

**UNIVERSIDADE DO VALE DO ITAJAÍ  
ESCOLA DO MAR, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
CURSO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

**SIMULANDO ESTRELAS DE QUARK ATRAVÉS DO MODELO DE  
SACOLA DO MIT**

Por

Marcelo Leonardo de Souza

Itajaí (SC), junho de 2018

**UNIVERSIDADE DO VALE DO ITAJAÍ  
ESCOLA DO MAR, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
CURSO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

**SIMULANDO ESTRELAS DE QUARK ATRAVÉS DO MODELO DE  
SACOLA DO MIT**

Área de Ciência da Computação

Por

Marcelo Leonardo de Souza Itajaí (SC),

Relatório apresentado à Banca Examinadora do  
Trabalho Técnico-científico de Conclusão de Curso  
do curso de Ciência da Computação para análise e  
aprovação.

Orientador: Marcelo Gomes de Paoli, Dr.

Itajaí (SC), junho de 2018

*Agradeço a minha família, amigos, professores, orientador, todos aqueles que me ajudaram direta e indiretamente a concluir este trabalho, todos aqueles que tiveram paciência comigo em momentos de tensão e de empenho e que me ajudaram a conseguir o que já consegui até hoje na vida.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter me fortalecido a ponto de superar as dificuldades, também por toda saúde que me deu e por permitir alcançar esta etapa tão importante da minha vida.

A Universidade do Vale do Itajaí, e toda a sua direção, eu deixo uma palavra de agradecimento por todo ambiente inspirador e pela oportunidade de concluir este curso.

Ao professor Dr. Marcelo Gomes de Paoli eu agradeço a orientação incansável, o empenho e a confiança que ajudaram a tornar possível este sonho tão especial.

À minha família e amigos que nunca desistiram de mim e sempre me ofereceram amor eu deixo uma palavra e uma promessa de gratidão eterna.

Aos Colegas de trabalho que me auxiliaram e me apoiaram, neste momento especial da minha vida.

Agradeço a QUAY Sistemas e Portais e as pessoas que a comandam por todo o apoio que me deram na reta final deste trabalho.

A todas as pessoas que de alguma forma fizeram parte do meu percurso eu agradeço com todo meu coração.

*“Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho”.*  
*(Dalai Lama)*

## RESUMO

SOUZA, Marcelo Leonardo de. Simulando estrelas de quark através do modelo de sacola do MIT, 2018. 40 f. Trabalho Técnico-científico de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da Computação) Escola do Mar, Ciência e Tecnologia, Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, Ano.

Em um mundo onde novos artigos são publicados todos os dias, nas mais diferentes áreas, é necessário que, apesar da produção massiva, os assuntos sejam inteligíveis para todo o público e não apenas para uma minoria que estuda profundamente o assunto. Com este pensamento em mente será desenvolvido um *software* cujo objetivo é facilitar o entendimento das estrelas de *quarks*, cuja descrição utiliza a pesada linguagem científica da física nuclear e da astrofísica. O software se utilizará de conceitos de Ciência da Computação para facilitar a visualização e entendimento dos dados resultantes da simulação ao mesmo tempo em que será de utilidade para estudantes de física por utilizar o modelo de sacola do MIT, que é de grande importância na área.

Palavras chaves: Estrelas de Quarks, Modelo de Sacola do MIT, Cadáveres Estelares.

## ABSTRACT

*In a world where new articles are published every day in the most diverse areas, it is necessary that, despite mass production, the issues are intelligible to the public and not just to a minority that studies the subject in depth. With this thought in mind we will develop a software whose goal is to facilitate the understanding of quarks stars, whose description uses the heavy scientific language of nuclear and astro physics. The software will use Computer Science concepts to facilitate the visualization and understanding of the resulting simulation data while it will be of use to physics students by using the MIT bag model, which is of great importance in the field.*

Keywords: *Stars of quarks, MIT bag model, Stellar corpses.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.	Nebulosa de Órion.....	21
Figura 2.	Super Nova.....	22
Figura 3.	Evolução proto-estrela.....	23
Figura 4.	Características das estrelas.....	24
Figura 5.	Aglomerado estelar.....	26
Figura 6.	Processo termonuclear de uma estrela.....	27
Figura 7.	Ciclo de vida estelar.....	29
Figura 8.	Evolução estelar estrelas de quark.....	30
Figura 9.	Nascimento de uma estrela de nêutron.....	31
Figura 10.	Pulsar.....	32
Figura 11.	Distribuição de período de rotação de pulsares.....	33
Figura 12.	Ilustração de um magnetar.....	34
Figura 13.	Méson Pi.....	36
Figura 14.	Representação do nêutron e do próton.....	37
Figura 15.	Soluções para TOV.....	40
Figura 16.	Resultado obtido por TORRES (2011) para equação de estado considerando a massa do quark $s$ 100MeV.....	42
Figura 17.	Resultado obtido por TORRES (2011) para equação de estado considerando a massa do quark $s$ 150MeV.....	43
Figura 18.	Resultado obtido por TORRES (2011) para massa x raio com a massa do quark $s$ de 100MeV.....	44
Figura 19.	Resultado obtido por PAIS (2008) para fracção dos quarks $u, d$ e $s$ em função da densidade.....	45
Figura 20.	Resultado obtido por PAIS (2008) para pressão x densidade de energia.....	46
Figura 21.	Resultado obtido por PAIS (2008) para massa x raio.....	47
Figura 22.	Resultado obtido por PAOLI (2010) Equação de estado para estrelas quarkionicas com e sem matéria estranha utilizando o modelo NJL.....	48
Figura 23.	Resultado obtido por PAOLI (2010) massa x raio para estrelas quark iônicas com e sem matéria estranha utilizando o modelo NJL.....	49
Figura 24.	Protótipo de tela da página inicial do simulador.....	53
Figura 25.	Protótipo de tela da página inicial do simulador.....	54
Figura 26.	Protótipo de tela da página de resultados do simulador.....	55
Figura 27.	Diagrama de classe.....	55



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Tipos de estrelas .....	25
Tabela 2 -	Relação dos primeiros quarks e antiquarks. ....	35
Tabela 3 -	Mésons formados por quarks (u,d ou s) e antiquarks (u, <i>d</i> , s.) .....	36
Tabela 4 -	Composição dos bárions a partir da combinação de três quarks u, d e s. ...	37
Tabela 5 -	Especificação do caso de uso 01 (Inserir informações). ....	53
Tabela 6 -	Especificação do caso de uso 02 (Simular). ....	53
Tabela 7 -	Cronograma de planejamento para o TTC II. ....	56

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

TTC	Trabalho Técnico-científico de Conclusão de Curso
UNIVALI	Universidade do Vale do Itajaí
AU	Astronomical Unit - Unidade Astronômica
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MeV	Milhões de elétrons-volts

## LISTA DE SÍMBOLOS

$b$	Quark bottom.
$B$	Constante de sacola do modelo do MIT.
$c$	Quark charme.
$d$	Quark down.
$\bar{d}$	Antiquark down.
$E_i$	Energia da partícula $i$ .
$\varepsilon$	Densidade de energia.
$G$	Constante da gravitação universal.
$k$	Momento.
$k_f$	Momento de fermi.
$M$	Massa gravitacional.
$n_B$	Densidade do número bariônico.
$p$	Pressão.
$s$	Quark strange.
$\bar{s}$	Antiquark strange.
$t$	Quark top.
$u$	Quark up.
$\bar{u}$	Antiquark up.
$\gamma_i$	Degenerescencia do quark $i$ .

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 Problematização.....</b>	<b>15</b>
1.1.1 Formulação do problema .....	15
1.1.2 Solução proposta .....	15
<b>1.2 Objetivos.....</b>	<b>15</b>
1.2.1 Objetivo Geral .....	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	15
<b>1.3 Metodologia.....</b>	<b>16</b>
<b>1.4 Estrutura do trabalho .....</b>	<b>16</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1 Conceito de partícula elementar .....</b>	<b>17</b>
2.1.1 Descoberta do Elétron .....	17
2.1.2 Descoberta do Fóton.....	18
2.1.3 Descoberta do Próton .....	18
2.1.4 Neutrino do Elétron .....	18
2.1.5 Descoberta do nêutron.....	19
2.1.6 Zoológico de Partículas .....	19
<b>2.2 Evolução estelar .....</b>	<b>20</b>
2.2.1 Origem das estrelas.....	20
2.2.2 Diagrama de HR .....	23
2.2.2.1 Aglomerados Estelares .....	25
2.2.3 Sequência principal.....	26
2.2.4 Final do ciclo de uma estrela .....	28
<b>2.3 Estrelas de quark.....</b>	<b>30</b>
<b>2.4 Historia das Estrelas de Nêutrons.....</b>	<b>31</b>
2.4.1 Pulsares.....	32
2.4.2 Magnetares .....	33
<b>2.5 Modelo de quarks.....</b>	<b>34</b>
2.5.1 Modelo de Gell-mann-Ne'eman .....	35
2.5.2 Mésons.....	36
2.5.3 Bárions.....	37
2.5.4 Quarks e Suas Cores .....	37
<b>2.6 Modelo De sacola do MIT.....</b>	<b>38</b>
2.6.1 Equação de Estado.....	39
2.6.2 Equações de TOV .....	39
<b>2.7 Métodos Numéricos .....</b>	<b>40</b>
2.7.1 Integração numérica .....	40

2.7.2 Interpolação numérica .....	41
2.7.3 Equação diferencial .....	41
<b>2.8 trabalhos similares.....</b>	<b>41</b>
 <b>3 PROJETO .....</b>	 <b>50</b>
<b>3.1 Análise do Simulador a ser desenvolvido .....</b>	<b>50</b>
3.1.1 Conceito Geral .....	50
3.1.2 Público Alvo .....	50
<b>3.2 Definição de entrada e saída do simulador .....</b>	<b>50</b>
3.2.1 Entradas .....	50
3.2.2 Saídas.....	51
<b>3.3 Funcionamento do software.....</b>	<b>51</b>
<b>3.4 processo de validação do software .....</b>	<b>52</b>
<b>3.5 Especificações do software.....</b>	<b>52</b>
3.5.1 Requisitos Funcionais.....	52
3.5.2 Requisitos Não Funcionais .....	52
3.5.3 Caso de uso.....	53
3.5.4 Protótipo de tela.....	54
3.5.5 Diagrama de classe .....	55
<b>3.6 Planejamento do TTC II.....</b>	<b>56</b>
3.6.1 Metodologia.....	56
3.6.2 Cronograma TTC II.....	56
 <b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	 <b>57</b>

# 1 INTRODUÇÃO

“Todas as coisas são feitas de átomos”.

Richard Feynman em seu *Lectures on Physics* diz que caso todo o conhecimento científico do mundo fosse perdido em um cataclismo e apenas uma frase pudesse ser passada para a próxima geração essa seria a frase com a maior quantidade de informação na menor quantidade de palavras (FEYNMAN, 2008). Hoje sabemos que os átomos, por sua vez, são compostos de *quarks*.

Os *quarks* são partículas extremamente peculiares. Devido a um fenômeno conhecido como *confinamento* eles nunca podem ser observados isoladamente. Eles podem ser encontrados apenas em trios, formando os bárions (prótons, nêutrons, deltas, etc.), ou em duos formando os mésons (pi, rho, etc.). Porém em situações extremas de densidade e pressão é possível que aconteça um *desconfinamento* e os *quarks* se comportem como partículas livres. Tal fenômeno é previsto pela cromodinâmica quântica, a parte da mecânica quântica responsável por descrever a interação entre os hádrons. Hádrons são as partículas compostas por quarks, no caso, bárions e mésons (GRIFFITHS, 2008).

Essa situação extrema pode acontecer dentro de uma estrela de quarks. Quando uma estrela chega ao fim de sua existência, dependendo de sua massa, ela pode se tornar um buraco negro, uma estrela de nêutrons ou uma anã branca. As estrelas de nêutrons são cadáveres estelares que possuem densidade e pressão altíssimas em seu interior. Elas receberam este nome porque acreditava-se, a princípio, que elas eram compostas exclusivamente por nêutrons. Hoje se sabe que elas podem conter prótons e outros hádrons, mais especificamente é possível que sua densidade seja tão alta que ela não seja composta por hádrons e sim por quarks livres e completamente desconfinados (FILHO, 2014; SARAIVA, 2014).

O objetivo deste trabalho é unir todos estes conceitos de física de forma acessível para leigos e curiosos de todas as áreas. Além de utilizar o modelo de sacola do MIT, que já é bem conhecido e cujos resultados são utilizados amplamente em física nuclear, para construir um software que também seja útil para o público especializado (PAOLI, 2010; JACOBSEN, 2007).

No modelo de sacola do MIT os quarks são tratados como partículas livres, no sentido restrito do termo, enquanto estiverem no interior da sacola. Sendo os quarks partículas de spin  $\frac{1}{2}$  e visto que a sua velocidade no interior dos hádrons é relativística, é adequado descrevê-los usando espinores de Dirac. No modelo de sacola do MIT, o mecanismo de confinamento consiste no fato de que o campo dos quarks só existe na região esférica que é chamada de sacola.

Não existe nada fora da sacola, nem mesmo flutuações quânticas dos campos dos quarks (PILOTTO,2003).

## **1.1 PROBLEMATIZAÇÃO**

### **1.1.1 Formulação do problema**

Descrever o interior, ou até mesmo analisar a possibilidade de existência, de uma estrela de quarks é algo tanto interessante quanto difícil. Por um lado, o entendimento do problema requer conceitos físicos com os quais a maior parte do público nunca se deparou. Por outro, a solução requer perícia na implementação de métodos computacionais e devido ao volume de dados e análises é possível que resultados e conceitos se percam no processo.

Com isso é de grande importância que tanto a física quanto a computação andem lado a lado, pois nos dias atuais a computação vem se tornando de grande auxílio para as outras áreas de conhecimento seja ela a física ou qualquer outra área.

### **1.1.2 Solução proposta**

A solução proposta para este problema é: desenvolver um software em python que utilizando métodos numéricos robustos resolve o problema físico envolvido e apresenta os resultados de forma a facilitar a análise do processo.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Desenvolver um software em python capaz de simular o interior de uma estrela de quarks utilizando o *Modelo de sacola do MIT* como base para seus cálculos. O software deve ser capaz de apresentar seus resultados de forma clara e útil tanto para o público entusiasta quanto especializado na área de astrofísica.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Implementar os métodos de cálculo numérico necessários para resolver as equações.
- Utilizar os métodos numéricos para resolver as equações com as restrições físicas apropriadas de modo a descrever o interior de uma estrela de quarks.
- Modelar as saídas do programa na forma de gráficos e tabelas claras e de fácil compreensão.

- Comparar os resultados obtidos com os já presentes na literatura e com alguns valores reais esperados.

### **1.3 METODOLOGIA**

Foram realizadas pesquisas bibliográficas em livros, dissertações e artigos na área de física que abordavam os estudos das estrelas, mas especificamente na área de estrelas de nêutrons e quarks. Estes auxiliaram no entendimento do problema, obtenção de conhecimento sobre os conceitos abordados e trouxeram uma maior compreensão sobre os estudos de estrelas de quark.

O levantamento bibliográfico realizado foi importante para encontrar trabalhos similares que serão utilizados como base para validar o software que será desenvolvido, estes trabalhos serão utilizados como base para as saídas esperadas pelo software e também serão utilizados para validar a precisão do software.

Após as pesquisas realizadas levando em conta os trabalhos similares encontrados na literatura foi feita a especificação do software a ser desenvolvido por este trabalho, apresentando seus requisitos, funcionalidades além dos diagramas e dos protótipos de tela.

### **1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este documento está estruturado em quatro capítulos. O capítulo 1, introdução, apresentou uma visão geral do trabalho, incluído problema abordado, objetivos e metodologia. No capítulo 2, Fundamentação Teórica, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre: conceito de partícula elementar, evolução estelar, estrelas de quarks, modelo de sacola do MIT. O capítulo 3, Projeto, apresenta a ferramenta que será desenvolvida de forma detalhada, apresentado as especificações do software a ser projetado, os requisitos e os protótipos de tela desenvolvidos com o intuito de facilitar o entendimento do simulador, o capítulo também apresenta como será implementado o software proposto, apresentando a metodologia e o cronograma para o TTC II. Concluindo, no Capítulo 4, são apresentadas as considerações finais do trabalho.



## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 CONCEITO DE PARTÍCULA ELEMENTAR**

O conceito de partícula elementar foi introduzido pela primeira vez na Grécia antiga, pelo filósofo Leucipo, porém quem descreveu o modelo em detalhes foi seu discípulo Demócrito. Leucipo propôs que toda a matéria era formada por partículas indivisíveis, que mais tarde foram chamadas de átomos por Demócrito. Diferente dos outros filósofos da época que acreditavam que a matéria elementar que regia a vida era o fogo, a terra, o ar e a água, o átomo como matéria primordial não era algo que podia ser tocado, ou visto, e nem possuía propriedades como gosto, cor ou cheiro, com o passar dos séculos o conceito de átomo foi sofrendo transformações (CARUSO, 1996; LOPES, 2009).

Durante o século XIX, por meio de diversas experiências, os físicos e químicos obtiveram êxito na determinação da razão das massas de diferentes elementos químicos, medindo, por exemplo, a proporção em que dois gases se misturam. Com essas informações obtidas foi possível descobrir que o diâmetro de um átomo não poderia ser maior do que  $10^{-8}$  cm.

Os métodos experimentais da época testavam o modelo de estrutura da matéria utilizando-se do modelo atomista vigente na época. O átomo até então era a partícula elementar pois nada se conhecia sobre sua natureza interna, por isso era dito “indivisível” (ABDALLA, 2004).

#### **2.1.1 Descoberta do Elétron**

O primeiro trabalho que utilizou o nome elétron para descrever a menor quantidade carga elétrica surgiu no final do Século XIX. O trabalho, publicado por George Johnstone Stoney, obteve um valor para a carga do elétron cerca de 20 vezes menor do que é atualmente aceito. Stoney também propôs a existência de uma carga positiva com o mesmo valor que a carga negativa. Em 1897 o físico Joseph John Thomson, em uma experiência com raios catódicos, conseguiu separar os elétrons de um átomo e com isso “descobriu” o elétron, a primeira partícula elementar a ter as características identificadas (ABDALLA, 2004).

### 2.1.2 Descoberta do Fóton

Em 1888 os físicos começaram a observar que certos tipos de metais iluminados por radiação, emitiam partículas carregadas negativamente, esse fenômeno ficou conhecido como efeito fotoelétrico. No ano de 1905 Einstein explicou o efeito propondo a luz como formada por partículas elementares, as quais hoje são chamadas de fótons. Segundo a teoria de Einstein quando os fótons que incidem numa placa de metal tem energia suficiente, elas fazem com que os elétrons do metal sejam ejetados, isso acontece por que os elétrons adquirem energia cinética proveniente dos fótons. No ano 1923, dezoito anos após a proposta feita por Einstein, o fóton foi confirmado na experiência do efeito Compton (ABDALLA, 2004).

### 2.1.3 Descoberta do Próton

Em 1886, Eugen Goldstein estudava os raios catódicos e acabou introduzindo uma variante na experiência, Goldstein decidiu perfurar o cátodo da ampola de Crookes e verificou que, como resultado das perfurações, aparecia um feixe de raios de luz que ele chamou de raios canais, que iam na direção oposta ao feixe de raios catódicos, apresentando assim um caráter elétrico positivo. As observações obtidas por Eugen ficaram esquecidas por mais de doze anos, até que foram publicadas de novo em uma revista de maior repercussão e o físico Wilhelm Wien decidiu retornar os experimentos. O físico percebeu que era necessário utilizar um campo eletrostático mais intenso do que o utilizado anos atrás por Goldstein, com isso ele conclui que os raios canais eram propriamente constituídos de hidrogênio ionizado

Em junho de 1919, Ernest Rutherford publicou os resultados sobre a primeira desintegração artificial, em um artigo sobre colisões de partículas  $\alpha$  contra átomos leves, no trabalho foi apresentado que as partículas  $\alpha$  incidem sobre o nitrogênio, produzem núcleos de hidrogênio (prótons), e desta forma foi descoberta sem querer o próton (ABDALLA, 2004).

### 2.1.4 Neutrino do Elétron

O neutrino foi a terceira partícula elementar a ser estudada (isso pois prótons não são partículas elementares), teve sua proposta formulada em 1930, quando foi proposto ainda não possuía a extensão “do elétron”, era apenas chamado de neutrino. O físico Wolfgang Pauli, propôs a existência de uma partícula leve, neutra e fracamente interagente com a matéria, para tentar explicar a aparente falha da conservação de energia nas medidas do chamado decaimento. Os neutrinos naquela época, não eram vistos nem detectados e com isso muitos físicos chegaram a duvidar da conservação de energia. Porém Pauli preferiu imaginar que esse

desbalanceamento de energia acontecia porque no processo havia a emissão de uma nova partícula neutra, que possuía pouca massa. No início Pauli chamou a nova partícula de nêutron, porém acabou não abandonando o nome. Mais tarde o termo acabou sendo utilizado por James Chadwick. Alguns anos depois Pauli aceitou a sugestão de seu padrinho e adotou o nome de neutrino para a nova partícula (ABDALLA, 2004).

### **2.1.5 Descoberta do nêutron**

Nos dias de atuais sabemos que cargas de mesmo sinal se repelem pela força eletrostática, pensando nisso se um núcleo fosse constituído apenas de prótons ele não seria estável, devido a força repulsiva entre os prótons (que possuem carga positiva). Com base na afirmação anterior, buscava-se a existência de uma partícula neutra que existisse no núcleo. Na década de 1920, alguns físicos, sugeriram a existência de uma partícula neutra que era formada por um próton e um elétron, cuja sua massa seria próxima a do próton. A partícula foi batizada de nêutron, porém a ideia acabou não vingando, pois as teorias da época traziam várias contraprovas, fazendo com que os físicos abandonassem a teoria. Muitos físicos tentaram e vários experimentos foram propostos com o objetivo de encontrar a partícula neutra, porém isso só foi possível quando Chadwick abandonou as leis da conservação fundamentais da física (ABDALLA, 2004).

### **2.1.6 Zoológico de Partículas**

Na década de 1950 o uso de aceleradores de partículas estava em seu auge e com isso uma grande quantidade de partículas começaram a ser descobertas, a quantidade era tão espantosa que os físicos apelidaram de zoológico de partículas. Era necessário formular uma classificação, capaz de ordenar tantas partículas, algo parecido com o que foi feito com os elementos químicos em 1872. Para conseguir classificar as novas partículas foi preciso utilizar duas variáveis para se ter sucesso:

- O spin, que pode ser inteiro (bósons) ou semi-inteiros (férmions).
- A forma como as partículas sentem a interação forte.

As partículas que sentem as forças nucleares são chamadas de hádrons. Existem dois tipos de hádrons, os mésons e os bárions. As partículas que não sentem as forças nucleares, como o elétron, são chamadas de léptons.

A quantidade de partículas “elementares” nesta época era espantosa e os físicos começaram a perceber que não era possível que tantas partículas fossem de fato elementares. Apenas depois de alguns anos foi descoberto o quark, que será abordado mais profundamente no Capítulo 3 (ABDALLA, 2004).

## **2.2 EVOLUÇÃO ESTELAR**

Estrelas são esferas auto gravitantes de gás ionizado, cuja fonte de energia é a transmutação de elementos através de reações nucleares, isso é, a fusão nuclear do hidrogênio em hélio e posteriormente o hélio em elementos mais pesados (FILHO, 2014). Assim como nós seres humanos as estrelas possuem um ciclo de vida, elas nascem, permanecem estáveis por um período e morrem. As estrelas possuem um nascimento muito semelhante entre si, porém sua morte depende de fatores como: composição química e massa. Ao morrer uma estrela pode tomar alguns caminhos que irão depender de sua massa inicial, os caminhos podem ser o surgimento de uma estrela anã branca, de uma estrela de nêutrons ou de um buraco negro (MARRANGHELLO, 2014).

### **2.2.1 Origem das estrelas**

As estrelas mais jovens se encontram sempre próximas a outras estrelas com idade semelhante e rodeadas por gás. Essas nuvens de gás que envolvem as estrelas mais jovens são constituídas de hidrogênio, o que sugere que as nuvens de gás estão ligadas a origem das estrelas. O nascimento das estrelas é de difícil observação, não devido apenas a sua duração que pode ser de alguns milhões de anos, como também pelo fato de ser difícil de observar dentro da nuvem de gás que as rodeia. Somente em fevereiro de 2000, os astrônomos conseguiram, a partir de um telescópio de infravermelho, observar uma imagem do interior de uma nuvem de gás (ALVES, 2005).

Figura 1. Nebulosa de Órion.



Fonte: <https://exame.abril.com.br/ciencia/15-fotos-incriveis-tiradas-pelo-telescopio-hubble-em-25-anos/>.

Na figura 1 podemos observar a nebulosa de Órion, que é uma das áreas de formação estelar mais próximas da terra, encontrando-se a 1.300 anos-luz<sup>1</sup>.

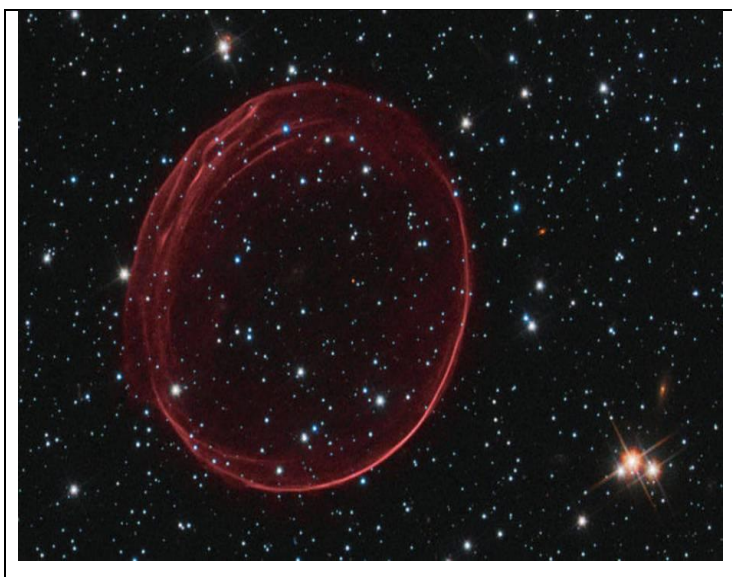
Foi o inglês James Jean no início do século XX, que determinou o valor da massa para que uma ligeira perturbação possa dar origem a uma contração mais brusca e com isso possibilitar o surgimento de uma estrela. Os astrônomos desconhecem qual ou quais são os fenômenos capazes de produzir tais perturbações que seriam necessárias para iniciar a contração, porém segundo ALVES, 2005 os mais plausíveis seriam:

- A influência de uma supernova – as supernovas são explosões, que podem ocorrer quando uma estrela muito massiva chega ao fim de sua existência. Elas liberam grande quantidade de energia e matéria que viajam a grandes velocidades, percorrendo enormes distancias e produzindo uma onda de choque capaz de introduzir alterações locais na densidade de uma nuvem. Na Figura 2 podemos ver os resquícios de uma supernova, a foto foi tirada pelo telescópio Hubble.

---

<sup>1</sup> Ano-luz é uma unidade que corresponde à distância percorrida pela luz, no vácuo, durante um ano, à velocidade de 300 mil km/s. Corresponde a exatamente 9.460.730.472.580,8 km.

Figura 2. Super Nova.



Fonte: <https://exame.abril.com.br/ciencia/15-fotos-incriveis-tiradas-pelo-telescopio-hubble-em-25-anos/>.

- Influência das estrelas – estrelas mais quentes, com temperaturas superficiais superiores a  $15000\text{ K}^2$ , quando agrupadas em conjunto produzem grandes quantidades de luz ultravioleta e um forte vento estelar, capaz de produzir as perturbações necessárias para o colapso.
- Colisões com grandes nuvens de gás e galáxias – a aproximação, ou colisão, com outras nuvens ou galáxias criam ondas de choque, que se propagam ao longo das nuvens e que, por sua vez, são capazes de alterar localmente a densidade.

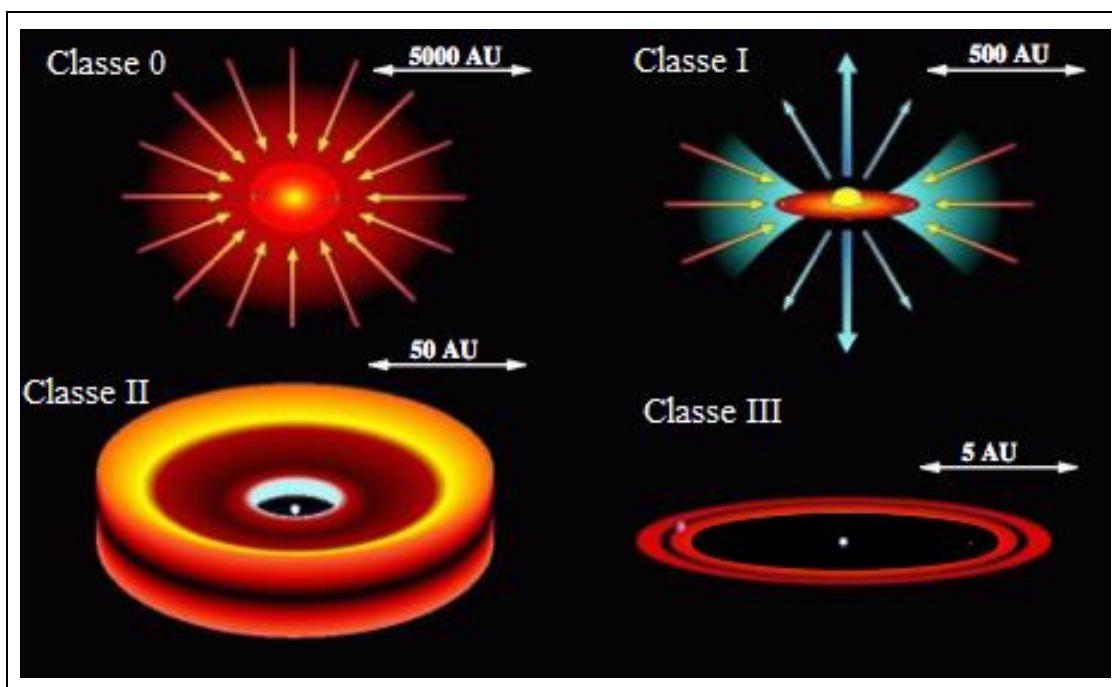
Após a perturbação, as moléculas da nuvem começam a colidir e formam glóbulos de gás hidrogênio, que acabam colapsando com seu próprio peso, cada glóbulo dará origem a uma nova estrela.

A medida em que o glóbulo colapsa se forma um disco em rotação com uma protoestrela no centro. Protoestrela é o período pós nascimento em que o núcleo está absorvendo a matéria que está nas proximidades e com isso torna-se mais denso e quente. Quando a temperatura do núcleo fica alta o suficiente para iniciar fusões termonucleares a protoestrela passa a ser chamada de estrela e dá início a fase de sua vida na sequência principal (ALVES, 2005; FILHO, 2014).

---

<sup>2</sup> K (Kelvin) é o nome dado para a unidade básica da temperatura de acordo com o Sistema Internacional de Unidades. A temperatura de 1 Kelvin corresponde a  $-272,15\text{ °C}$  (celsius). Na escala Kelvin, por exemplo,  $273,15\text{ Kelvin}$  equivale a  $0^\circ\text{ graus Celsius}$ .

Figura 3. Evolução proto-estrela.



Fonte: <https://ismlandmarks.wordpress.com/protostars/>

Na figura 3 da esquerda superior para a direita inferior podemos ver o ciclo de uma protoestrela (AU é uma unidade de distância e é igual à distância média entre a Terra e o Sol), a Classe 0 é o momento inicial de vida da protoestrela após dar início a contração do glóbulo gerado pela perturbação na nuvem. Na Classe I podemos ver a existência de um disco em volta da protoestrela, este disco é formado por uma grande quantidade de matéria. Na Classe II pode-se notar que a protoestrela começa a se estabilizar e na Classe III finalmente o ciclo de vida da protoestrela começa a chegar ao fim e com isso ela se torna uma estrela jovem.

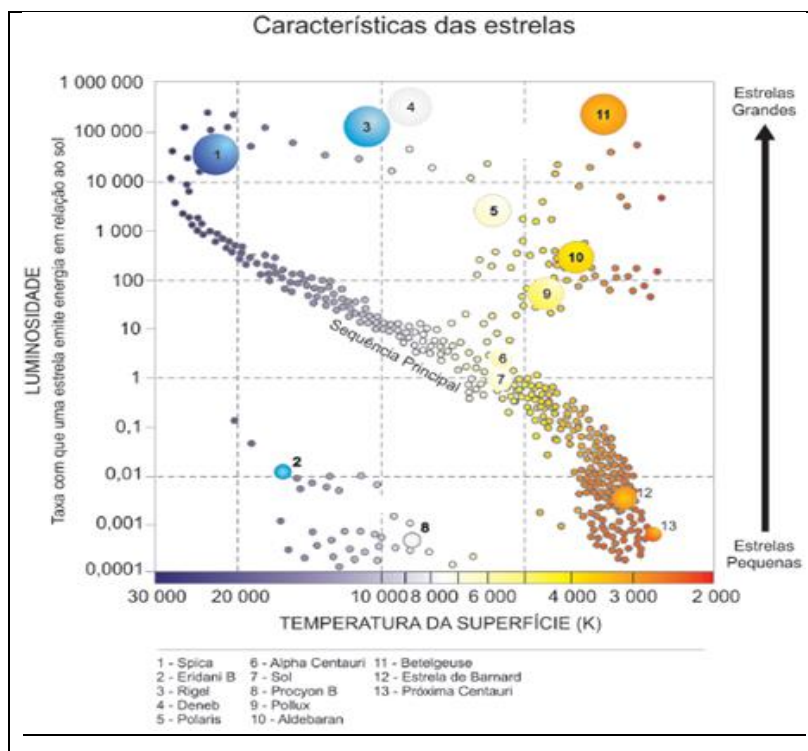
### 2.2.2 Diagrama de HR

O diagrama de Hertzsprung Russel, conhecido como o diagrama de HR, foi descoberto pelo dinamarquês Ejnar Hertzsprung em 1911 e pelo americano Henry Norris Russel no ano de 1913. Hertzsprung descobriu que estrelas de mesma cor podiam ser divididas em luminosas, que ele chamou de gigantes, e de baixa luminosidade, que receberam o nome de anãs. Russel utilizou o trabalho desenvolvido por Hertzsprung e o estendeu para que abrangesse também a classificação das estrelas por temperatura assim se tornando Diagrama de Hertzsprung Russel (FILHO,2014).

A figura 4 representa um diagrama HR para um conjunto de estrelas que se encontram próximas ao sol. Neste diagrama os astrônomos adotam a convenção de que a temperatura cresce para a esquerda, e a luminosidade para cima. Podemos notar que no diagrama de HR as

estrelas não se distribuem igualmente e sim encontram concentradas em algumas regiões. A maior parte está alinhada ao longo de uma curva diagonal que vai do extremo superior esquerdo, onde se encontram as estrelas mais quentes e muito luminosas, até o canto inferior direito, onde se encontram as estrelas mais frias e que possuem pouca luminosidade. Esta faixa recebe o nome de sequência principal, o fator que determina onde uma estrela se localiza na sequência principal é a sua massa, estrelas com uma massa muito grande são mais quentes e mais luminosas. Em algum momento de suas vidas todas as estrelas passam pela sequência principal (ALVES, 2005; FILHO, 2014).

Figura 4. Características das estrelas.



Fonte: adaptado de FILHO (2014).

O eixo vertical da figura 4 corresponde a taxa de luminosidade que a estrela emite em relação ao sol. No eixo horizontal tem-se a temperatura superficial que da estrela, quanto mais azul maior é sua temperatura e quanto mais vermelha menor sua temperatura.



Tabela 1 - Tipos de estrelas

Tipo de estrelas	Temperatura de superfície (K)	Cor
O	20.000 - 35.000	Azul
B	- 15.000	Azul-branco
A	- 9.000	Branco
F	- 7.000	Amarelo-branco
G	- 5.500	Amarelo
K	- 4000	Laranja
M	- 3000	Vermelho

Fonte: adaptado de ALVES (2005).

A Tabela 1 foi iniciada por Henry Draper em 1872 e continuada pelo observatório de Harvard (ALVES, 2005). A classificação espectral se dá pela temperatura da estrela e dependendo dela a estrela possui uma classificação de cor diferente. Essa cor não corresponde a cor real da estrela, ela apenas indica em que ponto do espectro de cores ocorre o máximo de emissão. Fora da atmosfera terrestre todas as estrelas são brancas, pois sempre emitem em todo espectro de cores.

Uma estrela não passa sua vida toda na sequência principal, como já foi abordado neste capítulo. Elas possuem um ciclo de vida que depende de sua massa inicial, porém com o passar do tempo vão perdendo massa e acabam passando por vários locais do diagrama. Segundo FILHO, 2014, é importante notar que o fato de uma estrela estar “na” ou “fora da” sequência principal não se refere à sua posição no espaço, mas apenas à posição do ponto no diagrama HR que representa sua luminosidade e temperatura, estima-se que em torno de 80% das estrelas nas vizinhanças do Sol são estrelas da sequencial principal. Aproximadamente 19% são anãs brancas e menos do que 1% são gigantes, supergigantes ou anãs marrons.

### 2.2.2.1 Aglomerados Estelares

Aglomerados estelares são um conjunto de estrelas formadas pela mesma nuvem de gás e, portanto, possuem a mesma idade, a mesma composição química e estão a aproximadamente a mesma distância da terra. Existem aglomerados com dezenas a centenas de estrelas, como as plêiades, que são mais conhecidas como As Sete Irmãs, pois é possível ver sete estrelas a olho nu. Elas possuem aproximadamente 20 milhões de anos e se encontra a 410 ano-luz da terra. Existem cerca de 160 aglomerados estelares na nossa Galáxia, com centenas de milhares de estrelas, um bom exemplo seria Ômega Centauri, que se encontra a 17.000 anos-luz da terra na constelação de Centauro e está localizada a 170 anos-luz.

Para uma amostra de estrelas que estão limitadas por brilho ou por distância, a sequência principal não é uma linha fina, mas sim uma linha larga, especialmente na extremidade fria, a largura da sequência principal não se dá devido a erros nas medidas de distância entre as estrelas, mas sim devido a variação na composição química das estrelas de mesma massa. Já para aglomerados de estrelas que nasceram da mesma nuvem de gás, e por isso possuem a mesma idade e tem a mesma composição química, a sequência principal no diagrama HR é uma linha fina (FILHO, 2014). Na figura 5 podemos ver o aglomerado de plêiades, onde os pontos mais claros são as sete irmãs.

Figura 5. Aglomerado estelar.



Fonte: <http://www.astronoo.com/pt/aglomerado-estelar.html>

### 2.2.3 Sequência principal

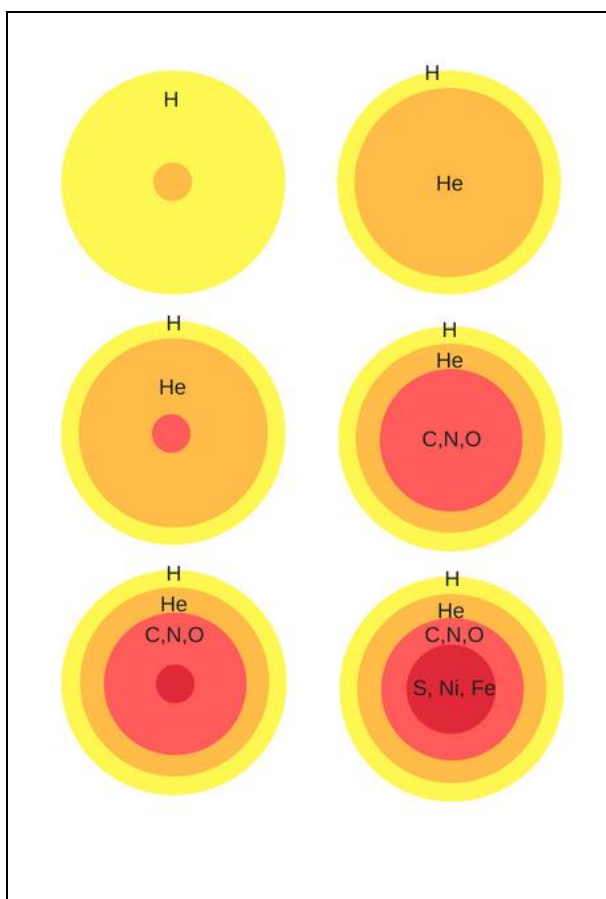
Hans Albrecht Bethe, no final da década de 60, desvendou a produção de energia nas estrelas e recebeu o prêmio nobel pelo feito. Hans descobriu que quando o gás de hidrogênio, que se encontra no centro da esfera, alcança densidades muito elevadas acaba iniciando um processo que ficou conhecido como fusão termonuclear. O processo transforma o Hidrogênio que se encontra no centro em Hélio, este processo libera uma grande quantidade de energia que é capaz de parar o colapso do gás e assim equilibrar a força gravitacional, estabilizando a estrela. O processo continuar até que todo o hidrogênio que se encontra no centro da estrela seja transformado em hélio (MARRANGHELLO, 2014).

O restante do hidrogênio que não foi utilizado na fusão encontra-se agora em torno do núcleo da estrela que agora é formado por hélio – o hélio é mais pesado que o hidrogênio e com isso acaba se acumulando no centro da estrela enquanto o hidrogênio fica em uma camada superior. O processo de fusão se repete novamente agora transformando o Hélio que se encontra

no centro em elementos mais pesados, como carbono, nitrogênio, até alcançar o elemento ferro (MARRANGHELLO, 2014).

Na figura 6 da esquerda superior para a direita inferior é possível ver a transformações que a estrela passa, inicia-se com a fusão do Hidrogênio para Hélio, depois é a vez do Hélio ser convertido em Carbono, Nitrogênio e Oxigênio e por fim os elementos mais pesados como o ferro são formados no centro da estrela. Este processo não dura infinitamente conforme vão ocorrendo as fusões termonucleares e elementos mais pesados vão se formando nas camadas mais internas da estrela, mais energia é necessária para unir os núcleos e assim gerar uma nova fusão, este processo ocorre até o ferro. A partir do ferro a estrela deixa de gerar energia e começa a consumir. Isso acontece pois a fusão de ferro em elementos mais pesados é um processo endotérmico ou seja absorver energia ao invés de gerar (FILHO, 2014; MARRANGHELLO, 2014).

Figura 6. Processo termonuclear de uma estrela.



### 2.2.4 Final do ciclo de uma estrela

O final do ciclo de uma estrela se dá a partir do momento em que elementos pesados como o ferro começam a ser formados no interior da estrela, pois estes necessitam de uma quantidade muito maior de energia para que aconteça uma nova fusão. Como citado anteriormente a fusão de elementos pesados é um processo endotérmico o que significa que ao invés de produzir mais combustível a estrela passa a consumir.

A partir do momento em que a estrela não gera mais seu próprio combustível, a matéria que se encontram nas camadas mais externas começam a cair em direção ao núcleo, porém as fusões continuam acontecendo, gerando os elementos mais pesados da tabela periódica, até que a estrela não possua mais energia. É importante frisar que apenas estrelas com massa superior a 8 massas solares são capazes de gerar elementos pesados como o ferro (JACOBSEN, 2007; FILHO, 2014; MARRANGHELLO, 2014).

Quando finalmente toda a matéria estelar cai em direção ao núcleo, inicia-se um dos mais belos eventos da natureza, conhecido como a explosão de uma supernova, uma onda de choque que se forma a alguns quilômetros da superfície do núcleo.

Existem inúmeras teorias para explicar os vários fenômenos que acontecem durante o evento, entretanto o resultado final é certo, a matéria que se encontra nas camadas externas ao cair sobre o centro da estrela é expelida em uma violenta explosão e se espalha pelo universo. Que anteriormente era formado por nuvens de gás hidrogênio e agora possui também frações de Hélio, Carbono, Nitrogênio, Oxigênio, Silício e entre outros elementos, que viajam em uma grande velocidade pelo Universo.

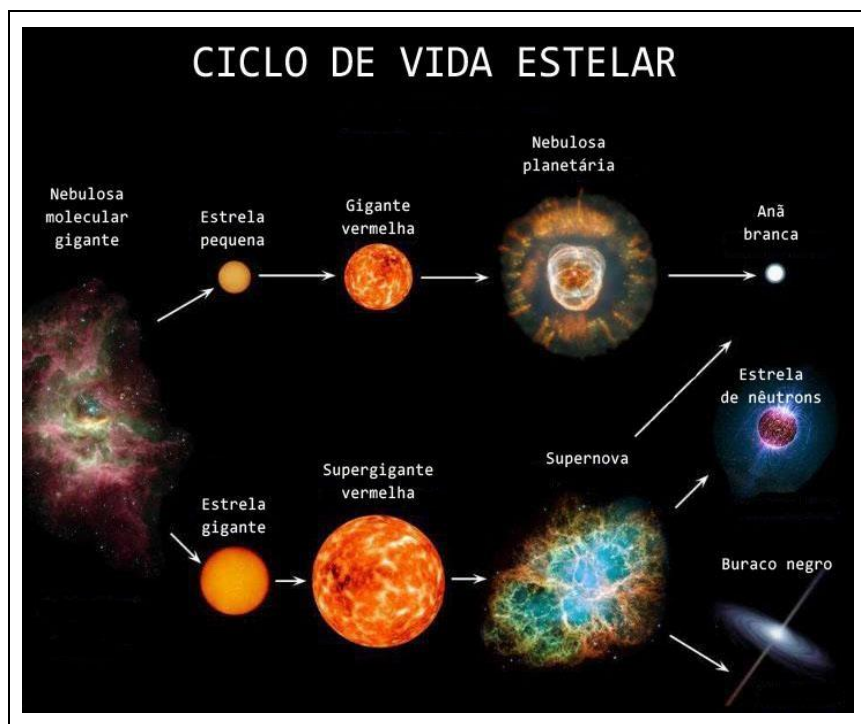
No momento em que a estrela morre podem ocorrer três situações com os seus restos. Na primeira o caroço de ferro no interior da estrela permanece praticamente intacto após a explosão, sofrendo um impulso de grande velocidade, que pode chegar a 1000 km/s. O caroço acaba sofrendo uma transformação devido à grande quantidade de energia liberada durante o processo, fazendo com que o núcleo que antes era formado por ferro seja dissolvido em prótons, elétrons e nêutrons. É importante citar que quanto maior é a sua massa inicial da estrela menor é o seu tempo de vida. Isto ocorre pois quanto mais massa a estrela possui maior é a compressão da mesma, fazendo com que ela atinja mais rapidamente as densidades críticas necessárias para a fusão de elementos mais pesados (JACOBSEN, 2007; MARRANGHELLO, 2014).

A segunda situação possível se dá caso a estrela possua massa menor que 8 massas solares. Estas estrelas acabam interrompendo seu processo de fusão antes de alcançar o elemento ferro e com isso acabam terminando seu ciclo expelindo a parte superficial sem

necessariamente explodir em uma supernova. O caroço que sobra possui uma massa próxima a do nosso sol, porém possuindo um raio de apenas alguns milhares de quilômetros, estas estrelas são conhecidas como anãs brancas. Este tipo de estrela possui o tamanho aproximadamente igual ao da terra, o que faz com que ela seja considerada pequena por isso o nome. Como sua massa está comprimida e sua densidade é muito grande seu brilho é totalmente diferente das estrelas que ainda estão em fase de fusão (JACOBSEN, 2007; MARRANGHELLO, 2014).

Por fim estrelas que possuem massa 20 vezes maior que a massa do sol evoluem em uma velocidade muito grande, atingindo rapidamente as etapas finais de seu ciclo. Lembrando que quanto maior massa da estrela mais energia ela gera e com isso se torna bem provável que estas estrelas consigam gerar elementos mais pesados que o ferro, algo que não acontece em estrelas menores. Porém, devido à gigantesca atração gravitacional, o produto final da evolução estelar se torna o famoso buraco negro, de onde nada escapa, nem mesmo a luz. Os buracos negros possuem entre 5 e 100 massas solares e podem atingir cerca de 1000 massas solares (FILHO, 2014; MARRANGHELLO, 2014).

Figura 7. Ciclo de vida estelar



Fonte: adaptado de <https://hypescience.com/ciclo-vida-estrela-ciclo-vida-estelar/>

A Figura 7 é uma representação de cada uma das situações citas a cima, mostrando por todas as etapas que uma estrela passa em seu ciclo até a transformação em uma anã branca, estrela de nêutrons ou um buraco negro.

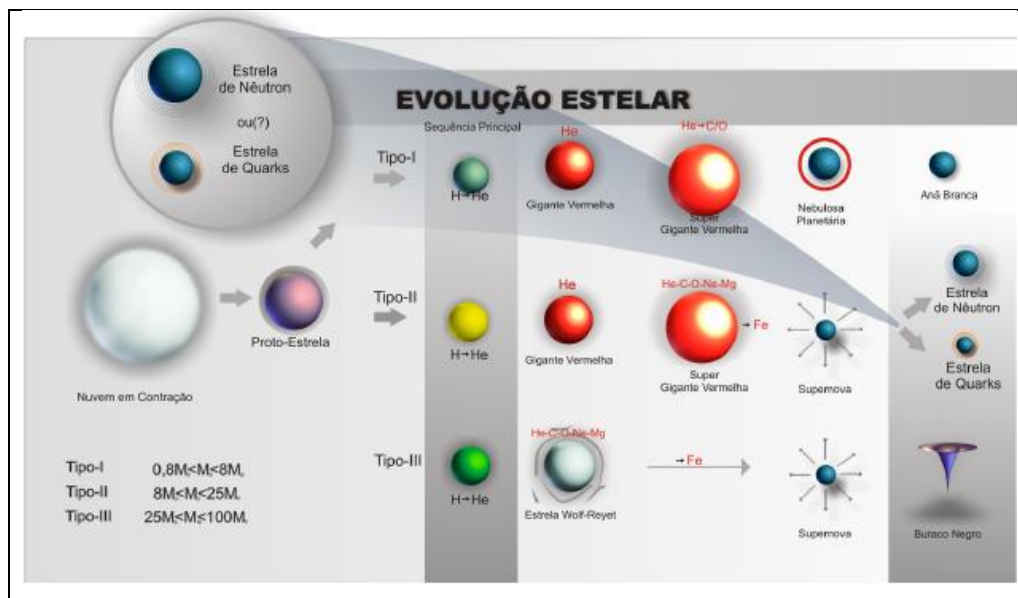
Existem estudos que apontam a existência de uma variação para a estrela de nêutron, conhecida como estrelas de quarks, onde a estrela é composta totalmente, ou em partes, por quarks livres (PAIS, 2008). Existem diversos modelos que descrevem como uma estrela de nêutrons pode ser formada por quarks. Neste trabalho iremos focar em um modelo específico, denominado de modelo de sacola do MIT.

## 2.3 ESTRELAS DE QUARK

Acredita-se que as estrelas de nêutrons possuam uma variação, conhecida como estrelas de quarks. Em altas densidade os quarks podem ser desconfinados dos hádrons, fazendo com que a estrela seja composta puramente por quarks livres (PAIS, 2008; TORRES, 2011).

Para formar uma estrela de quarks é necessário que a estrela possua massa maior que 8 massas solares e menor que 25 massas solares. Na Figura 8 podemos ver que o caminho necessário que a protoestrela deve percorrer é a Tipo-II, passando pela fase de gigante vermelha e, após isso, super gigante vermelha. Para pôr fim, ao formar Fe no seu núcleo, explodir em supernova e dar origem a uma estrela de quarks (JACOBSEN, 2007).

Figura 8. Evolução estelar estrelas de quark.



Fonte: adaptado de TORRES (2011).

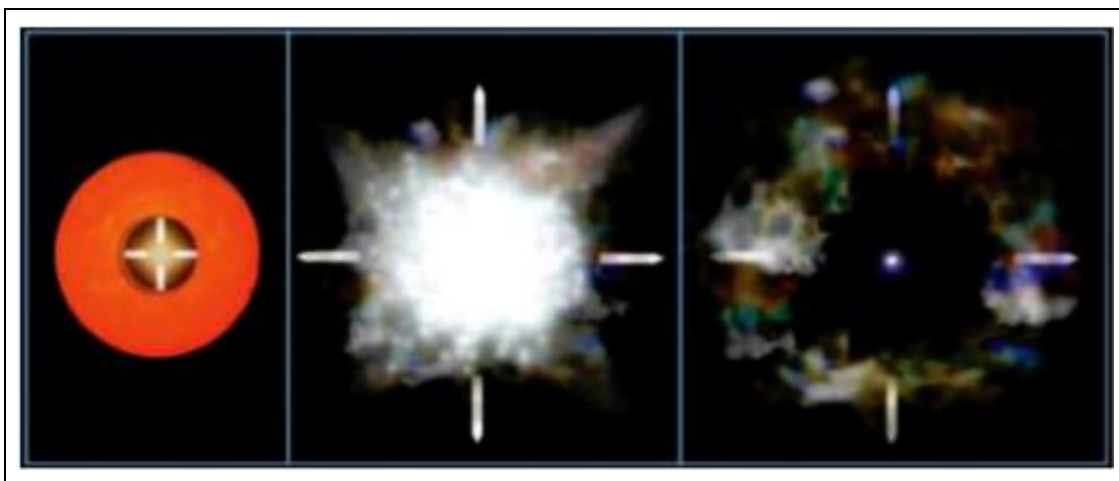
## 2.4 HISTORIA DAS ESTRELAS DE NÊUTRONS

O estudo das estrelas de nêutrons só se tornou possível após o desenvolvimento da *Teoria da Relatividade Geral* de Albert Einstein. Não era possível estudá-las utilizando a *Teoria da Gravitação Clássica* que foi desenvolvido por Newton, pois a força gravitacional das estrelas é tão forte que distorce a estrutura do espaço que se encontra à sua volta, fazendo com que fosse necessário adicionar as correções que foram estudadas por Einstein para calcular qualquer uma de suas propriedades (MARANGHELLO, 2014).

Outro fato importante que contribuiu para os estudos das estrelas de nêutrons foi a descoberta do nêutron feita por Chadwick no início da década de 30. Após a descoberta começaram a surgir as primeiras ideias de que estrelas de nêutrons poderiam vir a ser o produto final de uma evolução estelar. A proposta elaborada por Walter Baade e Fritz Zwicky, alguns anos após a descoberta do nêutron, considerava que a energia adquirida pelo caroço durante a explosão de uma supernova seria o suficiente para deixar uma estrela de nêutrons como produto final.

A Figura 9 é uma representação dos últimos passos de uma estrela que, após chegar ao estágio de Gigante Vermelha, explode como uma supernova e deixa uma estrela de nêutrons como produto final.

Figura 9. Nascimento de uma estrela de nêutron.



Fonte: adaptado de MARANGHELLO (2014).

No ano de 1939 J.R Oppenheimer, G. M. Volkoff e R. C. Tolman encontraram uma solução para as equações de Einstein que se adequava aos estudos das estrelas de nêutron. Estas equações descrevem a estrutura de uma estrela esférica na qual a pressão exercida pela gravitação é contrabalançada pela pressão dos nêutrons que formam a estrutura interna da estrela (MARANGHELLO, 2014).

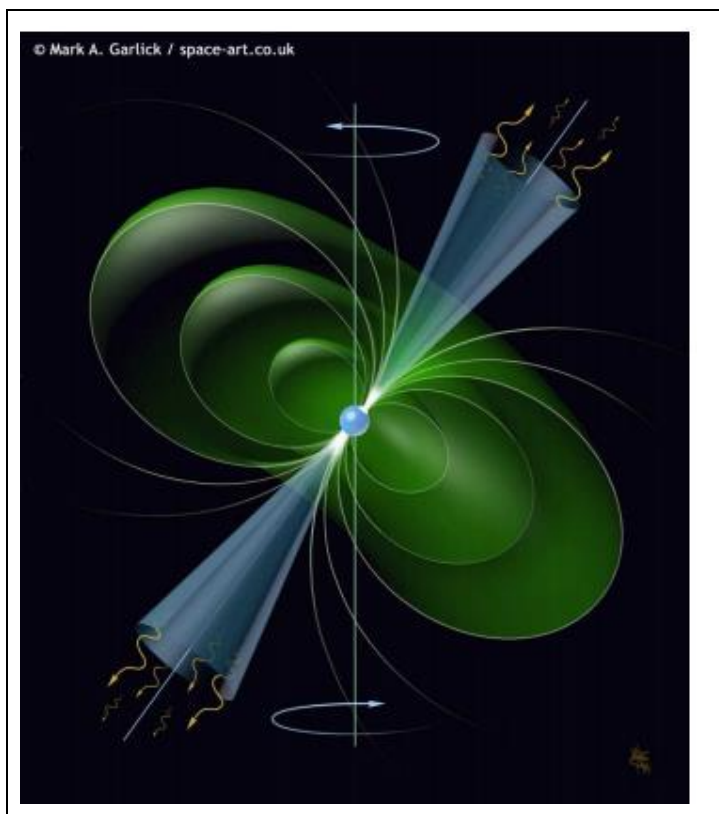
Existem outros trabalhos que utilizam as equações de Einstein para obter resultados mais realísticos nos quais a inclusão de características importantes é acrescentada, como a rotação da estrela e a presença de um campo magnético.

### 2.4.1 Pulsares

Apenas no ano de 1967 a teoria sobre as estrelas de nêutrons foi confirmada, ao ser detectada o primeiro pulsar. Pulsar é o nome dado à uma estrela de nêutrons que se encontra em movimento de rotação. O nome está ligado ao fato de que a estrela emite um feixe de luz bem direcionado e por estar em rotação lembra um farol que indica o caminho aos navegantes, sua luz chega a Terra apenas como pulsos isolados, daí o nome pulsar (MARANGHELLO, 2014).

O astrofísico Anthony Hewish desenvolveu um radiotelescópio para estudar quasares, após um mês de operação, uma de suas alunas Jocelyn Bell, noticiou a detecção de uma fonte de pulsos periódicos e no ano de 1974 recebeu o prêmio Nobel por tal feito. Hoje a quantidade de pulsares já detectados ultrapassa o número de 1500 (MARANGHELLO, 2014).

Figura 10. Pulsar



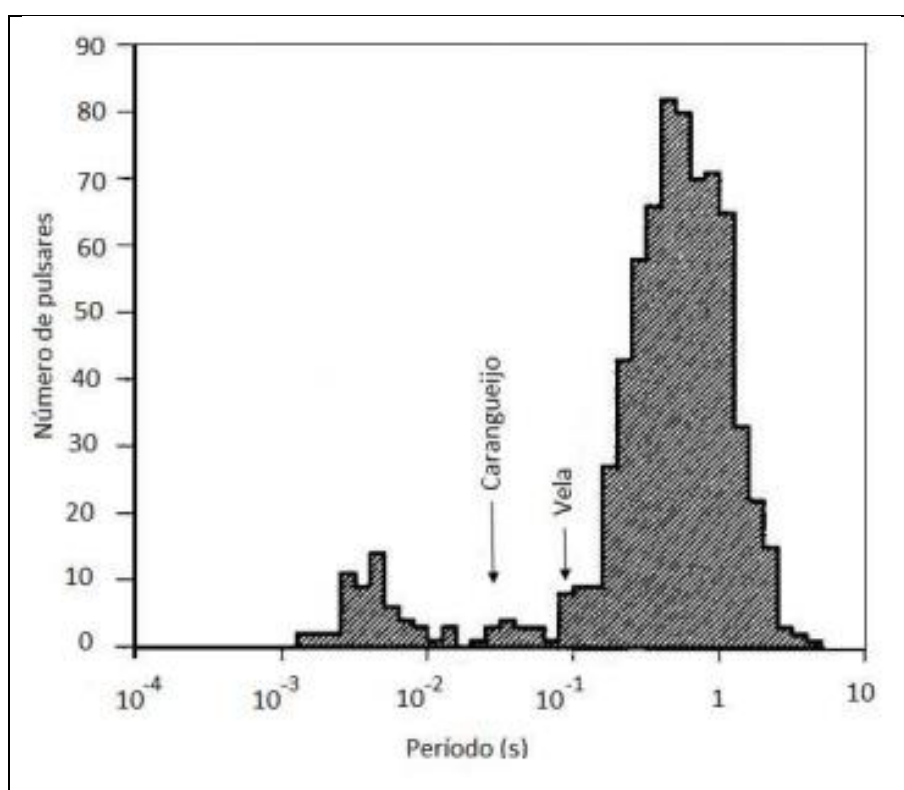
Fonte: adaptado de FRANZON (2012).



A Figura 10 ilustra o comportamento de uma estrela do tipo pulsar. Na figura existe um cone de radiação (em azul) que sai da estrela, por estar rotacionando apenas pulsos chegam até a terra, como se fosse um farol. Os toroides concêntricos (em verde) representam o campo eletromagnético da estrela.

Os pulsares possuem períodos de rotação extremamente altos e isso se deve à conservação do momento angular durante a sua formação. É comum separar esses objetos em dois grupos, pulsares de milissegundos e pulsares canônicos, que se distinguem pela intensidade do campo magnético, idade e período de revolução (FRANZON, 2012).

Figura 11. Distribuição de período de rotação de pulsares.



Fonte: adaptado de FRANZON (2012).

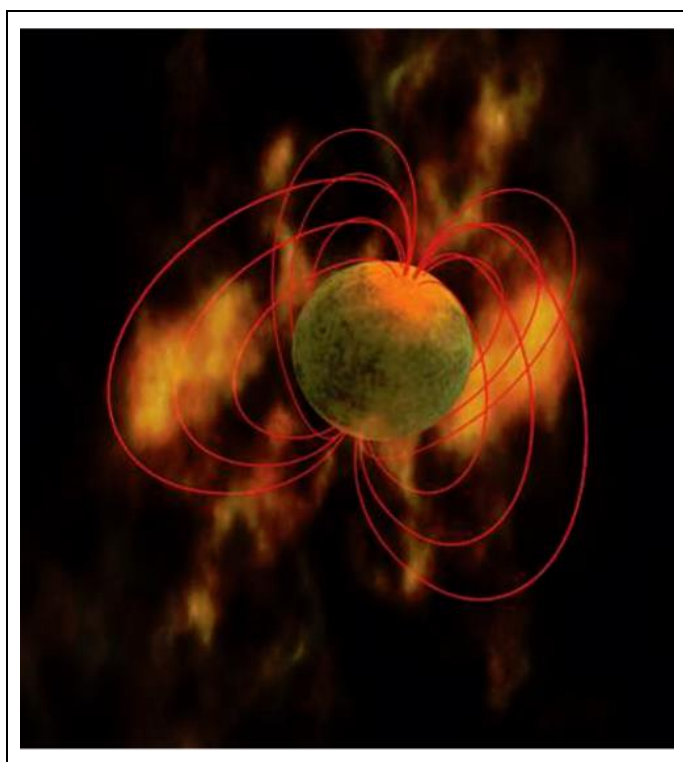
A Figura 11 representa o número de pulsares como função do período de rotação, podemos notar que a maior parte deles tem período de aproximadamente 1s (os canônicos) e a minoria tem período ~ 1ms (os de milissegundos).

## 2.4.2 Magnetares

As estrelas de nêutrons possuem campos magnéticos muito fortes, muito maiores que os encontrados na Terra (tanto naturais quanto produzidos em laboratório), porém existe uma teoria sobre a existência de uma classe de estrelas de nêutrons que são capazes de gerar campos magnéticos ainda mais forte e que liberam uma grande quantidade de radiação eletromagnética

por conta disso. Esta classe é chamada de *magnetar* e seu estudo alcança todos os limites da relatividade e da mecânica quântica (MARANGHELLO, 2014; PAIS, 2008). Dentro da física existe a teoria de que um magnetar é uma estrela de quarks, pois supostamente os campos magnéticos muito fortes facilitariam a dissolução dos nêutrons e prótons em quarks (MARANGHELLO, 2014). A Figura 12 é uma ilustração que representa como deve ser um magnetar as linhas vermelhas são linhas de campos eletromagnéticos.

Figura 12. Ilustração de um magnetar.



Fonte: adaptado de MARANGHELLO (2014).

## 2.5 MODELO DE QUARKS

Proposto em 1964 por Murray Gell-Man e George Zweing, o modelo propõe que os hádrons são constituídos por combinações de duas ou três partículas realmente elementares, os quarks. De acordo com o modelo os quarks carregam cargas elétricas fracionárias e possuem números internos rotulados por sabores. No modelo original proposto por Gell-Man e Zweing existiam três sabores que eram, conhecidos como *up*, *down* e *strange* que também são conhecidas por suas iniciais *u*, *d*, *s*. Para cada quark existente há uma antipartícula com a mesma massa, spin mas com carga elétrica oposta, os antiquarks. Os antiquarks são representados acrescentando uma barra ao símbolo do quark correspondente, como exemplo podemos citar o quark *d* onde seu antiquark é representado por  $\bar{d}$  (AVANCINI, 2009; JACOBSEN, 2007;

TORRES, 2011; OSTERMANN). A Tabela 2 fornece algumas propriedades dos quarks, note que os quarks possuem carga elétrica fracionada (frações da carga do elétron), o que não é usual, já que uma carga elétrica fracionária nunca foi detectada experimentalmente em “estado livre” (AVANCINI, 2009; OSTERMANN).

Tabela 2 - Relação dos primeiros quarks e antiquarks.

Nome	Símbolo	Carga	Estranheza
Up	$U$	$+2/3$	0
Down	$D$	$-1/3$	0
Strange	$S$	$-1/3$	-1
anti-up	$\bar{u}$	$-2/3$	0
anti-down	$\bar{d}$	$+1/3$	0
anti-strange	$\bar{s}$	$+1/3$	+1

Fonte: adaptado de OSTERMANN.

Ainda no ano de 1964 foi proposto um quarto sabor que recebeu o símbolo  $c$  para indicar uma nova propriedade denominada *charm*. No ano de 1977 dois novos sabores de quarks foram propostos  $t$  e  $b$  respectivamente *top* e *bottom* (AVANCINI, 2009; JACOBSEN, 2007; OSTERMANN; TORRES, 2011).

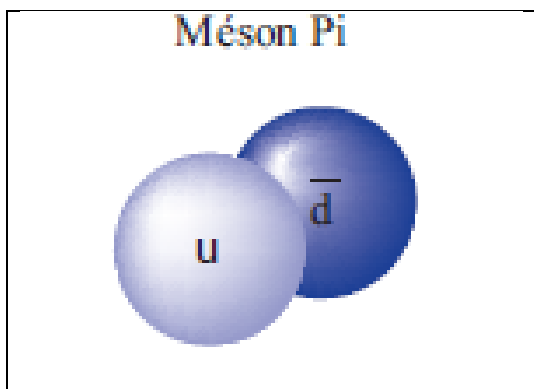
### 2.5.1 Modelo de Gell-mann-Ne’eman

O modelo de Gell-mann-Ne’eman é o precursor da teoria de quarks. A classificação das partículas elementares (hádrons) baseia-se na ideia de identificar famílias de partículas através da realização de uma conexão entre seus vários membros. O modelo teve um enorme sucesso, pois além de classificar todas as partículas conhecidas, ainda foi capaz de prever novas partículas que posteriormente acabaram sendo observadas experimentalmente (AVANCINI, 2009).

## 2.5.2 Mésons

Os mésons são constituídos pela combinação de um quark e um antiquark. Desde a década de 60, quando o modelo de quark foi proposto pela primeira vez, muitos mésons foram descobertos e todos eles são compostos por um quark e um antiquark. Não se existem relatos de mésons que não se encaixem neste modelo (OSTERMANN).

Figura 13. Méson Pi



Fonte: adaptado de AVANCINI, 2009.

A Figura 13 é uma representação da união de um quark e um antiquark para a geração do méson pi.

Tabela 3 - Mésons formados por quarks ( $u, d$  ou  $s$ ) e antiquarks ( $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$ .)

Mésons	Símbolos	Quark	Antiquark
Pi Zero	$\pi^0$	$u, d$	$\bar{u}/\bar{d}$
Pi Menos	$\pi^-$	$d$	$\bar{u}$
Pi Mais	$\pi^+$	$u$	$\bar{d}$

Fonte: adaptado de OSTERMANN.

A Tabela 3 traz como exemplo três mésons formados pela combinação de quarks e antiquarks.

### 2.5.3 Bárions

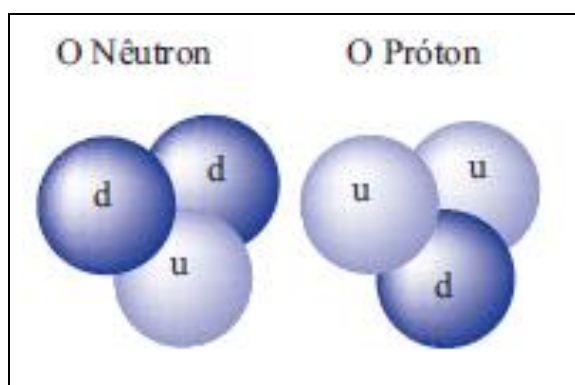
Os bárions são compostos a partir de três quarks, tomando-se todas as possíveis combinações entre os quarks. Existem também bárions que são compostos apenas por antiquarks como podemos ver na Tabela 4 logo abaixo.

Tabela 4 - Composição dos bárions a partir da combinação de três quarks  $u$ ,  $d$  e  $s$ .

Bárions	Composição
Próton	$duu$
Antipróton	$\bar{d}\bar{u}\bar{u}$
Nêutron	$ddu$
Antinêutron	$\bar{d}\bar{d}\bar{u}$
Lambda	$dus$
Antilambda	$\bar{d}\bar{u}\bar{s}$

Fonte: adaptado de OSTERMANN.

Figura 14. Representação do nêutron e do próton.



Fonte: adaptado de AVANCINI, 2009.

A Figura 14 ilustra os quarks necessários para a formação de um nêutron e de um próton.

### 2.5.4 Quarks e Suas Cores

Como mencionado antes os quarks possuem spin  $1/2$  e com isso obedecem ao chamado Princípio de Exclusão de Pauli, segundo ele duas partículas iguais não devem ocupar o mesmo estado quântico, no caso dos quarks não podem ocupar o mesmo estado se possuírem os mesmos sabores. Isso ocorre também nos átomos, onde dois elétrons não podem ocupar o mesmo estado de energia e spin. Porém existem casos de bárions formados pela combinação de quarks do mesmo sabor que acabam por violar o princípio de Pauli, como  $\Delta^{++}$  que é formado pela combinação  $uuu$  e também o caso  $\Omega^-$  que é formado por  $sss$  (AVANCINI, 2009; OSTERMANN).

Na tentativa de resolver este problema, o físico Greenberg sugeriu que os quarks possuem uma nova propriedade chamada de cor, obviamente a cor do quark não possui relação alguma com o sentido visual a que estamos habituados. Essa propriedade é chamada de cor apenas por necessidade e em geral é referenciada como carga de cor. As cores são: vermelho (VM), verde (VD) e azul (AZ). Estas cargas são chamadas coletivamente de cargas coloridas, já os antiquarks possuem cargas coloridas negativas sendo antivermelho, ativerde e antiazul.

Os quarks e hádrons experimentam a força forte enquanto os elétrons e os neutrinos não. Após ser proposto a carga-cor para os quarks, que é uma propriedade não apresentada por neutrinos e elétrons, surgiu a ideia de que a cor pode ser a fonte da força que atua entre os quarks. Uma conclusão imediata foi possível ao fazer a analogia das cores com as cargas elétricas: cores iguais se repelem. Assim dois quarks azuis se repelem enquanto que um quark azul e um quark antiazul se atraem, isto ocorre similarmente com as outras cores (AVANCINI, 2009; OSTERMANN).

A atração entre duas cores diferente ocorre com uma intensidade menor que a atração entre cores opostas de um quark e um antiquark, assim um quark azul e um quark verde podem se atrair, porém a atração será menor que entre um quark azul e um antiazul. Os bárions são formados por um agrupamento entre os três quarks de cores diferentes (AVANCINI, 2009; OSTERMANN).

## 2.6 MODELO DE SACOLA DO MIT

O modelo de sacola do MIT foi desenvolvido no instituto de Tecnologia de Massachussets na década de 70. O modelo foi proposto para contabilizar as massas hadrônicas em termos dos seus constituintes – os quarks. Em linhas gerais o modelo de sacola do MIT descreve o confinamento e movimento livre dos quarks em um volume do espaço capaz de conter campos hadrônicos, como se fosse uma sacola, assim mantendo os quarks em uma única região (PAIS, 2008; TORRES, 2011).

O modelo contém dois aspectos fundamentais: liberdade assintótica e confinamento, esses dois aspectos são incorporados ao modelo da seguinte maneira

- Dentro da sacola as interações não são consideradas.
- Fora da sacola quarks são proibidos de existir como partículas livres. Isto é possível dando-se ao vácuo uma densidade de energia constante  $B$  que mantém os quarks confinados em pequenas regiões do espaço.

O modelo tem sido utilizado para descrever a matéria de quarks não apenas dentro dos hádrons, como também em qualquer volume fechado finito, este é o motivo por que o modelo é utilizado nas estrelas de nêutrons (GRYNBERG, 1995).

### 2.6.1 Equação de Estado

Para descrever a estrela iremos precisar utilizar as equações de estado para o modelo de sacola do MIT, vamos utilizar uma versão dela considerando a temperatura igual a zero (o que simplifica a equação e facilita resolve-las analiticamente). Apesar de objetos compactos terem temperaturas elevadas da ordem da temperatura do núcleo do sol a energia das partículas é muito maior que a energia térmica do meio (TORRES, 2011). Levando isto em conta utilizaremos as seguintes equações:

$$p = \frac{1}{3} \sum_i \frac{\gamma_i}{2\pi^2} \int_0^{k_f} k^3 \frac{\partial E_i(k)}{\partial k} - B$$

$$\varepsilon = \sum_i \frac{\gamma_i}{2\pi^2} \int_0^{k_f} k^2 E_i(k) dk + B$$

$$n_B = \frac{1}{3} \sum_i \frac{\gamma_i}{2\pi^2} \int_0^{k_f} k^2 dk$$

Onde  $p$  é a pressão,  $\varepsilon$  é a densidade de energia,  $n_B$  é a densidade do número bariônico,  $\gamma_i$  é degenerescência dos quarks,  $k$  é o momento,  $k_f$  é o momento de Fermi,  $E_i$  é a energia do quark  $i$ ,  $B$  é a constante de sacola e o somatório em  $i$  é feito sobre todos os quarks.

### 2.6.2 Equações de TOV

Para descrever as propriedades das estrelas de nêutrons e de quarks é utilizado a equação da relatividade geral conhecida como equações de Tolman-Oppenheimer-Volkoff, estas equações são a forma reduzida das equações de Einstein para o interior de uma estrela esférica, estática e relativista e são dadas por:

$$\frac{dp}{dr} = -G \frac{[p(r) + \varepsilon(r)][M(r) + 4\pi r^3 p(r)]}{r(r - 2M(r))}$$

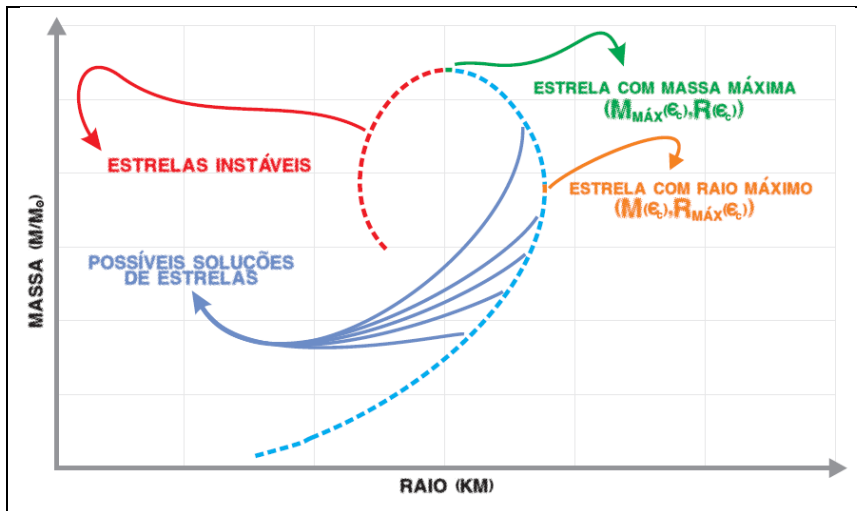
e

$$M(r) \equiv 4\pi \int_0^r \varepsilon(r) r^2 dr$$

onde  $p$  é a pressão,  $M$  é a massa gravitacional,  $\varepsilon$  é a densidade de energia e  $G$  é a constante da gravitação universal. As equações de TOV podem ser integradas desde a origem, com a condição inicial  $M(0) = 0$  até um valor arbitrário para a densidade central de energia  $\varepsilon(0)$ , até a pressão  $p(r)$  ir a zero para um raio  $R$ . Como a pressão nula define a superfície da estrela,  $R$  define o raio gravitacional da estrela.

Para uma dada Equação de estado, só existe uma solução com  $M(r)$  para cada densidade de energia central,  $\varepsilon(0)$ . Cada equação de estado define uma única família de estrelas sendo que cada estrela parametrizada pela pressão central ou densidade central. A figura abaixo mostra como é feita a leitura das curvas resultantes da equação de TOV. São curvas parametrizadas pela densidade de energia (PAIS, 2008; TORRES, 2011).

Figura 15. Soluções para TOV.



Fonte: adaptado de TORRES (2011).

## 2.7 MÉTODOS NUMÉRICOS

### 2.7.1 Integração numérica

A integração numérica consiste em aproximar uma função de difícil integração (ou até mesmo impossível de se resolver analiticamente) por polinômios. Essa substituição é realizada em pequenos intervalos, quanto maior o número de intervalos (e, portanto, quanto menores eles são) mais preciso será o resultado. Finalmente a integração é realizada para estes polinômios, que tem fácil solução (RUGGIERO, 1996; ).

O método que será utilizado neste trabalho é o da quadratura gaussiana, que aproxima a função por um polinômio ortogonal e é considerado o método mais preciso para realizar integração numérica (RUGGIERO, 1996).



### 2.7.2 Interpolação numérica

A interpolação é uma técnica básica do cálculo numérico, utilizada quando as funções são conhecidas apenas em um conjunto finito e discreto de pontos no intervalo. Para o presente trabalho iremos utilizar o método de interpolação conhecido como *Spline*. O método utiliza de poucos grupos de pontos, obtendo-se polinômio de grau menor, e impõe condições para que a função de aproximação seja contínua e tenha derivadas contínuas até uma certa ordem. Existem algumas variações para o *método de interpolação Spline*, a utilizada neste projeto será a cúbica, que utiliza uma função polinomial por partes onde cada parte é um polinômio de grau 3 (RUGGIERO, 1996).

### 2.7.3 Equação diferencial

A solução de uma equação diferencial de forma analítica tem como resultado uma família de funções que dependem de constantes que devem ser determinadas pelas condições iniciais do problema. Quando isso é realizado numericamente a solução é um conjunto de pontos (que representam a função) que também dependem das condições iniciais (RUGGIERO, 1996).

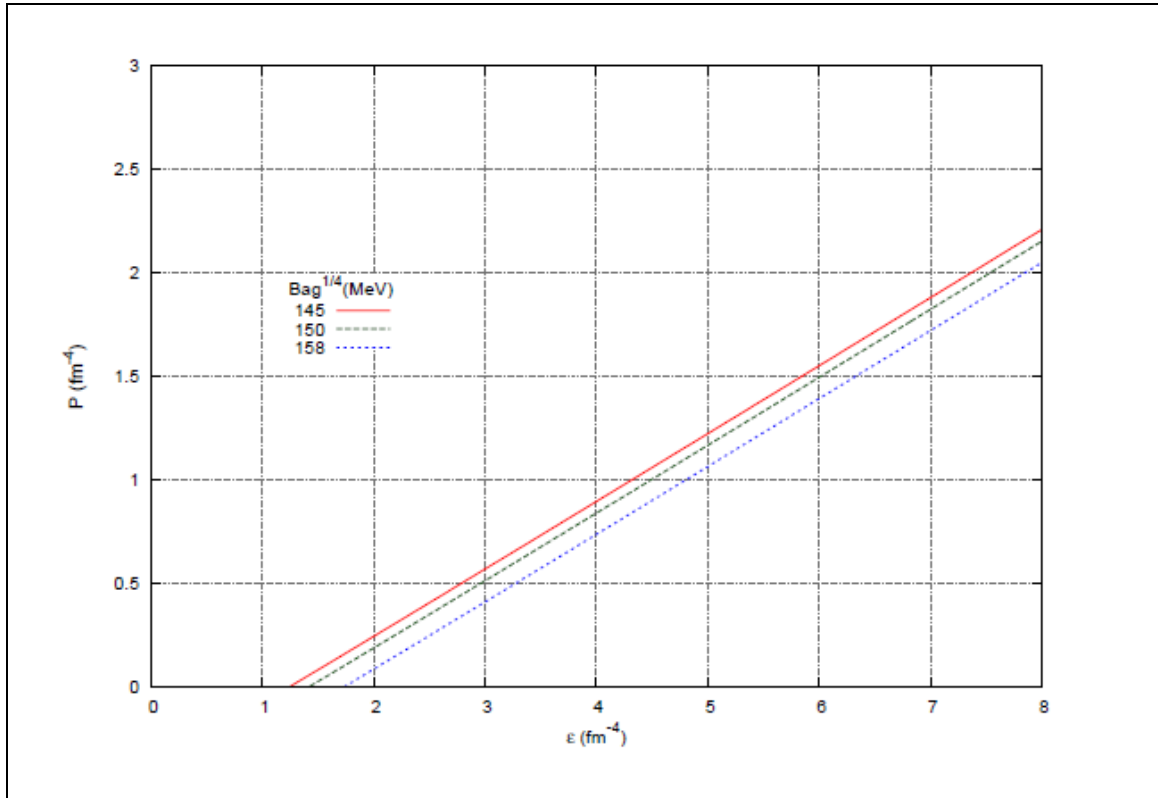
O método utilizado para a solução das equações diferenciais neste trabalho é o método de Runge-Kutta. Existem diversas ordem de aproximação para o método de Runge-Kutta, em geral, quanto maior a ordem mais preciso o resultado. Para este trabalho pretende-se utilizar uma aproximação de quarta ordem (RUGGIERO, 1996).

## 2.8 TRABALHOS SIMILARES

Foram selecionados três trabalhos similares que abordam o assunto das estrelas de quarks, os três trabalhos escolhidos são dissertações de mestrados e utilizam-se de modelos para calcular a existência de estrelas de nêutrons e de quarks.

O primeiro trabalho apresentado nesta seção é o de TORRES (2011). Torres propôs o estudo da matéria nuclear em altas densidades considerando apenas a fase de desconfinamento dos quarks a temperatura zero, para isto dois métodos foram utilizados, o primeiro amplamente já conhecido na área da física o *Modelo de Sacola do MIT*, e o segundo uma proposta alternativa ao primeiro modelo conhecida como o *Modelo de quarks com massa dependente da densidade* (QMDD). Os resultados obtidos por TORRES (2011) para o modelo do MIT podem ser vistos nas Figuras 16, 17, 18:

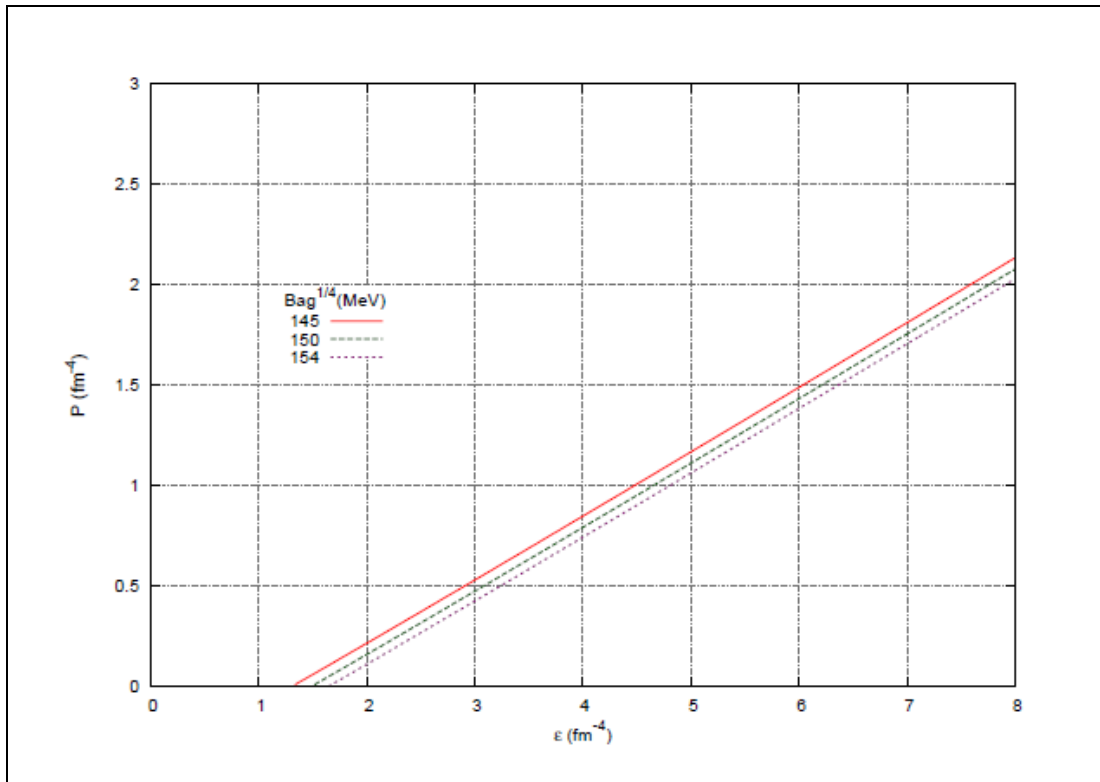
Figura 16. Resultado obtido por TORRES (2011) para equação de estado considerando a massa do quark  $s$  100MeV.



Fonte: adaptado de TORRES (2011).

A Figura 16, é uma reprodução dos resultados de TORRES (2011) para a equação de estado utilizando o *Modelo de Sacola do MIT* e considerando os quarks  $u$  e  $d$  com massa zero e a massa do quark  $s$  de 100MeV, onde o eixo  $y$  representa a pressão e o eixo  $x$  representa a densidade de energia.

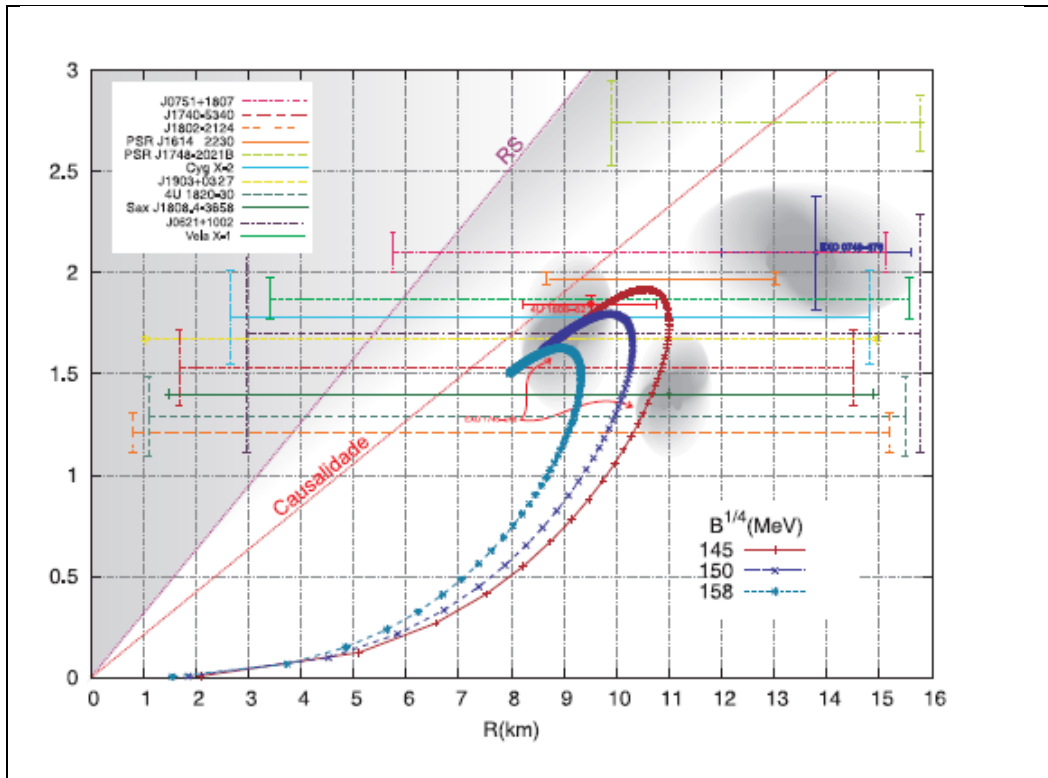
Figura 17. Resultado obtido por TORRES (2011) para equação de estado considerando a massa do quark  $s$  150MeV.



Fonte: adaptado de TORRES (2011).

A Figura 17, é uma reprodução dos resultados de TORRES (2011) para a equação de estado utilizando o *Modelo de Sacola do MIT* e considerando os quarks  $u$  e  $d$  com massa zero e a massa do quark  $s$  de 150MeV, onde o eixo  $y$  representa a pressão e o eixo  $x$  representa a densidade de energia.

Figura 18. Resultado obtido por TORRES (2011) para massa x raio com a massa do quark  $s$  de 100MeV.

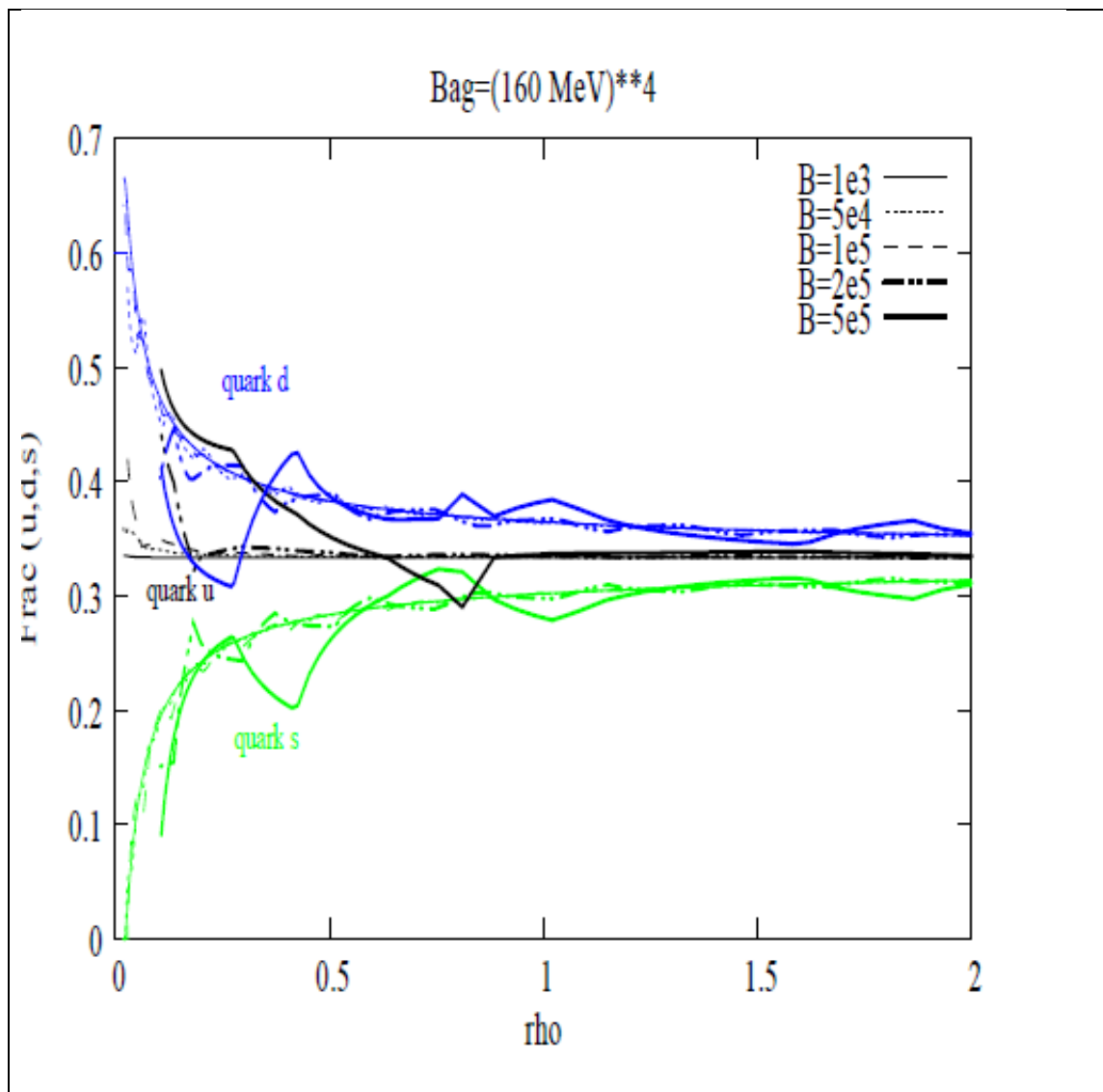


Fonte: adaptado de TORRES (2011).

A Figura 18, é uma representação gráfica dos resultados de TORRES (2011) para a relação massa raio considerando os quarks  $u$  e  $d$  com massa zero e a massa do quark  $s$  de 100 MeV onde o eixo  $y$  representa a massa gravitacional (massa solar) e o eixo  $x$  representa o raio em km.

O segundo trabalho apresentado nesta seção é o da PAIS (2008). Pais propôs o estudo do efeito de campos magnéticos fortes em equações de estado de matéria de quarks, este trabalho utilizou-se do *Modelo de Sacola do MIT* integrando com as equações de Tolman-Oppenheimer-Volkof (TOV), Pais obteve os seguintes gráficos resultantes:

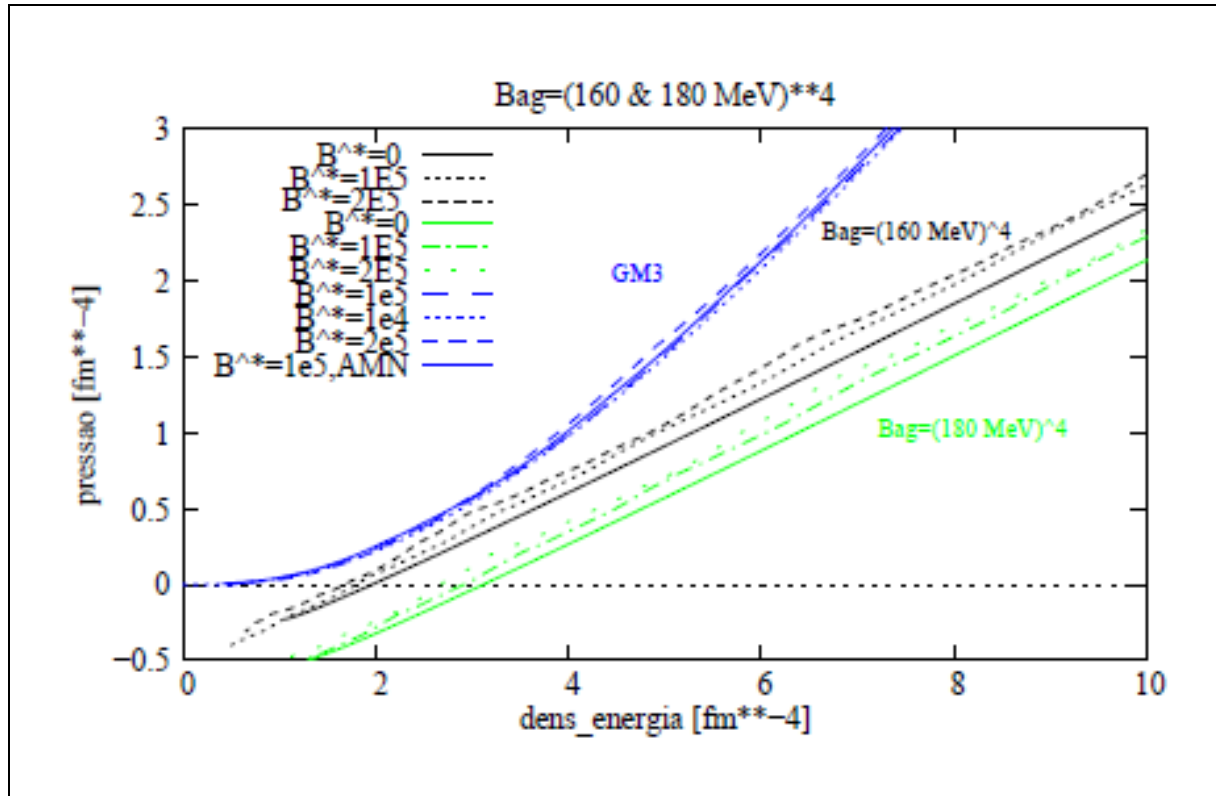
Figura 19. Resultado obtido por PAIS (2008) para fracção dos quarks  $u, d$  e  $s$  em função da densidade.



Fonte: adaptado de PAIS (2008)

A figura 19, é uma representação dos resultados obtidos por PAIS (2008), onde o eixo y representa a fração dos quarks e o eixo x representa a densidade.

Figura 20. Resultado obtido por PAIS (2008) para pressão x densidade de energia.

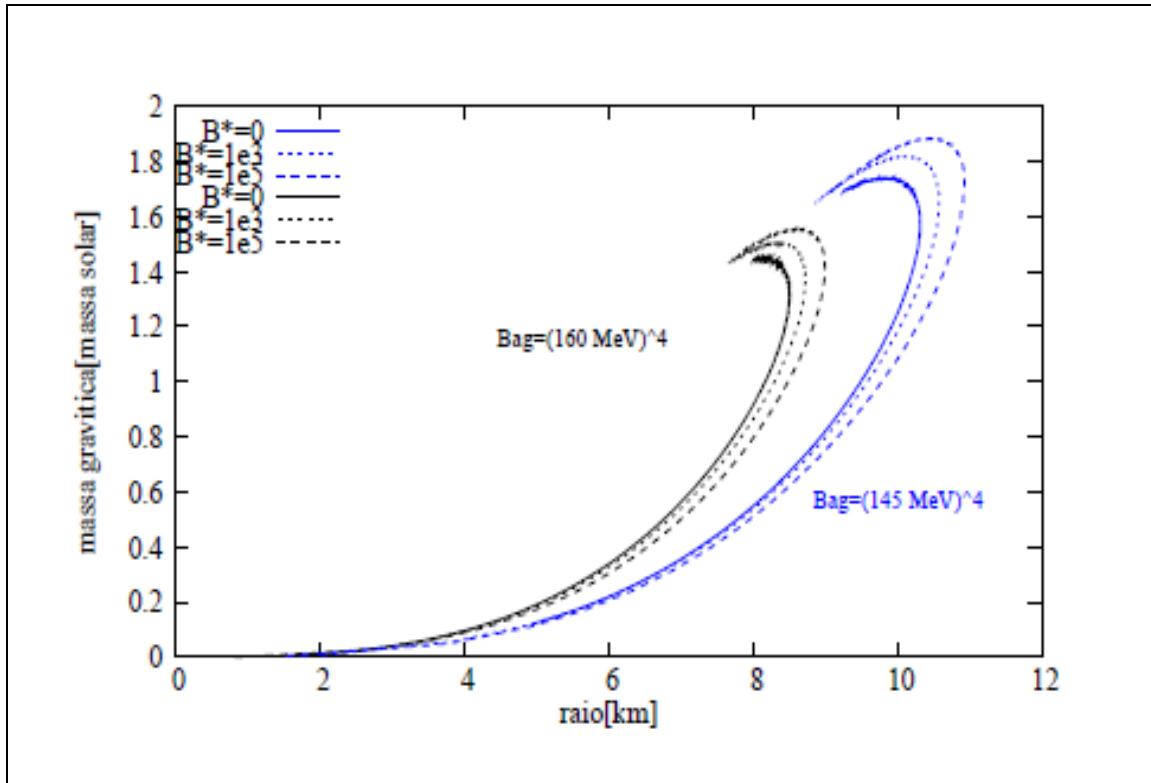


Fonte: adaptado de PAIS (2008).

A figura 20, que se encontra acima é o resultado obtido por PAIS (2008) onde o eixo y é a pressão e o eixo x a densidade de energia para diversos valores da constante de sacola.

O terceiro trabalho apresentado nesta seção é o de PAOLI (2010). Paoli propôs o estudo sobre a existência de uma fase mista para estrelas de nêutrons, o trabalho utiliza-se do modelo de *Nambu-Jona-Lasinio* (NJL) para a fase de quarks, PAOLI (2010) obteve como resultado para a estrelas de quarks utilizando o modelo de NJL os seguintes resultados:

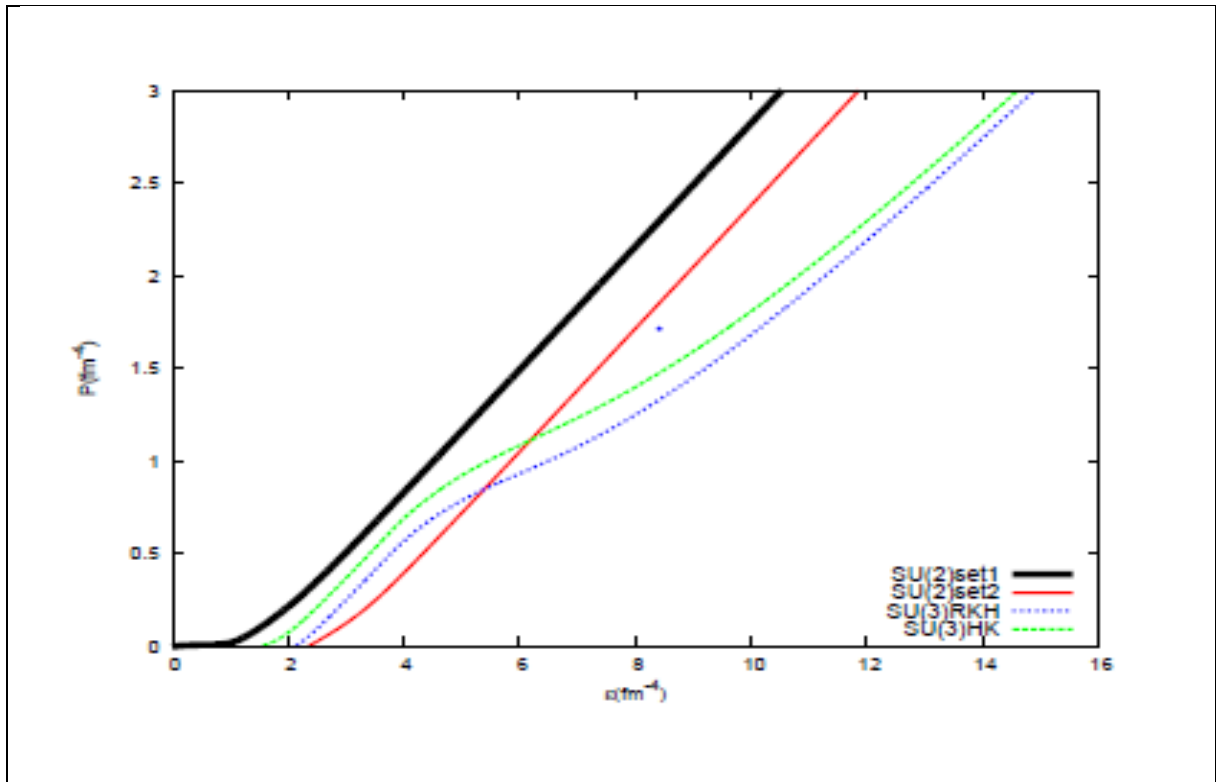
Figura 21. Resultado obtido por PAIS (2008) para massa x raio.



Fonte: adaptado de PAIS (2008).

A Figura 21, é uma representação gráfica dos resultados de PAIS (2008), onde o eixo y representa a massa gravitacional (massa solar) e o eixo x representa o raio em km.

Figura 22. Resultado obtido por PAOLI (2010) Equação de estado para estrelas quarkionicas com e sem matéria estranha utilizando o modelo *NJL*.

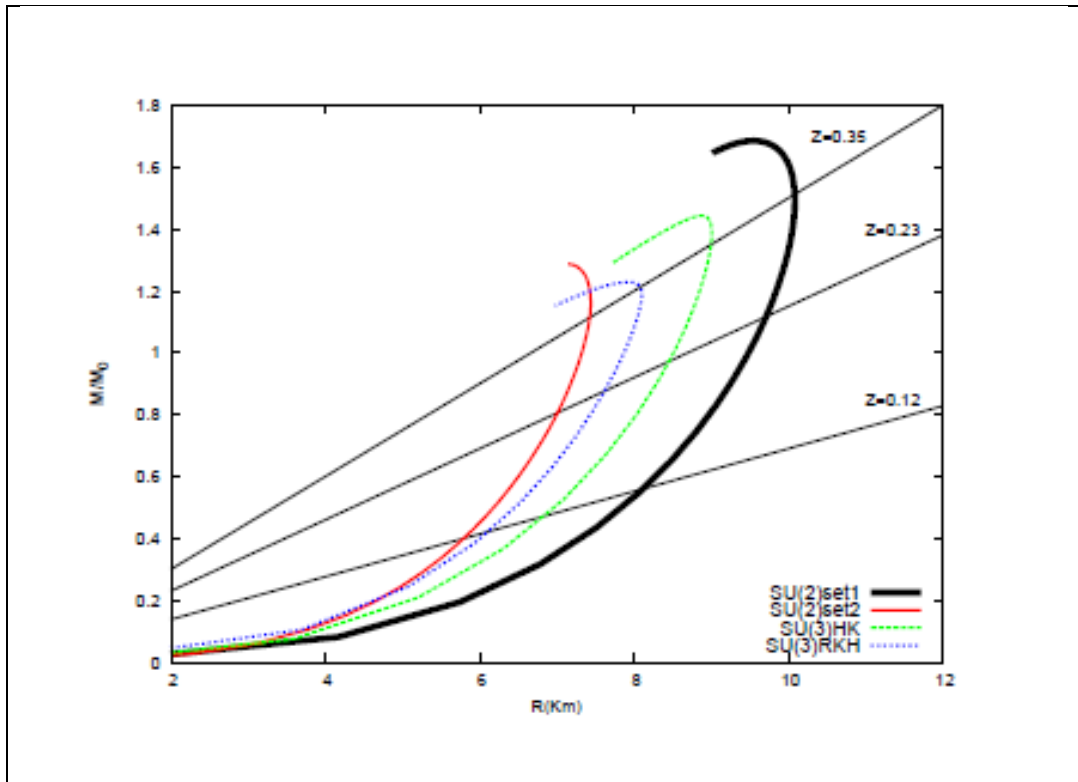


Fonte: adaptado de PAOLI (2010).

A Figura 22, é uma reprodução dos resultados de PAOLI (2010) para a equação de estado onde o eixo y representa a pressão e o eixo x representa a densidade de energia.



Figura 23. Resultado obtido por PAOLI (2010) massa x raio para estrelas quark iônicas com e sem matéria estranha utilizando o modelo *NJL*.



Fonte: adaptado de PAOLI (2010).

A Figura 23, é uma reprodução dos resultados de PAOLI (2010) onde o eixo y representa a massa gravitacional (massa solar) e o eixo x representa o raio em km.

Os trabalhos apresentados neste capítulo, serão utilizadas como base para este trabalho. É importante frisar que os resultados apresentados nesta seção não são os únicos que os autores obtiveram, porém, os aqui apresentados são os que possuem maior relevância para este trabalho. Pretende-se reproduzir os mesmos gráficos de TORRES (2011) e PAIS (2008) pois ambos utilizam o *Método de sacola do MIT*. O trabalho de PAOLI (2010) é utilizado como base de comparação já que o mesmo simula a existência de estrelas de quarks, porém utilizando outro modelo.

## 3 PROJETO

### 3.1 ANÁLISE DO SIMULADOR A SER DESENVOLVIDO

#### 3.1.1 Conceito Geral

O conceito geral do simulador que será desenvolvido é auxiliar estudantes da área de astrofísica ou entusiasta na área a resolver o *Modelo de Sacola do MIT*, que como já abordado anteriormente é um método muito conhecido e aplicado na área de astrofísica. Para resolver o modelo serão utilizados métodos numéricos em conjunto com as equações apresentadas no capítulo anterior. Os métodos matemáticos utilizados são: a *Regra de quadratura Gaussiana*, o *Método de Interpolação Spline Cúbica* e o *Método de Runge-Kutta*.

Também propõe-se criar uma interface que facilite a visualização dos resultados obtidos no simulador, de uma maneira a apresentar os gráficos e tabelas que já são encontrados na literatura, além de criar novas visualizações, com os resultados que serão obtidos. Para auxiliar no entendimento do simulador foram desenvolvidos protótipos de telas para que haja uma melhor compreensão do seu funcionamento.

#### 3.1.2 Público Alvo

O público alvo deste simulador são alunos de graduação e mestrado na área de física ou entusiastas com um bom conhecimento na parte de estrelas e astrofísica.

### 3.2 DEFINIÇÃO DE ENTRADA E SAÍDA DO SIMULADOR

#### 3.2.1 Entradas

O simulador terá como entrada as seguintes variáveis:

- Quantidade de tipos diferentes de quark: o usuário deverá informar a quantidade de quarks diferente que podem existir dentro da estrela simulada, este valor deve ser entre 2 e 6.
- Massa de cada quark: para cada quark informado, o usuário deverá informar o valor da massa que o mesmo possui.
- Constante de sacola: o usuário deverá informar o valor para a constante da sacola, este valor deve ser entre 100 e 200 (O intervalo definido para o simulador tem como base, os valores mínimos e máximos utilizados na literatura).

### 3.2.2 Saídas

O simulador terá como saída os seguintes gráficos:

- Gráfico da Equação de Estado para o *Modelo de Sacola do MIT*, utilizando as entradas fornecidas pelo usuário, que será chamado de gráfico da pressão x densidade de energia.
- Gráfico da Solução da Equação de TOV utilizando a equação de estado para o *Modelo de Sacola do MIT*, que será chamado de gráfico massa x raio.
- Gráfico da densidade do número de partículas em função da densidade total para o *Modelo de Sacola do MIT*, que será chamado de gráfico fração de partículas x densidade.

Os gráficos informados acima serão as saídas esperadas para o simulador, porém acredita-se que os dados obtidos na simulação podem acabar gerando outros gráficos que deverão ser apresentados ao usuário. Para cada gráfico gerado como resultado, existe uma tabela com as mesmas informações, estas tabelas estarão ocultas em primeiro momento, porém caso o usuário assim deseje será possível fazer o download.

## 3.3 FUNCIONAMENTO DO SOFTWARE

O funcionamento do software se dará a partir da entrada dos parâmetros inseridos pelo usuário que serão inseridos dentro da equação para densidade de energia, pressão e densidade do número de partículas.

Utilizando integração numérica e fazendo variar o parâmetro livre *Momento de Fermi* (entre zero e um valor arbitrário a ser decidido com base em teste que serão realizados no TTC II) obtém-se um conjunto de dados que serão utilizados para construir os gráficos de pressão x densidade de energia (também conhecido como gráfico da equação de estado) e o gráfico da densidade do número de partículas em função da densidade.

O gráfico da pressão x densidade de energia será interpolado e utilizado para resolver a equação diferencial de TOV. A solução da TOV é um conjunto de dados que é utilizado para fazer o gráfico massa x raio e o valor máximo de massa (com o seu raio correspondente) será apresentado separadamente.

### 3.4 PROCESSO DE VALIDAÇÃO DO SOFTWARE

O software deverá ser capaz de reproduzir os gráficos para o modelo do MIT sem modificação presentes nos trabalhos de TORRES (2011) e PAES (2008) quando utilizados os mesmos parâmetros de entrada (número de quarks, massa dos quarks e constante de sacola).

### 3.5 ESPECIFICAÇÕES DO SOFTWARE

#### 3.5.1 Requisitos Funcionais

- RF01. O sistema deve permitir ao usuário parametrizar as informações da estrela
- RF02. O sistema resolvera o *Modelo de sacola* a partir das entradas informadas pelo usuário.
- RF03. O sistema apresentara como saída o gráfico massa x raio.
- RF04. O sistema apresentara como saída o gráfico pressão x densidade de energia.
- RF05. O sistema apresentara como saída o gráfico densidade de partículas.
- RF06. O sistema deve permitir o download das tabelas relacionadas aos gráficos.

#### 3.5.2 Requisitos Não Funcionais

- RNF01. O simulador será desenvolvido na linguagem de programação *python* em conjunto com a framework para desenvolvimento web denominada *Django*.
- RNF02. O simulador utilizará a linguagem de marcação *HyperText Markup Language* - *HTML* em conjunto com *Folha de estilo em Cascata* – *CSS* e com a linguagem de programação *Javascript* para a construção da interface do usuário.
- RNF03. O usuário deve ter acesso a internet.

### 3.5.3 Caso de uso

Seção destinada a apresentar o diagrama de caso de uso.

Figura 24. Protótipo de tela da página inicial do simulador.

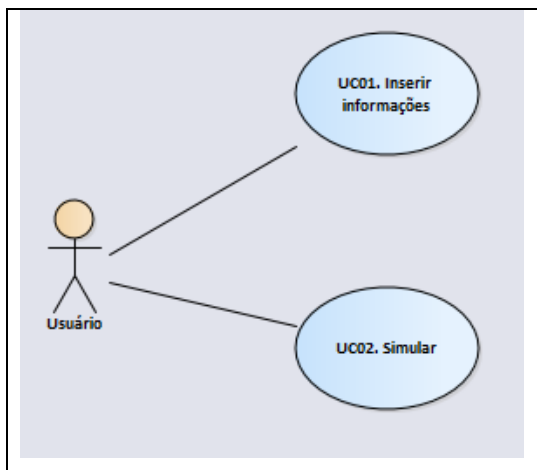


Tabela 5 - Especificação do caso de uso 01 (Inserir informações).

Objetivo	Inserir informações
Pré-condição	Possuir o software
Cenário Principal	1. usuário visualiza a tela inicial do simulador. 2. o sistema apresenta os campos a ser preenchido pelo usuário.

Tabela 6 - Especificação do caso de uso 02 (Simular).

Objetivo	Simular
Pré-condição	Preencher os campos
Cenário Principal	1. usuário clica em simular 2. o sistema apresenta os resultados.

### 3.5.4 Protótipo de tela

Figura 25. Protótipo de tela da página inicial do simulador.

Simulador

## Simulador de estrelas de quark

Informe a quantidade de quarks

Informe o valor para a constante da sacola

Informe a massa do quark

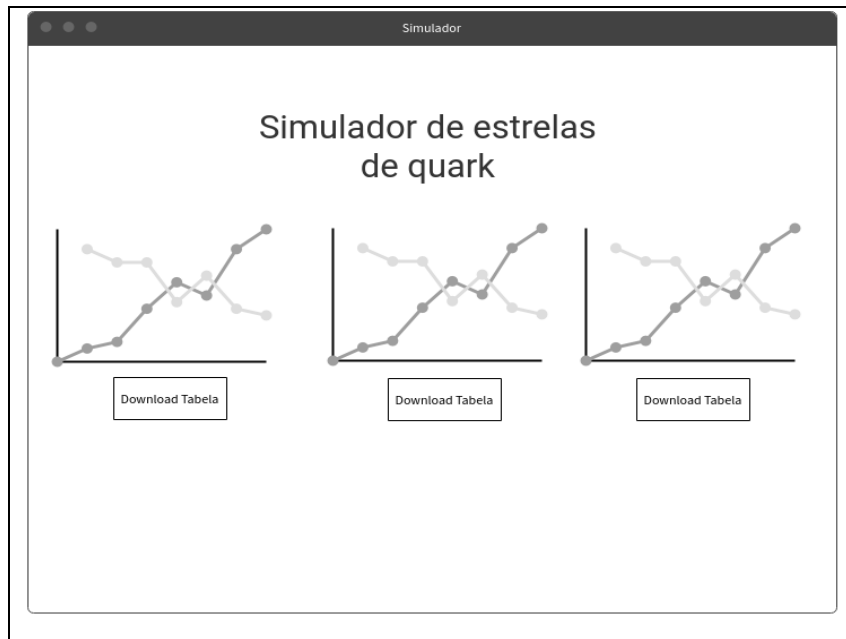
Adicionar quark

id	massa do quark
1	valor
2	valor
3	valor

Simular

A Figura 17, que se encontra acima é uma representação da tela inicial do simulador, onde o usuário deverá informar qual será a quantidade de quarks, a massa do quark e qual será o valor para a constante de sacola utilizada na simulação, após informar os dados o usuário deve clicar em simular.

Figura 26. Protótipo de tela da página de resultados do simulador.

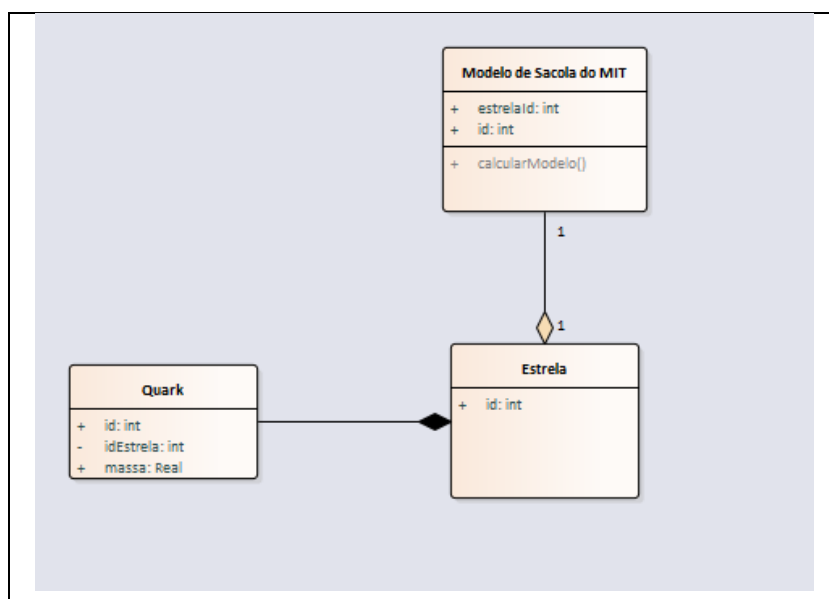


A Figura 18, é uma representação da tela de resultados, aonde após o simulador fazer os cálculos baseado nas entradas do usuário, irá representar em forma de gráficos e tabelas os resultados, para que fique mais fácil o entendimento do usuário.

### 3.5.5 Diagrama de classe

O diagrama de classes representa uma visão estática do sistema e também mostra as classes e a estrutura do software a ser desenvolvido. O diagrama de classe do simulador a ser desenvolvido é apresentado na figura 19.

Figura 27. Diagrama de classe.



### 3.6 PLANEJAMENTO DO TTC II

Esta seção é destinada a apresentar o planejamento proposto para o TTC II.

#### 3.6.1 Metodologia

Após toda a investigação realizada será efetuado o desenvolvimento do simulador, que irá resolver as equações do *Método de sacola do MIT*, conforme foi abordado neste capítulo, o desenvolvimento do simulador compreende a implementação dos métodos matemáticos necessários para resolver o método e a implementação da interface do usuário. Após a conclusão do desenvolvimento, serão efetuados teste comparando os resultados obtidos pela ferramenta, junto com os já presentes na literatura e serão documentados.

#### 3.6.2 Cronograma TTC II

Tabela 7 - Cronograma de planejamento para o TTC II.

Atividade	Julho 2018	Agosto 2018	Setembro 2018	Outubro 2018
Desenvolvimento de software	XXXX	XXXX	XXXX	
Definição e Desenvolvimento da Interface do usuário			_XXX	XX__
Análise dos resultados				XXXX



## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado o projeto de um simulador que utiliza o *Modelo de sacola do MIT* para simular o interior de uma estrela de quark e com isso auxiliar estudantes de física no estudo das estrelas. Para isto, foi feito uma pesquisa sobre partículas elementares, ciclo de vida de uma estrela, *Modelo de sacola do MIT*, métodos numéricos robustos, além de uma pesquisa por trabalhos similares.

No levantamento teórico realizado, foi possível perceber que o estudo do interior de uma estrela de quark é de grande relevância para área da física e que o modelo escolhido para desenvolvimento do simulador é bem difundido na área, sendo um dos mais simples métodos utilizados para simular uma estrela de quark. Além de que a busca por trabalhos similares, auxiliou na descoberta das entradas necessárias para simulação e também quais devem ser as saídas esperadas pelo simulador.

Busca-se, no TTC II, realizar o desenvolvimento do simulador proposto e assim criar uma ferramenta que irá auxiliar estudantes da área de física a calcular a existência de estrelas de quark.

## REFERÊNCIAS

ABDALLA, Maria Cristina Batoni, **O discreto charme das partículas elementares**. São Paulo. Editora UNESP, 2004. 344 p.

ALVES, Rául M. S. T. **I – Evolução estelar II – A matéria escura, os WIMPS e a Heliossimologia**. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2005.

AVANCINI, S. S.; MARINELLI, J. R.. **Tópicos de Física Nuclear e Partículas Elementares**. 2009. Florianópolis – Universidade Federal de Santa Catarina, Consórcio RediSul.

CARUSO, F., OGURI, V., **A Eterna Busca do Indivisível: Do Átomo Filosófico aos quarks e leptons**, Rio de Janeiro, 1996.

FRANZON, Bruno Cezar de Souza. **Gluons em Estrelas de Nêutrons**. São Paulo, 2012.

FEYNMAN, Richard. **Lições de Física de Feynman**. Bookman, 2008.

FILHO, Kepler de Souza Oliveira; SARAIVA, Maria de Fatima Oliveira. **Astronomia e Astrofísica**. Porto Alegre: [s.n.], 2014. 784 p.

GRIFFITHS, David. **Introduction to Elementary Particles**. 2nd Edition. WILEY-VHC, 2008.

GRYNBERG, Suely Epsztein. **Fenomenologia Estelar em Modelos de Quarks**. Minas Gerais, 1995.

JACOBSEN, Rafael Bán. **Plasma de Quarks e Glúons no interior de Estrelas de Nêutros**. Porto alegre, 2007.

LOPES, Cesar Valmor Machado. **Modelos atômicos no início do século XX: da física clássica à introdução da teoria quântica**. São Paulo, 2009.

MARRANGHELLO, Guilherme Frederico; **Estrelas de Nêutron**. 1ed. Itajaí: Casa Aberta, 2014.

ORTIZ, Roberto; **Perda de massa em estrelas**. Escola de Artes, Ciências e Humanidades da USP.

OSTERMANN, F. **Partículas Elementares e Interações Fundamentais**. Textos de Apoio aos Professores de Física, Nº 12. 2001. Porto Alegre: Instituto de Física - UFRGS. Disponível em: < [https://www.if.ufrgs.br/public/tapf/n12\\_ostermann.pdf](https://www.if.ufrgs.br/public/tapf/n12_ostermann.pdf)>. Acesso em: 18 abr. 2018.

PAIS, Helena Sofia de Castro Felga Rámos. **Estrelas de quarks num campo magnético forte**. Universidade de Coimbra, 2008.

PAOLI, Marcelo Gomes de. **Efeitos da existência da fase mista em estrelas de Nêutrons híbridas**. Florianópolis, 2010.

PILOTTO, Fernando Gonçalves. **Modelo de sacola Quiral com Superfície Difusa**. Porto alegre, 2003.

RUGGIERO, M. A.; LOPES, V. L. da R. **Cálculo Numérico – Aspectos teóricos e computacionais**. 2d. Pearson Makron Books, 1996.

TORRES, James Rudnei. **Equação de estado para matéria de quarks e propriedades estelares**. Florianópolis, 2011.