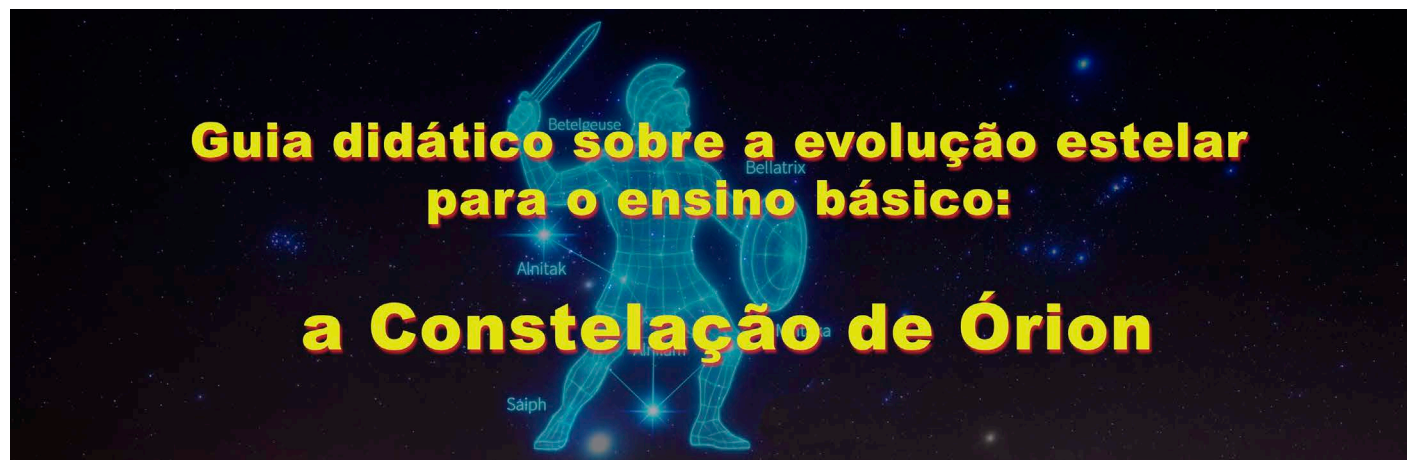




.....
Luciano Luiz Alencar de Oliveira^{1#} , Rodrigo da Silva Sobrinho² 

¹Instituto Federal do Pará, Campus Bragança, Bragança, PA, Brasil.

²Instituto Federal do Rio Grande do Norte, Campus Natal, Natal, RN, Brasil.
.....

Palavras-chave

astronomia
evolução estelar
ensino de astronomia
constelação de Órion
diagrama HR

Resumo

É sabido que o ensino de astronomia no Ensino Médio ainda é reduzido a debates simples e generalistas a respeito de seus temas, tornando o ensino pouco profundo. Os problemas são ainda mais graves quando o intuito é conhecer, trabalhar e explorar recursos que possam despertar e fomentar a pesquisa científica entre os discentes na educação básica, pois a falta de materiais didáticos e recursos metodológicos contribuem para uma abordagem mais simplista de seus temas. Tratar a astronomia no Ensino Médio como uma ciência acessível e praticável, que utiliza dados reais obtidos por telescópios profissionais, como HIPPARCOS, é uma maneira de ampliar a perspectiva dos alunos sobre sua aprendizagem no campo da astronomia, contribuindo para seu desenvolvimento em diversas áreas. Então, aqui é proposto um guia didático voltado ao ensino básico, com foco no estudo das estrelas mais brilhantes da constelação de Órion, buscando tornar o ensino de astronomia mais acessível, significativo e conectado à realidade dos alunos. Além disso, este trabalho pode ser usado como um material de apoio e como complemento à formação de professores de física interessados em ampliar seus conhecimentos de astronomia.

1. Introdução

Olhar para o céu noturno é uma das primeiras experiências que todos nós realizamos desde a infância, mesmo sem saber que estamos diante de um laboratório aberto e o quanto de informações podemos extrair dos astros ou estrelas. Para Leão e Teixeira [1], a atração pelo céu é popular e milenar, o que mantém a astronomia como fonte permanente de interesse no campo das ciên-

cias, tanto para os estudantes quanto para os leigos. É certo que todos já notamos que algumas estrelas têm características físicas diferentes das outras, como o brilho e o tamanho, por exemplo. Essas características se diferenciam, pois as estrelas têm contínuas modificações durante seu ciclo de vida, o que se reflete em seus aspectos físicos mais simples.

A evolução estelar é uma área da astronomia que se dedica a co-

A atração pelo céu é popular e milenar, o que mantém a astronomia como fonte permanente de interesse no campo das ciências

Auto de correspondência. Email: luciano.oliveira@ifpa.edu.br.

Este é um artigo de acesso livre sob licença Creative Commons



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

Copyright © 2025, Copyright by Sociedade Brasileira de Física. Printed in Brazil.

nhecer como as estrelas se modificam com o tempo, embora seu tempo de evolução seja imensamente maior que o tempo de vida de um ser humano, tornando o nosso tempo desprezível, a partir do ponto de vista de uma estrela. É fundamental dedicar tempo a observações e estudos a respeito da evolução estelar. Uma forma simples e bastante eficaz de entendermos sobre essa evolução é analisar como um conjunto de estrelas se distribui ao longo do diagrama Hertzsprung-Russell [2]. Fundamentalmente, esse diagrama é pautado em dois parâmetros físicos importantes: a temperatura efetiva e a luminosidade superficial, além das isócronas¹, que permitem ver como cada estrela, dependendo de sua massa, segue uma trajetória evolutiva diferente com o passar do tempo.

É comum chamarmos de constelação o conjunto de estrelas que aparentemente estão próximas umas das outras e formam uma imagem no mesmo plano celeste. Quando ligadas por uma linha imaginária a partir da perspectiva do que é observado da Terra, suas formas são comparadas a objetos, animais ou pessoas. Povos antigos de diversas regiões do mundo dedicavam mitos e histórias às constelações vistas no céu noturno, como por exemplo a constelação de Órion, chamado de O Caçador pelos gregos antigos.

Explorar os temas de astronomia na educação básica pode ir além de debates mistos sobre astronomia/cosmologia, como teoria do *Big Bang*, formação do sistema planetário, planetologia e algumas curiosidades acerca de missões espaciais, como é comumente observado em livros didáticos. O Plano Nacional de Astronomia (PNA) aponta que há precariedade no ensino de astronomia, principalmente pela negligência histórica nos currículos escolares, provocando um distanciamento entre as práticas pedagógicas e os tópicos propostos nos currículos escolares [3].

Muito embora a astronomia seja um campo de pesquisa muito rico, ainda é pouco difundido no ambiente escolar, pois está condicionada a algumas limitações, dentre as quais destaco:

- a escassez de recursos didáticos apropriadamente atualizados para discutir e resolver problemas em sala de aula sobre os assuntos gerais e/ou pontuais de astronomia, como Sistema Solar, buracos negros etc.;
- a falta de guias ou recursos metodológicos que possibilitem auxiliar o professor e seus alunos no desenvolvimento de assuntos mais complexos, como a evolução estelar, que se baseia em análise de dados reais, obtidos a partir de missões espaciais;
- por fim, o desconhecimento ou a falta de habilidade no manuseio de ferramentas digitais ou simuladores apropriados às discussões sobre temas de astronomia.

Povos antigos de diversas regiões do mundo dedicavam mitos e histórias às constelações vistas no céu noturno, como por exemplo a constelação de Órion, chamado de O Caçador pelos gregos antigos

Outra dificuldade muito observada no ensino da astronomia, como apontado por Langhi e Nardi [4], é o receio de professores em não dominar os conteúdos, revelando seu despreparo sobre os temas abordados,

que também está associado à falta de capacitação durante sua formação, assim como falta de tempo hábil para a construção pedagógica das aulas propostas sobre os tópicos de astronomia, além das dificuldades matemáticas enfrentadas pelos alunos [1,5].

Então, motivado por essas limitações, este artigo apresenta um guia didático que permitirá ao professor

explorar pontos importantes sobre a evolução das estrelas usando ferramentas online como uma linha norteadora aos estudos da evolução das estrelas, baseando-se no manuseio de dados reais e na produção de diagramas.

Na seção 2, é brevemente apresentada a constelação de Órion (o foco de aplicação didática deste artigo), destacando-se as estrelas mais brilhantes da constelação e discutindo-se suas principais características físicas. Na seção 3, serão discutidos alguns parâmetros físicos fundamentais de uma estrela, como sua cor, distância de um observador na Terra, temperatura, luminosidade e raio. Esses parâmetros servirão como um ancoradouro ao professor, enriquecendo-o em seus debates futuros, além de serem uma abordagem panorâmica sobre o diagrama Hertzsprung-Russell. Na seção 4, é apresentado o guia didático, o diagrama e finalmente se discute a evolução das estrelas da constelação de Órion. Na seção 5, são apresentadas algumas considerações importantes sobre este trabalho.

2. A constelação de Órion

Órion é uma das 88 constelações modernas, composta por mais de 80 estrelas e algumas nebulosas, como a Nebulosa Cabeça de Cavalo. A Fig. 1 ilustra a constelação de Órion, com destaque para as sete estrelas mais brilhantes: Betelgeuse, Kappa Orionis, Gamma Orionis, Rigel, Zeta Orionis, Epsilon Orionis e Delta Orionis. Essa constelação pode ser vista de todo o globo terrestre, pois Órion está no equador celeste. Para observadores localizados no hemisfério sul do planeta, o período favorável à observação dessa constelação é entre os meses de dezembro e janeiro.

No quadrilátero da constelação, ligados pela linha imaginária verde, encontram-se as duas estrelas mais brilhantes: Betelgeuse, uma supergigante vermelha, e Rigel, uma supergigante azul. Ao centro, está localizado o famoso cinturão do caçador, formado por três estrelas: Zeta Orionis, Epsilon Orionis e Delta Orionis (Fig. 1).

Embora a constelação de Órion seja bastante populosa de estrelas, vamos focar apenas nas mais brilhantes, haja vista que são estrelas facilmente observáveis, mesmo na ausência de instrumento óptico. Essa

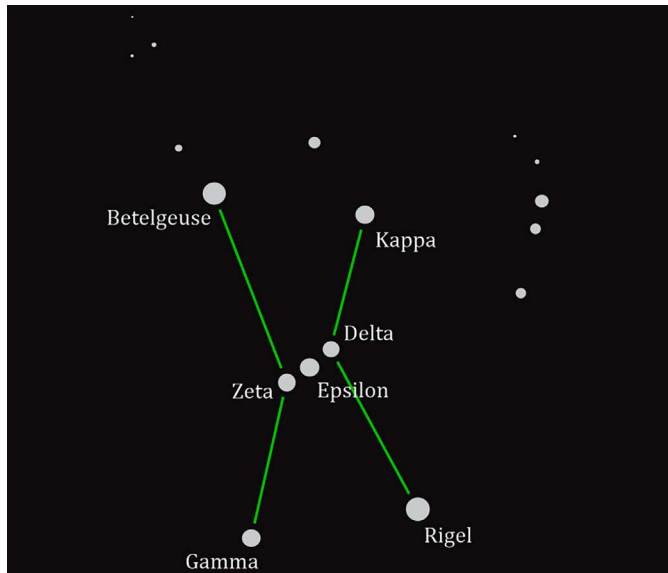


Figura 1 - Representação artística da Constelação de Órion com cores meramente ilustrativas e fora de escala. Aqui destacamos apenas as sete estrelas mais brilhantes da constelação. No quadrilátero são vistas as estrelas Betelgeuse, Gamma Orionis (γ), Kappa Orionis (κ) e Rigel. Ao centro da constelação, formando o famoso cinturão de Órion, temos: Zeta Orionis (ζ , também conhecida como Alnitak), Epsilon Orionis (ϵ , também conhecida como Alnilam) e Delta Orionis (δ , também conhecida como Mintaka).

constelação é uma das mais famosas no Brasil por conta das chamadas Três Marias (Zeta, Epsilon e Delta Orionis), ou cinturão de Órion, como são internacionalmente conhecidas.

A Fig. 2 apresenta sete painéis com imagens reais das estrelas mais brilhantes da constelação do caçador. Na parte superior, vemos as estrelas de coloração azul, enquanto na parte inferior temos a única estrela de coloração vermelha. A cor da estrela está associada a fatores físico-químicos e muito tem a nos dizer sobre sua evolução.

3. Os principais parâmetros físicos de uma estrela

Os parâmetros atmosféricos estelares são importantes em diversos estudos da astrofísica e medi-los não é uma tarefa trivial. Felizmente, algumas missões espaciais têm feito o trabalho de medição de alguns parâmetros estelares, tais como paralaxe (π), índice de cor ($B - V$), luminosidade $L_{\odot}$ e outros. A partir desses parâmetros, é possível determinar outros, como distância, temperatura efetiva (T_{ef}) e raio estelar ($R_{\odot}$), por exemplo. A seguir, apresentam-se cada parâmetro físico e as suas formas de obtenção.

3.1. Paralaxe e distância

Quando o objetivo é determinar a distância que uma estrela se encontra de um observador na Terra, é

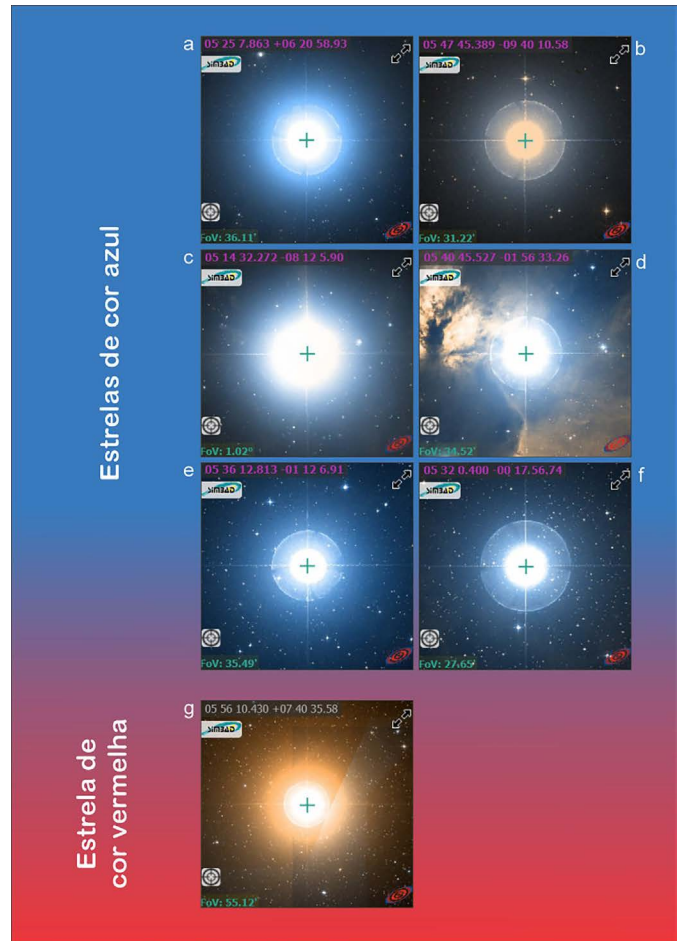


Figura 2 - Estrelas de cor azul: Gamma Orionis (a), Kappa Orionis (b), Rigel (c), Zeta Orionis (d), Epsilon Orionis (e) e Delta Orionis (f). Estrela de cor vermelha: Betelgeuse (g). Imagens extraídas de <https://simbad.cds.unistra.fr/simbad/>.

imprescindível conhecer sua medida de paralaxe (π). Em 1997, a grande missão espacial ESA HIPPARCOS coletou informações astrométricas de mais de 118 mil estrelas. Em 2007, foi publicada uma atualização desses dados astrométricos, incluindo medidas de paralaxe para as principais estrelas da constelação de Órion, como mostrado na Tabela 1.

A distância de uma estrela até seu observador na Terra é determinada usando a relação

$$d = \frac{1000}{\pi}, \quad (1)$$

onde d e π representam as medidas de distância, em pc (parsec), e paralaxe, em mas (miliarco de segundo), respectivamente. É importante destacar que 1 pc corresponde a aproximadamente $3,086 \times 10^{16}$ km. Então, entre as estrelas da constelação do caçador, a mais próxima de um observador na Terra é Gamma Orionis, com cerca de 2,39 quintilhões de quilômetros ($2,39 \times 10^{18}$ km). Por outro lado, a estrela mais distante é Epsilon Orionis, com cerca de 18,70 quintilhões de quilômetros ($18,70 \times 10^{18}$ km).

Tabela 1: Na primeira e na segunda colunas temos os nomes alternativos das principais estrelas que compõem a constelação de Órion, além de seus identificadores oficiais, segundo a missão HIPPARCOS (HIP). Na terceira e na quarta colunas são apresentadas as medidas de paralaxe (π), disponíveis no catálogo HIPPARCOS, e os valores de distância (d), respectivamente. As unidades de paralaxe e distância são miliarco de segundo (mas) e parsec (pc).

Nome alternativo da estrela	Identificador da estrela (ID)	Paralaxe (mas)	Distância (pc)
Betelgeuse	HIP 27989	6,55	152,67
Gamma Orionis	HIP 25336	12,90	77,39
Kappa Orionis	HIP 27336	5,04	198,41
Rigel	HIP 24436	3,78	264,55
Zeta Orionis	HIP 26727	4,43	225,73
Epsilon Orionis	HIP 26311	1,62	606,06
Delta Orionis	HIP 25930	4,71	212,31

3.2. Índice de cor ($B - V$)

Na astronomia, há uma variedade de dispositivos que permitem filtrar a luz de uma estrela em regiões de comprimentos de ondas específicos. Os filtros mais comuns têm bandas espectrais na região U (ultravioleta), B (azul) e V (visível), cujos comprimentos de onda efetivos das bandas são de 3.600 Å, 4.200 Å e 5.500 Å, respectivamente. Essas bandas são derivadas do sistema fotométrico UBV (também conhecido como sistema Johnson-Morgan). Pode-se medir a magnitude de uma estrela em cada uma das bandas e determinar os índices de cor ($B - V$), isto é, a diferença entre as magnitudes dos filtros azul (B) e visível (V). A Tabela 2 mostra os dados fotométricos nas bandas B e V, além do índice de cor para cada estrela pertencente à constelação de Órion.

O valor de ($B - V$) também é um indicativo da cor superficial da estrela. Cruzando-se os dados apresentados na Tabela 2 com as imagens da Fig. 2, é fácil perceber que estrelas com ($B - V$) > 0 tendem à coloração vermelha, como Betelgeuse (painel g da Fig. 2), enquanto as estrelas com ($B - V$) < 0 tendem à coloração azul, como por exemplo Rigel (painel c da Fig. 2). A cor da estrela está associada a sua temperatura efetiva, como veremos a seguir, portanto o índice de cor ($B - V$) é um parâmetro fundamental e por isso deve ser considerado em nossos estudos.

A fotometria V (mag) representa o brilho da estrela quando observada a olho nu, isto é, representa a magnitude aparente de uma estrela. O astrônomo grego Hipparco definiu um sistema de classificação de magnitudes aparentes, no qual é estabelecido que quanto menor o valor de V, mais brilhante é a estrela a olho nu; então, quanto maior for seu valor, menos brilhante ela é. Entre as sete estrelas da constelação de Órion, Delta Orionis é a menos brilhante, com $V = 2,25$ mag (consulte a Tabela 2). Por outro lado, as estrelas Rigel e Betelgeuse são as mais brilhantes da constelação, com $V = 0,18$ mag e $V = 0,45$ mag, respectivamente.

Tabela 2: Medidas retiradas do catálogo ESA HIPPARCOS.

Nome alternativo da estrela	V (mag)	B (mag)	(B - V)
Betelgeuse	0,45	1,050	1,500
Gamma Orionis	1,64	1,416	-0,224
Kappa Orionis	2,07	1,902	-0,168
Rigel	0,18	0,150	-0,030
Zeta Orionis	1,74	1,541	-0,199
Epsilon Orionis	1,69	1,506	-0,184
Delta Orionis	2,25	2,075	-0,175

É comum alguns fazerem associações do brilho aparente com a distância que a estrela se encontra de um observador na Terra, criando a ideia de que estrelas mais brilhantes estão mais próximas do observador, enquanto as estrelas menos brilhantes estão mais distantes.

Embora essa ideia seja bastante intuitiva, ela está errada! Quando cruzamos os dados das Tabelas 1 e 2 e analisamos as medidas de distância e brilho aparente, nota-se que, embora Rigel seja mais brilhante que Delta Orionis, a primeira está mais distante de um observador na Terra do que a segunda estrela. Portanto, a relação brilho aparente e distância não é verdadeira.

3.3.1. Temperatura efetiva, luminosidade e raio estelar

Por definição, a temperatura efetiva (T_{ef}) de uma estrela é a mesma temperatura que um corpo negro de raio igual à estrela emitiria se tivesse o mesmo fluxo de energia por unidade de área superficial. A temperatura é um dos requisitos fundamentais para realizar estudos detalhados sobre a composição química de uma estrela [6]. Determinar com precisão os valores de T_{ef} nos possibilita compreender melhor algumas propriedades físicas, como luminosidade, massa e raio, além da evolução estelar, como explica o astrônomo russo Sichevskij [7], em seu trabalho sobre a evolução das estrelas com diferentes massas.

Destacamos apenas o método de determinação de temperatura efetiva a partir de um ajuste polinomial baseado no índice de cor ($B - V$), proposto por Flower [8]. Esse método consiste em um ajuste polinomial baseado em uma lei de potência que toma como referência o índice de cor ($B - V$). A Eq. (2) mostra a relação logarítmica da temperatura efetiva extraída a partir de ($B - V$). Os coeficientes a , b , c , d , e , f , g e h foram corrigidos e rerepresentados no trabalho de Torres e colaboradores [9].

$$\log(T_{ef}) = a + b(B - V) + c(B - V)^2 + d(B - V)^3 + e(B - V)^4 + f(B - V)^5 + \dots \quad (2)$$

Para as estrelas gigantes (Gamma e Delta Orionis), os coeficientes usados foram: $a = 3,979145107$, $b = -0,654992269$, $c = 1,740690042$, $d = -4,608815154$, $e = 6,79259978$, $f = -5,396909891$, $g = 2,192970377$ e $h = -0,359495739$.

Tabela 3: Temperatura efetiva para as estrelas mais brilhantes da constelação de Órion.

Nome alternativo da estrela	Temperatura efetiva (T_{ef})
Betelgeuse	4.015 K
Gamma Orionis	19.295 K
Kappa Orionis	18.315 K
Rigel	11.122 K
Zeta Orionis	21.310 K
Epsilon Orionis	19.763 K
Delta Orionis	15.104 K

Já para as demais estrelas, isto é, para as estrelas supergigantes, os coeficientes usados foram: $a = 4,012559732$, $b = -1,055043117$, $c = 2,133394539$, $d = -2,459769795$, $e = 1,349423943$ e $f = -0,283942579$. A Tabela 3 apresenta os valores de temperatura efetiva obtidos para as sete estrelas de nossa amostra.

Como podemos determinar a temperatura efetiva de uma estrela? Utilizamos a estrela gigante HIP 25336 (Gamma Orionis) para ilustrar o processo de determinação dessa temperatura. Substituindo o valor de índice de cor ($B - V$) e os coeficientes das gigantes na Eq. (2), teremos

$$\begin{aligned} \log(T_{ef}) = & 3,979145107 - 0,654992269(-0,224) \\ & + 1,740690042(-0,224)^2 - 4,608815154(-0,224)^3 \\ & + 6,79259978(-0,224)^4 - 5,396909891(-0,224)^5 \\ & + 2,192970377(-0,224)^6 - 0,359495739(-0,224)^7. \end{aligned}$$

Então, $\log(T_{ef}) = 4,285436709$.

Resolvendo-se o logaritmo acima, a temperatura efetiva de Gamma Orionis é $T_{ef} = 19.295$ K. O mesmo procedimento deve ser usado para as demais estrelas da amostra. Os coeficientes devem ser usados de acordo com a classe a que a estrela pertence.

3.3.2. Luminosidade e raio estelar

A luminosidade de uma estrela depende tanto de sua temperatura quanto de seu raio. Por aproximação, a relação de Stefan-Boltzmann mostra que o fluxo na fotosfera de uma estrela é dado por $F \equiv \sigma T_{ef}^4$. Para uma estrela de raio R , sua luminosidade L é obtida multiplicando-se o fluxo na área da fotosfera por $4\pi R^2$, de modo que a luminosidade pode ser obtida a partir da relação

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{ef}^4, \quad (3)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann e vale $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

Neste trabalho não se discutirá o modo de determinar as medidas de luminosidade do conjunto de nossas estrelas, mas serão usadas as medidas disponíveis na base de dados do Vizier², do catálogo *Extended Hipparcos Compilation - XHIP*, publicado por Anderson e Francis [10]. Com o auxílio do professor, o aluno pode-

Tabela 4: Valores para luminosidade e raio estelar são estimados em relação ao Sol. A luminosidade solar é $L_{\odot} = 3,826 \times 10^{26} \text{ W}$ e o raio solar é $R_{\odot} = 6,957 \times 10^8 \text{ m}$.

Nome alternativo da estrela	Luminosidade ($L_{\odot}$)	Raio estelar ($R_{\odot}$)
Betelgeuse	36.554	395,17
Gamma Orionis	6.430	7,18
Kappa Orionis	15.106	12,21
Rigel	62.723	67,45
Zeta Orionis	78.180	20,51
Epsilon Orionis	112.138	28,57
Delta Orionis	39.340	28,97

rá determinar o raio das estrelas aplicando a Eq. (3). A Tabela 4 resume os resultados esperados para cada estrela.

Como determinar o raio de uma estrela? Utilizamos também a estrela gigante HIP 25336 para ilustrar o processo de determinação dessa luminosidade. Usando a Eq. (3), isolando o termo do raio e substituindo os valores de luminosidade e temperatura efetiva, temos que:

$$R = \sqrt{\frac{L_{\star}}{4\pi \cdot \sigma \cdot T_{\star}^4}}.$$

Substituindo os valores de luminosidade e temperatura efetiva da estrela, temos

$$R = \sqrt{\frac{6.430}{4\pi \cdot 5,67 \times 10^{-8} \cdot (19.295)^4}}.$$

Ao se dividir o resultado por $6,957 \times 10^8 \text{ m}$, obtém-se o raio de Gamma Orionis, cujo valor é de $R = 7,18$, isto é, 7,18 vezes o raio do Sol.

3.4. Diagrama Hertzsprung-Russell

Dois astrônomos do início do século XX, Ejnar Hertzsprung (1873-1967) e Henry Norris Russell (1877-1957), descobriram de modo independente uma importante relação observacional para comparar estrelas diferentes umas com as outras. Quando são plotados em um gráfico a luminosidade e a temperatura de estrelas diferentes, aquelas que apresentam brilho e cor semelhantes ficam agrupadas em uma região próxima no gráfico [11]. Esse gráfico ficou conhecido na astronomia como diagrama Hertzsprung-Russell (daqui para a frente será chamado apenas de diagrama HR).

O diagrama HR nos possibilita observar como ocorre a evolução das estrelas em diferentes estágios, considerando duas de suas características fundamentais: temperatura efetiva e luminosidade superficial. Os modelos estelares adotados para estudar a evolução de estrelas devem ser criteriosamente escolhidos, pois

fatores químicos, como a metalicidade, influenciam diretamente a evolução [12]. Contudo, até o momento da publicação deste guia didático, entre as estrelas mais brilhantes da constelação de Órion, apenas Betelgeuse e Gamma Orionis têm disponíveis na literatura medidas de metalicidade, o que limita a observação mais detalhada da evolução de todo o conjunto, tornando complexa a escolha de um modelo evolutivo adequado às estrelas da constelação de Órion. Por essa razão, as discussões futuras serão apenas sobre evolução na perspectiva geral, isto é, sem se levantar considerações pontuais sobre massa, metalicidade, gravidade superficial e outros parâmetros atmosféricos.

Na Fig. 3 temos um diagrama HR com 117.955 estrelas cujos dados foram extraídos do catálogo da ESA HIPPARCOS [10, 13], juntamente com nossa amostra de estrelas. No eixo das abscissas é plotada a temperatura efetiva, a qual cresce horizontalmente para a esquerda do diagrama. No eixo das ordenadas, é plotada a luminosidade estelar (em escala logarítmica), que

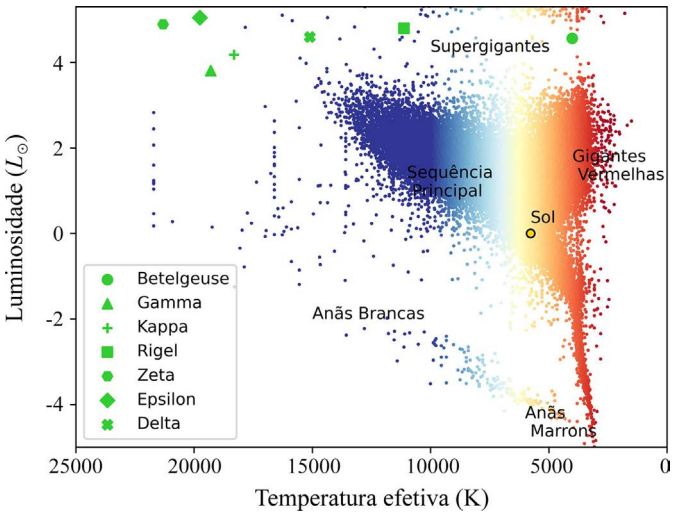


Figura 3 - Aqui temos o diagrama HR com as estrelas da Constelação de Órion, conforme indicado na legenda. Ao fundo, estão distribuídas todas as estrelas catalogadas pela ESA HIPPARCOS e que preenchem o diagrama para as demais fases evolutivas. O ponto amarelo representa a posição do Sol no diagrama, o qual encontra-se na fase da sequência principal. A temperatura efetiva do Sol e luminosidade são, respectivamente, $T_{\odot} = 5.778 \text{ K}$ e $L_{\odot} = 3,827 \times 10^{26} \text{ W}$.

aumenta na vertical, para cima. No diagrama é observado que as estrelas estão distribuídas em diferentes fases, desde a sequência principal, passando pelas gigantes vermelhas, algumas supergigantes e finalmente chegando ao estágio das anãs brancas.

Ainda sobre a Fig. 3, nota-se que as estrelas de nosso estudo estão distribuídas na região mais brilhante do diagrama, com temperaturas que variam entre 4.000 K e 22.000 K (ver Tabela 3). Exceto por Betelgeuse, cuja temperatura estimada neste trabalho é de 4.015 K, as demais estrelas são mais quentes que o Sol, cuja temperatura efetiva é de $T_{\odot} = 5.778 \text{ K}$. Note ainda que as estrelas mais frias estão localizadas na região mais à direita do diagrama; é o caso de Betelgeuse, motivo por que é classificada como supergigante vermelha. Por outro lado, estrelas cujas temperaturas são mais elevadas estão distribuídas na região mais à esquerda do diagrama. Kappa, Zeta, Epsilon Orionis e Rigel são classificadas como supergigantes azuis, enquanto as estrelas Gamma e Delta Orionis são gigantes azuis.

4. O guia didático

O intuito deste guia é elaborar uma base teórica e metodológica para o professor de educação básica sobre o ensino de astronomia, servindo como um material de apoio didático sobre conceitos físicos e técnicos pertinentes aos estudos da evolução estelar. O ensino de astronomia, embora seja muito rico, ainda é pouco explorado na perspectiva de uma abordagem metodológica que envolva dados reais no ensino básico. A capacidade de acessar, decodificar e tratar dados reais, além de ser estimulante, é fundamental para o processo de aprendizagem no âmbito do ensino de astronomia [14]. Então, busca-se aqui apresentar um guia didático para o estudo da evolução estelar, com ênfase na análise de dados reais para a constelação de Órion, aplicando-o no diagrama HR. É sugerido que este guia seja desenvolvido em dois momentos, com duas horas-aula para cada momento.

4.1. Primeiro momento: discussões teóricas

Como um mediador, o professor deve iniciar esse momento abrindo sua aula com provocações como:

Tabela 5: Resumo das principais medidas estelares.

Nome alternativo da estrela	Distância (pc)	Magnitude aparente V (mag)	Índice de cor (B - V)	Temperatura efetiva (T _{ef})	Luminosidade (L _⊙)	Raio (R _⊙)
Betelgeuse	152,62	0,45	1,5	4.015 K	36.554	395,17
Gamma Orionis	77,39	1,64	-0,224	19.295 K	6.430	7,18
Kappa Orionis	198,41	2,07	-0,168	18.315 K	15.106	12,21
Rigel	264,55	0,18	-0,030	11.122 K	62.723	67,45
Zeta Orionis	225,73	1,74	-0,199	21.310 K	78.180	20,51
Epsilon Orionis	606,06	1,69	-0,184	19.763 K	112.138	28,57
Delta Orionis	212,31	2,25	-0,175	15.104 K	39.340	28,97

- O que é uma estrela?
- Todas as estrelas são iguais?
- O que é uma constelação?
- Quais constelações você conhece?

À medida que as respostas surgirem, o professor conduzirá a discussão em direção às características gerais de uma estrela, como sua cor, seu brilho, sua distância, sua temperatura superficial e outros elementos físicos que foram apresentados nas seções 3.1, 3.2. e 3.3. deste trabalho. Após isso, o professor pode apresentar a constelação de Órion na perspectiva da Astronomia, isto é, apresentando as estrelas e enfatizando suas características físicas, além de uma breve discussão histórico-cultural, em caráter de interdisciplinaridade, comentando sobre o mito de Órion e ampliando esse diálogo na perspectiva dos povos originários brasileiros sobre essa constelação.

Após essa breve apresentação histórica/mitológica e a discussão dos conceitos físicos, o aluno deve ser estimulado a coletar os primeiros dados reais das sete estrelas mais brilhantes da constelação, visitando a base de dados do Vizier³ para obter as medidas de paralaxe π , magnitude aparente V , índice de cor e luminosidade. Caso não seja possível acessar os dados da base, o professor pode utilizar as informações previamente listadas nas Tabelas 1, 2 e 4.

Com as medidas de paralaxe e índice de cor, é possível determinar a distância e a temperatura efetivas de nossas estrelas usando as Eqs. (1) e (2), respectivamente. Os resultados obtidos pela Eq. (2) estão em logaritmo de base dez, então é preciso convertê-los para números inteiros. Com as medidas de luminosidade, é possível determinar o raio estelar usando-se a Eq. (3). A Tabela 5 resume os parâmetros físicos extraídos da base de dados e/ou medidos pelos alunos.

Para encerrar o primeiro momento, o professor deve retomar a provocação inicial que pergunta se *todas as estrelas são iguais*, usando como referência os dados resumidamente reapresentados na Tabela 5. Ao discutir que a luminosidade da estrela (ou brilho) não está univocamente relacionado à distância e/ou à temperatura, mas depende de uma relação mútua entre o raio estelar e a temperatura efetiva (Eq. (3)), então o aluno deverá ser capaz de observar que as estrelas são diferentes umas das outras, mesmo que algumas características possam ser similares, como a magnitude aparente V , o índice de cor ($B - V$) e a temperatura efetiva, como é facilmente observado no caso das estrelas Zeta e Epsilon Orionis, embora a luminosidade e o raio dessas estrelas tenham parâmetros físicos bastante diferentes. Sobre a evolução dessas estrelas, aconselha-se discuti-la no perfil geral do diagrama HR, mostrado a seguir. Sendo assim, esse primeiro momento deve ser limitado às discussões físicas gerais das estrelas de Órion e suas medições.

4.2. Segundo momento: elaboração do diagrama HR

Após as discussões e medições de luminosidade e temperatura efetiva na aula anterior (primeiro momento), agora é possível entender a evolução dessas estrelas utilizando o diagrama HR - uma poderosa ferramenta que nos ajudará a observar como as estrelas se modificam ao longo de sua vida. Há diversos simuladores online de diagrama HR e aqui utilizaremos para estudar a evolução estelar o laboratório virtual fornecido pelo Nebraska Astronomy Applet Project (NAAP)⁴ [15], idealizado pela Universidade de Nebraska-Lincoln.

A Fig. 4 apresenta a interface do simulador do diagrama HR dividido em quatro quadros. No quadro (i) é mostrada a comparação entre o Sol (em inglês, *sun*) e uma estrela teste (em inglês, *star*), cujas dimensões são alteradas ao passo que suas propriedades são definidas nos campos disponíveis no quadro (ii). Para o quadro (ii), é possível preencher os campos com as propriedades físicas fundamentais e obter o raio aproximado da estrela. No quadro (iii), é visto o diagrama HR com linhas de isorrádio (do inglês *isoradius lines*), além dos diferentes estágios evolutivos - sequência principal ou anãs (*Dwarfs*, V), gigantes (*Giants*, III), supergigantes (*Supergiants*, I) e anãs brancas (*White Dwarfs*). No quadro (iv), o usuário pode escolher um diagrama com *plot* contendo outras estrelas.

4.2.1. Um exemplo para o professor

A Fig. 4 representa o diagrama HR para uma estrela fictícia chamada de x . Os parâmetros dessa estrela foram definidos no quadro (ii) e sua comparação com o Sol é vista no quadro (i). O valor do raio estelar é obtido a partir de uma aproximação empírica mostrada no quadro (ii). Localizada na sequência principal (faixa verde que se estende da diagonal superior esquerda à inferior direita), portanto, é uma estrela com características evolutivas semelhantes ao Sol, com raio igual ao Sol ($1R_{\odot}$), contudo mais quente e luminosa que o mesmo, com $T_{\text{ef}} = 6.800 \text{ K}$ e $2L_{\odot}$.

A equação do raio estelar apresentada pelo simulador NAAP é uma aproximação derivada a partir da relação empírica luminosidade-temperatura, dada por

$$R_{\star} = \frac{\sqrt{L_{\star}}}{\left(\frac{T_{\star}}{T_{\odot}}\right)^2}, \quad (4)$$

onde $L_{\star}$ e $T_{\star}$ representam, respectivamente, a luminosidade e temperatura da estrela, enquanto $T_{\odot}$ é a temperatura do Sol. O simulador utilizou $T_{\odot} = 5.800 \text{ K}$. Os valores dos raios estimados pelo simulador podem não ter bons resultados para algumas estrelas além do escopo deste trabalho, pois a Eq. (4) não toma a mesma crimeza como feito na relação de Stefan-Boltzmann.

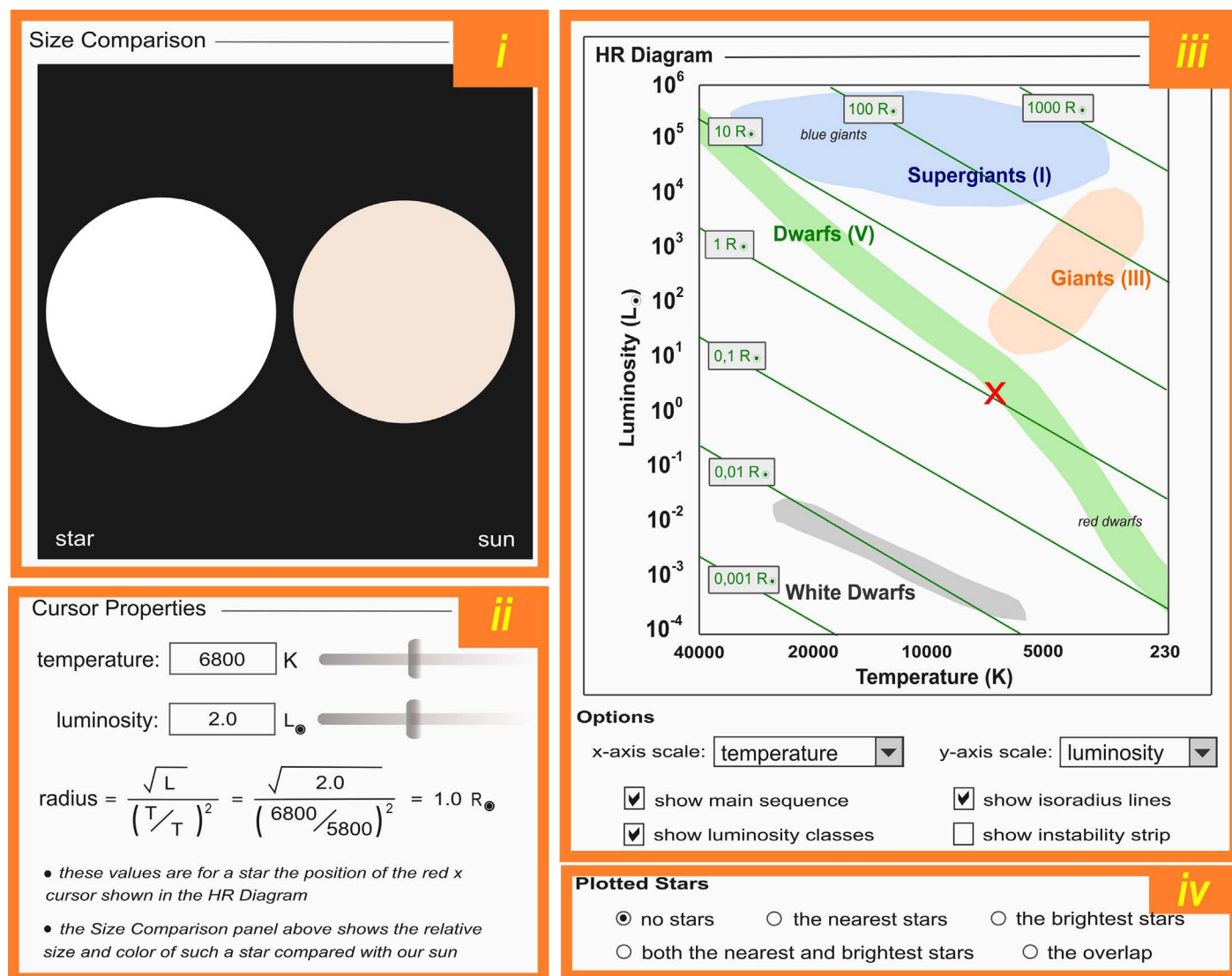


Figura 4 - Interface do simulador de diagramas HR, disponível no *website* da Universidade de Nebraska-Lincoln. O quadro (i) mostra o Sol (em inglês, *sun*) como referência e outra estrela cuja temperatura é 6.800 K, luminosidade $2,0L_{\odot}$ e raio $1,0R_{\odot}$. No quadro (ii), há dois campos que podem ser preenchidos com propriedades básicas, as quais nos permitem conhecer o valor aproximado do raio estelar (em inglês, *radius*). No quadro (iii), é visto o diagrama HR destacando os diferentes estágios evolutivos. No quadro (iv), o usuário tem a opção de plotar seu diagrama com outras estrelas, se desejar.

4.2.2. A constelação de Órion e o diagrama HR

Preenchendo-se os campos do quadro (ii) na Fig. 4 com os valores de temperatura efetiva e luminosidade estelar, são obtidos resultados como os mostrados na Fig. 5. Cada painel da Fig. 5 apresenta o diagrama de sua respectiva estrela, além de suas propriedades físicas básicas. O simulador NAAP gera um diagrama para cada estrela, por isso aconselha-se imprimir os diagramas como forma de registro para analisá-los posteriormente.

O painel viii da Fig. 5 sumariza a distribuição das estrelas de nossa amostra ao longo do diagrama HR. Note que suas posições no diagrama não coincidem com suas posições relativas no céu noturno, de modo que não apresenta a forma do caçador mostrada na

Fig. 1. Essa observação deve ser enfatizada, haja vista que as constelações são apenas projeções relativas vistas a partir de um observador na Terra.

As estrelas Betelgeuse (painel i da Fig. 5), Kappa (painel iii da Fig. 5), Rigel (painel iv da Fig. 5), Zeta (painel v da Fig. 5) e Epsilon (painel vi da Fig. 5) estão localizadas na região das supergigantes, as quais são mais evoluídas que as gigantes. As supergigantes são massivas e podem atingir valores de até $70M_{\odot}$, isto é, 70 vezes a massa do Sol, além de serem bastante luminosas. Quanto mais massiva for uma estrela, mais rapidamente ela consome elementos em seu interior, por isso elas têm um ciclo de vida que varia em alguns poucos milhões de anos (entre 10 e 50 milhões). Quando o hidrogênio começa a se exaurir, novos elementos passam a ser consumidos nas camadas mais internas da

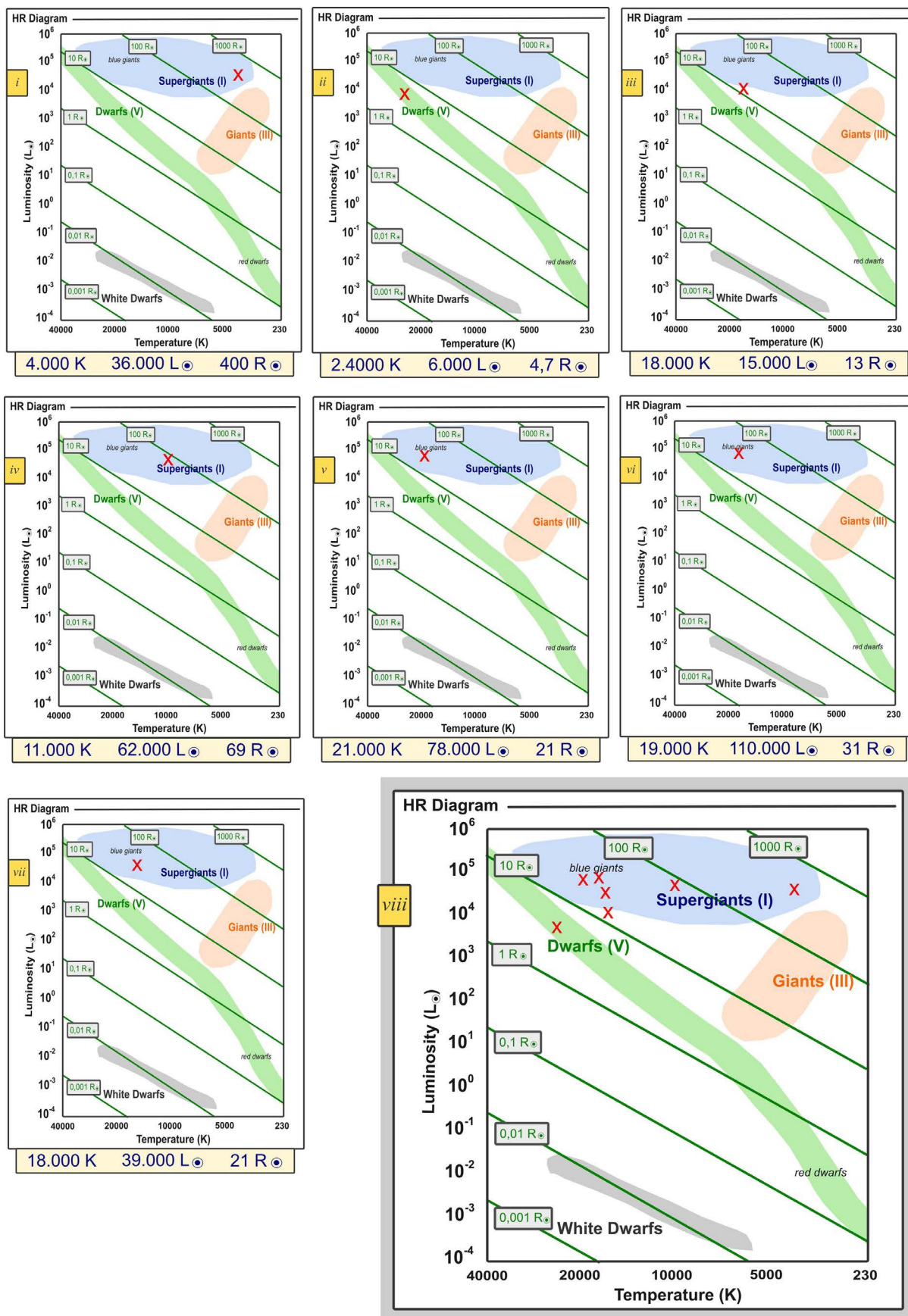


Figura 5 - painel i: Betelgeuse; painel ii: Gamma Orionis; painel iii: Kappa Orionis; painel iv: Rigel; painel v: Zeta Orionis; painel vi: Epsilon Orionis; painel vii: Delta Orionis; painel viii: diagrama para todas as estrelas.

estrela, então elementos cada vez mais pesados começam a ser forjados em seu interior [7,16]. Por conta das convecções das camadas internas, esses elementos são encontrados na superfície dessas estrelas, dando-lhes uma tonalidade azulada, justificando assim a coloração das estrelas mais quentes de nossa amostra, como visto nos painéis *a*, *b*, *c*, *d*, *e* e *f* da Fig. 2.

As supergigantes são classificadas em Ia e Ib, sendo a classe Ia mais luminosa que a Ib. As estrelas Betelgeuse e Zeta Orionis são da classe de luminosidade Ib. Kappa Orionis, Rigel e Epsilon Orionis são da classe de luminosidade Ia. À direita do diagrama HR estão localizadas estrelas mais frias, que, devido à expansão de suas camadas externas, têm coloração avermelhada, como Betelgeuse. As demais supergigantes estão à esquerda do diagrama e são mais quentes. Todas essas estrelas são mais brilhantes que o Sol, com medidas que variam entre $10^3 L_{\odot}$ e $10^5 L_{\odot}$ (como mostrados na Tabela 4), e seus raios variam desde algumas unidades até centenas de vezes maiores que o raio solar.

A luminosidade dessas estrelas é expressa em escala logarítmica. Embora a luminosidade esteja relacionada com o raio da estrela, ela também depende de outros fatores atmosféricos, como a temperatura efetiva, a atividade magnética e a queima de metais [7]. Por isso, não é possível associar univocamente a intensidade do brilho de uma estrela ao seu raio.

As estrelas Gamma Orionis (painel *ii* da Fig. 5) e Delta Orionis (painel *vii* da Fig. 5) são classificadas como gigantes e suas classes de luminosidade são III e II, respectivamente. Gamma Orionis está abaixo da região das supergigantes, como esperado, porém, encontra-se na faixa da sequência principal do simulador. Delta Orionis está na região das supergigantes azuis, embora devesse estar localizada na região das gigantes.

Estrelas gigantes com temperaturas superiores a 10.000 K geralmente estão distribuídas em uma região tênue do diagrama HR, cujas classes de luminosidade das gigantes podem se confundir com a sequência principal, como acontece com Gamma Orionis. Já a localização de Delta Orionis no diagrama pode ser devida a um viés nas medidas de luminosidade, as quais estão disponíveis no catálogo utilizado neste trabalho, ou um efeito gráfico gerado pelo simulador que pode ter delimitado imprecisamente as regiões da sequência principal e das supergigantes.

O simulador NAAP tem uma limitação técnica observada no quadro (*ii*) da Fig. 4. Os campos vazios reservados para o preenchimento de dados não recebem a parte das dezenas do valor de temperatura e a parte das centenas do valor de luminosidade. No painel *viii* da Fig. 5, vemos a distribuição das sete estrelas de Órion em um único diagrama. Esse painel não foi gerado usando o NAAP, mas a partir dos dados obtidos nele. Comparando o diagrama HR da Fig. 3, gerado a partir

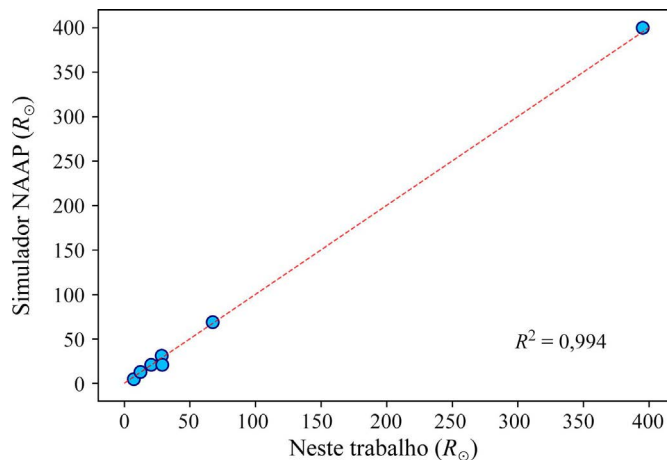


Figura 6 - Gráfico de dispersão com linha de tendências. Os dados aqui comparados, medidas feitas neste trabalho vs. medidas obtidas pelo NAAP, apresentam uma correção próxima, cujo $R^2 = 0,9994$.

dos dados obtidos ao longo deste trabalho, com o painel *viii* da Fig. 5, vemos que ambos estão em acordo.

Embora o simulador NAAP demonstre algumas limitações técnicas, as medidas dos raios estelares calculados por ele apresentam baixíssimas diferenças em relação às medidas dos raios estelares obtidas com a equação de Stefan-Boltzmann. O gráfico de dispersão da Fig. 6 nos mostra que os dados obtidos pelas Eqs. (3) e (4) têm correlação entre si de 99,94%. Isso nos permite concluir que o simulador NAAP - apesar de algumas ressalvas - é uma ferramenta didática com boas aproximações para as estrelas aqui estudadas, permitindo-nos conhecer mais sobre a evolução das estrelas ao longo do diagrama HR.

5. Considerações finais

Neste artigo, foi apresentado um guia didático para o ensino de astronomia na educação básica. O principal intuito é possibilitar ao professor um material didático sobre os estudos da evolução estelar na perspectiva do diagrama Hertzsprung-Russell, enriquecendo sua prática docente ao mesmo tempo que dá aos alunos condições de praticar uma astronomia profissional e realista, pois, além de expandir seus conhecimentos sobre as características físicas de estrelas, o manuseio e o tratamento de dados reais da constelação de Órion, estimula-os a se desenvolverem como pesquisadores.

Este trabalho pode ser usado como um material de apoio e complementar à formação de professores de física com interesse em ampliar seus conhecimentos de astronomia. Ao modificar suas práticas de ensino, o educador não enrijece seus parâmetros didáticos em um único método, mas diversifica-os com temas atuais e instigantes [14]. Tomando essa vertente como verdadeira e partindo das provocações feitas pelo professor sobre as estrelas e constelações e ao aplicar fórmulas, discutir os resultados e finalmente a elaborar o dia-

grama HR, o aluno alcança o entendimento de que as estrelas evoluem de modo diferente umas das outras. Embora tenham cores semelhantes e pareçam pertencer à mesma região do espaço (na perspectiva de uma constelação), as estrelas podem ser distintas em outros parâmetros físicos, como temperatura efetiva, raio, luminosidade etc.

Além da ação ativa dos alunos e das mediações oportunas e sistemáticas do professor, este guia didático viabiliza discussões mais profundas sobre parâmetros físicos, técnicas de medidas e evolução das estrelas, tendo em vista uma compreensão contextualizada do conteúdo científico, afastando-se de noções equivocadas de conceitos não críticos [17], como o caso da luminosidade e do raio estelar, a cujo respeito há conceitos populares equivocados. O letramento científico é um ponto crucial na formação dos estudantes contemporâneos, pois não se trata apenas da capacidade de compreender e interpretar o mundo, em seus âmbitos social, natural e tecnológico, mas de ser ativo, usando os aportes teóricos e processuais das ciências [1].

Este trabalho mostrou que apesar de suas limitações quanto às estimativas dos raios estelares e às posições das estrelas no diagrama HR, os resultados obtidos pelo simulador NAAP são satisfatórios, pois acomodam

as expectativas de aprendizado acerca dos conceitos de evolução ao longo do diagrama HR. Se a quantidade de materiais de apoio e o incentivo ao professor forem aumentados, é possível que muito mais práticas de ensino de astronomia sejam realizadas na escola [18]. Este guia didático foi realizado na turma da 1ª série do Ensino Médio da escola Instituto Santa Teresinha, em Bragança, PA. Na ocasião, foram utilizadas planilhas eletrônicas e calculadoras para agilizar e facilitar os cálculos matemáticos. Apesar de esta proposta pedagógica não apresentar um balizador avaliativo, acreditamos ter obtido resultados satisfatórios no desempenho dos alunos durante a aplicação deste guia. Portanto, é esperado que esta proposta didática produza uma curva de aprendizado bastante significativa, haja vista que os discentes lidam com conceitos, equações, simulador e diagrama. Por fim, esperamos que este trabalho possibilite ao professor e ao aluno olhar para o céu noturno de outra forma.

Agradecimentos

Agradeço a Aline Sarubby e a Janilson Matos pelas considerações a este trabalho.

Recebido em: 21 de Março de 2024

Aceito em: 16 de Junho de 2025

Notas

¹A isócrona é uma curva baseada em modelos evolutivos cujas condições iniciais são predefinidas, como a idade e metalicidade. No diagrama Hertzsprung-Russell, as isócronas ajudam a entender a posição evolutiva das estrelas com a mesma idade, mas massas diferentes.

²Veja no Apêndice A o passo a passo para obtenção de dados.

³Disponíveis em <https://vizier.cds.unistra.fr/viz-bin/VizieR>.

⁴Disponível em <https://astro.unl.edu/naap/hr/animations/hr.html>

Referências

- [1] R.S.C. Leão, M.R.F. Teixeira, Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia - RELEA **30**, 115 (2020). Disponível em <https://www.relea.ufscar.br/index.php/relea/article/view/498>
- [2] L.L.A. de Oliveira, *Sobre o Comportamento Rotacional das Estrelas Evoluídas de Classe de Luminosidade Ib, II, III e IV*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.
- [3] Brasil, Ministério da Ciência e Tecnologia, Comissão Nacional de Astronomia, *Plano Nacional de Astronomia - PNA* (Ministério da Ciência e Tecnologia, Brasília, 2010).
- [4] R. Langhi, R. Nardi, Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia **2**, 75 (2005). doi
- [5] G.L.P. Renner, Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia **25**, 39 (2018). doi
- [6] J. Irwin e cols, Monthly Notices **392**, 1456 (2009). doi
- [7] S.G. Sichevskij, Astronomy Reports **60**, 816 (2016). doi
- [8] P.J. Flower, The Astrophysical Journal **469**, 355 (1996). doi
- [9] G. Torres e cols, The Astrophysical Journal **140**, 1158 (2010). doi
- [10] E. Anderson, Ch. Francis, Astronomy Letters **38**, 331 (2012). doi
- [11] AAVSO, *Stellar Evolution*. 2023. Disponível em <https://www.aavso.org/stellar-evolution>, acesso em 28/12/2023.
- [12] L.L.A. de Oliveira, *A Rotação Estelar Revelada Pela Modulação Fotométrica*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2019.
- [13] F. van Leeuwen, A&A **474**, 653 (2007). doi
- [14] R.S. Sobrinho, L.L.A. de Oliveira, A Física na Escola **20**, 2012013 (2022). doi
- [15] Nebraska Astronomy Applet Project - NAAP. Universidade do Nebraska-Lincoln. 2013. Disponível em <https://astro.unl.edu/naap/hr/animations/hr.html>, acesso em 30/12/2023.
- [16] C. Soubiran, J.L. Campion, N. Brouillet, L. Chemin, A&A **591**, A118 (2016). doi
- [17] J.B. de Oliveira, J.M. Hidalgo, A Física na Escola **20**, 210706 (2021). doi
- [18] C.M. Sitko, M.C. Batista, O.R. Santos, A Física na Escola **21**, 230042 (2023). doi

Apêndice

O Vizier é uma plataforma eletrônica que fornece catálogos astronômicos, cujos dados são livremente disponíveis e essencialmente dedicados a utilização científica e gratuita. Neste apêndice será apresentado passo-a-passo como o usuário pode extrair os dados tratados neste artigo. Já na página inicial do site do Vizier, o usuário deve preencher o campo de busca como nome do catálogo usado neste trabalho (*Extended Hipparcos Compilation - XHIP*), ou apenas suas iniciais – XHIP e clicar em *find* (do inglês buscar), conforme mostrado na Fig. 7.

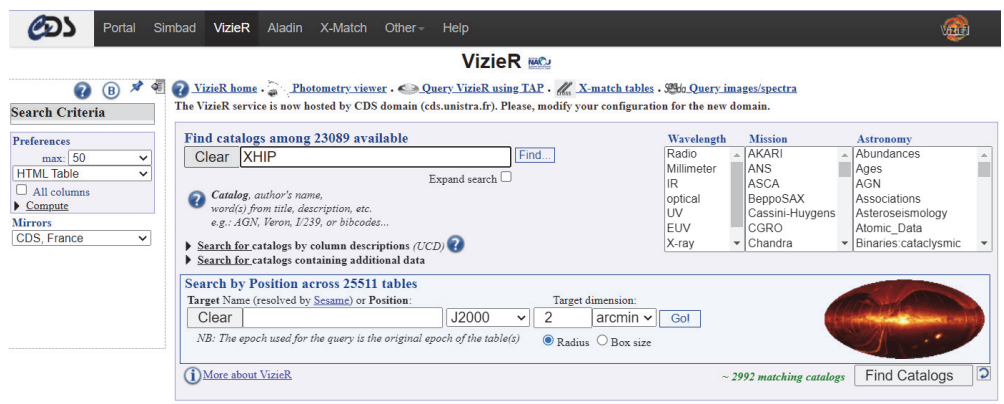


Figura 7 - Página inicial do Vizier.

Após o passo anterior, o usuário será redirecionado para a página seguinte, como mostrado na Fig. 8. Nesta página é apresentado os catálogos que pertencem à missão HIPPARCOS. Neste trabalho foi usado o catálogo V/137D/XHIP dos autores E. Anderson e Ch. Francis [10] (Fig. 8). Clique no link que corresponde ao catálogo usado.

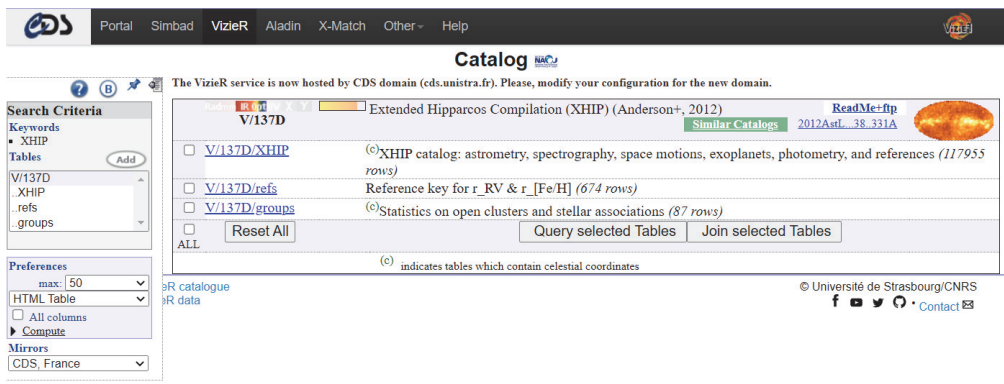


Figura 8 - Página da lista dos catálogos XHIP, 2012.

O VizieR tem um processo de busca de dados baseado em raio de atuação, por isso, é necessário limitar sua busca para 2 arcsec (como mostrado no quadro (a) da Fig. 9), a fim de obter apenas os dados da estrela alvo, caso contrário, por padrão, o catálogo retornará com informações de outras estrelas compreendidas nos limites definidos em *Target dimension* para 2 arcmin, o qual está muito além do nosso interesse.

Para facilitar a experiência do professor e/ou aluno, é sugerido que seja buscado individualmente os dados de cada estrela, sendo assim, o item HIP deve ser marcado e preenchido com o identificador¹ da estrela (confira os identificadores das estrelas da constelação de Órion na tabela 1). Após isto, o usuário deve marcar apenas os itens de interesse deste trabalho, como a paralaxe (Plx), magnitudes aparentes B mag e V mag, o índice de cor (B-V) e a luminosidade estelar (Lum), como ilustrado no quadro (b) da Fig. 9. Todos os demais itens devem ser desmarcados e finalmente o usuário deve clicar em *Submit* para que VizieR retorne apenas com os dados da estrela. Na página seguinte, será listado os dados obtidos pela missão HIPPARCOS (veja a Fig. 10), cujos parâmetros foram previamente definidos (como mostrados na Fig. 9).

É sugerido que os dados sejam anotados separadamente em uma folha de papel ou em uma planilha digital. O processo deve ser repetido para as demais estrelas somente a partir da Fig. 9.

¹ Use apenas o número do identificador, por exemplo, para a estrela Betelgeuse, cujo identificador é HIP 27989, preencha o campo HIP apenas com 27989.

b

a

