam acoplados ao

aplicativo, e compreender como algumas adaptações deveriam ser feitas para que a janela de simulação representasse os dados de maneira correta.

A implementação das soluções para os cálculos de geometria, temperatura e curva de luz produziu o mecanismo que gera os valores necessários para a simulação. O novo mecanismo foi integrado ao aplicativo e, feitas as adaptações necessárias se comportou conforme esperado.

A integração com a janela de simulação demandou atenção especial em relação aos algoritmos que tratam a ligação entre os pontos dos corpos. Alterações foram realizadas e propiciaram uma simulação mais agradável visualmente e consistente com os comportamentos físicos envolvidos.

Após a integração do modelo desenvolvido com o aplicativo, algumas modificações foram efetuadas nas janelas de configuração e simulação. As modificações na janela de configuração proporcionaram uma comunicação melhor com as camadas de controle, além de ter tornado a interação com o usuário mais simples.

5.3 Considerações finais

Dado que os objetivos propostos foram cumpridos, conseguimos então reformular o aplicativo SEBC e produzimos uma nova versão do mesmo. Essa nova versão apresentou uma evolução notável na precisão dos dados calculados para simulação. Devido ao novo modelo gerar um número grande de pontos, cada um dos corpos modelados na janela de simulação ficou mais parecido com a forma com que são observados pelos astrofísicos através dos telescópios, se assemelhando inclusive a algumas ilustrações.

O sucesso do projeto também pôde ser observado por outros aspectos, como atualizações futuras para o aplicativo. O novo modelo implementado calcula dados de temperatura dos componentes, que poderão ser utilizados para implementar as cores do sistema em função das temperaturas na próxima atualização.

Outra perspectiva futura seria a inclusão deste aplicativo dentro de um projeto maior, que ofereça outras ferramentas como simuladores para outros tipos

de sistemas ou fenômenos. Muito embora tal projeto ainda não exista, é muito plausível pensar em uma ferramenta mais completa e que possa agregar mais funcionalidades. Mesmo com tudo o que o Aplicativo SEBC representa, é necessário lembrar que o mesmo é uma simulação de um sistema estelar muito específico e que outras ocorrências podem ser desenvolvidas em projetos diferentes para então serem integrados em um sistema maior.

A nova versão do aplicativo está funcionando e pronta para ser utilizada como ferramenta de pesquisa e ensino.

6 Referências Bibliográficas

- [1]. μ -Labs: JMathPlot. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/mulabsltd/products/jmathplot>>. Acesso em: 29 de Jun. de 2015.
- [2]. Além da Astronomia : 7 mistérios do espaço que você provavelmente não sabia. Disponível em: <<http://www.alemdaastronomia.com/2014/08/7-inexplicaveis-misterios-do-espaco-que.html>>. Acesso em: 29 de Jun. de 2015.
- [3]. Almeida, Leonardo Andrade de. Atividade nas Estrelas Secundárias de Variáveis Cataclísmicas. INPE, 2009.
- [4]. Astronomia e Astrofísica: Departamento de Astronomia e Astrofísica da UFRGS. Disponível em:< <http://astro.if.ufrgs.br/evol/bin/node2.htm> > . Acesso em: 29 de Jun. de 2015.
- [5]. AstroPT: Das novas até a pilha do telescópio. Disponível em <<http://www.astropt.org/2015/03/02/das-novas-ate-a-pilha-do-telemovel/>>. Acesso em: 29 de Jun. de 2015.
- [6]. Beutler, Gerhard. Methods of Celestial Mechanics: Volume 1:Physical, Mathematical, and Numerical Principles, v. 1 Berlim: Springer-Verlag, 2005.
- [7]. C++ institute. Disponível em: <http://www.cppinstitute.org/?page_id=74>. Acesso em : 09 de Jul. de 2015;
- [8]. Freitas Filho, Paulo José de. Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas: com Aplicações em Arena - 2º edição. Florianópolis: Visual Books Ltda., 2008.
- [9]. Knowing the universe and it's secrets: Lexicon of some useful terms. Disponível em: <<http://nrumiano.free.fr/PagesU/Eindex.html>>. Acesso em: 29 de Jun. de 2015.

- [10]. Observatório Educativo Itinerante. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/oei/stars/wd/wd_evol.htm>. Acesso em: 09 de Jul. de 2015.
- [11]. OpenGL. Disponível em: <<https://www.opengl.org/>>. Acesso em: 29 de Jun. de 2015.
- [12]. OpenGL: OpenGL Overview. Disponível em: <<https://www.opengl.org/about/>>. Acesso em: 09 de Jul. de 2015.
- [13]. Prof2000: Estrelas depois da morte. Disponível em: <http://www.prof2000.pt/users/angelof/af16/ts_estrelas/depois_da_morte_anas_branca.htm>. Acesso em: 09 de Jul. de 2015.
- [14]. Ribeiro, Tiago. Análise de Variáveis Cataclísmicas no Infravermelho. UFSC, 2007.
- [15]. Roberto Jr, A, J. Fotometria de Variáveis Cataclísmicas no Infravermelho. INPE, 2008.
- [16]. Russell, S. & Norvig, P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall, 2003.
- [17]. Silva, A.L. ; Bressan, P. A. ; Roberto Jr, A. J. . Simulação Tridimensional de Sistema Estelar Binário: um Objeto Virtual de Aprendizagem no Ensino de Astronomia. In: I Simpósio Nacional de Educação em Astrofísica, 2011, Rio de Janeiro. Anais do I Simpósio Nacional de Educação em Astrofísica, 2011.
- [18]. Wikipédia: Fortran. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/?title=Fortran>>. Acesso em: 29 de Jun. de 2015.
- [19]. Wikipédia: Buraco Negro. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Buraco_negro>. Acesso em: 09 de Jul. de 2015.

- [20]. Wikipédia: Estrela de Nêutrons. Disponível em : <https://pt.wikipedia.org/wiki/Estrela_de_n%C3%AAutrons>. Acesso em: 09 de Jul. de 2015.
- [21]. Wikipédia: Fortran. Disponível em : <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Fortran>>. Acesso em: 09 de Jul. de 2015.
- [22]. Wikipédia: Interfade de Programação de Aplicações. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Interface_de_programa%C3%A7%C3%A3o_de_aplica%C3%A7%C3%B5es>. Acesso em: 29 de Jun. de 2015.
- [23]. Wikipédia: Supernova. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Supernova>>. Acesso em: 09 de Jul. de 2015.