



Fundação Universidade Federal do ABC

Pró reitoria de pesquisa

Av. dos Estados, 5001, Santa Terezinha, Santo André/SP, CEP 09210-580

Bloco L, 3º Andar, Fone (11) 3356-7617

iniciacao@ufabc.edu.br

Relatório Final de Iniciação Científica
referente ao Edital: (1/2021)

Nome do aluno: Gustavo Ferreira Santos

Assinatura do aluno:

Nome do orientador: Pieter Willem Westera

Assinatura do orientador:

Título do projeto: ajuste de isócronas para a determinação de idade e composição química de populações estelares da Via Láctea através do diagrama de Hertzsprung-Russell

Palavras-chave do projeto: populações estelares, diagrama de Hertzsprung-Russell, composição química de estrelas, metalicidade de estrelas, aglomerados globulares

Área do conhecimento do projeto: astronomia

Bolsista: Sim. PIC

Santo André

07/10/2022

Sumário

1 Resumo.....	2
2 Introdução.....	2
3 Fundamentação teórica	2
4 Metodologia	10
4.1 Materiais e Métodos.....	10
4.2 Etapas da pesquisa	10
5 Resultados e discussão dos resultados	11
6 Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.....	16
Referências.....	18

1 Resumo

Nesse relatório final os temas da pesquisa como a evolução estelar, os diagramas cor-magnitude, o diagrama Hertzsprung-Russell, além do ajuste de isócronas, foram detalhados e aprofundados com o intuito de criar-se uma base sólida sobre a qual construiremos o caminho necessário para atingir a completude dos objetivos desse trabalho: determinar a idade e a composição química de aglomerados globulares na Via Láctea.

Além disso, utilizando a linguagem de programação “python” construímos dois programas para a plotagem de diagramas e isócronas, os quais são de suma importância para a análise e execução do ajuste e posterior obtenção dos dados procurados citados anteriormente.

Por fim, concluímos que a maioria dos aglomerados globulares se formou há mais de 13 bilhões de anos e, além disso, possuíam uma metalicidade cerca de 30 vezes menor que a do Sol, o que leva a crer que a nuvem de gás da qual originou-se a Via Láctea era pobre em metais. Isso é típico do halo Galáctico.

2 Introdução

O universo é o palco de tudo o que conhecemos. Nesse sentido, compreender o funcionamento dos eventos que movem a grande máquina do tempo adiante é de suma importância para entender de onde viemos e do que somos feitos (assim como tudo o que nos cerca). Posto isso, uma vez que as estrelas possuem um grande papel na geração dos materiais que compõem o universo, estudá-las implica não somente no que concerne a produção desses materiais, mas também no desenrolar da grande história do cosmo. Assim sendo, através dos estudos propostos nessa pesquisa entenderemos como funcionam as estrelas, as populações estelares (dando uma maior ênfase aos aglomerados globulares) e também a influência delas na formação da nossa Galáxia e nas suas vizinhanças em geral.

3 Fundamentação teórica

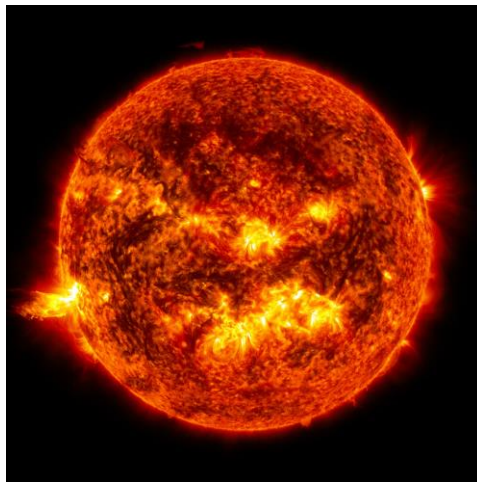
O hidrogênio e o hélio (os elementos mais simples da tabela periódica) constituem a maior parte da matéria bariônica (matéria composta principalmente por bárions, dentre esses

os mais conhecidos são os prótons e nêutrons) presente no universo e são comumente encontrados na forma de grandes nuvens de gás (também chamadas de nebulosas), na composição química das estrelas e em planetas gasosos. Nas irregularidades de densidade presentes nessas nebulosas a força gravitacional atua de forma incessante durante milhares de anos, atraindo pouco a pouco mais e mais matéria em torno de um ponto específico, gerando calor e emitindo radiação. Nesse sentido, se além do esforço dessa força elementar do universo as condições forem propícias, poderá surgir o principal berço de elementos mais complexos que hidrogênio e hélio, uma gigantesca bola de gás e plasma extremamente quente e luminosa capaz de fundir elementos em seu núcleo, que chamamos de: estrela.



M16: A Nebulosa da Águia (Fig. 1)

O “ pilar” de hidrogênio gasoso interestelar e poeira na M16, a Nebulosa da Águia.



O Sol (Fig. 2)

A estrela que é a principal fonte de energia do nosso planeta, o Sol.

Após o nascimento de uma estrela, como explicado no parágrafo anterior, modelos preveem com uma certa acurácia o desenvolvimento e as fases futuras que esses astros podem experienciar baseados em parâmetros como a metalicidade e, principalmente, a massa. Esse primeiro parâmetro refere-se à fração de elementos na composição química da estrela em relação à sua massa total que são diferentes de hidrogênio e hélio, chamados no ramo da astronomia, de forma generalizada, de metais, representado pela letra Z (a

metalicidade solar é $Z=0.019$, significando que o Sol possui em torno de 1,9% de sua massa composta por metais. Outra maneira usual de denotar essa grandeza é pela forma logarítmica da metalicidade sobre a abundância de hidrogênio da estrela em estudo; dividido pela metalicidade sobre a abundância de hidrogênio, ambos os parâmetros agora do Sol, como se vê abaixo.

$$[Z/H] = \log_{10}[(Z/H)/(Z/H)_{\odot}]_{(1)}$$

Essa equação diz respeito à relação entre as abundâncias de metais e o hidrogênio de uma estrela qualquer e o Sol, podendo ser entendida da seguinte forma: se $[Z/H] = -4$, isso quer dizer que a estrela em questão possui uma metalicidade dez mil vezes menor que a do Sol.

Ademais, a existência desses corpos celestes gira em torno de um equilíbrio entre a pressão interna da estrela que tende a expandi-la e a força gravitacional que tende a comprimi-la chamado de equilíbrio hidrostático. Em momentos bem avançados da vida estelar notaremos que esse equilíbrio será posto em xeque e a estrela poderá colapsar ou se desfazer e deixar de existir. Mas, retornando ao tópico principal, após a estrela estabelecer uma fusão nuclear de hidrogênio em hélio constante em seu centro (a qual é a principal fonte de energia da mesma), ela irá povoar o ramo da sequência principal (SP) no diagrama de Hertzsprung-Russell (“Hertzsprung-Russell Diagram” ou simplesmente HRD, um diagrama temperatura-luminosidade comumente usado pelos astrônomos e astrofísicos no estudo de estrelas e aglomerados estelares) pela maior parte da sua existência. O Sol, por exemplo, vai passar cerca de 90% da sua vida nessa fase o que é equivalente a cerca de 10 bilhões de anos. Hoje ele encontra-se na metade dessa fase.

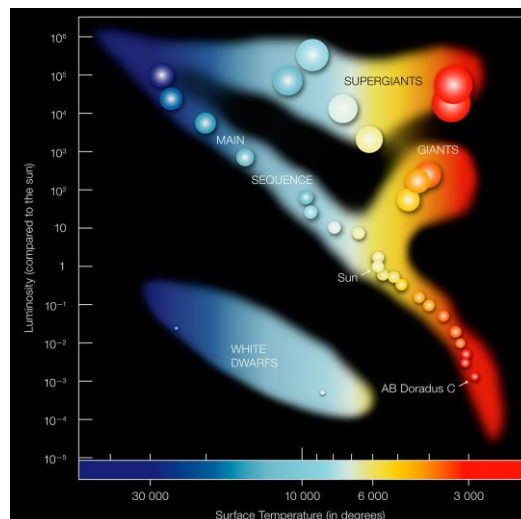


Diagrama Hertzsprung-Russell (Fig. 3)

No eixo vertical temos de forma crescente a luminosidade da estrela e no eixo horizontal de forma decrescente a temperatura da sua superfície.

Adiante, assim que o principal combustível da estrela (o hidrogênio) tiver se convertido em hélio no núcleo, através da fusão nuclear, as camadas acima do núcleo da estrela, ricas em hidrogênio, com uma casca queimando em sua base protagonizarão a produção de energia. O

ponto no HRD que demarca a saída da estrela da SP é denominado “turn-off”. Durante essa nova fase o núcleo, que já não mais sustenta nenhum tipo de fusão nuclear, comprime bem lentamente e o envelope de hidrogênio se expande. Por conta da expansão, as camadas superficiais esfriam e a opacidade aumenta drasticamente. Como consequência, a retenção de energia dentro da estrela se torna cada vez mais eficiente, e auxilia na expansão das outras camadas. Nesse momento, a estrela se moverá para o ramo das sub-gigantes no HRD, povoando o mesmo por aproximadamente 12 milhões de anos para estrelas com 3 massas solares e aproximadamente 1 milhão de anos para estrelas com 6 massas solares. Vale ressaltar que, quanto maior a massa da estrela menor seu tempo de vida e mais rápida é a sua evolução, sendo assim, observar estrelas muito massivas nesse estágio evolutivo é bastante incomum.

Logo após essa fase, essa estrela que agora é várias vezes maior que seu tamanho inicial, possuirá as camadas superficiais mais frias e, portanto, mais avermelhadas, ocupando então o ramo das gigantes vermelhas (GV) no HRD por cerca de 1 bilhão de anos para uma estrela com 1 massa solar. Eventualmente, durante a fase de GV, a pressão e temperatura da estrela no núcleo irão permitir a ignição da fusão de hélio em carbono e oxigênio com traços de neônio em todo o seu núcleo, evento denominado flash de hélio ou “helium flash”.

Continuando a história evolutiva desses astros, após a fase de GV, por conservação de energia, a expansão e o esfriamento do núcleo após o flash de hélio resultam em uma contração das camadas externas da estrela e um aumento de sua temperatura superficial. Assim, a estrela se movimenta para a esquerda e para baixo no HRD, ficando mais azul e menos luminosa. Como a massa do núcleo no começo da fusão de hélio é sempre de aproximadamente 0.45 massas solares, independentemente da massa total da estrela, a luminosidade nessa fase também independe da massa total, sendo igual a aproximadamente 50 luminosidades solares. Por isso, estrelas que fundem hélio em seus núcleos ocupam uma faixa aproximadamente horizontal (ou seja, todas têm a mesma luminosidade) no HRD, chamada ramo horizontal (RH) que dura cerca de 100 milhões de anos.

Seguida dessa fase, em estrelas entre 0.6 e 8 massas solares, após a conversão de todo o seu hélio em um núcleo inerte de carbono e oxigênio, seu núcleo se encontra envolto por uma camada onde ainda ocorre queima de hélio, após essa uma camada onde ocorre queima de hidrogênio e por último uma camada com composição química similar à das estrelas que povoam a sequência principal. Esse estágio evolutivo é representado no HRD pelo ramo assintótico das gigantes (RAG), que dura cerca de 10 mil anos. Durante esse estágio, a estrela ejetará pouco a pouco o material das camadas mais externas para o espaço por meio dos “ventos” solares formando uma nebulosa planetária e o seu fim é demarcado pelo surgimento de uma Anã Branca que nada mais é do que o núcleo de carbono e oxigênio formado ao longo do estágio representado pelo ramo horizontal, porém, nem todos esses astros são formados de carbono e oxigênio. Cerca de 98% de todas as estrelas se tornarão Anãs Brancas.

O Sol entrará na fase GV daqui a cerca de 5 bilhões de anos, e permanecerá nela por 1 bilhão de anos. Durante esse estágio assim que o hidrogênio das camadas mais externas se esgotar se dará início à queima de hélio no núcleo e ele fará parte do ramo horizontal. Porém, devido a sua massa, ele nunca atingirá a fusão do elemento seguinte para continuar sua vida, então assim que o hélio no seu núcleo se esgotar, ocupando então o ramo assintótico das gigantes, aos poucos ele irá expelir a matéria presente nas camadas superficiais para o espaço formando uma nebulosa planetária e deixará como um cadáver do que um dia foi uma triunfante estrela, uma pequena, porém extremamente densa, Anã Branca que existirá por

bilhões de anos, até esfriar e escurecer. No fim dessa última fase, está demarcada a morte silenciosa e definitiva da nossa estrela.

No entanto, a história de estrelas mais massivas possui outros desfechos. Uma estrela que possui entre 8 e 25 massas solares, durante a fase representada pelo RAG, pode continuar a cadeia de nucleossíntese e queimar o carbono formando oxigênio, magnésio e neônio; após esse o neônio formará oxigênio e magnésio; seguido dele o oxigênio forma silício e por fim a queima do silício gera um caroço de ferro que é resistente à fusão nuclear (significando que a reação de fusão nuclear do mesmo não tem como resultado líquido a produção de energia e sim o consumo, sendo inviável para manter o equilíbrio hidrostático da estrela). Para uma estrela de 20 massas solares, os eventos descritos anteriormente duram 1450 anos, 1 ano e 169 dias, 263 dias e 1 dia, respectivamente. Ao atingir uma massa crítica, o núcleo de ferro colapsa violentamente, iniciando um processo explosivo que chamamos de supernova, deixando para trás uma estrela de nêutrons, um dos corpos celestes mais densos do universo.

Estrelas ainda mais massivas, com mais de 25 massas solares, ao chegar no fim de suas vidas deixam como remanescente um buraco negro, um ponto infinitesimal no espaço de densidade matematicamente infinita cercado por um horizonte de eventos, esse é o corpo celeste mais denso do universo e o produto final da evolução estelar. Além de ser a representação mais pura da gravidade.

Tendo construído o cenário que será utilizado para aprofundar a nossa pesquisa podemos agora adentrar um pouco mais no que tange a mesma. É possível observar a existência de populações ou aglomerados estelares pois do colapso de uma nuvem de gás podem surgir centenas, às vezes milhares, de estrelas. Além disso, pode considerar-se que elas têm a mesma composição química e a mesma idade por terem nascido do colapso da mesma nebulosa em torno do mesmo período.

Aglomerados estelares são responsáveis pela formação estelar da nossa e de outras galáxias e dividem-se em aglomerados abertos e globulares. Os aglomerados globulares são os maiores desses aglomerados, possuindo uma aparência esférica e sendo compostos de milhares até milhões de estrelas estando entre os constituintes mais velhos das galáxias. Desse modo, o estudo do sistema de aglomerados globulares da Via Láctea pode gerar conhecimentos importantes sobre a formação e evolução da nossa Galáxia.



Aglomerado Globular 47 Tucanae (Fig.4)

A aparência esférica do aglomerado se dá pela forte atração gravitacional entre as estrelas que o compõem

Uma população estelar como essa é representada em um diagrama cor-magnitude (CMD ou HRD observacional) através do posicionamento de cada estrela nela presente em seu respectivo ponto, observando sua magnitude (a escala logarítmica do brilho de um objeto) em uma banda fotométrica (filtro que capta luz com uma sensibilidade conhecida à radiação incidente) e seu índice de cor (que é a diferença de magnitude entre duas bandas fotométricas diferentes). É importante ressaltar que a escala de magnitude é decrescente, sendo assim, quanto menor a magnitude mais brilhante é a estrela.

Uma representação gráfica que será imprescindível para concluir os objetivos dessa pesquisa é a isócrona que é descrita em seguida. A computação de uma isócrona é conceitualmente muito simples, considere um conjunto de caminhos evolutivos de estrelas com a mesma composição química inicial e várias massas iniciais; diferentes pontos ao longo de um caminho individual correspondem a diferentes valores de tempo t' e de massa inicial. Uma isócrona de idade t é simplesmente a linha no HRD que conecta os pontos pertencentes aos vários caminhos (um ponto por caminho) onde $t=t'$. Isso significa que, quando nos movemos de acordo com uma isócrona, o tempo é constante ao passo que o valor da massa inicial da estrela povoando a isócrona a cada ponto está mudando. Adiante, por fazerem parte da mesma vizinhança estelar, sua evolução também é estudada em conjunto. Portanto, o ajuste dessa isócrona no CMD e no HRD oferece pistas substanciais para a obtenção dos dados procurados como a composição química e a idade dessas estrelas.

Ao analisar um CMD de um aglomerado, nota-se sua evolução da seguinte forma: após a formação das estrelas aos poucos a SP se torna mais povoada, de cima para baixo, tendo como suas primeiras integrantes as estrelas mais massivas; adiante, as estrelas menos massivas vão aos poucos povoando também a SP ao passo que as estrelas mais massivas tornam-se gigantes vermelhas, dessa forma, assim como o ramo da SP foi povoado de cima para baixo, é assim que o mesmo se esvazia; continuando, as estrelas povoam cada vez mais o ramo das GV a medida que abandonam a SP até que somente as estrelas de menor massa estejam ainda na SP; eventualmente, o ramo horizontal e o ramo assintótico das gigantes também se preencherão de estrelas (vide a Fig. 7).

Em outro escopo, é possível determinar o módulo de distância e por conseguinte a distância propriamente dita, utilizando a diferença entre as magnitudes aparente e absoluta. A magnitude aparente (m) é um valor que se refere à intensidade do brilho de um objeto observado por algo ou alguém aqui na Terra (vide equação 2), onde F é a intensidade da radiação observada, F_0 a intensidade da radiação observada de uma estrela de 0ª magnitude e $C=2.5 \cdot \log F_0$. Frequentemente a estrela Vega é usada como “ponto zero” da escala. Já a magnitude absoluta (M) se refere à intensidade desse brilho se o objeto se encontrasse a uma distância de 10 parsec ou 32.6 anos-luz do observador. Tendo em vista que a intensidade observada F depende da luminosidade intrínseca L do objeto e da sua distância d : $F=L/4\pi d^2$, é possível calcular a magnitude absoluta substituindo F pela equação encontrada e d por 10pc (vide equação 2.1 e equação 3).

$$m = -2.5 \cdot \log \frac{F}{F_0} = -2.5 \cdot \log F + C \quad (2)$$

$$m = -2.5 \cdot \log \frac{L}{4\pi d^2} + C \quad (2.1)$$

$$M = -2.5 \cdot \log \frac{L}{4\pi (10pc)^2} + C \quad (3)$$

Explorando as equivalências entre as equações e utilizando algumas identidades logarítmicas chegaremos às equações 4 e 4.1 as quais representam o módulo de distância (que não possui unidade de medida) e a distância propriamente dita em parsecs, respectivamente.

$$m - M = 5 \cdot \log \frac{d}{10pc} \quad (4)$$

$$d = 10^{\frac{(m-M+5)}{5}} pc \quad (4.1)$$

Posteriormente, pode se estimar a composição química ajustando a forma da SP, já que essa varia com metalicidade (como é possível notar na Fig. 6) e ainda em busca de dados podemos estimar a idade de um aglomerado pela localização do ponto de “turn-off” e pelo ajuste de todos os ramos pós-SP.

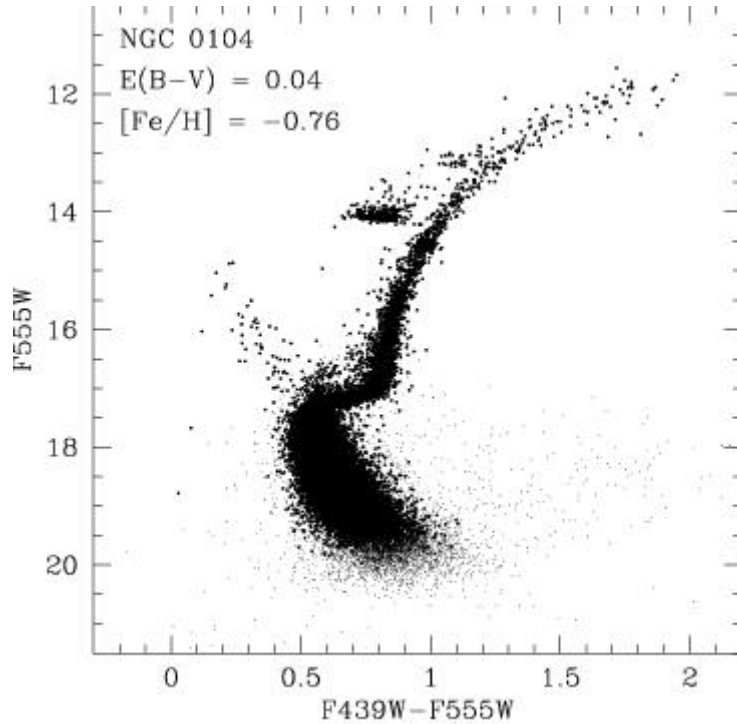
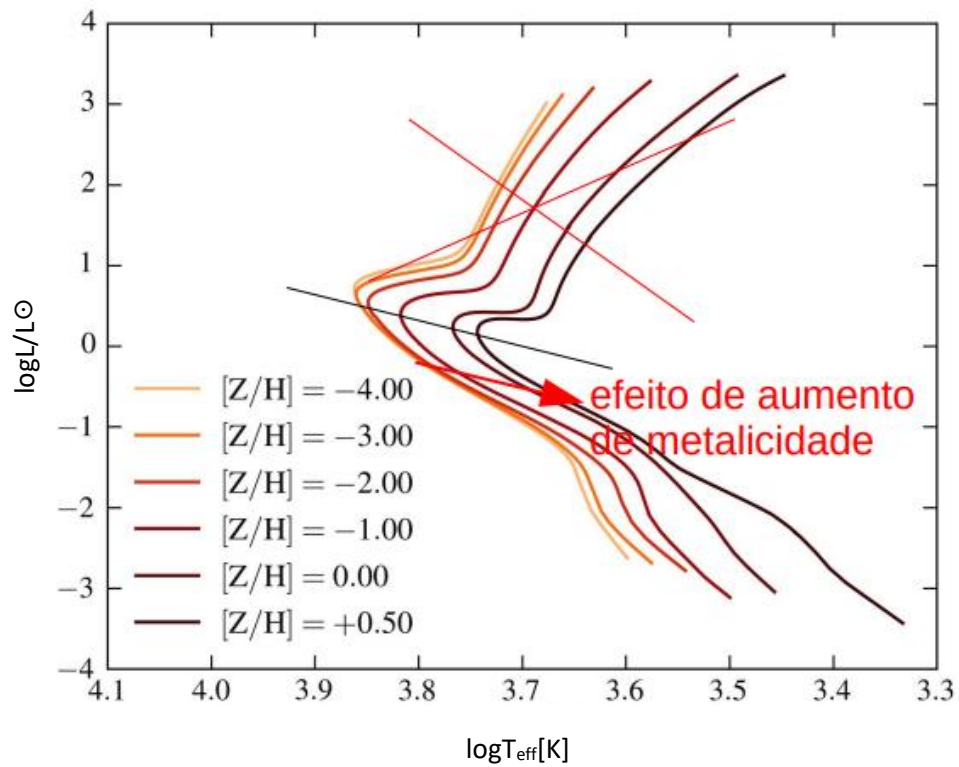


Diagrama cor-magnitude do Aglomerado Globular 47 Tuc (Fig. 5)



HRD comparando diferentes metalicidades (Fig. 6)

É possível observar que com o aumento da metalicidade o gráfico se desloca para a direita e para baixo.

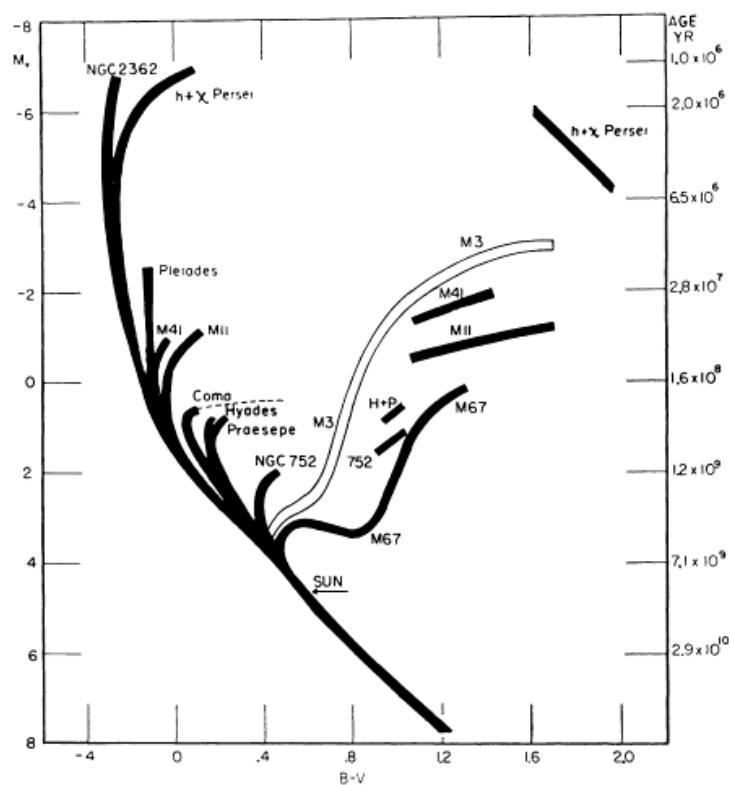


Diagrama cor-magnitude de diversos aglomerados com idades variadas (Fig. 7)

4 Metodologia

4.1 Materiais e Métodos

Usamos diversas fontes acadêmicas no âmbito da astronomia majoritariamente online, mas tendo como principal SALARIS e CASSISI (2005). Além da discussão recorrente sobre o livro e esclarecimento de dúvidas com o orientador.

4.2 Etapas da pesquisa

Construímos dois programas na linguagem “python”, o primeiro para a plotagem do CMD de um aglomerado, com o intuito de testagem utilizamos os dados fotométricos do aglomerado 47 Tuc (o mesmo da Fig.4), do banco de dados de Piotto et al. (2002) nas bandas F439W e F555W da Wide Field Planetary Camera 2 (WFPC2) do Hubble Space Telescope (HST), que pode ser encontrado no site da Universidade de Pádua, no Departamento de Física e Astronomia “Galileu Galilei”. A escolha desse aglomerado deve-se ao fato de que uma vez que já possuímos o CMD do mesmo sabemos com o que o resultado da plotagem do nosso programa deve se assemelhar. No mesmo escopo, o segundo programa tem o intuito de plotar sobre o CMD várias isócronas do banco de dados da Universidade de Harvard, encontradas no site do projeto Mesa Isochrones and Stellar Tracks (MIST), e testar subsequentemente essas isócronas visando encontrar a que melhor se ajusta ao CMD e assim, usando a isócrona em questão, adquirir os dados procurados pela nossa pesquisa que são: composição química (metalicidade) do aglomerado e a sua idade.

Em seguida, será detalhado o processo de plotagem dos CMDs bem como das isócronas sobre esses diagramas. Inicialmente, uma vez escolhido um aglomerado do banco de dados de Piotto et al. (2002), é necessário fazer o download dos dados fotométricos do mesmo. Após isso, esses dados serão convertidos para uma tabela no formato Excel da qual necessitamos apenas três colunas: a primeira com os dados fotométricos na banda F555W, a segunda com os mesmos dados, porém na banda F439W e por fim uma com o resultado da subtração da primeira coluna na segunda (F439W – F555W).

Utilizando o primeiro programa, que fará a leitura dessa tabela, será criado um diagrama cor-magnitude (Fig. 8) do aglomerado. Posterior à plotagem do diagrama, se dará início ao ajuste de isócronas utilizando o segundo programa. Será necessário fornecer ao programa 4 dados, sendo esses: o módulo de distância, o avermelhamento, a metalicidade e a idade. O módulo de distância influencia no posicionamento vertical da isócrona, relação essa que ocorre da seguinte forma: aumentando o valor do módulo de distância, a isócrona se deslocará para baixo, diminuindo o mesmo ela se moverá para cima. Em seguida, o aumento do avermelhamento desloca a isócrona verticalmente para baixo e horizontalmente para a direita. Essa última grandeza, pode ser consequência da presença de poeira interestelar entre a estrela e o observador, já que essa poeira absorve melhor as frequências mais altas (azuis) do que as mais baixas (vermelhas) resultando, no avermelhamento da luz observada. O cálculo da diferença de cor observada e intrínseca se dá como é mostrado abaixo.

$$E(B - V) = (B - V) - (B_0 - V_0)_{(5)}$$

Nessa relação, B-V representam uma cor, quanto maior for o seu valor mais vermelha é a estrela. No entanto, como já exposto, pode existir um excesso de cor na observação, que é denotado por E(B-V). Esse excesso, por sua vez, é calculado através da diferença entre o valor da cor observada (B-V) e o valor da cor intrínseca à estrela (B₀-V₀).

Ao mesmo tempo, a metalicidade influencia no formato da isócrona (vide Fig. 6). E, por fim, uma vez escolhida a metalicidade da isócrona, a idade definirá qual das 72 isócronas do banco de dados ligadas à metalicidade em questão será utilizada.

O ajuste consiste na alteração desses valores buscando enquadrar melhor a isócrona no CMD, uma vez ajustada a isócrona, os dados utilizados para a execução do mesmo correspondem aos dados do aglomerado. Um exemplo da conclusão dessa etapa está presente na Fig. 11, no entanto, o mesmo se iniciou como mostra a Fig. 9, sendo necessário modificar os valores fornecidos ao programa para chegar no ajuste desejado. Finalmente, vale mencionar a existência de aglomerados para os quais fatores como a quantidade de estrelas na sua população, tornam impossível concluir o ajuste de maneira satisfatória (vide Fig. 12).

5 Resultados e discussão dos resultados

Como resultado do primeiro programa obtivemos um CMD do aglomerado 47 Tuc (Fig. 8). Adiante, como resultado do uso do segundo programa, obtivemos um CMD com uma isócrona sobre o mesmo (Fig. 9). A isócrona presente na imagem já é uma escolhida dentre diversas do banco de dados. No entanto, é perceptível a disparidade de localização, já que a isócrona deveria encaixar-se na porção central percorrendo toda a linha fiducial desde a base onde estão as estrelas na SP até a ponta superior direita onde estão as GV, fato esse que também interfere no julgamento que determinaria a isócrona que melhor se ajusta ao diagrama. Dito isso, serão feitas variações nos parâmetros do programa com o intuito de deslocar a curva da isócrona para cima e para a esquerda como esta se encontra na Fig. 11.

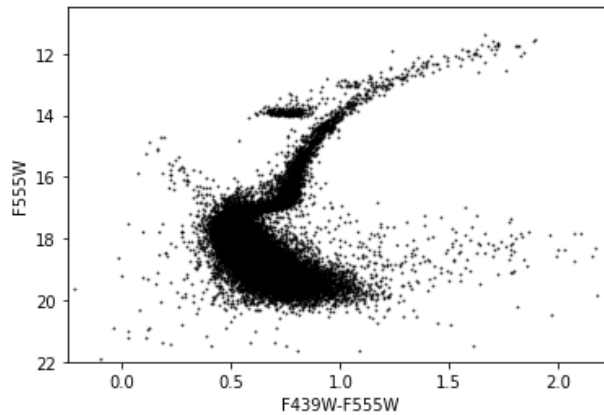


Diagrama cor-magnitude do Aglomerado Globular 47 Tuc (Fig. 8)

Esse diagrama é fruto do uso do programa feito somente para a plotagem de CMDs que serão usados nessa pesquisa.

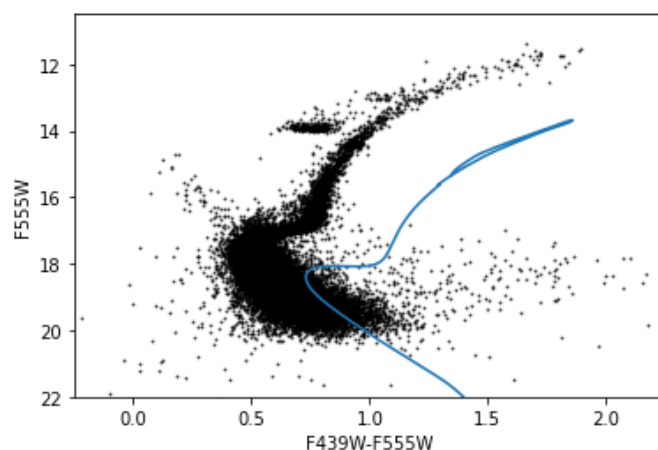


Diagrama cor-magnitude do Aglomerado Globular 47 Tuc com uma isócrona, obtido através do uso do segundo programa (Fig. 9)

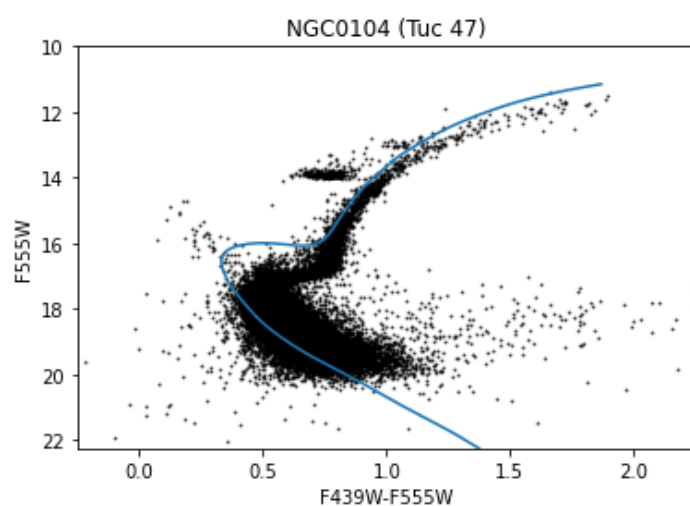


Diagrama cor-magnitude do Aglomerado Globular 47 Tuc com uma isócrona já ajustada à SP, porém, com a idade errada. (Fig. 10)

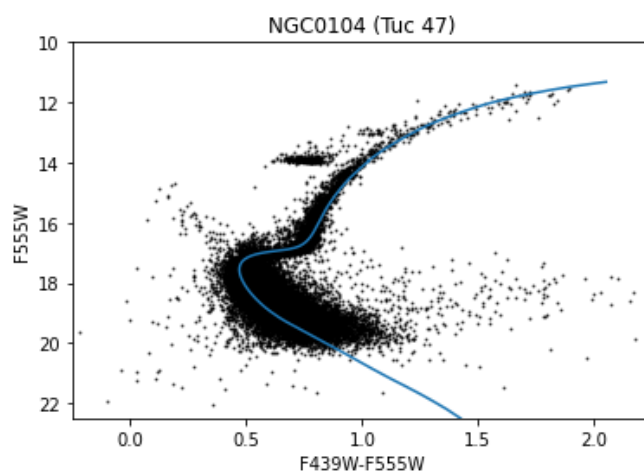
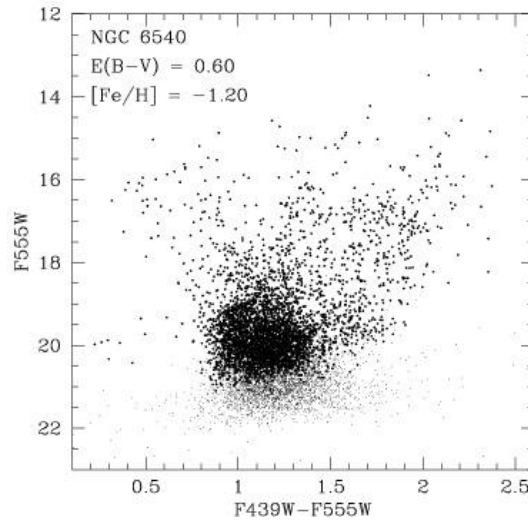


Diagrama cor-magnitude do Aglomerado Globular 47 Tuc com uma isócrona devidamente ajustada (Fig. 11)



Um exemplo de CMD onde ajustar uma isócrona não é possível (Fig. 12)

Por fim, abaixo encontram-se todos os valores obtidos através do ajuste de isócronas para 48 aglomerados globulares da Via Láctea, e dois gráficos que expõem a relação entre quantidade de aglomerados e idade dos mesmos, e quantidade de aglomerados e sua metalicidade. Sendo esses últimos, gráficos 1 e 2 respectivamente.

Tabela 1 – Metalicidade, idade, distância e avermelhamento de diversos aglomerados

Aglomerado	[Z/H]	Idade (Gy)	Módulo de distância	E(B-V)
NGC 0104	-1,0	13,5	13,3	0,04
NGC 0362	-1,0	8,5	14,8	0,05
NGC 1851	-1,0	12,0	15,2	0,02
NGC 1904	-1,5	12,0	15,6	0,01
NGC 2419	-2,5	12,0	19,7	0,11
NGC 2808	-1,5	12,0	15,0	0,23
NGC 3201	-1,5	13,5	13,4	0,21
NGC 4147	-2,0	13,5	16,5	0,05
NGC 4590	-2,0	13,5	15,2	0,05
NGC 4833	-2,0	12,0	14,3	0,05
NGC 5024	-2,0	13,5	16,4	0,02
NGC 5634	-2,0	13,5	17,2	0,05

NGC 5694	-2,0	13,5	18,0	0,09
NGC 5824	-2,0	13,5	17,6	0,13
NGC 5904	-1,5	13,5	14,4	0,03
NGC 5927	-0,5	12,0	14,6	0,45
NGC 5986	-1,5	13,5	15,3	0,27
NGC 6093	-2,0	13,5	14,6	0,18
NGC 6139	-1,5	13,5	15,0	0,75
NGC 6205	-1,5	12,0	14,5	0,02
NGC 6218	-1,5	13,5	13,8	0,19
NGC 6229	-1,5	13,5	17,6	0,01
NGC 6266	-1,5	13,5	14,6	0,47
NGC 6273	-1,5	13,5	15,0	0,37
NGC 6284	-1,5	13,5	16,0	0,28
NGC 6293	-2,0	12,0	15,0	0,41
NGC 6356	-0,5	13,5	15,5	0,28
NGC 6362	-1,0	13,5	14,5	0,08
NGC 6388	-0,5	9,5	15,2	0,40
NGC 6397	-2,0	10,7	12,2	0,18
NGC 6402	-1,5	9,5	15,5	0,60
NGC 6441	-0,5	13,5	15,8	0,44
NGC 6522	-1,5	13,5	15,4	0,48
NGC 6569	-1,0	12,0	15,4	0,56
NGC 6584	-1,5	13,5	15,7	0,10
NGC 6624	-0,5	13,5	14,8	0,28
NGC 6637	-1,0	13,5	15,0	0,16
NGC 6652	-1,0	13,5	15,2	0,09
NGC 6681	-1,5	13,5	15,0	0,07
NGC 6712	-1,0	10,7	14,6	0,45

NGC 6723	-1,0	13,5	14,8	0,05
NGC 6838	-0,5	10,7	13,2	0,25
NGC 6864	-1,5	12,0	16,9	0,16
NGC 6934	-1,5	9,5	16,4	0,09
NGC 6981	-1,5	13,5	16,1	0,05
NGC 7078	-2,0	13,5	14,6	0,10
NGC 7089	-1,5	13,5	15,1	0,06
NGC 7099	-2,0	12,0	14,6	0,03

Gráfico 1 – Nº de aglomerados em relação à idade

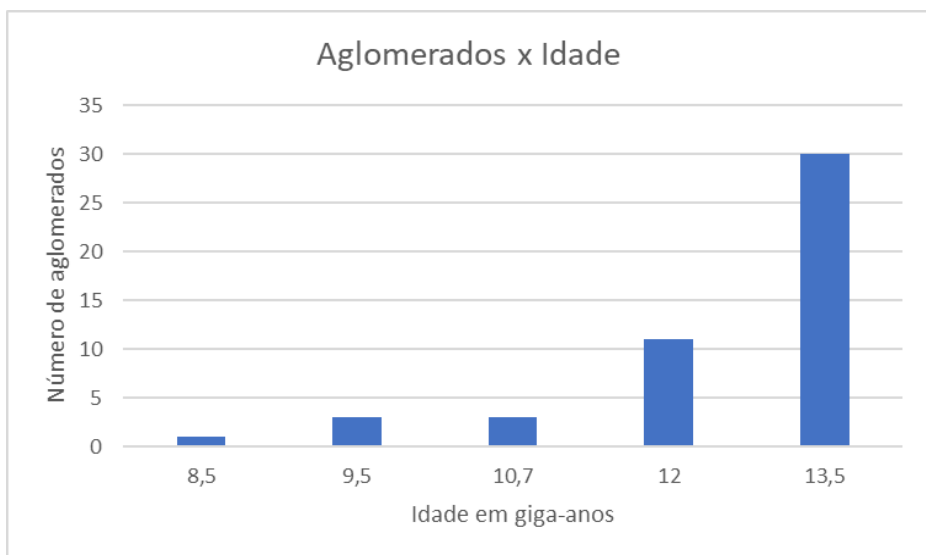


Gráfico 2 – Nº de aglomerados em relação à metalicidade

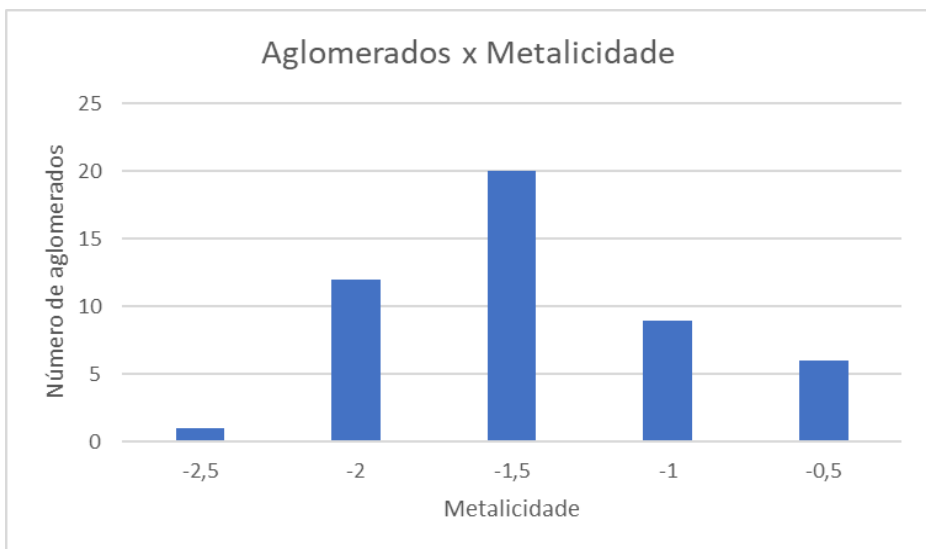
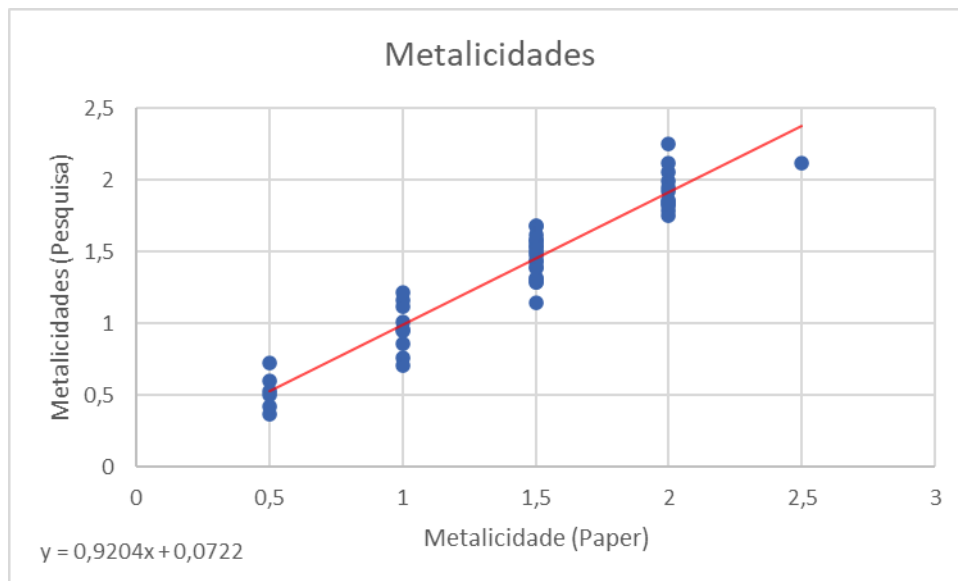


Gráfico 4 – Comparação dos valores encontrados com os da literatura para metalicidades



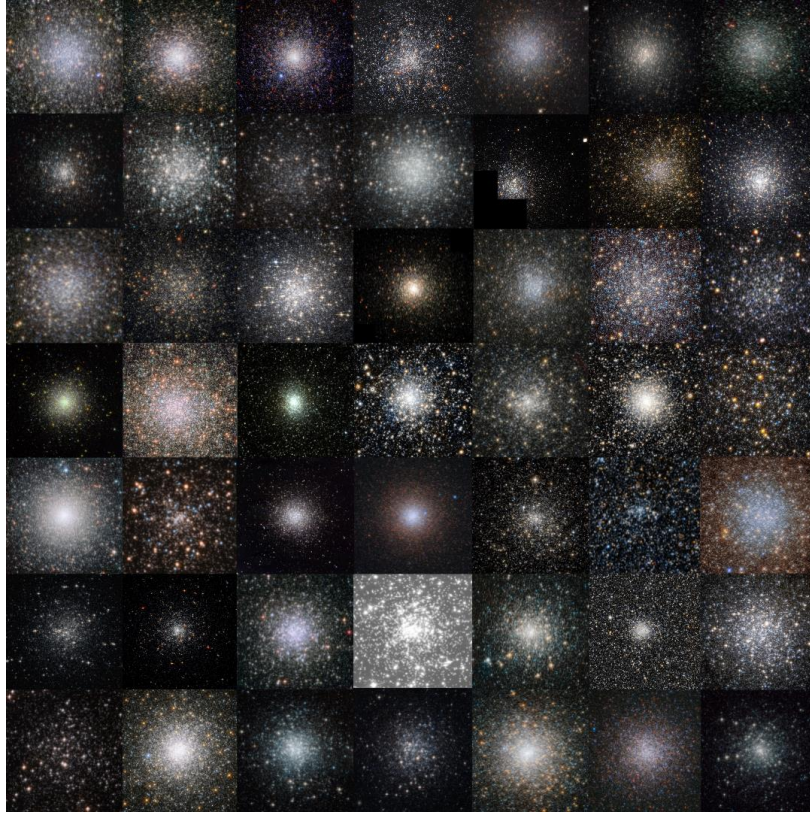
6 Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros

Finalmente, após o decorrer de toda a pesquisa foi possível concluir que a parte majoritária dos aglomerados globulares da Via Láctea se formou há mais de 13 bilhões de anos. Além disso, suas metalicidades são, em sua maioria, cerca de 30 vezes menores que a do Sol. Sendo assim, podemos inferir que a nuvem de gás que formou a Via Láctea era pobre em metais.

No entanto, vale ressaltar que a maior parte dos aglomerados globulares perambula pela parte da galáxia chamada de “halo”, e tendem a ser os objetos mais velhos e mais pobres em metais da mesma, de acordo com modelos de formação e evolução da Via Láctea.

Somado a isso, a partir da equação presente no Gráfico 3 no canto inferior esquerdo da linha de tendência (linha vermelha) é possível concluir que houve uma pequena discrepância em relação ao ângulo de inclinação da reta, cuja precisão foi de 92,04% e com a posição horizontal de cada valor, essa última de apenas 7,22%. O objetivo era manter a linha de tendência com uma equação de reta da forma $y=x$, o que representaria uma precisão de 100% e, por conseguinte, a equivalência total dos valores. Sendo assim, a pesquisa foi finalizada com um grau de equivalência, entre os valores encontrados e os valores presentes na literatura, bastante preciso.

Futuramente, seria interessante aprofundar a análise sobre os aglomerados abertos e, também, procurar desenvolver estudos específicos sobre a relação entre estrelas binárias, estrelas de nêutrons, buracos negros, e sistemas binários desses dois últimos. Afinal, a produção de alguns dos elementos mais pesados do universo só ocorre naturalmente como fruto de acontecimentos catastróficos e extremamente violentos como, por exemplo, a colisão de estrelas de nêutrons, eventos cósmicos que são interessantíssimos e necessários para se compreender algumas características do nosso universo.



Os 49 aglomerados selecionados para o ajuste (Fig. 13)



Os CMDs de 48 dos 49 aglomerados selecionados para o ajuste, com suas respectivas isócronas na mesma ordem da Figura 13 (Fig. 14)

Referências

- [1] SALARIS, M.; CASSISI, S. Evolution of Stars and Stellar Populations. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [2] SANDAGE, A. The color-magnitude diagrams of galactic and globular clusters and their interpretations as age groups. Astrophysics Data System (ADS), 1958. Ricerche Astronomiche, Vol. 5, Specola Vaticana, Proceedings of a Conference at Vatican Observatory, Castel Gandolfo, May 20-28, 1957, Amsterdam: North-Holland, and New York: Interscience, 1958, edited by D.J.K. O'Connell., p.41
- [3] Piotto, G., et al. 2002, A&A, 391, 945
- [4] NOVAIS, Patricia Martins de. A Distribuição de Populações Estelares em Galáxias. 2013. Dissertação (Mestrado em Astronomia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. doi:10.11606/D.14.2019.tde-05062018-102951.