

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

Adriano Luis da Silva

SIMULAÇÃO TRIDIMENSIONAL DE SISTEMA ESTELAR
BINÁRIO COMPACTO

Alfenas, 16 de Junho de 2011.

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

**SIMULAÇÃO TRIDIMENSIONAL DE SISTEMA ESTELAR
BINÁRIO COMPACTO**

Adriano Luis da Silva

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. Paulo Alexandre Bressan|

|Co-orientador: Prof. Artur Justiniano Roberto Junior|

Alfenas, 16 de Junho de 2011.

Adriano Luis da Silva

**SIMULAÇÃO TRIDIMENSIONAL DE 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^a. Juliana Maria Abreu da Silva Morbec

Universidade Federal de Alfenas

Prof. Luiz Eduardo da Silva

Universidade Federal de Alfenas

Prof. Artur Justiniano Roberto Junior (Co-orientador)

Universidade Federal de Alfenas

Prof. Paulo Alexandre Bressan (Orientador)

Universidade Federal de Alfenas

Alfenas, 16 de Junho de 2011.

|

Para Pai Hélio e Mãe Thuca, amo vocês!

AGRADECIMENTO

“Agradeço profundamente o empenho de meus pais nesta jornada, Hélio e Thuca. Digo, sem sombra de dúvidas, que não me seria possível concluí-la sem o apoio incondicional de ambos, seu carinho e dedicação. Que estejam comigo e desfrutem dos frutos deste labor por muitos anos.

Aos meus queridos irmãos Anderson, Hellen e à minha cunhada Aghata, que sempre presentes, fizeram deste ciclo de minha vida uma caminhada prazerosa e cheia de emoções. Obrigado pelo carinho, pela atenção e pelas noites de boemia, regadas pela cumplicidade.

À Sônia, que esteve comigo grande parte do tempo em que cursei a faculdade. Agradeço todas as vezes que me confortou e me deu forças para continuar nos momentos em que pensei em desistir. Que possa estar bem e acima de tudo feliz onde quer que esteja.

Aos meus amigos da república Canarinho: Lucas, João, Vinícius, Felipe e Douglas. Companheiros inseparáveis nos estudos e no dia-a-dia enquanto estive morando em Alfenas. Que sejam felizes em quaisquer caminhos que escolherem em suas vidas.

Ao meu querido amigo Rafael Peria, companheiro e colega da Computação. Que o sucesso esteja presente na sua vida, para que realize tudo aquilo que seu coração desejar.

Ao meu orientador Bressan, que me ajudou a desenvolver este trabalho, ensinando e orientando nos momentos de dúvidas. E ao meu também orientador Artur, que compartilha comigo a paixão pelas estrelas. Que a beleza insondável do Cosmo esteja sempre em nossos corações, nos iluminando e nos guiando rumo ao entendimento das coisas celestes.”

O Autor. |

“Se pude enxergar mais longe é porque me apoiei sobre ombros de gigantes.”

Sir. Isaac Newton (1699)

RESUMO

Sistemas Estelares Binários são conjuntos de estrelas que estão ligadas entre si pela atração gravitacional. Estes sistemas se caracterizam, geralmente, por estrelas que possuem diferentes densidades, ocasionando um acréscimo de material da estrela de menor densidade àquela que possui maior densidade. A importância destes sistemas pode contribuir para a compreensão de reações nucleares particulares, além de possibilitar o estudo do caminho evolutivo para a formação de um tipo específico de supernova.

Estudos e pesquisas realizados levam os astrônomos a terem consideráveis resultados, já que as observações desses sistemas são feitas, dentre outros, através de espectroscopia, fotometria e detectores sensíveis ao infravermelho. Segundo as características de um Sistema Estelar Binário, é dito que uma Variável Cataclísmica é um tipo particular do mesmo, sendo que a estrela de maior densidade é uma anã branca e a outra componente pode ser uma anã ou uma gigante.

A fim de se obter uma abstração visual para que cientistas e pesquisadores tenham um melhor entendimento, é proposto nesse trabalho a implementação de um protótipo para a simulação de Variáveis Cataclísmicas, dado a natureza de sua complexidade. Este simulador permitirá a visualização tridimensional dos dados e o ajuste dos parâmetros do sistema para uma melhor compreensão.

Palavras-Chave: Variáveis Cataclísmicas, Sistemas Estelares Compactos, Simulação Sistema Estelar.

ABSTRACT

Close Binaries are collections of stars that are bound together by gravitational attraction. This system is characterized usually by stars that have different densities, causing an increase in the star's material of lower density to that which has greater density. The importance of these systems can contribute to understanding special nuclear reactions, and allows the study of the evolutionary path for the formation of a specific type of supernova.

Studies and research have leading astronomers to significant results, since the observations of these systems are made, among others, through spectroscopy, photometry and infrared-sensitive detectors. According to the characteristics of a Close Binaries, it is said that a Cataclysmic Variable is a particular kind of it, with the highest density of star is a white dwarf and the other component may be a dwarf or a giant.

To achieve a visual abstraction so that scientists and researchers have a better understanding is proposed in this work the implement of prototype for the simulation of Cataclysmic Variables, given the nature of their complexity. This simulator will allow the three-dimensional visualization of data and adjustment of system parameters for better understanding.

Keywords: Cataclysmic variables, Close Binaries, Close Binaries Simulation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: UMA CONCEPÇÃO ARTÍSTICA SEGUNDO GARLICK (2002) DE UMA VC (ADAPTADA) [5].....	32
FIGURA 2: UMA REPRESENTAÇÃO TRIDIMENSIONAL DO POTENCIAL DE ROCHE NUM SISTEMA BINÁRIO COM UMA RAZÃO DE MASSA $Q = M_2 = M_1 = 0$, ADAPTADO [6].....	33
FIGURA 3: EQUIPOTENCIAL DO MODELO DE ROCHE EM UM PLANO, ADAPTADO [7].....	34
FIGURA 4: ESQUEMA GERAL DE UMA VC, DESTACANDO-SE SEUS PONTOS DE LAGRANGE	36
FIGURA 5: <i>EM CYG</i> SIMULADA PELO SOFTWARE <i>BINSIM</i> DE HYNES, ADAPTADO [13]	40
FIGURA 6: <i>A0620-00</i> SIMULADA PELO SOFTWARE <i>BINSIM</i> DE HYNES, ADAPTADO [13]	41
FIGURA 7: CAPTURA DE TELA DO SOFTWARE DE MODELAGEM DE VC'S SEGUNDO HYNES (2002): A MASSA DA ESTRELA SECUNDÁRIA COMEÇA A SER ATRAÍDA PELA PRIMÁRIA.....	41
FIGURA 8: 2º CAPTURA DE TELA DO SOFTWARE DE MODELAGEM DE VC'S SEGUNDO HYNES (2002): A MASSA DO DISCO NÃO SE CHOCA COM A ESTRELA PRIMÁRIA.....	42
FIGURA 9: 3º CAPTURA DE TELA DO SOFTWARE DE MODELAGEM DE VC'S SEGUNDO HYNES (2002): A MASSA DO DISCO SE CHOCA COM A ESTRELA PRIMÁRIA	42
FIGURA 10: DIAGRAMA DE CLASSES UML DEMONSTRANDO UMA VISÃO GERAL DO PROTÓTIPO. FONTE: <i>PLUGIN UML NETBEANS</i>	46
FIGURA 11: UMA VISÃO GERAL DE EXECUÇÃO DO PROTÓTIPO	52
FIGURA 12: TELA DE CONTROLE DO SIMULADOR	55
FIGURA 13: TELA INICIAL DE VISUALIZAÇÃO DO SIMULADOR. À DIREITA A ESTRELA SECUNDÁRIA E NA PARTE CENTRAL A ESTRELA PRIMÁRIA. ENTRE ELAS O FLUXO DE MATÉRIA	56
FIGURA 14: CAMPO <i>DATA</i> NA TELA DE CONTROLE DO SIMULADOR.....	57
FIGURA 15: CAMPO <i>ACTION</i> NA TELA DE CONTROLE DO SIMULADOR	58
FIGURA 16: VC COM RAZÃO DE MASSAS DE 0,1 E ÂNGULO RELATIVO DO OBSERVADOR DE 90°.....	59
FIGURA 17: VC COM RAZÃO DE MASSAS DE 0,1 E ÂNGULO RELATIVO DO OBSERVADOR DE 90°.....	59
FIGURA 18: VC COM RAZÃO DE MASSAS DE 0,1 E ÂNGULO RELATIVO DO OBSERVADOR ENTRE 45° E 90°. AS LINHAS CURVAS EM VERMELHO REPRESENTAM O LÓBULO DE ROCHE DAS COMPONENTES....	60
FIGURA 19: VC COM RAZÃO DE MASSAS DE 1 E ÂNGULO RELATIVO DO OBSERVADOR ENTRE 30° E 45°. AS LINHAS EM VERMELHO REPRESENTAM O LÓBULO DE ROCHE DAS COMPONENTES.....	60
FIGURA 20: VC COM RAZÃO DE MASSAS DE 0,42 E ÂNGULO RELATIVO DO OBSERVADOR DE APROXIMADAMENTE 45°. AS LINHAS RETAS DEMONSTRAM OS EIXOS CARTESIANOS.....	61
FIGURA 21: VC COM RAZÃO DE MASSAS DE 0,42 E ÂNGULO RELATIVO DO OBSERVADOR MENOR QUE 30°. A SECUNDÁRIA COMEÇA A ECLIPSAR A PRIMÁRIA EM ÓRBITA SENTIDO HORÁRIO.....	61
FIGURA 22: TELA DE VISUALIZAÇÃO DE UMA CURVA DE LUZ DE 45°	63

LISTA DE ABREVIACÕES

API	<i>Application Programming Interface</i> (Interface de Programação de Aplicações).
ARP	<i>Architecture Review Board</i> (Placa de Revisão de Arquitetura).
B	Campo Magnético
gif	<i>Graphics Interchange Format</i> (Formato de Gráficos Intercambiáveis)
GLU	<i>OpenGL Utility Library</i> (Biblioteca Utilitária OpenGL).
GLUT	<i>OpenGL Utility Toolkit</i> (Conjunto de Ferramentas Utilitárias OpenGL).
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> (Ambiente de Desenvolvimento Integrado).
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Padronização).
JOGL	Java OpenGL.
JVM	<i>Java Virtual Machine</i> (Máquina Virtual Java).
MG	Produto da massa solar $M = 1,9891 \times 10^{30} \text{Kg}$ pela constante gravitacional $G = 6,67300 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$.
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> (Administração Nacional de Espaço e Aeronáutica).
PHIGS	<i>Programmer's Hierarchical Graphics System</i> (Hierarquia de Programadores de Sistemas Gráficos).
SEBC	Sistema Estelar Binário Compacto.
SGI	<i>Silicon Graphics Inc.</i>
UML	<i>Unified Modeling Language</i> (Linguagem Unificada de Modelagem)
VC	Variável Cataclísmica.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	26
1.2 PROBLEMATIZAÇÃO	27
1.3 OBJETIVOS	27
1.3.1 Gerais	27
1.3.2 Específicos	27
1.4 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA	28
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1 SISTEMA ESTELAR BINÁRIO COMPACTO	31
2.2 VARIÁVEIS CATACLÍSMICAS	31
2.3 MODELO DE ROCHE	32
2.4 PONTOS DE LAGRANGE	35
2.5 A COMPUTAÇÃO GRÁFICA PARA SIMULAR UM SEBC	36
2.5.1 Simulação	37
2.5.2 OpenGL	38
2.5.2.1 Arquitetura	38
2.5.3 O Eixo X-Y-Z	39
2.6 TRABALHOS CORRELATOS	40
3 PROPOSTA	43
3.1 PROJETO	43
3.2 METODOLOGIA	44
3.3 DIAGRAMA DE CLASSES UML	45
4 IMPLEMENTAÇÃO	47
4.1 NETBEANS OPENGL PACK	47
4.2 CONSTRUINDO A ESTRELA SECUNDÁRIA E O LÓBULO DE ROCHE	48
4.3 A POSIÇÃO DO OBSERVADOR	51
4.4 INTERFACE GRÁFICA	52
4.5 PRIMITIVAS GRÁFICAS USADAS	53
4.6 O PROTÓTIPO	54
4.6.1 Aspectos gerais	54
4.6.2 Funções	56
4.6.3 Tela de visualização do sistema	58
4.6.4 Tela de visualização das curvas de luz	62
5 RESULTADOS	65
5.1 REALIZAÇÃO DOS OBJETIVOS	65
6 CONCLUSÕES	69
6.1 TRABALHOS FUTUROS	70
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

1

Introdução

A Astronomia pode ser considerada como uma das ciências mais antigas da humanidade. Desde a pré-história, nossos ancestrais tentavam associar eventos naturais celestes com entidades divinas, e assim, compreender melhor como viver. De acordo com as estrelas, os planetas e a Lua, foram estabelecidos rituais, o plantio, a colheita, e até mesmo a previsão do futuro. Segundo Filho e Saraiva (2000) [1], os registros astronômicos mais remotos podem ser datados de aproximadamente 3000 a.C. pelos egípcios, assírios, babilônios e, muitos séculos antes da era cristã, os chineses já usavam calendários de 365 dias, possuindo registros precisos de cometas, meteoros e meteoritos, além de observarem e relatarem supernovas.

A evolução da Astronomia e Cosmologia ao longo do tempo responderam questões há muito desconhecidas. Estudos teóricos a respeito do 'Big-Bang' apontam a origem dos primeiros tipos de átomos e a formação de gases constituídos por estes átomos. As primeiras estrelas, formadas pela aglomeração desses gases, foram os reatores nucleares que deram origem aos átomos primordiais existentes no Cosmo. A morte destas mesmas estrelas, ou seja, as supernovas, originaram os átomos essenciais para que a vida, como a conhecemos, pudesse se desenvolver. Assim, a investigação da evolução de sistemas estelares é uma importante tarefa no entendimento de nossas origens e, podemos assim dizer que todos nós somos "poeira das estrelas", segundo o astrônomo norte-americano Carl Sagan.

Dentre os sistemas estelares conhecidos, as Variáveis Cataclísmicas têm atraído o interesse de astrônomos profissionais e amadores. Segundo Kopal apud Herschel (1802) [2], um Sistema Estelar Binário é composto por duas estrelas ligadas gravitacionalmente. No entanto, as Variáveis Cataclísmicas são sistemas estelares binários compactos onde uma estrela do tipo anã branca, que é a

componente mais densa e quente, sofre um acréscimo de material da estrela menos densa, que pode ser uma gigante ou uma anã (Ribeiro, 2007) [3].

Considerando estes fatores e a nossa tecnologia atual, o Universo e a evolução das estrelas são objetos importantes de constante estudo. Muitas das observações e pesquisas feitas são reconstruídas em laboratórios, dada a natureza de sua investigação. Estrelas e fenômenos astronômicos são simulados em computadores para serem melhores observados e compreendidos. Algoritmos que descrevem fórmulas matemáticas são aplicados para recriar a interação gravitacional de sistemas estelares. Assim, a Ciência da Computação vem se desenvolvendo através da criação de ferramentas tecnológicas, incluindo ferramentas para a pesquisa astronômica, possibilitando o desenvolvimento da Computação Gráfica e a Realidade Virtual como uma das ferramentas mais importantes para a simulação de aspectos observáveis do mundo real.

1.1 Justificativa e Motivação

Os sistemas estelares chamados de Variáveis Cataclísmicas (VC's) são objetos de constante estudo no âmbito da Astronomia. É certo afirmar que dentre as componentes deste sistema, a estrela do tipo anã branca (chamada de primária) atrai matéria de sua estrela companheira (secundária), a qual orbita seu centro de massa. Dependendo da quantidade de hidrogênio acumulado na superfície da anã branca, esta pode sofrer uma explosão termonuclear, tornando possível a observação de reações nucleares particulares. Os Sistemas Estelares Binários Compactos (SEBC's) são importantes, pois se apresentam como um caminho evolutivo para a formação de supernovas do tipo I. (Justiniano, 2008 apud MacDonald, 1984 e Truran, 1992) [4].

Considerando estes fatores, um SEBC se torna um objeto importante de estudo para o entendimento de como estrelas podem evoluir ao longo do tempo, justificando a implementação de ferramentas cada vez mais sofisticadas para sua elucidação. Sua visualização através de radiotelescópios ou através de detecção sensível ao infravermelho não é uma tarefa simples, já que esses objetos requerem

algumas horas de exposição para a captura de seu espectro, devido, por exemplo, ao seu movimento orbital característico. |

1.2 Problematização

|Considerando a importância das VC's no contexto da evolução estelar e as dificuldades existentes nos métodos para a observação desses objetos, uma ferramenta que simule tridimensionalmente o comportamento de um SEBC pode ajudar pesquisadores de Astronomia e Astrofísica a obter uma melhor abstração visual do mesmo. Sendo assim, como ilustrar de forma tridimensional e interativa o acréscimo de massa da anã branca pela estrela de menor densidade a fim de se obter uma melhor compreensão de um SEBC? |

1.3 Objetivos

1.3.1 Gerais

|O objetivo principal deste trabalho é simular interativa e tridimensionalmente um SEBC permitindo a manipulação de seus parâmetros, a fim de que estudiosos e pesquisadores de Astronomia e Astrofísica possam ter uma melhor abstração visual do mesmo. |

1.3.2 Específicos

- |Estudar a biblioteca OpenGL, bem como seus recursos e os conceitos de Computação Gráfica para construir o modelo gráfico;
- Estudar um SEBC através de dados obtidos em estudos já realizados;

Entender como o modelo de Roche descreve o potencial gravitacional de um SEBC;

- Avaliar como os dados podem ser representados graficamente;
- Implementar o protótipo que faça a simulação tridimensional do SEBC. |

1.4 Organização da Monografia

Esta monografia está organizada em 6 (seis) capítulos. Além da parte introdutória, apresentamos cinco capítulos que discursam a respeito da teoria empregada na construção do simulador deste trabalho.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica a respeito de toda a teoria referente a sistemas estelares binários, bem como alguns tópicos de Astrofísica relacionados ao tema, explanando o conceito de VC's. O Capítulo apresenta ainda, dois trabalhos similares que foram encontrados em pesquisas no período de execução desta monografia.

O Capítulo 3 apresenta em resumo a proposta deste trabalho, que ocorreu na apresentação do pré-projeto na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso I. O capítulo possui ainda alguns aspectos da modelagem do protótipo, que são fundamentais para qualquer implantação de software, considerando desde seus requisitos até a codificação final.

O Capítulo 4 explica a lógica de implementação deste trabalho, ou seja, a parte de codificação e a metodologia empregada para a confecção deste código, abrangendo suas principais características e demonstrando em pseudocódigo algumas funcionalidades. Apresenta de maneira geral, a execução do protótipo de VC's e suas principais funcionalidades. Contém imagens reais da execução do software em várias capturas de tela, mostrando tanto o controle como as telas principais.

O Capítulo 5 expõe os resultados deste, ou seja, apresenta a realização dos objetivos específicos propostos nesta introdução na execução do protótipo de VC's e suas principais funcionalidades.

Finalmente, o Capítulo 6 discursa sobre as conclusões inerentes a esta monografia e aos seus trabalhos práticos realizados. Apresenta ainda algumas pretensões para a continuação deste projeto em momento oportuno, explicando quais seriam os próximos passos a serem realizados como trabalhos futuros.

2

Revisão Bibliográfica

Este capítulo faz uma revisão de alguns conceitos a respeito de Sistemas Estelares Binários Compactos, mais especificamente sobre as Cataclísmicas, principal objeto de simulação deste trabalho. A Seção 2.1 apresenta o conceito de um Sistema Estelar Binário Compacto e a Seção 2.2 conceitualiza uma Variável Cataclísmica. Nas seções seguintes apresentamos um estudo sobre a geometria de Roche e os Pontos de Lagrange, pontos fundamentais para a implementação deste sistema. Nas seções finais é comentado sobre trabalhos similares encontrados em pesquisas realizadas no tempo de execução desta monografia.

2.1 Sistema Estelar Binário Compacto

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

2.2 Variáveis Cataclísmicas

As Variáveis Cataclísmicas são 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, preenchendo seu lóbulo de Roche, que é a região do espaço em torno de um corpo estelar (mais detalhes a respeito do termo 'lóbulo de Roche' em 2.3). O objeto mais frio, em geral, é a componente de menor massa no sistema, e por isso chamado de secundária. Nos sistemas onde o campo magnético da anã branca é fraco, sendo B

$\ll 10MG$ (onde MG é o produto da massa solar $M = 1,9891 \times 10^{30}$ Kg pela constante gravitacional $G = 6,67300 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$), um disco de acreção forma-se em torno da mesma. Nos sistemas onde $B > 10MG$, o campo magnético impede a formação do disco e a matéria choca-se diretamente com a superfície da anã branca. Quando o campo magnético tem intensidade intermediária, há a formação de um disco que não se choca com a anã branca, não apresentando rotação sincronizada com o período orbital do sistema (Justiniano, 2008) [4]. A Figura 1 mostra uma concepção artística segundo Garlick (2002) de uma VC [5].

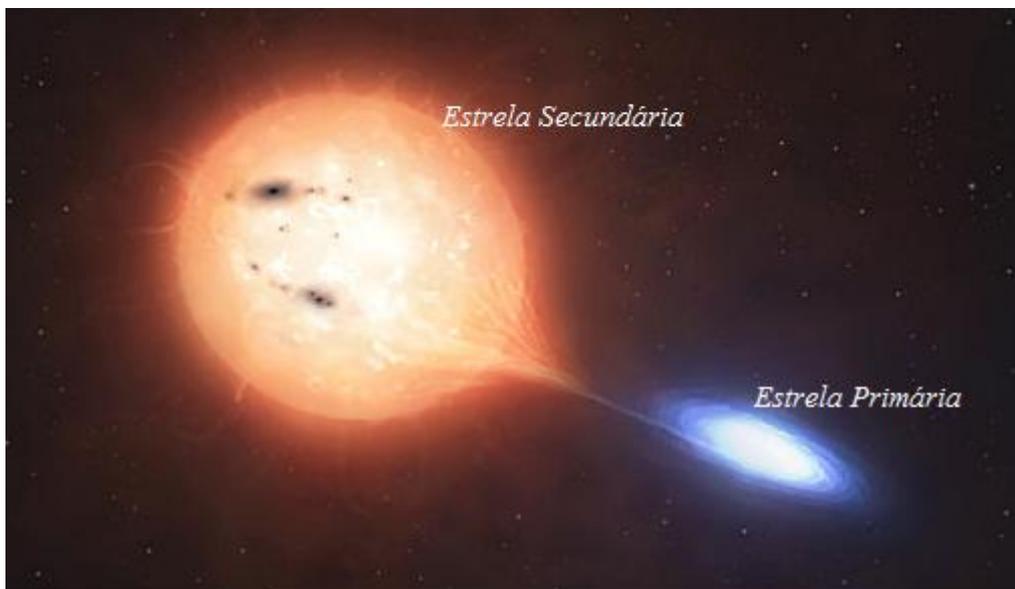


Figura 1: Uma concepção artística segundo Garlick (2002) de uma VC (adaptada) [5].

2.3 Modelo de Roche

A fim de se compreender melhor a dinâmica de um SEBC o matemático francês Edouard A. Roche (1820-1883) fez uso de um sistema de coordenadas que descreve a solução do problema restrito de 3 (três) corpos interagindo-se gravitacionalmente. 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 (conforme a Figura 2), 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) [6]. Considerando-se também que a distância entre as massas puntiformes é normalizada, isto é, mapeadas no espaço com distância de valor 1.

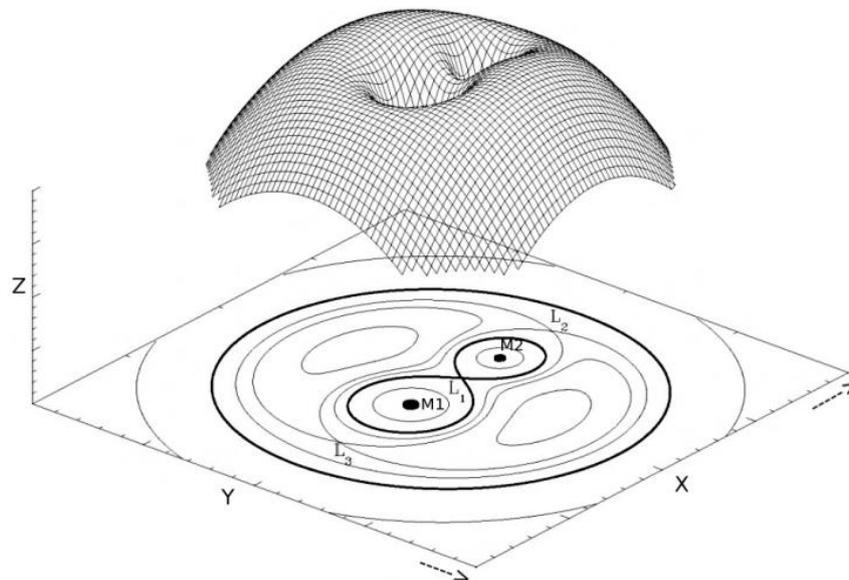


Figura 2: Uma representação tridimensional do potencial de Roche num sistema binário com uma razão de massa $q = M_2 = M_1 = 0$, adaptado [6].

Em um dado ponto (x, y, z) do espaço desse sistema, o potencial efetivo sobre uma partícula é a soma do potencial das duas massas. Como citado anteriormente, o termo “lóbulo de Roche” é a superfície que delimita a forma de uma estrela (Ribeiro, 2007 apud Warner 1995) [3]. A matéria que ultrapassa essa superfície limite ou é transferida para a outra estrela ou será perdida pelo sistema. Segundo M. Plavec, Ondrejov e P. Kratochvil (1963) [7] podemos mapear o modelo de Roche em um plano X-Y e calcular mais facilmente o equipotencial gravitacional do sistema, conforme Figura 3. Esta figura considera a estrela primária localizada no centro das origens, no ponto M_1 ; e a secundária localizada em M_2 . Os Pontos P_1' , P_1'' e P_{1n} são os pontos de intersecção dos eixos de localização das

componentes com o equipotencial gravitacional C_1 , enquanto os demais pontos P_2' , $P_{m+1,n}$ (m e $n \neq 0$) são os pontos de intersecção dos eixos de localização das componentes com os equipotenciais C_2 e C_3 (não considerados neste trabalho). Os pontos L_1 , L_2 e L_3 são descritos na seção seguinte. Desta maneira, o equipotencial de Roche (C_1) pode ser descrito segundo a equação:

$$C_1 = \frac{2}{1+m} \cdot \frac{1}{r_1} + \frac{2m}{1+m} \cdot \left(\frac{1}{r_2} - x \right) + (x^2 + y^2) + \frac{m^2}{(1+m)^2}$$

Onde:

- $m = \frac{m_2}{m_1}$, sendo m_1 = a massa da estrela em $(x,y,z) = (0,0,0)$ e m_2 = a massa da estrela em $(x,y,z) = (0,1,0)$;
- r_1 = a distância de um ponto qualquer localizado na superfície do lóbulo de Roche da estrela primária até $(x,y,z) = (0,0,0)$;
- r_2 = a distância de um ponto qualquer localizado na superfície do lóbulo de Roche da estrela secundária até $(x,y,z) = (0,1,0)$.

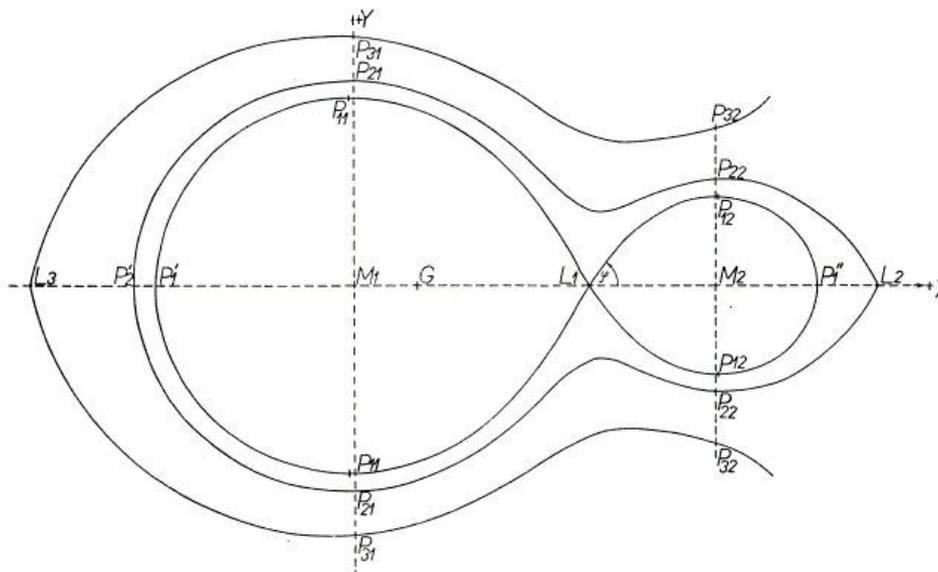


Figura 3: Equipotencial do modelo de Roche em um plano, adaptado [7].

2.4 Pontos de Lagrange

Os pontos de Lagrange foram definidos pelo matemático italiano Joseph-Louis de Lagrange quando descobriu a existência de pontos específicos próximos de um sistema orbital de dois corpos massivos. Estes pontos possuem características distintas porque as forças gravitacionais das massas cancelam a aceleração centrípeta.

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) [8]. Considerando o sistema Terra-Lua e um satélite colocado sobre um destes pontos, por exemplo, o satélite permanece estático em relação ao sistema.

Dos cinco pontos de Lagrange, três são sempre instáveis e dois podem ser estáveis. Os pontos de Lagrange instáveis denominam-se: L_1 , L_2 e L_3 , e estão ao longo de uma linha conectando os centros de gravidade das duas massas. Os pontos que podem ser estáveis (dependendo da relação entre as massas dos dois corpos principais) denominam-se: L_4 e L_5 . Em particular às VC's, a estrela secundária perde parte sua massa pelo ponto L_1 , que é capturada pela atração gravitacional da estrela primária, tomando forma de um disco. A Figura 4 (captura de tela do próprio simulador) mostra um esquema geral de uma VC, destacando a importância dos pontos L_1 , L_2 e L_3 para o mapeamento do equipotencial de Roche, considerando um sistema estelar com suas medidas normalizadas.

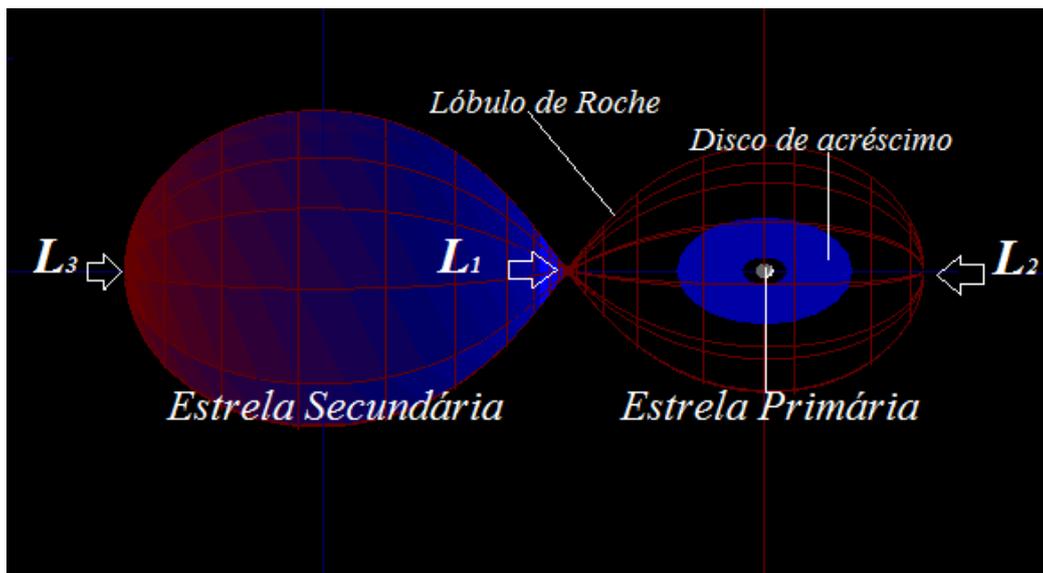


Figura 4: Esquema geral de uma VC, destacando-se seus pontos de Lagrange

2.5 A Computação Gráfica para Simular um SEBC

De acordo com a ISO (International Organization for Standardization) [9], a definição de Computação Gráfica é: “um conjunto de ferramentas e técnicas para converter dados para/ou de um dispositivo gráfico através de um computador”. A Computação Gráfica tem por essência o armazenamento de dados em estruturas especializadas para que possam ser representados graficamente, por meio de algoritmos que construam perspectivas de visualização em um monitor tanto em duas ou três ou dimensões. Podendo construir também animações por meio da execução desses algoritmos, alternando seus valores de entrada. Tais algoritmos são baseados em transformações geométricas e algébricas, que têm seus fundamentos na matemática conhecida. Ainda sobre a Computação Gráfica, segundo Azevedo e Conci (2003) [9], “é uma ferramenta artística que proporciona um maior poder de abstração, criando imagens complexas e em muitos casos não imaginadas”.

A computação gráfica, por ser uma ferramenta artística, foi escolhida para ser usada como ferramenta de simulação neste trabalho pelo seu alto poder de abstração. Um fenômeno ocorrido há muitos anos-luz de distância e conhecido apenas pelas informações de seu espectro de luz, pode facilmente ser reproduzido através de uma animação com primitivas gráficas e de ajustes de seus parâmetros. As particularidades de tais fenômenos, tais como a suposta cor, intensidade de brilho da luz emitida pelo objeto e seus movimentos orbitais podem ser simulados pela descrição de suas fórmulas bem definidas no campo da Astrofísica.

2.5.1 Simulação

A simulação consiste em empregar formalizações, expressões matemáticas ou especificações mais ou menos padronizadas, para que seja possível imitar um processo ou uma operação do mundo real. Desta forma, para se realizar uma simulação computacional, é necessário construir um modelo que corresponda à situação real que se deseja simular (Freitas apud Pedgen 2008) [10].

Para a construção do simulador de um SEBC, foi levado em conta que a simulação computacional de sistemas consiste na utilização de certas técnicas matemáticas, empregadas em computadores, as quais permitem imitar o funcionamento de praticamente qualquer tipo de operação ou processo do mundo real. Portanto, o estudo do comportamento de objetos ou situações reais através do exercício de modelos.

Existem diversas definições para a simulação, dentre elas podemos citar a de Pegden (Freitas apud Pedgen 2008) [10] que diz: “a simulação é um processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação”.

Desta maneira, podemos entender a simulação como um processo amplo que engloba não apenas a construção do modelo, mas todo o método experimental que se segue, buscando:

- Descrever o comportamento do sistema;
- Construir teorias e hipóteses considerando as observações efetuadas;

- Usar o modelo para prever o comportamento futuro, isto é, os efeitos produzidos por alterações no sistema ou nos métodos empregados em sua operação.

A escolha da Computação Gráfica para a construção do simulador foi devido à natureza do problema. Como dito anteriormente, os astrônomos não possuem ferramentas que possibilitem a visualização direta de um SEBC. Conhecendo um modelo que descreva a interação gravitacional das duas estrelas, bem como o seu comportamento de forma dinâmica, é possível usar um ambiente tridimensional mapeado por coordenadas espaciais para a construção de uma simulação, provido pela Computação Gráfica.

2.5.2 OpenGL

2.5.2.1 Arquitetura

O OpenGL é um conjunto de algumas centenas de funções, que fornecem acesso a praticamente todos os recursos do hardware de vídeo. Internamente, ele age como uma máquina de estados, que de maneira bem específica dizem ao hardware o que fazer. Usando as funções da API, é possível habilitar ou desabilitar vários aspectos dessa máquina, tais como a cor atual de um vértice, qual transparência será usada, se cálculos de iluminação devem ser feitos, se haverá ou não o efeito de neblina, e assim por diante. É importante conhecer cada um desses estados, pois não é incomum a obtenção de resultados indesejados simplesmente por deixar um ou outro estado definido de maneira incorreta.

O OpenGL também foi projetado para funcionar mesmo que a máquina que esteja exibindo os gráficos não seja a mesma que contém o programa gráfico. Pode ser o caso de dois computadores estarem conectados em rede e, nesse caso, o computador que gera os comandos é chamado cliente, enquanto o que recebe e executa os comandos de renderização é chamado de servidor. O formato da transmissão desses comandos (chamado protocolo) também é padronizado, então é possível que duas máquinas com sistemas operacionais e hardwares diferentes se comuniquem dessa forma. Se o OpenGL não está sendo executado numa rede, o

computador é considerado ao mesmo tempo cliente e servidor. Essa decisão de projeto tem uma consequência muito importante: os comandos do OpenGL não são imediatamente jogados para o hardware. Eles são agrupados para serem enviados mais tarde - o que não só aperfeiçoa o uso da rede, mas também abre margem para outras otimizações.

Por consequência, um erro comum de muitos programadores é tentar medir o tempo levado pelos comandos de renderização simplesmente adicionando funções antes e depois de um comando (ou conjunto de comandos) que, nessa arquitetura, certamente gerará resultados inválidos. Afinal, não há garantias de que os comandos serão imediatamente executados, e o que acaba sendo medido com essa estratégia, é a velocidade que o OpenGL armazena os comandos para futura execução. Forçar a execução dos comandos também é uma estratégia ruim, já que com isso muitas otimizações são simplesmente desprezadas.

O OpenGL ainda possui a vantagem de se integrar com placas aceleradoras gráficas, sendo que muitos desses algoritmos já são implementados para executarem no hardware. Mais detalhes no próprio endereço eletrônico do OpenGL [11].

2.5.3 O Eixo X-Y-Z

Um ambiente tridimensional em Computação Gráfica pode ser mapeado de acordo com a geometria espacial Euclidiana, ou seja, uma vez instaladas em um computador todas as bibliotecas requeridas para se trabalhar com alguma ferramenta, a própria disponibiliza códigos específicos que traduzem toda a geometria espacial, bem como suas operações e transformações já fundamentadas. Resta então ao programador, conhecer bem a sintaxe e a semântica referente à linguagem de programação usada pela ferramenta gráfica.

Especificamente sobre uma VC e de acordo com M. Plavec, Ondrejov e P. Kratochvil (1963) [7], a distância entre as duas componentes do sistema é normalizada e igual a 1 (uma unidade). Assim, podemos considerar em um ambiente tridimensional que, tanto a primária quanto a secundária, estejam localizadas sobre o eixo X, inicialmente localizadas respectivamente em $(x,y,z) = (0, 0, 0)$ e $(x,y,z) = (1, 0, 0)$, sendo a secundária a orbitar a primária.

2.6 Trabalhos Correlatos

Em pesquisas realizadas na Internet e artigos científicos relacionados ao tema deste projeto, não encontramos softwares que simulassem de forma fiel, baseados em formulações matemáticas, a dinâmica de um SEBC. Animações apenas artísticas foram encontradas em sites relacionados à Astrofísica que tratam sobre as VC's. Estas animações eram construídas desconsiderando as formulações matemáticas e apenas abstraíndo sua idéia básica. Outras animações, porém, eram construídas em *Flash* ou em arquivos de extensão *.gif* demonstrando de forma simples um SEBC, de acordo, por exemplo, com o endereço eletrônico em [12].

Dois trabalhos de modelagem tridimensional a respeito de binárias foram feitos por Hynes em *Visualising Interacting Binaries in 3D* (2002) [13]. Um deles consiste em um software que modela algumas das binárias catalogadas com seus dados pré-estabelecidos em observações realizadas. O software chamado de *BinSim*, está disponível em [13]. As Figuras 5 e 6 mostram respectivamente os SEBC's *EM Cyg* e *A0620-00* (nomes específicos de duas VC's segundo suas localizações), simulados por este software.

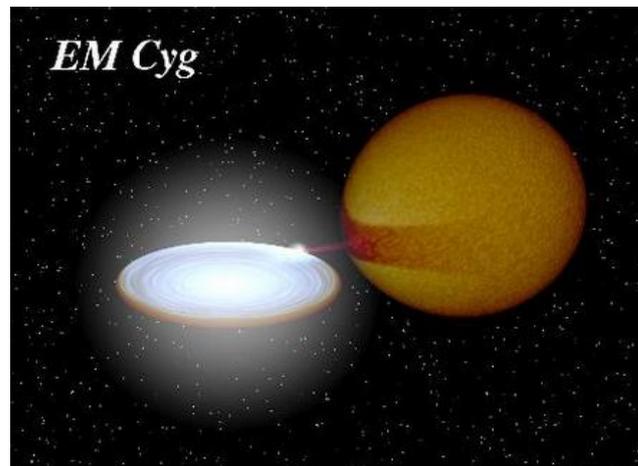


Figura 5: *EM Cyg* simulada pelo software *BinSim* de Hynes, adaptado [13]

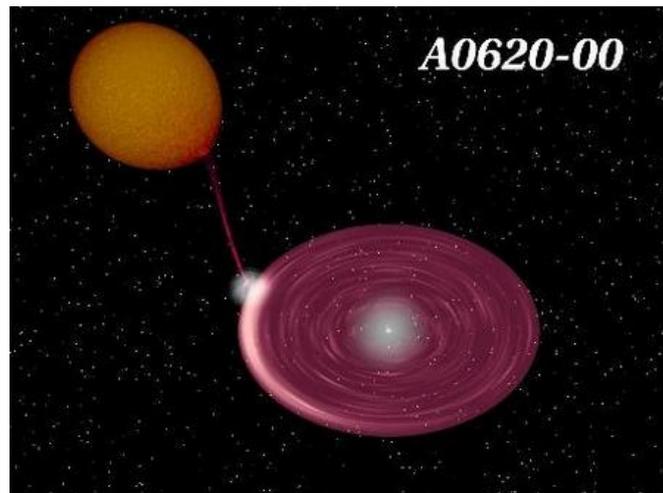


Figura 6: *A0620-00* simulada pelo software *BinSim* de Hynes, adaptado [13]

O outro trabalho de Hynes (2002) a respeito de VC's apresenta um esquema geral do comportamento das binárias, contendo uma representação visual estática bastante intuitiva. Este trabalho também foi testado em um computador pessoal com sistema operacional Linux, possuindo um processador Pentium Dual-Core T3100 de 1.90 GHz, com 2 GB de memória RAM. A seguir algumas imagens deste software.

A Figura 7 apresenta uma VC em sua fase inicial, ou seja, quando a massa da secundária começa a ser atraída pela atração gravitacional de primária:

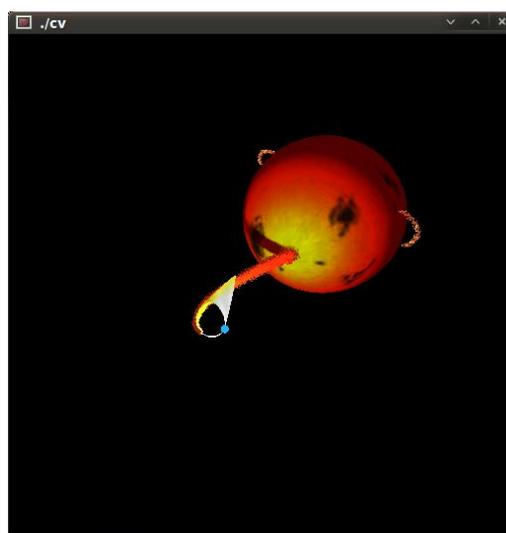


Figura 7: Captura de tela do software de modelagem de VC's segundo Hynes (2002): a massa da estrela secundária começa a ser atraída pela primária

A Figura 8 mostra uma segunda captura de tela do software de modelagem de Hynes (2002) com a formação do disco de acreção em torno da primária. Note que a matéria do disco não se choca com a superfície da estrela:

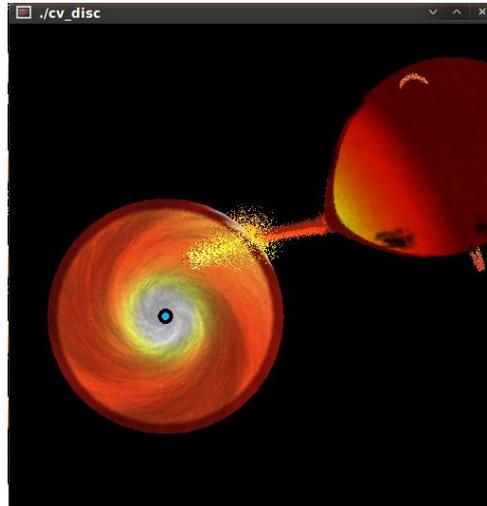


Figura 8: 2º captura de tela do software de modelagem de VC's segundo Hynes (2002): a massa do disco não se choca com a estrela primária

A Figura 9 mostra uma segunda captura de tela do software de modelagem de Hynes (2002) com a formação do disco de acreção em torno da primária. Aqui a matéria do disco se choca com a superfície da estrela:

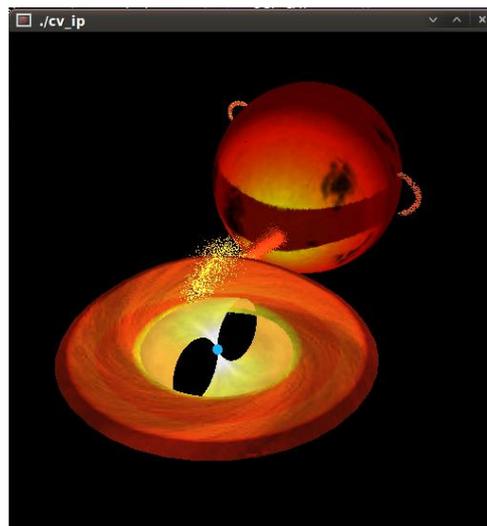


Figura 9: 3º captura de tela do software de modelagem de VC's segundo Hynes (2002): a massa do disco se choca com a estrela primária

3

Proposta

Este capítulo apresenta a proposta desta monografia. É organizado da seguinte forma: A Seção 4.1 apresenta uma descrição geral do Projeto de Simulação de um Sistema Estelar Binário. A Seção seguinte detalha um pouco da metodologia abordada para a construção do simulador

3.1 Projeto

O projeto de construção de um software que simulasse um SEBC de forma tridimensional e interativa surgiu pela importância dos estudos da evolução estelar. Considerando que todos os elementos químicos conhecidos na natureza têm suas origens nos imensos reatores nucleares que são as estrelas, podemos concluir que as nossas origens estão intimamente ligadas a elas. Isso ocorre de tal maneira que o astrônomo Carl Sagan, que trabalhou nos projetos da NASA das sondas *Pioneer* e *Voyager*, declarou que todos nós somos “poeira das estrelas”.

Outra justificativa para o projeto em questão é de que a observação de um SEBC não é possível com instrumentos ópticos comuns, sendo que ao observá-los pelas lentes de um telescópio, por exemplo, não há distinção alguma de qualquer componente de um SEBC. A observação destes objetos acontece, entre outros, pela detecção sensível ao infravermelho, com horas de exposição para a captação de seu espectro. Além disso, não foi encontrado no meio científico ferramenta de igual propósito.

A idéia original deste projeto era construir uma ferramenta que demonstrasse a dinâmica de um SEBC. Para que fosse possível em tempo hábil a execução de nossos trabalhos, optamos por construir um protótipo que demonstrasse apenas um tipo de sistema estelar: as VC's. A própria representação gráfica de uma VC, em se tratando das diversas formas como é encontrada e a representação de sua dinâmica, já constitui uma ampla execução de um projeto de pesquisa em se tratando de sua complexidade. Portanto, descrevem-se aqui

aspectos da metodologia empregada e uma modelagem de classes do protótipo através da linguagem UML, que é um padrão para a construção de modelos de software segundo a *Object Management Group* – empresa dedicada a desenvolver normas de integração empresarial, além de promover a tecnologia de negócios [17].

3.2 Metodologia

A estrutura espacial de uma VC é modelada com referência em um sistema de coordenadas cartesiano, tendo a estrela primária na origem dos eixos. Assim, a API gráfica do OpenGL pode satisfatoriamente suportar todas as construções, já que seu ambiente de visualização é mapeado através de, entre outros, de uma estrutura espacial cartesiana.

Para que fosse possível a construção de um protótipo que simulasse fielmente uma VC, foi preciso entender como o modelo de Roche descreve a superfície que delimita a região que representa a influência gravitacional que uma estrela exerce sobre um corpo de massa desprezível. Essa superfície, conhecida como lóbulo de Roche, pode ser primeiramente conhecida analisando o trabalho de M. Plavec, Ondrejov e P. Kratochvil em *Tables for the Roche Modelo f Close Binaries* (1963) [7]. Este trabalho descreve como o lóbulo de Roche das duas estrelas de uma VC pode ser primeiramente mapeado em um plano, para ser entendido mais facilmente. Uma vez conhecida a curva que delimita o lóbulo de Roche das componentes, basta aplicarmos transformações espaciais para mapearmos sua estrutura tridimensional.

Os objetos do OpenGL usados como primitivas gráficas foram totalmente satisfatórios para a modelagem dos corpos estelares. Uma das dificuldades enfrentadas neste projeto foi calcular os pontos que fazem parte da solução da equação da página 31. A partir do ponto L_1 de um sistema estelar qualquer, são aplicados cálculos de aproximação para encontrarmos os pontos (x,y) que fazem parte da curva que representa o lóbulo de Roche das estrelas em questão. Uma vez encontrados, são aplicados transformações geométricas espaciais para achar de forma tridimensional tanto do lóbulo de Roche quanto da deformidade

apresentada pela estrela secundária. Apresentamos mais detalhes destas implementações no capítulo 4.

3.3 Diagrama de Classes UML

A Figura 10 mostra o diagrama de classes contendo uma visão geral do protótipo do simulador. Este diagrama foi construído com a IDE NetBeans aliada com o *plugin Unified Modeling Language* (Linguagem Unificada de Modelagem - UML), disponível nos repositórios próprios da IDE.

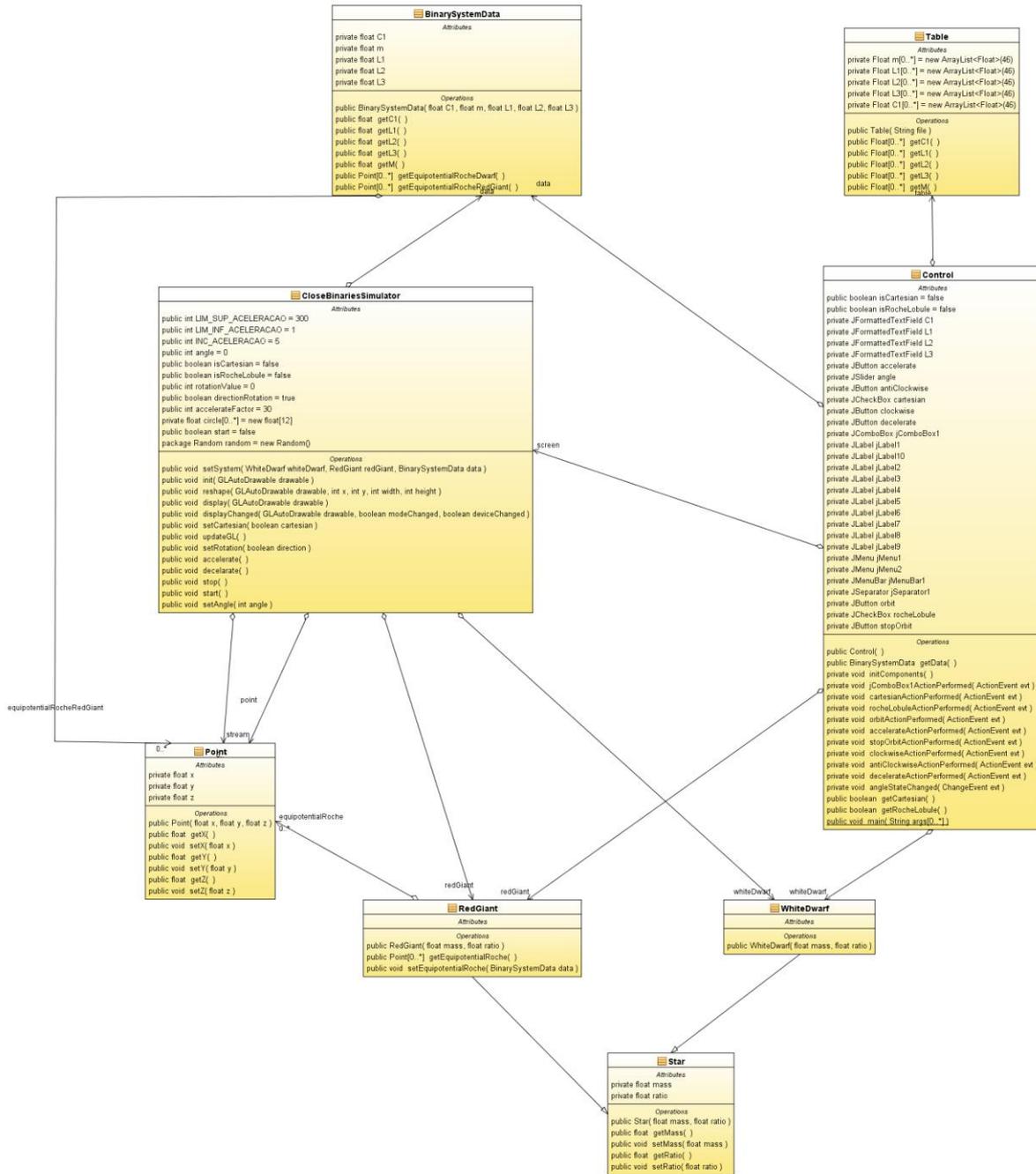


Figura 10: Diagrama de Classes UML demonstrando uma visão geral do protótipo. Fonte: *plugin UML NetBeans*

4

Implementação

Este capítulo apresenta em aspectos gerais a implementação do protótipo de simulação de uma VC. Na seção 6.1 abordamos um pouco sobre o plugin OpenGL Pack do NetBeans. Na seção 6.2 comentamos a respeito da construção tridimensional da estrela secundária deformada, bem como os lóbulos de Roche das estrelas. Em 6.3 falamos sobre a visualização do sistema através da câmera virtual do OpenGL e na seção seguinte sobre a interface gráfica do sistema. No final deste capítulo (seção 6.5), são apresentadas as principais funções usadas para criar o ambiente virtual de simulação.

Para a implementação do simulador em questão, era necessário que fosse possível executá-lo em vários sistemas operacionais, considerando sua natureza educacional e científica. Sabemos que programas compilados em arquiteturas diferentes têm seus arquivos executáveis compostos de diferentes parâmetros. Para que a característica multi-plataforma fosse atendida, optou-se por implementar o simulador com a linguagem Java. Assim, se a máquina alvo possuir a JVM instalada, ela poderá executar o simulador sem qualquer restrição.

Foi também escolhido o ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) NetBeans que provê suporte para a linguagem Java, criando um projeto de desenvolvimento neste ambiente juntamente com os *plugins* OpenGL e UML.

4.1 NetBeans OpenGL Pack

O objetivo do *plugin* NetBeans OpenGL Pack é proporcionar uma maneira fácil de usar um ambiente de desenvolvimento gráfico, integrando o IDE NetBeans com OpenGL. Fornecendo ainda módulos de integração e vinculação, aliados com ferramentas para exibição de informações de hardware, além de projetos de exemplo.

Quando instalado, o NetBeans não possui o *plugin* de integração com o OpenGL, sendo preciso adquiri-lo em [15]. Esta tecnologia é gratuita e sua instalação pode ser feita seguindo passos intuitivos.

Para a codificação do sistema, criou-se um projeto Java OpenGL (JOGL) no NetBeans, que é uma opção que contém exemplos de como integrar primitivas gráficas com a programação orientada à objetos, própria da linguagem Java.

A seguir, uma explicação de como algumas funcionalidades foram implementadas.

4.2 Construindo a Estrela Secundária e o Lóbulo de Roche

Uma das principais características de uma VC é a mudança estrutural que a estrela secundária sofre na interação gravitacional com a primária. Conforme acontece tal evento e a secundária ejeta material no ponto L_1 , sua densidade diminui e seu volume aumenta, a tal ponto de preencher todo seu lóbulo de Roche. Como já sabemos, o equipotencial de Roche pode ser descrito, para melhor entendimento, em um plano X-Y. Assim, podemos usar de transformações geométricas no espaço para construir a secundária com o seu lóbulo de Roche todo preenchido.

Primeiramente, é preciso calcular todos os pontos $(x, y, 0)$ para delimitarmos o lóbulo de Roche. Para isso, é preciso considerar um ponto inicial $x = L_2$ e fazendo sua iteração de +0,001 até o ponto $x = L_1$. Para cada iteração de x , calculamos o seu ponto y correspondente no plano. Portanto, ao final das iterações, temos uma coleção de k -pontos em um plano $z = 0$.

Seja j o iterator que permite controlar o valor de um ângulo de uma circunferência e percorrê-lo por completo. Seja i o iterator que permite controlar o índice do vetor *equipotencialX* e *equipotencialY*, que são os correspondentes do delimitador do equipotencial de Roche no plano $z = 0$. Usando a função `GL_LINES_STRIP`, construímos 10 linhas em torno do eixo y , modificando o valor de j , aplicando as transformações:

```

(equipotencialX[i], equipotencialY[i]*sin(j), equipotencialY[i]*cos(j)),
(equipotencialX[i+1], equipotencialY[i+1]*sin(j), equipotencialY[i+1]*cos(j)),
(equipotencialX[i+2], equipotencialY[i+2]*sin(j), equipotencialY[i+2]*cos(j)),
.
.
.
(equipotencialX[k-3], equipotencialY[i-3]*sin(j), equipotencialY[i-3]*cos(j)),
(equipotencialX[k-2], equipotencialY[k-2]*sin(j), equipotencialY[k-2]*cos(j)),
(equipotencialX[k-1], equipotencialY[k-1]*sin(j), equipotencialY[k-1]*cos(j)).

```

Assim, podemos codificar estas transformações da seguinte maneira em pseudocódigo:

```

for(int j = 0; j < 360;){
    for(int i = 0; i < this->k-1; i++){
        glBegin(GL_LINE_STRIP);
        glVertex3f(equipotencialX[i],equipotencialY[i]*sin(j),
        equipotencialY[i]*cos(j));
        glVertex3f(equipotencialX[i+1],equipotencialY[i]*sin(j),
        equipotencialY[i]*cos(j));
        glEnd();
    }
    j+=(360.0/10);
}

```

Foi usada também uma lógica que, a cada 60 iterações deste código, fosse construído círculos de raio = y , em torno do eixo x .

Para que se pudesse preencher toda a superfície da estrela secundária, que é delimitada pelo seu lóbulo de Roche, foi usado uma primitiva gráfica que cobrisse toda esta superfície, tendo como parâmetro a coleção de pontos contidos nas 10 linhas obtidas pelas transformações anteriores e nas intersecções dos círculos mencionados. Conservando-se estes pontos de intersecção foi possível construir segmentos que envolvessem toda a superfície da seguinte maneira (em pseudocódigo):

Seja j o iterator que permite controlar o valor de um ângulo de uma circunferência e percorrê-lo por completo. Seja i o iterator que permite controlar o índice do vetor *equipotencialX* e *equipotencialY*, que são os correspondentes do delimitador do equipotencial de Roche no plano $z = 0$. Foi possível desenhar “tiras” de comprimento consideráveis para cobrir toda a superfície em questão usando a função `GL_TRIANGLE_STRIP`:

```
for(int i = 0; i < equipotencialX.size() - 31; i = i + 30){
    for(int j = 0; j < 11;){
        gl.glBegin(GL_TRIANGLE_STRIP);
            glVertex3f(equipotencialX.get(i),equipotencialY.get(i)*sin(ang),
                equipotencialY.get(i)*cos(ang));
glVertex3f(equipotencialX.get(i+30),equipotencialY.get(i+30)*sin(ang),
    equipotencialY.get(i+30)*cos(ang));
        j++;
            glVertex3f(equipotencialX.get(i),equipotencialY.get(i)*sin(ang),
                equipotencialY.get(i)*cos(ang));
        gl.glEnd();
    }
}
```

De maneira análoga, construiu-se também o lóbulo de Roche da estrela primária, não cobrindo sua superfície, já que esta não sofre deformações considerando a dinâmica da interação gravitacional entre os corpos (vide Figura 1)

4.3 A Posição do Observador

Para que houvesse um parâmetro constante de visualização, consideramos um observador inicialmente posicionado em $(x,y,z) = (0,1,1)$, e que esteja olhando diretamente para $(x,y,z) = (0,0,0)$, que é aproximadamente o ponto L_1 de uma VC. Neste ponto, o observador virtual pode ter uma visão completa de qualquer sistema escolhido, considerando a variação de seus parâmetros. A Figura 11 mostra além da tela de visualização, uma interface de controle onde o usuário pode interagir com o sistema, modificando seus parâmetros.

Como sabemos, o eixo X de uma VC qualquer pode não estar alinhado horizontalmente com um observador terrestre, que é a posição inicial de qualquer sistema quando inicializado pelo simulador. Assim, foi ajustado que a inclinação do eixo x do sistema possa ser alterada, de acordo com a interação do usuário com o mouse possibilitando que a visualização aconteça de qualquer ponto no espaço. Isso possibilita uma percepção visual de como um sistema estelar real se comporte em relação à quantidade de luz recebida por um observador.

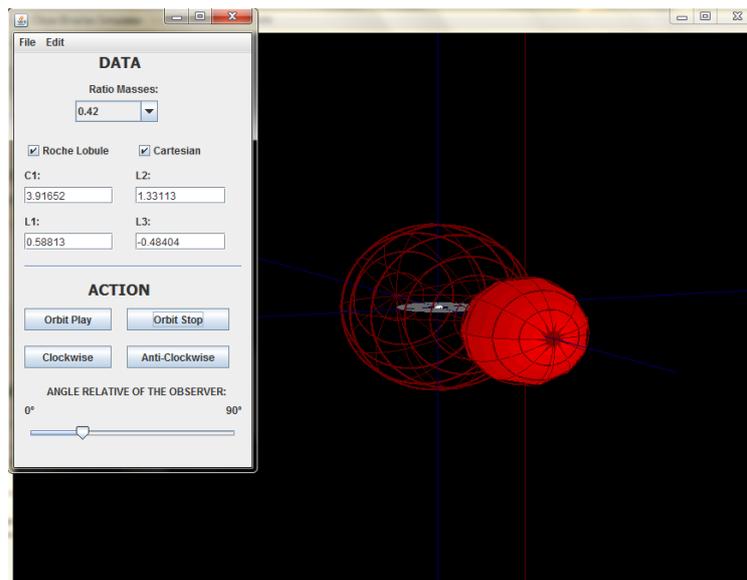


Figura 11: Uma visão geral de execução do protótipo

4.4 Interface Gráfica

Uma das principais características do simulador de VC's é a interface gráfica de usuário, já que esta é o meio de visualização pelo qual um usuário pode estudar um sistema estelar desejado. Através da classe de interface *GLEventListener*, criou-se uma classe que implementa seus métodos, fazendo uso das primitivas gráficas do OpenGL. A instância de um objeto que implementa esta classe é a criação de uma janela contendo um ambiente tridimensional com a representação gráfica de uma VC. Mostrando imagens bidimensionais renderizadas, o software possibilita uma percepção visual tridimensional e animada, à medida que o simulador é executado.

Criamos também uma classe que herda a classe *JFrame*. A instância de um objeto desta classe é uma interface gráfica contendo botões de funções que tornam possíveis as seguintes ações:

- A visualização das diferenças entre vários tipos de VC conforme a razão de massas m_2/m_1 ;
- A órbita da estrela secundária em torno da primária: sabendo-se que em uma VC este período pode durar horas, foi estabelecido de forma

arbitrária um período orbital que pode ser iniciado, interrompido e acelerado pelo usuário. Esta característica de animação foi possível graças à implementação de *threads* que gerenciam o tempo de execução das primitivas gráficas;

- Um eixo de coordenadas no espaço que mostra as posições da estrelas, bem como sua distância normalizada;
- A mudança do ângulo de um sistema estelar em relação a um observador, que pode ser mudado pelo usuário. Em se tratando de observações reais, é de extrema importância esta posição para as medições dos níveis de luz emitidos pelo sistema;
- A opção de visualizar ou não os lóbulos de Roche das componentes do sistema.

4.5 Primitivas Gráficas Usadas

As bibliotecas pertencentes à API OpenGL usadas para a construção dos desenhos do simulador são: *OpenGL Utility Library (GLU)* e *OpenGL Utility Toolkit (GLUT)*, ambas possuem funções específicas implementadas, de acordo com o desenho desejado. As principais funções, ou seja, aquelas usadas para construir as representações dos corpos estelares, bem como as de simulação de um observador do sistema, são descritas a seguir:

- ***glutSolidShere(radius,slices,stacks)***: pertencente à biblioteca GLUT, o uso desta função possibilitou a confecção de uma estrela, por exemplo, que pode ser considerada uma esfera perfeita constituída de plasma. A exceção a esta afirmação se dá pela confecção da estrela secundária, já que esta toma forma de um 'balão', devido a interação gravitacional do sistema.
- **GL_LINES**: função pertencente à biblioteca GLU, o uso desta função possibilita a confecção dos limites da estrela secundária quando ela preenche todo o seu lóbulo de Roche, definidos pela equação de seu equipotencial. Com transformações geométricas específicas, é

possível aplicar uma rotação desta linha sobre o eixo x do espaço e obter seu aspecto em três dimensões.

- **GL_TRIANGLE_FAN:** função pertencente à biblioteca GLU, o uso desta função possibilita o preenchimento das regiões extremas da secundária, concêntricas ao eixo x.
- **GL_TRIANGLE_STRIP:** função pertencente à biblioteca GLU, o uso desta função possibilita o preenchimento de regiões específicas da secundária.
- *gluLookAt(0,80,200, 0,0,0, 0,1,0):* define a transformação de visualização. Através dos seus argumentos é possível indicar a posição de um observador para uma VC.

glRotatef(angulo, x, y, z): função pertencente a biblioteca GLU, usada para simular a órbita da secundária em torno da primária.

4.6 O protótipo

4.6.1 Aspectos gerais

Ao ser executado, o software apresenta duas telas: uma de controle e outra contendo a modelagem tridimensional de uma VC com razão de massas de 0,1. A tela de controle (Figura 12) possui duas áreas distintas chamadas de 'Data' e 'Action'. Na área 'Data' encontram-se algumas áreas de texto que mostram alguns valores relevantes sobre o sistema, além de possuir áreas onde é possível editar alguns valores do sistema. Possui também, botões de funções que controlam aspectos dinâmicos do sistema.

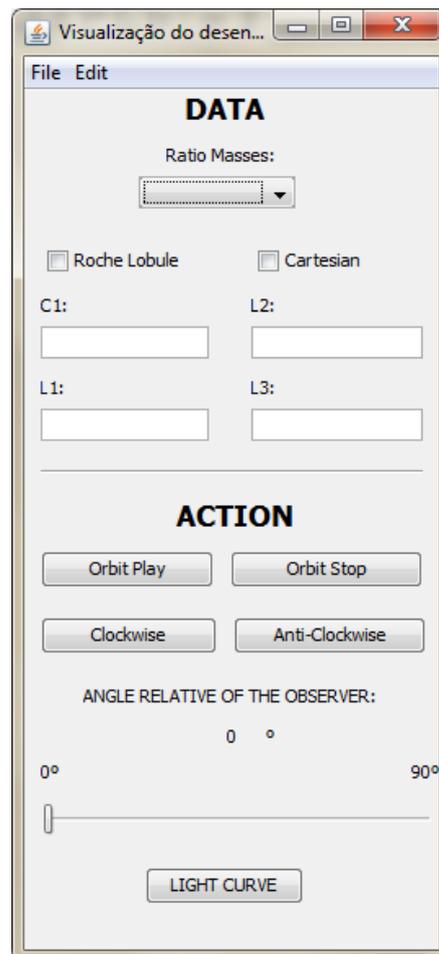


Figura 12: Tela de controle do simulador

Outra tela de interface com o usuário (Figura 13) é a tela contendo a visualização tridimensional e interativa. Ao ser iniciada esta tela mostra uma VC com razão de massas de 0,1, com a secundária já deformada pela atração gravitacional da primária, contendo uma animação representando o 'stream' do sistema, ou seja, o fluxo de matéria perdido pela estrela secundária. Além disso, o observador (câmera) encontra-se a 0° em relação ao eixo X do sistema (eixo que une os centros de massas das duas estrelas).

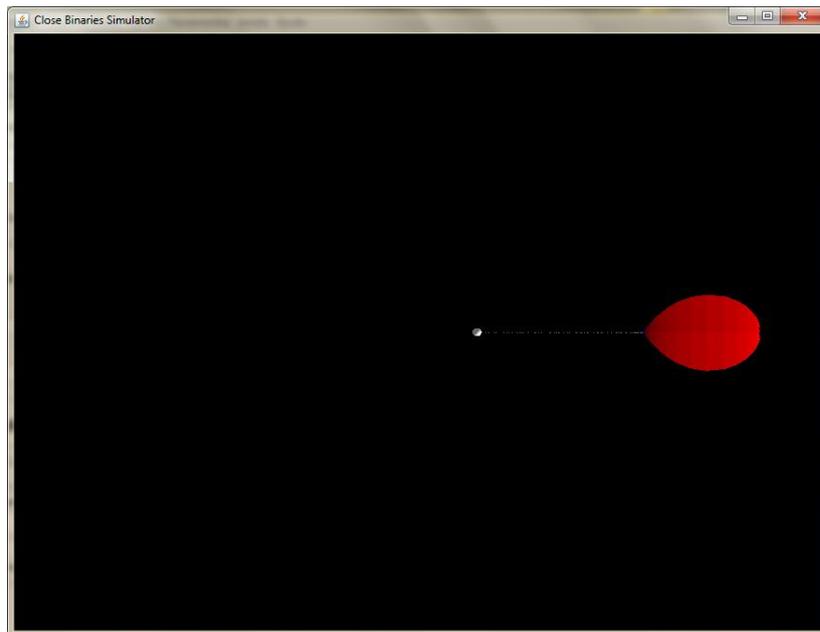


Figura 13: Tela inicial de visualização do simulador. À direita a estrela secundária e na parte central a estrela primária. Entre elas o fluxo de matéria

4.6.2 Funções

A tela de controle possui na área 'Data' (Figura 14) as seguintes funções e áreas de visualização:

- *Ratio Masses*: Uma área de texto (vetor) onde se podem escolher as possíveis razões de massas (m_2/m_1) entre as duas componentes do sistema. Sendo m_1 a massa da primária e m_2 a massa da secundária;
- *Roche Lobule* e *Cartesian*: Dois seletores onde se é possível ativar, respectivamente, a visualização dos lóbulos de Roche das componentes do sistema e a visualização do espaço cartesiano (azul), mostrando a distância (igual a 1 unidade) normalizada das duas estrelas.
- $C1$: o valor do potencial gravitacional na superfície que delimita lóbulo de Roche do sistema em questão;
- L_n : os valores de x dos pontos L_1 , L_2 e L_3 .

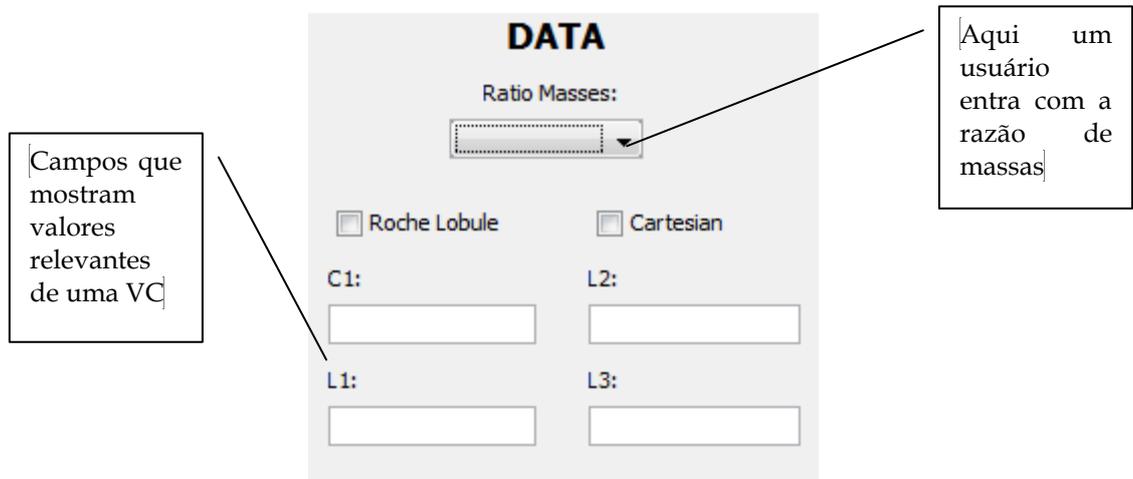


Figura 14: Campo *Data* na tela de controle do simulador.

A tela de controle (Figura 15) possui na área '*Action*' as seguintes funções e áreas de visualização:

- *Play Orbit*: Inicia a dinâmica do sistema;
- *Stop Orbit*: Pausa o sistema orbital;
- *Angle Relative of the Observer*: Controla o ângulo de visão entre um possível observador (câmera) e o eixo x do cartesiano (eixo que passa entre os núcleos de massa das duas componentes).
- *Light Curve*: Ativa a tela que mostra a curva estimada da relação do período de rotação do sistema com a emissão de luz pela secundária, considerando o ângulo relativo do observador.

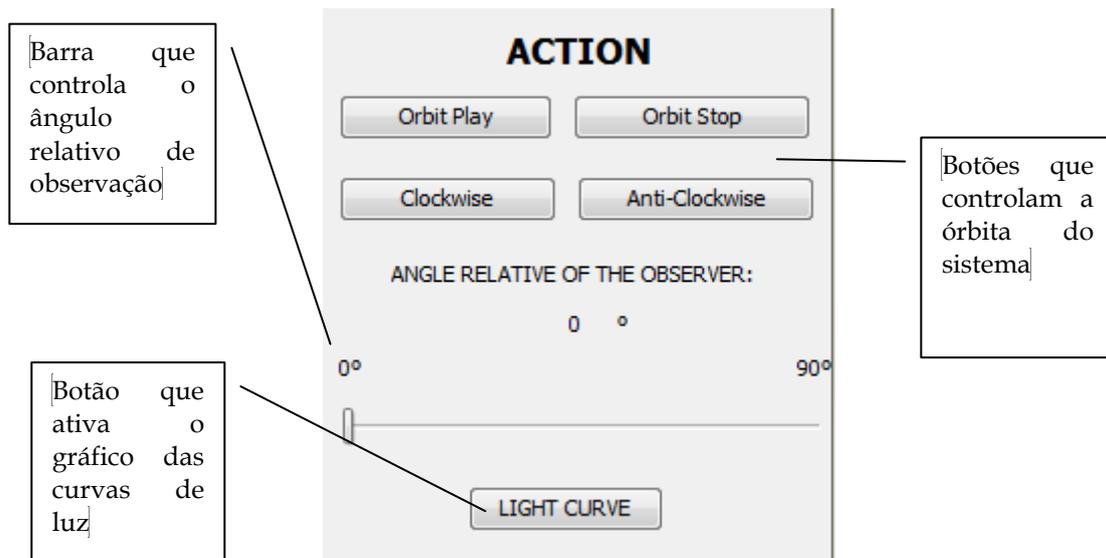


Figura 15: Campo *Action* na tela de controle do simulador

4.6.3 Tela de visualização do sistema

A segunda tela de visualização mostra os componentes tridimensionais do sistema, a saber, uma VC escolhida pelo usuário. Como se trata de um protótipo, qualquer VC selecionada mostra-se inicialmente com a secundária deformada pela força gravitacional da primária, com sua matéria sendo desprendida pelo ponto L_1 . Esse fluxo de matéria (*stream*) também é mostrado em forma de disco em torno da estrela primária, resultado do acúmulo da matéria pelas forças de atração gravitacional.

Mostramos a seguir capturas de tela do simulador em várias instâncias de execução com a modificação de seus parâmetros. O protótipo apresenta um manuseio intuitivo e uma interface gráfica de usuário amigável.

A Figura 16 mostra uma VC com razão de massas de 0,1 e ângulo relativo do observador de 90° . As linhas azuis representam os eixos X e Y, habilitados pela função '*Cartesian*' que se encontra na janela de controle (superior à esquerda). Note que a estrela primária (centro) já possui um disco de acréscimo:

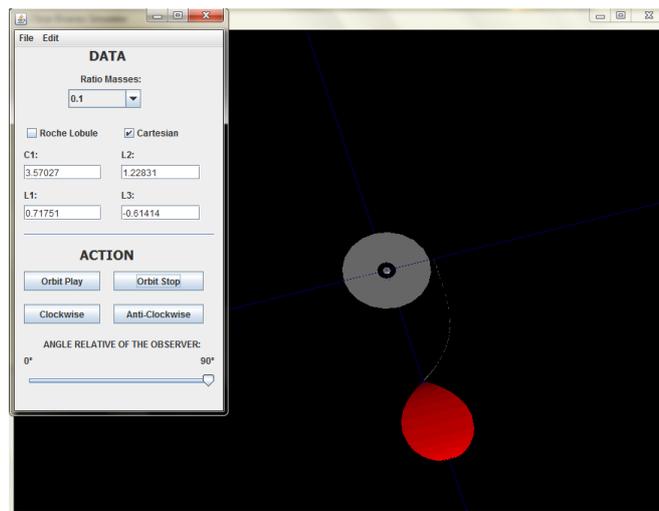


Figura 16: VC com razão de massas de 0,1 e ângulo relativo do observador de 90°

A Figura 17 mostra uma VC com razão de massas de 0,1 e ângulo relativo do observador de 90°, porém com a função 'Cartesian' desabilitada, ou seja, sem as linhas do espaço cartesiano:

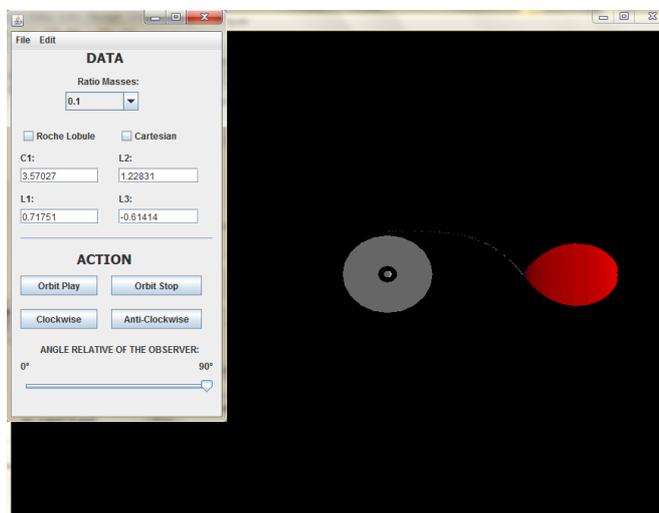


Figura 17: VC com razão de massas de 0,1 e ângulo relativo do observador de 90°.

A Figura 18 mostra uma VC com razão de massas de 0,1 e ângulo relativo do observador entre 45° e 90°, com as funções 'Roche Lobule' e 'Cartesian'

habilitadas. Quando 'Roche Lobule' esta habilitada, o simulador desenha na tela as linhas em vermelho que delimitam os lóbulos de Roche das duas estrelas:

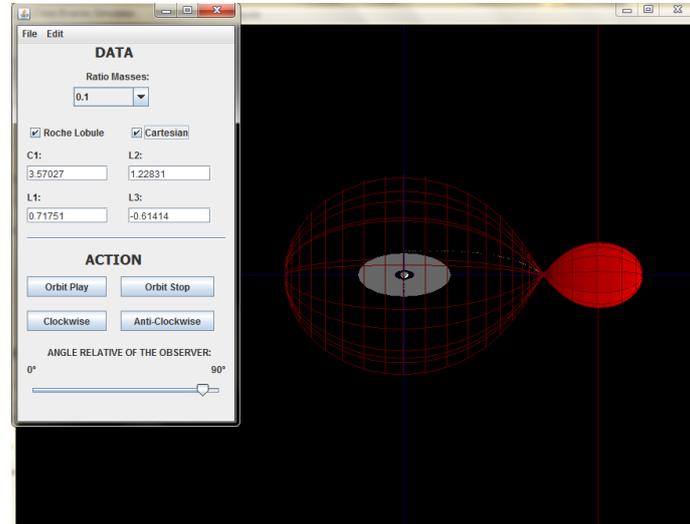


Figura 18: VC com razão de massas de 0,1 e ângulo relativo do observador entre 45° e 90°. As linhas curvas em vermelho representam o lóbulo de Roche das componentes

A Figura 19 mostra uma VC com razão de massas de 1 e ângulo relativo do observador entre 30° e 45°, apenas com a função 'Roche Lobule' habilitada:

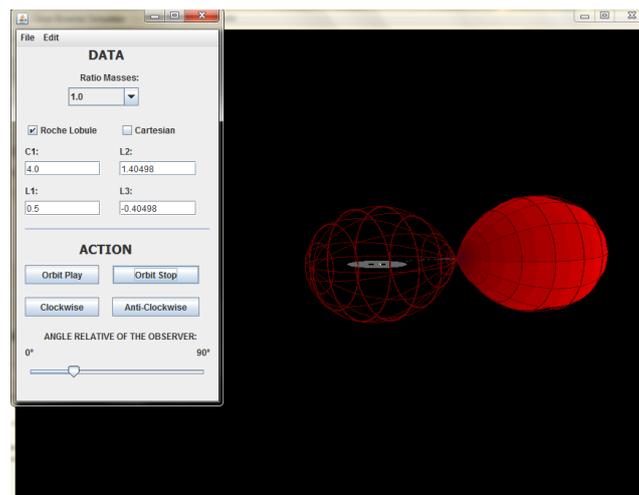


Figura 19: VC com razão de massas de 1 e ângulo relativo do observador entre 30° e 45°. As linhas em vermelho representam o lóbulo de Roche das componentes

A Figura 20 mostra uma VC com razão de massas de 0,42 e ângulo relativo do observador de aproximadamente 45° , apenas com a função 'Roche Lobule' habilitada. A Figura 21 mostra a mesma VC, mas com um ângulo de observação menor que 30° e com seus respectivos lóbulos desenhados. Note que, com seu movimento orbital, a estrela secundária começa a eclipsar a primária:

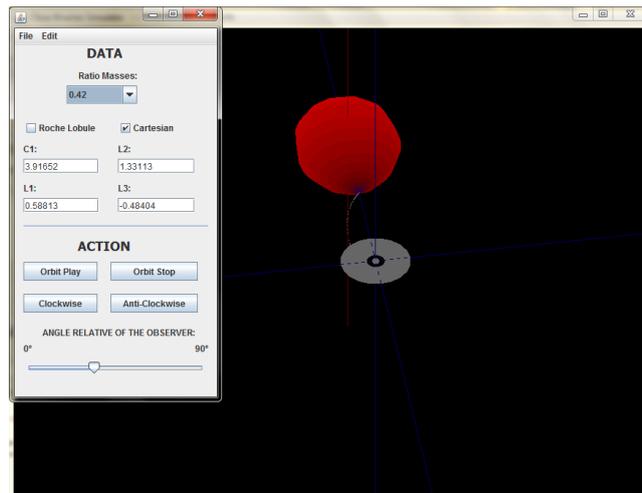


Figura 20: VC com razão de massas de 0,42 e ângulo relativo do observador de aproximadamente 45° . As linhas retas demonstram os eixos cartesianos

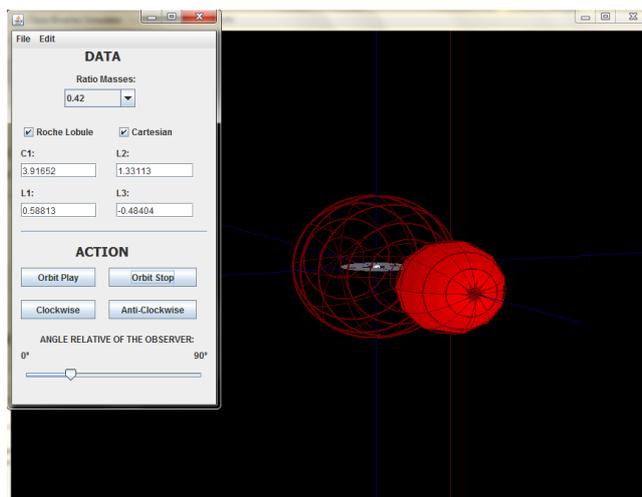


Figura 21: VC com razão de massas de 0,42 e ângulo relativo do observador menor que 30° . A secundária começa a eclipsar a primária em órbita sentido horário

4.6.4 Tela de visualização das curvas de luz

Uma curva de luz é a curva expressa pela relação da quantidade de luz emitida por um objeto em um determinado período arbitrário. No caso particular de nosso simulador, modelamos uma curva de luz para cada ângulo ($0^\circ - 90^\circ$) que indica a posição de um observador em relação ao eixo que passa pelo centro de massa das duas estrelas. A saber, modelamos uma estimativa da real curva de luz que se obtêm de dados de observações astronômicas, considerando somente a emissão de luz pela estrela secundária. Isto se deu porque é preciso levar em conta a dinâmica de todas as fontes de luz do sistema, que são a estrela primária, o disco de acreção, e o ponto onde o fluxo de plasma que sai da secundária encontra com o disco. Para que seja possível tal simulação, é preciso primeiramente construir o disco considerando a dinâmica de partículas que são capturadas pela ação gravitacional da estrela primária. Mais detalhes sobre esta implementação, bem como a dinâmica de partículas de um SEBC, se encontra no Capítulo 6, onde exploramos os Trabalhos Futuros.

No campo *Action* encontra-se também o botão que ativa a visualização das curvas de luz. Conforme a Figura 22, os eixos que compõem o gráfico são: '*Light Stream*' - (Fluxo de Luz) e '*Phase (degrees)*' - (Período (graus)). Arbitariamente, a escala *Light Stream* vai de 0 até 1, sendo 0 representando que nenhuma luz emitida pela estrela secundária chega até um observador qualquer, e 1 representando a máxima quantidade de luz que um observador poderia receber. A escala *Phase (degrees)* vai de 0° até 360° , representando um período orbital do sistema.

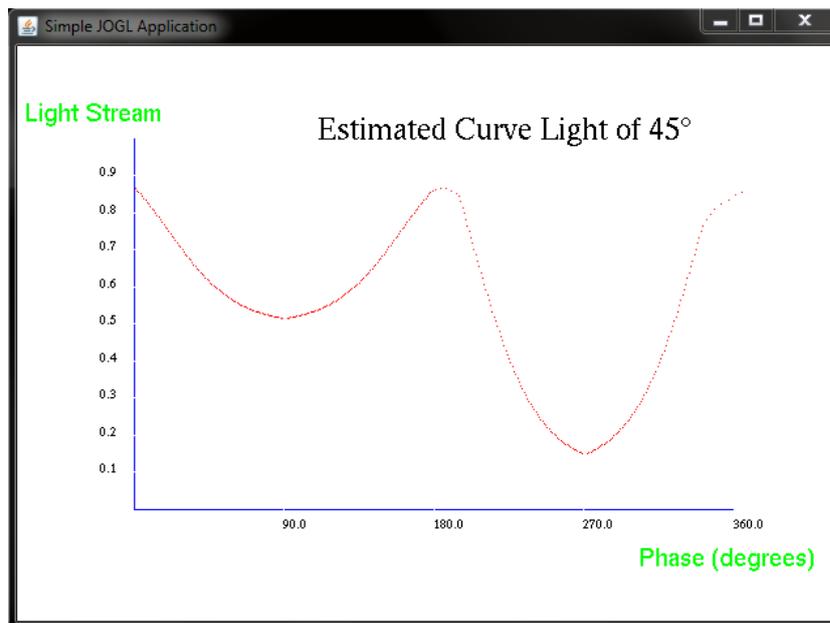


Figura 22: Tela de visualização de uma curva de luz de 45°

5

Resultados

Neste capítulo são listados os objetivos do projeto e seus respectivos resultados de acordo com sua execução. É apresentada também uma análise sobre a execução do simulador e suas funcionalidades.

5.1 Realização dos Objetivos

Considerando o pré-projeto deste trabalho, concluído na disciplina do Trabalho de Conclusão de Curso I, são listados a seguir todos os objetivos propostos e seus respectivos resultados na execução desta monografia.

- **Estudo da biblioteca OpenGL**

No âmbito da Ciência da Computação, a execução deste projeto era, sem dúvida, de caráter totalmente voltado para o estudo da computação gráfica. Os principais conceitos, tais como a geometria espacial, transformações, perspectiva, volume e visualização, foram todos elucidados de forma satisfatória. O estudo do OpenGL foi de fundamental importância para a execução dos trabalhos, já que sustentava toda a parte gráfica da simulação da dinâmica de uma VC. O aprendizado ocorreu de forma conclusiva em se tratando das primitivas gráficas usadas no projeto e toda a teoria estudada sobre o assunto foi empregada na modelagem do sistema, possibilitando um melhor uso das primitivas gráficas.

- **Estudo de um SEBC**

Em se tratando da bibliografia usada no projeto, o entendimento da teoria sobre as VC's, bem como sua dinâmica, ocorreu de forma satisfatória. Isto se deu porque o assunto é bastante difundido e estudado no ramo da Astrofísica, sendo de fácil acesso aos artigos científicos publicados.

Os dados obtidos em estudos já realizados a respeito das VC's possibilitaram a confecção de um banco de dados que fornece ao simulador os valores dos principais pontos de Lagrange L_1 , L_2 e L_3 , além das razões de massa entre as duas estrelas e os valores do equipotencial usados nos cálculos de seus lóbulos de Roche.

- **Entendendo o modelo de Roche**

O estudo de como este modelo descreve o potencial de um SEBC e como ele é usado para calcularmos o lóbulo de Roche ocorreu de forma satisfatória, porém, encontramos várias dificuldades em estabelecer funções no código-fonte do protótipo que traduzissem as fórmulas matemáticas em questão. Estas fórmulas calculavam, entre outras, coordenadas que eram usadas justamente para delimitar tanto a superfície da estrela secundária, quanto a dinâmica do sistema de partículas, diretamente influenciado pelo potencial gravitacional. A respeito destas coordenadas, as repetições usadas para calcular os pontos em um plano X-Y e as transformações espaciais empregadas, foram calculadas de maneira não-otimizadas, podendo ser usadas futuramente, técnicas de cálculo numérico que utilizem menos iterações nas funções implementadas, podendo diminuir seu tempo de execução.

As dificuldades encontradas para a realização deste objetivo causaram atrasos no cronograma do projeto. Porém, o entendimento de toda a teoria do modelo de Roche fundamentou e possibilitou a modelagem e as animações presentes no protótipo-simulador.

- **Avaliar como os dados podem ser representados graficamente**

Considerando que o OpenGL possui funções para a modelagem de alguns objetos, inicialmente foi considerado que usaríamos a função *glutSolidSphere* para que se modelasse esferas representando as componentes do sistema. Porém, foi preciso construir uma lógica que 'deformasse' a estrela secundária devido à força das marés gravitacionais em questão, possibilitando assim um objeto estelar que mais se aproxima da realidade, já que se usaram fórmulas matemáticas que

representam o equipotencial de Roche. A maneira que modelamos a estrela primária foi de forma toda satisfatória, usando a função `glutSolidSphere`.

Em se tratando das diferentes temperaturas de uma VC, usamos o sistema de cores RGB do OpenGL que usa a função `glColor3f`. O sistema de cores se mostrou satisfatório, pois os parâmetros que mensuram estas cores são obtidos por uma grande faixa de valores, possibilitando o ajuste aproximado entre as diferentes temperaturas.

- **Implementação do protótipo**

A idéia principal deste projeto era construir um software que simulasse de forma tridimensional e interativa um SEBC que apoiasse o ensino e a pesquisa de Astronomia, em se tratando de sistemas estelares específicos. Portanto, foi possível construir um protótipo contendo a idéia inicial de um SEBC com seus aspectos básicos tais como: a modelagem dos corpos estelares, momento orbital e as diferentes cores de temperatura.

O protótipo desenvolvido provê a base para a construção de uma ferramenta de simulação completa, pois mostra como é possível, através da computação gráfica, elaborar ferramentas científicas que simulem sistemas estelares reais, de acordo com as leis da física. Foi possível através das bibliotecas gráficas construir praticamente todo o sistema, considerando a distância normalizada das duas estrelas, tamanho, forma e momento orbital. Também foi possível estabelecer certas variações de cores, caracterizando as diferenças de temperaturas na superfície da estrela secundária, devido às influências de luz e temperatura da estrela primária.

Portanto, foi de extrema importância a construção deste protótipo, considerando que não foi encontrado no meio científico, ferramenta de igual propósito que modelasse fielmente um SEBC.

6

Conclusões

Neste capítulo é apresentada a conclusão desta monografia, bem como os próximos passos a serem realizados como trabalhos futuros.

Quando começamos a perseguir os objetivos do projeto em questão, não se imaginava a complexidade de construir uma ferramenta que simulasse sistemas que envolviam a interação gravitacional de três corpos em um sistema de partículas. Muitas vezes, as fórmulas matemáticas usadas como base para a construção das animações precisavam ser ajustadas de acordo com as coordenadas de espaço referente aos movimentos dos corpos estelares. Esta dificuldade não prevista no início de nossa pesquisa resultou em uma defasagem no cronograma proposto. Porém, vale ressaltar que fundamentamos uma lógica para a construção de uma ferramenta que provenha no futuro, um simulador que faça o estudo fielmente de vários sistemas estelares.

Através das fórmulas que descrevem o comportamento de campos gravitacionais, construímos uma simulação que descreve fielmente o comportamento de uma VC em relação à modificação de seus parâmetros, a saber, a razão das massas das componentes do sistema. Estes campos dizem respeito ao espaço denominado de lóbulo de Roche, que é o espaço em torno de um corpo estelar onde a gravidade age de tal forma que um corpo, contido inteiramente neste espaço, não escapa desta ação gravitacional.

Considerando ainda as massas das componentes do sistema, foi modelada de forma satisfatória tanto a estrela primária quanto a secundária. Esta modelagem é de extrema importância, sendo que um observador terrestre, por exemplo, não distingue qualquer característica individual de uma VC sem o auxílio de equipamentos específicos que medem a variação de luz deste sistema. Com a investigação destes resultados, ou seja, com a interpretação da variação de luz de uma VC, um astrônomo faz a dedução de como é o aspecto de uma binária e como

é sua dinâmica gravitacional. Com o simulador apresentado aqui, o usuário pode ter uma fiel aproximação de uma VC em relação a esta razão de massas.

Através das bibliotecas gráficas do OpenGL, implementamos um simulador que possui uma perspectiva tridimensional e animada que se comporta de diferentes maneiras, de acordo com a interação do usuário. Essa característica é de fundamental importância, pois estudiosos e cientistas que fizerem uso desta ferramenta podem entender por completo a dinâmica de uma VC.

Portanto, construímos uma ferramenta tridimensional educativa que serve de apoio ao ensino de Física e como suporte para análise de dados astronômicos.

6.1 Trabalhos futuros

- **Implementação de um sistema de partículas:** Um sistema de partículas diz respeito a como um conjunto finito de corpos com massa desprezível se comporta quando há uma força de interação gravitacional agindo sobre este conjunto. A dinâmica deste sistema pode ser expressa por uma gama de equações que traduzem, não só como determinadas partículas interagem com uma força gravitacional superior, mas também como se dá a interação gravitacional entre todas as partículas, detectando assim, aspectos como colisão e trajetórias de cada partícula. Em se tratando de uma VC, a massa da estrela secundária que é atraída pela força gravitacional da estrela primária, pode ser modelada através de um sistema de partículas. Este fluxo, contínuo em certo período, toma a forma de um disco em torno da primária, caracterizando um sistema particular. Assim, o próximo passo neste trabalho seria a simulação tridimensional da interação gravitacional entre este fluxo de partículas e a estrela primária.
- **Modelagem de diferentes formas de visualização:** Quando observado sem nenhum equipamento óptico específico, um SEBC não apresenta nenhuma distinção entre suas componentes, mas através da detecção

sensível ao infravermelho ou pela observação de raios-X, por exemplo, tornam-se explícitos vários de seus aspectos particulares, possibilitando a dedução de sua dinâmica. Portanto, é interessante que um usuário do protótipo proposto aqui possa ter a opção de simular alguns destes instrumentos, a fim de que possa ter não só uma visão geral de um SEBC, mas também, analisar cada característica separadamente.

- **Modelagem de diversos sistemas estelares:** Devido à existência de vários tipos de sistemas estelares, optamos aqui por modelar as VC's, que são objetos importantes no estudo da evolução estelar. Sabemos que este campo da Astrofísica abrange vários tipos de sistemas e estrelas, por isso, um passo importante nas próximas atualizações deste software seria a modelagem de vários sistemas. Uma vez implementadas funções que traduzem aspectos como gravidade, massa, luminosidade e a dinâmica de um sistema de partículas, recebendo parâmetros de entrada, estas funções seriam responsáveis por modelar a dinâmica de qualquer sistema ou de uma única estrela.

7

Referências Bibliográficas

- [1]. Filho, Kepler de Souza Oliveira & Saraiva, Maria de Fátima Oliveira, *Astronomia e Astrofísica - 2ª edição*. Rio Grande do Sul: Livraria da Física, 2000.
- [2]. Kopal, *Dynamics of Close Binary Systems*. Astrophysics and space science library, v.68. 1914.
- [3]. Ribeiro, Tiago. *Análise de Variáveis Cataclísmicas no Infra-vermelho*. UFSC, 2007.
- [4]. Justiniano, Artur. *Fotometria de Variáveis Cataclísmicas no Infravermelho*. INPE, 2008.
- [5]. Space-art. Página visitada em 29/03/2011, disponível em <http://www.space-art.co.uk/>.
- [6]. Almeida, Leonardo Andrade de. *Atividade nas Estrelas Secundárias de Variáveis Cataclísmicas*. INPE, 2009.
- [7]. Plavec; Ondrejov & P. Kratochvil. *Tables for The Roche Model of Close Binaries*. Astronomical Institute of the Czechoslovak Academy of Science, University of Prague, 1963.

- [8]. Beutler, Gerhard. *Methods of Celestial Mechanics: Volume I: Physical, Mathematical, and Numerical Principles*, v. 1. Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- [9]. Azevedo, Eduardo e Conci, Aura. *Computação Gráfica - Teoria e Prática - 3ª edição*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003.
- [10]. Freitas Filho, Paulo José de. *Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas: com Aplicações em Arena - 2ª edição*. Florianópolis: Visual Books Ltda., 2008.
- [11]. OpenGL Licensing Programs. Página visitada em 08/02/2011, disponível em: <http://www.sgi.com/products/software/opengl/license.html>.
- [12]. Envelope comum. Página visitada em 30/03/2011, disponível em <http://astro.if.ufrgs.br/evol/bin/node2.htm>.
- [13]. Hynes, Robe. Página visitada em 22/02/2011, disponível em <http://www.phys.lsu.edu/~rih/>.
- [14]. Object Management Group. Página visitada em 17/03/2011, disponível em <http://www.omg.org/>.
- [15]. NetBeans Pack OpenGL. Página visitada em 16/03/2011, disponível em <http://kenai.com/projects/netbeans-opengl-pack/pages/Home>.