



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Observatório do Valongo
Curso de Graduação em Astronomia



Estudo e classificação de candidatas a Pós-AGB a partir da
análise das propriedades da estrela central e do envoltório
circunstelar

Thiago Flaulhabe Xavier Gomes

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2023

Estudo e classificação de candidatas a Pós-AGB a partir da
análise das propriedades da estrela central e do envoltório
circunstelar

Thiago Flaulhabe Xavier Gomes

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Curso
de Graduação em Astronomia do Observatório do
Valongo, Universidade Federal do Rio de Janeiro,
como requisito necessário para a obtenção do título
de Astrônomo.

Orientadora: Silvia Lorenz-Martins

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2023

CIP - Catalogação na Publicação

X3e Xavier Gomes, Thiago Flaulhabe
 Estudo e classificação de candidatas a Pós-AGB a
partir da análise das propriedades da estrela
central e do envoltório circunstelar / Thiago
Flaulhabe Xavier Gomes. -- Rio de Janeiro, 2023.
 151 f.

 Orientadora: Silvia Lorenz-Martins.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Observatório
do Valongo, Bacharel em Astronomia, 2023.

 1. Estrelas: AGB e Pós-AGB. 2. Estrelas:
envoltório circunstelar. 3. Infravermelho: diagramas
cor-cor. I. Lorenz-Martins, Silvia, orient. II.
Título.



PROJETO FINAL

RELATÓRIO DA COMISSÃO JULGADORA

ALUNO: Thiago Flaulhabe Xavier Gomes (DRE 118109990)

TÍTULO DO TRABALHO: “ESTUDO E CLASSIFICAÇÃO DE CANDIDATAS A PÓS-AGBS A PARTIR DA ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DA ESTRELA CENTRAL E DO ENVOLTÓRIO CIRCUNSTELAR”

DATA DA DEFESA: 27 de fevereiro de 2023 às 15:00h

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA:

Prof.ª Sílvia Lorenz Martins – (Orientadora/Presidente - OV/UFRJ)

Dr. Cláudio Bastos – (ON/MCTIC)

Dr. Daniel Mello – (OV/UFRJ)

Dr. Wagner Marcolino – (OV/UFRJ)

CANDIDATO:

Thiago Flaulhabe Xavier Gomes

Rio de Janeiro, 27 de fevereiro de 2023.

Prof. Carlos Roberto Rabaça
Coord. de Grad. do Curso de Astronomia

O presente trabalho foi realizado com apoio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica associado à Universidade Federal do Rio de Janeiro (PIBIC-UFRJ).

À minha família, que me ensina a perseverar.

Aos meus amigos, que me ensinam a sorrir.

Ao meu Mestre da vida, que me inspira a sonhar.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço à minha mãe, que sempre me apoiou e me incentivou a seguir os meus sonhos, e que desde pequeno me ensinou que a primeira pessoa com quem eu sempre poderia contar era eu mesmo. Agradeço à minha avó pela alegria, e ao meu avô pelo seu zelo e preocupação, e a ambos pelo carinho que sempre recebi.

Em segundo, agradeço à toda a comunidade do Observatório do Valongo da UFRJ. Aos professores, funcionários e alunos, que fizeram o observatório se tornar uma segunda casa pra mim: uma ambiente acolhedor, onde pude viver tantas experiências únicas e incríveis. Em particular, agradeço à minha orientadora, Silvia, que me conduziu ao longo dessa primeira etapa da minha vida acadêmica. Agradeço aos meus veteranos, que nunca pouparam esforços pra me ajudar no que fosse necessário: em especial, agradeço ao Eduardo pelo apoio dado em tantas situações, e à Yanna, cujos conselhos me marcaram tanto e guardo no coração. Agradeço aos meus companheiros de 2018, com quem pude compartilhar grande parte da minha graduação: em especial, agradeço ao Eric, ao Micah e ao Marco, de quem pude me aproximar bastante nesses últimos tempos, por todo o apoio, por serem amigos tão incríveis e pela grande fonte de inspiração que são. E agradeço também aos meus calouros: em particular, o Pedro, a Roberta, a Isabelle, o Pedro Henrique e o Matheus, que me apoiaram em um momento tão difícil. O apoio e a ajuda de vocês foi mais importante do que vocês imaginam.

Por fim, agradeço ao meu Mestre da vida, o terceiro presidente da organização budista Sokka Gakkai Internacional, Dr. Daisaku Ikeda, que não poupou e até hoje não poupa esforços para propagar os ensinamentos do budismo de Nichiren Daishonin por todo o mundo, com o objetivo de levar felicidade à todas as pessoas utilizando como base os princípios de paz, cultura e educação. Seus incentivos são os que me fazem continuar seguindo em frente, mesmo nos momentos mais difíceis da minha vida. Muito obrigado, *sensei!*

*“Que soprem furiosos os ventos!
Que se elevem bravias as ondas!
Eu sou a juventude.
O estandarte escarlate
Que tremula na tormenta.”*

— Daisaku Ikeda

Resumo

Estudo e classificação de candidatas a Pós-AGB a partir da análise das propriedades da estrela central e do envoltório circunstelar

Thiago Flaulhabe Xavier Gomes

Orientadora: Silvia Lorenz-Martins

RESUMO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA DO OBSERVATÓRIO DO VALONGO, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO REQUISITO NECESSÁRIO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE ASTRÔNOMO.

Objetos Pós-AGB são aqueles que estão em um estágio evolutivo extremamente importante, mas ainda pouco entendido, da evolução de estrelas de baixas massas e massas intermediárias. Devido à curta duração dessa fase, esses objetos são pouco numerosos na nossa Galáxia, porém, existem diferentes classes de Pós-AGBs, que são definidas pelas características espectrais observadas nas diferentes faixas do espectro eletromagnético. O estudo dos objetos Pós-AGB de diferentes classes possui grande relevância científica, uma vez que estes fornecem uma interessante interface entre os processos físicos e químicos que ocorrem a baixas temperaturas, como a nucleação de grãos, e processos que necessitam de altas energias, geradas por choques e/ou radiação ultravioleta. Neste trabalho, a partir de uma amostra de 69 estrelas Pós-AGB e 10 candidatas a Pós-AGB, desenvolvemos um estudo das propriedades do envoltório circunstelar e da estrela central desses objetos, com base no conhecimento atual presente na literatura. Para isso, analisamos a espectroscopia no óptico e no infravermelho como ferramentas para definir características espectrais que podem ser utilizadas para classificar esses objetos. Nossa amostra conta com 6 classes de Pós-AGBs, caracterizadas principalmente pela química do envoltório: Pós-AGBs carbonadas, Pós-AGBs oxigenadas, Pós-AGBs de química dupla, objetos 21 μm , RV Tauri e Water Fountains. Como resultado, discutimos as propriedades observadas nas Distribuições Espectrais de Energia (SEDs) das Pós-AGBs da amostra, e apresentamos diagramas cor-cor com cores no infravermelho que podem ser utilizadas para separar certas classes, em particular, as classes RV Tauri, 21 μm e Water Fountain. A partir desses resultados, sugerimos uma classificação preliminar da química do envoltório das candidatas a Pós-AGB da nossa amostra que ainda são pouco estudadas na literatura.

palavras chave: *estrelas: AGB e Pós-AGB, estrelas: envoltório circunstelar, infravermelho: diagramas cor-cor*

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2023

Abstract

Study and classification of Post-AGB stars based on the analysis of the properties of the central star and the circumstellar envelope

Thiago Flaulhabe Xavier Gomes

Advisor: Silvia Lorenz-Martins

UNDERGRADUATE THESIS ABSTRACT SUBMITTED TO THE ASTRONOMY COURSE OF THE VALONGO OBSERVATORY, FEDERAL UNIVERSITY OF RIO DE JANEIRO, IN FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF ASTRONOMER.

Post-AGB objects are those that are going through an extremely important, but still poorly understood, evolutionary stage of the evolution of low-mass and intermediate-mass stars. Due to the short duration of this phase, these objects are few in number in our Galaxy, however, there are different classes of Post-AGBs, which are defined by the spectral characteristics that are observed in the different bands of the electromagnetic spectrum. The study of Post-AGB objects of different classes has great scientific relevance, since they provide an interesting interface between physical and chemical processes that occur at low temperatures, such as grain nucleation, and processes that require high energies, generated by shocks and/or ultraviolet radiation. In this work, from a sample of 69 Post-AGB stars and 10 Post-AGB candidates, we developed a study of the properties of the circumstellar envelope and the central star of these objects, based on the current knowledge present in the literature. We analyze optical and infrared spectroscopy as tools to define spectral characteristics that can be used to classify these objects. Our sample has 6 classes of Post-AGBs, characterized mainly by the chemistry of the envelope: carbon-rich Post-AGBs, oxygen-rich Post-AGBs, double-chemistry Post-AGBs, 21 μm objects, RV Tauri and Water Fountains. As a result, we discuss the observed properties of the Spectral Energy Distributions (SEDs) of the Post-AGBs in the sample, and present color-color diagrams with infrared colors that can be used to separate certain classes, in particular, the RV Tauri, 21 μm and Water Fountain. Based on these results, we suggest a preliminary classification of the circumstellar envelope chemistry of Post-AGB candidates in our sample, which are still understudied in the literature.

keywords: *stars: AGB and Post-AGB, stars: circumstellar envelope, infrared: color-color diagrams*

Rio de Janeiro
February 2023

Lista de Figuras

- 1.1 A figura apresenta os três ramos da cadeia pp, mostrando as reações completas de cada um, junto com as probabilidades de ocorrência no caso do núcleo solar. Retirado de Carroll & Ostlie (2017). 27
- 1.2 Trajetórias evolutivas da sequência principal e pós-sequência principal para estrelas com diferentes valores de massa inicial, e metalicidade fixa. No eixo horizontal está representado o logaritmo da temperatura efetiva estelar, em K, e no eixo vertical está representado o logaritmo da razão entre a luminosidade estelar e a luminosidade solar. A posição do Sol está marcada com o símbolo \odot na trajetória de $1 M_{\odot}$. A linha diagonal representa a sequência principal de idade-zero. Retirado de Carroll & Ostlie (2017). 28
- 1.3 Esquema de uma estrela de $5 M_{\odot}$ com um núcleo de Hélio e uma camada de queima de hidrogênio, logo após o fim da SP. Retirado de Carroll & Ostlie (2017). 30
- 1.4 Esquema da trajetória evolutiva de uma estrela de baixa massa de $1 M_{\odot}$. Retirado de Carroll & Ostlie (2017). 31
- 1.5 Esquema da trajetória evolutiva de uma estrela de massa intermediária de $5 M_{\odot}$. Retirado de Carroll & Ostlie (2017). 31
- 1.6 Esquema do interior de uma estrela de $5 M_{\odot}$ na fase E-AGB, com um núcleo de CO, uma camada de queima de hidrogênio e uma camada de queima de hélio. Retirado de Carroll & Ostlie (2017). 35
- 1.7 Diagrama HR mostrando a evolução de uma estrela de $2 M_{\odot}$ com metalicidade solar, desde a Sequência Principal (em verde) até a fase de Anã Branca (em azul). Os números representam o logaritmo da duração aproximada, em anos, de cada fase para esse caso. Retirado de Herwig (2005). 38
- 1.8 Distribuição espectral de energia de uma Pós-AGB mostrando a característica emissão de duplo pico: o primeiro associado à emissão da estrela central no óptico, e o segundo associado à emissão dos grãos presentes no envoltório, no infravermelho. Retirado de van Winckel (2003). 39

- 2.1 Espectros ópticos de seis estrelas Pós-AGB carbonadas, mostrando as linhas em 4715 e 4737Å de C_2 , e uma linha de Ba II em 4554Å , encontradas no espectro dessa classe de estrelas, junto com a marcação de outras linhas proeminentes. Retirado de Hrivnak (1995). 42
- 2.2 Espectros da Figura 2.2 expandidos mostrando as linhas de C_3 em 3991 e 4050Å , de CN em 4216Å , e uma linha de Sr II em 4077Å , entre outras linhas proeminentes. Retirado de Hrivnak (1995). 43

2.3	Espectros de alta resolução de seis estrelas Pós-AGBs carbonadas no intervalo de 9 a 21 μm , mostrando alguns dos componentes espectrais esperados para essa classe de objetos, como a banda em 13.7 μm , marcada na figura, associada à molécula de C_2H_2 . Retirado de Hrivnak et al. (2009).	43
2.4	Espectros Spitzer IRS de alta resolução de sete fontes 21 μm , com cada um mostrando a banda característica dessa classe de objetos. Retirado de Hrivnak et al. (2009).	45
2.5	Espectro de alta resolução na região do óptico da Pós-AGB quente IRAS 22023+5249, mostrando algumas linhas de O II em absorção e a linha de $\text{H}\gamma$ em emissão. O eixo horizontal é medido em angstroms. Retirado de Sarkar et al. (2012).	47
2.6	Espectro na região do infravermelho da Pós-AGB oxigenada IRAS 19386+0155, mostrando a componente de emissão associada a silicatos amorfos em 18 μm . Retirado de Pereira et al. (2004).	48
2.7	O mesmo que a Figura 2.6, mas mostrando componentes de CO_2 e H_2O entre 4 e 7 μm . Neste objeto, a componente em 6 μm associada ao gelo de H_2O está ausente. Retirado de Pereira et al. (2004).	48
2.8	Espectro de Pós-AGBs de química dupla mostrando componentes carbonadas em 6.2 e 7.7 μm , associadas a PAHs, e a banda em 9.7 μm associada a grãos de silicato amorfo. À direita são mostrados os espectros inteiros obtidos, e à esquerda o intervalo de 5 a 14 μm do mesmo espectro após a subtração do contínuo. Retirado de Cerrigone et al. (2009).	49
2.9	Curva de luz visual da RV Tauri R Sct, com magnitudes calculadas em intervalos de 5 dias. A linha vertical representa a data da observação ISO/SWS. Retirado de Matsuura et al. (2002).	52
2.10	Espectro ISO/SWS da RV Tauri R Sct (espectro inferior), com indicação das componentes moleculares mais proeminentes. O espectro superior é da estrela AGB oxigenada <i>o</i> Cet. Observamos a componente característica de envoltórios oxigenados em 9.7 μm , associada a grãos de silicatos amorfos. Retirado de Matsuura et al. (2002).	52
3.1	Distribuição Espectral de Energia da Pós-AGB não-binária IRAS Z02229+6208. Os símbolos coloridos representando a fotometria deste objeto em diferentes bandas, a linha sólida preta representa o modelo de atmosfera sem avermelhamento, e a linha vermelha é o modelo com avermelhamento ajustado aos dados observados. Retirado de Kamath et al. (2022).	57
3.2	SED da Pós-AGB binária IRAS 08544-4431. Os dados fotométricos são representados pelos símbolos coloridos. Retirado de Kluska et al. (2022).	58
3.3	SED da Pós-AGB binária IRAS 18281+2149. Os dados fotométricos são representados pelos símbolos coloridos. Retirado de Kluska et al. (2022).	58
3.4	Temperatura efetiva em função do índice de cor B-V para estrelas de tipos espectrais entre F e K e metalicidades dentro de diferentes intervalos, conforme representado pelos diferentes símbolos na figura. (Sekiguchi & Fukugita, 2000)	60
3.5	Diagrama cor-cor para estrelas do aglomerado aberto NGC 6866. A linha preta pontilhada representa a inclinação e a direção do vetor de avermelhamento e a curva sólida representa a Sequência Principal de Idade Zero. (Joshi et al., 2012)	60

3.6	Regiões do diagrama cor-cor IRAS que separam diferentes tipos de objetos com envoltório circumstelar. A linha pontilhada representa a trajetória evolutiva de AGBs ricas em O e a linha cheia representa a curva de corpo negro da poeira circumstelar. Retirado de van der Veen & Habing (1988).	62
3.7	Diagrama cor-cor IRAS com as regiões definidas por van der Veen & Habing (1988), denotadas por numerais romanos, e a região de Pós-AGBs e NPs definida por Garcia-Lario et al. (1997), em linha pontilhada. A linha reta representa a curva de corpo negro. Retirado de Molina et al. (2019).	63
3.8	Diagrama cor-cor com as cores [8.28]-[14.65] e [14.65]-[21.34] mostrando AGBs, Pós-AGBs e nebulosas planetárias. Além disso, são mostradas trajetórias evolutivas de AGBs oxigenadas e AGBs carbonadas de diferentes modelos teóricos. Retirado de Suh (2015).	63
3.9	O mesmo que a Figura 3.8, mas mostrando trajetórias evolutivas de Pós-AGBs carbonadas e oxigenadas. Observamos que as trajetórias evolutivas de Pós-AGBs oxigenadas e de Pós-AGBs carbonadas não apresentam uma clara separação neste diagrama. Retirado de Suh (2015).	64
3.10	Diagrama cor-cor WISE mostrando as regiões para objetos com disco (<i>disc box</i>) e para objetos com envoltório (<i>shell box</i>) definidas para uma amostra de referência de RV Tauri com SEDs de tipo disco (pontos azuis) e com SEDs de tipo envoltório (quadrados vermelhos). Retirado de Gezer et al. (2015).	65
3.11	O mesmo que a Figura 3.10, mas dessa vez mostrando uma terceira região (<i>non-IR box</i>) para RV Tauri sem excesso no infravermelho (triângulos verdes). Na figura, as RV Tauri de tipo disco são agora mostradas com losangos azuis. Retirado de Gezer et al. (2015).	65
3.12	Modelo de envoltório que melhor se ajusta à observação ISO da fonte IRAS 22177+5936, mostrando a banda em $9.7 \mu\text{m}$ característica da natureza oxigenada do envoltório. Retirado de Khouri (2010).	67
3.13	Modelos de envoltórios oxigenados de Pós-AGBs para diferentes valores de temperatura efetiva T_{eff} da estrela e de temperatura interna T_c do envoltório. Retirado de Suh (2015).	67
3.14	Modelo de envoltório circumstelar com grãos de SiC, mostrando como a distribuição espectral de energia varia com a variação do raio interno R_1 , em função de raios estelares, mantendo-se todos os outros parâmetros do modelo padrão constantes.	68
3.15	O mesmo que a Figura 3.14, mas variando-se o raio externo R_2 , em função de raios estelares.	69
3.16	O mesmo que a Figura 3.14, mas variando-se a opacidade τ do envoltório.	69
3.17	O mesmo que a Figura 3.14, mas variando-se a temperatura efetiva T_{eff} da estrela.	70
3.18	O mesmo que a Figura 3.14, mas variando-se o tamanho dos grãos presentes no envoltório.	71
4.1	Espectro no óptico de Pós-AGBs estudadas por Molina et al. (2019), com a marcação da localização de linhas espectrais importantes. Retirado de Molina et al. (2019).	75

4.2	Espectros normalizados das Pós-AGBs quentes estudadas por Mello et al. (2012) com a identificação de alguns dos principais componentes espectrais. Retirado de Mello et al. (2012).	75
4.3	Espectro normalizado da binária espectroscópica SAO 209306, mostrando o perfil de linhas duplas. Retirado de Mello et al. (2012).	76
4.4	Espectro de alta resolução no intervalo de 4700 a 4800 Å da Pós-AGB carbonada IRAS 18384-2800. Algumas das principais linhas são identificadas, mostrando diversas componentes associadas à molécula de C ₂ e linhas intensas associadas a elementos do processo-s, como Y e Zr, por exemplo.	77
4.5	Espectro de alta resolução no intervalo de 4700 a 4800 Å da fonte 21 μm IRAS 19500-1709. Identificamos componentes de Mg I, Ti II, Zr I, Fe I e Y I, além de uma linha de C ₂	78
4.6	Espectro de alta resolução da RV Tauri IRAS F18281+2149, no intervalo espectral de 6510 a 6600 Å. Podemos observar o perfil P-Cygni da linha de Hα em 6562 Å, com a componente vermelha extremamente intensa, e linhas de Fe I e Fe II, juntamente com uma possível linha de Ni I.	79
4.7	Espectro de alta resolução da Pós-AGB oxigenada IRAS 19475+3119, no intervalo espectral de 4600 a 4700 Å. São observadas muitas linhas nesse intervalo espectral. Foram identificadas linhas de O II, Fe I, Ti I e N II, além de possíveis componentes de Fe II, Ce II e Cr I.	80
4.8	Espectro de alta resolução da Pós-AGB de química dupla IRAS 18313-1738, no intervalo espectral de 5900 a 6000 Å. São observadas linhas de emissão muito intensas de Fe I, Ti I, Zr I e O I. Linhas de emissão intensas são comuns no espectro de Pós-AGBs muito quentes.	80
4.9	Espectro de baixa resolução no intervalo de 3000 a 8000 Å da Pós-AGB carbonada IRAS 07134+1005, com as marcações das linhas da série de Balmer, da absorção associada ao duplete de sódio (Na D) e das principais linhas de absorção atmosféricas presentes.	81
4.10	O mesmo que a Figura 4.9, mas para a Pós-AGB oxigenada IRAS 17436+5003.	81
4.11	O mesmo que a Figura 4.9, mas para a RV Tauri IRAS F18281+2149.	82
4.12	O mesmo que a Figura 4.9, mas para a RV Tauri IRAS 20343+2625	82
5.1	Distribuição espectral de energia da Pós-AGB carbonada IRAS 16594-4656. Em azul estão apresentados os dados de fotometria e em laranja está sobreposto o espectro ISO desse objeto. Além da emissão de duplo pico, observamos as marcações de diferentes componentes associadas a PAHs em 6.2, 6.9, 7.7, 8.6, 11.3, 13.3 μm, e a emissão ainda sem identificação em 20.1 μm.	85
5.2	O mesmo que a Figura 5.1, mas para a Pós-AGB carbonada IRAS 22272+5435. As componentes em 7.7 e 8.6 μm parecem estar ausentes, mas observamos a presença de uma emissão em 6.9 μm	85
5.3	O mesmo que a Figura 5.1, mas para a Pós-AGB rica em oxigênio IRAS 19475+3119, sem a marcação das componentes carbonáceas. O comprimento de onda marcado é o de 33.4 μm, onde é observada uma emissão associada à presença de grãos de silicatos cristalinos.	86

5.4	O mesmo que a Figura 5.1, mas para a Pós-AGB rica em oxigênio IRAS 19244+1115. Estão marcados os comprimentos de onda 9.7 e 18 μm onde esperamos encontrar as componentes associadas a grãos de silicato amorfo no envoltório. Não observamos a emissão de duplo pico nesta SED.	87
5.5	O mesmo que a Figura 5.1, mas para a Pós-AGB de química dupla IRAS 06176-1036. As marcações estão nos comprimentos de onda de 3.3, 6.2, 7.7, 8.6 e 11.3 μm , associados a emissões devidas a PAHs; em 33.4 μm , associado à emissão de grãos de silicatos cristalinos. A SED deste objeto não apresenta emissão de duplo pico.	88
5.6	O mesmo que a Figura 5.1, mas para a Pós-AGB de química dupla IRAS 16279-4757. Estão presentes as emissões de PAHs em 6.2, 7.7 e 11.3 μm . Não é observada a emissão de duplo pico.	89
5.7	O mesmo que a Figura 5.1, mas para a RV Tauri IRAS F18281+2149. Observamos emissões em 4.25 μm , associada com a molécula de CO_2 , um excesso em 9.7 μm associado a grãos de silicato amorfo, e uma componente em 33.4 μm associada a grãos de silicato cristalino.	90
5.8	O mesmo que a Figura 5.1, mas para a Water Fountain IRAS 18139-1816. Há a presença de uma intensa absorção em 9.7 μm , associada a grãos de silicato amorfo, e a SED mostra um perfil de pico único.	91
5.9	O mesmo que a Figura 5.1, mas para a Water Fountain IRAS 18286-0959. Há a presença de uma intensa emissão em 9.7 μm , associada a grãos de silicato amorfo, e a SED mostra um perfil de pico único.	91
5.10	Diagrama cor-cor IRAS com os objetos que compõem a amostra deste trabalho. As regiões coloridas correspondem àquelas definidas por van der Veen & Habing (1988) (explicitadas no texto), e a região pontilhada em cinza é a definida por Garcia-Lario et al. (1997) para Pós-AGBs e NPs.	93
5.11	Diagrama cor-cor WISE com os objetos que compõem a amostra deste trabalho. Pode-se observar uma concentração de algumas estrelas RV Tauri na região de Gezer para objetos sem excesso no infravermelho (em preto). Além disso, estão marcadas as regiões de Gezer para objetos com discos circumbinários (em azul), e para objetos com envoltórios circunstelares (em vermelho).	96
5.12	Diagrama cor-cor combinando cores WISE e AKARI com os objetos que compõem a amostra deste trabalho. Observamos que os objetos RV Tauri e 21 μm concentram-se todos no canto inferior esquerdo do diagrama, e que a candidata 6 posiciona-se no canto superior direito, onde são observados apenas objetos oxigenados.	98
5.13	Diagrama cor-cor combinando cores MSX e IRAS com os objetos que compõem a amostra deste trabalho. Definimos uma região, em verde, onde são encontrados apenas objetos carbonados, e outra região, em roxo, onde encontramos apenas objetos oxigenados neste diagrama.	100
5.14	Diagrama cor-cor combinando cores MSX e 2MASS com os objetos que compõem a amostra deste trabalho. Observamos que alguns objetos da classe Water Fountain e objetos da classe 21 μm ocupam regiões mais à direita do diagrama, separados do restante dos objetos no espaço de cor.	101
5.15	Diagrama cor-cor combinando bandas fotométricas IRAS e WISE com os objetos que compõem a amostra deste trabalho. Estão marcadas duas regiões: uma para objetos 21 μm no canto superior esquerdo, em ciano, e outra para objetos oxigenados, em roxo.	103

5.16	Espectros ópticos separados de HD 161853 A e B, com marcações nas linhas mais notáveis. Retirado de Gamen et al. (2015).	105
5.17	Distribuição espectral de energia da candidata 1, HD 161853. Em azul estão apresentados os dados de fotometria. Não foram encontrados dados de espectroscopia para esse objeto na literatura.	105
5.18	Diagrama HR em escala logarítmica para um objeto de $5 M_{\odot}$, sendo o eixo vertical a luminosidade do objeto em luminosidades solares, e o eixo horizontal a temperatura efetiva em K. Podemos observar que um objeto com idade $t \approx 0.52$ Myr encontra-se antes do início da Sequência Principal no diagrama.	107
5.19	Diagrama HR em escala logarítmica para um objeto de $5 M_{\odot}$, sendo o eixo vertical a luminosidade do objeto em luminosidades solares, e o eixo horizontal a temperatura efetiva em K. O ponto vermelho indica o início da sequência principal no diagrama e o texto em vermelho apresenta a idade aproximada que um objeto de $5M_{\odot}$ teria neste ponto, $t \approx 3.89$ Myr.	107
5.20	O mesmo que a Figura 5.17, mas para a candidata 2, HD 155448.	107
5.21	Imageamento da nossa candidata à Pós-AGB de número 3, IRAS 19219+0947. À esquerda é apresentada a imagem em $H\alpha$ do HST, e à direita é apresentada a mesma imagem, mas processada, em cor falsa, para destacar certas características da estrutura. Nas imagens, podemos observar a morfologia típica de nebulosas planetárias. Retirada de Sahai et al. (2011).	109
5.22	Distribuição espectral de energia da candidata 3, IRAS 19219+0947. Em azul estão apresentados os dados de fotometria e em laranja foi sobreposto o espectro ISO desse objeto. Estão marcados os comprimentos de onda 7.7, 13.7, associados a emissões de componentes carbonáceos, e de $33.4 \mu\text{m}$, associado à emissão de grãos de silicatos cristalinos no envoltório.	109
5.23	O mesmo que a Figura 5.22, mas para a candidata 4, IRAS 11065-6026. Não observamos nenhuma das componentes moleculares esperadas em estrelas Pós-AGB.	111
5.24	Imagens do HST da nossa candidata à Pós-AGB IRAS 15405-4945, mostrando sua morfologia bipolar. A linha branca pontilhada na imagem da direita denota a orientação (-45°) e a extensão da ejeção de matéria bipolar vista na emissão de maser OH. Retirada de Sahai et al. (2007).	113
5.25	O mesmo que a Figura 5.17, mas para a candidata 5, IRAS 15405-4945.	113
5.26	O mesmo que a Figura 5.17, mas para a candidata 6, IRAS 15066-5532.	115
5.27	O mesmo que a Figura 5.22, mas para a candidata 7, HD 90177. Os comprimentos de onda marcados são os de 13.3 e $13.7 \mu\text{m}$, associados a componentes carbonáceos.	116
5.28	O mesmo que a Figura 5.22, mas para a candidata 8, THA 35-II-27. É observada uma componente em emissão em $7.7 \mu\text{m}$, associada a PAHs.	118
5.29	Diagrama cor-cor indicando uma região esperada para objetos T Tauri (em azul) e uma região delimitada para estrelas Herbig Ae/Be (em magenta). Observamos que a candidata 9 encontra-se dentro da região esperada para estrelas Herbig Ae/Be. Retirado de López et al. (2021).	119
5.30	Os poucos dados fotométricos encontrados para a candidata 9, IRAS 06562-0337, não permitem visualizar sua SED.	120
5.31	Esquema da morfologia complexa da nebulosa ao redor do sistema binário IRAS 07399-1435, a candidata 10 do nosso trabalho. Retirado de Contreras et al. (2018).	121

5.32 O mesmo que a Figura 5.17, mas para a candidata 10, IRAS 07399-1435. 121

B.1	Distribuições espectrais de energia das Pós-AGBs carbonadas IRAS 19454+2920, IRAS 23304+6147, IRAS 23304+6147 e da Pós-AGB de química dupla IRAS 10215-5916. Os dados de fotometria são representados pelos pontos azuis, e a espectroscopia ISO, quando disponível, é mostrada em laranja.	142
B.2	O mesmo que a Figura B.1, mas para a Pós-AGB de química dupla IRAS 19306+1407, e para as Pós-AGBs oxigenadas IRAS 22036+5306, IRAS 18135-1456 e IRAS 17150-3224.	143
B.3	O mesmo que a Figura B.1, mas para as RV Tauri IRAS 19472+4254, IRAS 04440+2605, IRAS 15544-5332, e para a Water Fountain IRAS 16342-3814.	144
B.4	O mesmo que a Figura B.1, mas para as Water Fountains IRAS 16552-3050, IRAS 18043-2116, IRAS 18450-0148 e IRAS 18596+0315.	145
C.1	Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 8.3 e 14.7 μm do MSX, e 18 e 65 μm do AKARI.	147
C.2	Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 3.4 e 4.6 μm do WISE, e 9 μm do AKARI.	147
C.3	Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 4.6 μm do WISE, e 9 e 18 μm do AKARI.	148
C.4	Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 9, 18 e 65 μm do AKARI.	148
C.5	Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 12 e 22 μm do WISE, e 25 e 60 do IRAS.	149
C.6	Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 8.3 e 14.7 μm do MSX, e 12 e 25 do IRAS.	149
C.7	Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 12 e 25 μm do IRAS, e 18 e 65 μm do AKARI.	150
C.8	Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 12 e 25 μm do IRAS, e J e K do 2MASS.	150
C.9	Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 12 e 25 μm do IRAS, e K do 2MASS.	151
C.10	Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 12 e 25 μm do IRAS, e 18 e 65 μm do AKARI.	151
C.11	Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 25 e 60 μm do IRAS, e 18 e 65 μm do AKARI.	152
C.12	Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 3.4 e 4.6 μm do WISE, 8.3 μm do MSX, e K do 2MASS. . .	152
C.13	Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 12 μm do IRAS, K do 2MASS, e 9 e 18 μm do AKARI. . . .	153
C.14	Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 12 μm do IRAS, K do 2MASS, e 18 e 65 μm do AKARI. . .	153
C.15	Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas J e K do 2MASS, e 12 μm do IRAS.	154
C.16	Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 3.4 e 4.6 μm do WISE, e 9 e 18 μm do AKARI.	154
C.17	Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 3.4, 4.6 e 12 μm do MSX.	155

C.18 Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas
fotométricas 3.4, 4.6, 12 e 22 μm do MSX. 155

Lista de Tabelas

2.1	Amostra utilizada nesse trabalho, com seus identificadores mais comuns, identificação no catálogo IRAS, classe, ascensão reta (RA) e declinação (DEC).	55
A.1	Dados fotométricos das Pós-AGBs e candidatas da nossa amostra no intervalo de 0.15 a 0.76 μm . Os fluxos em cada comprimento de onda são dados em Jy.	135
A.2	O mesmo que a Tabela A.1, mas para o intervalo de 0.85 a 3.4 μm	136
A.3	O mesmo que a Tabela A.1, mas para o intervalo de 3.6 a 9 μm	137
A.4	O mesmo que a Tabela A.1, mas para o intervalo de 11.56 a 65 μm	138
A.5	O mesmo que a Tabela A.1, mas para o intervalo de 70 a 350 μm	139
A.6	Tabela mostrando para quais estrelas da nossa amostra foram encontrados dados espectroscópicos de alta e baixa resoluções no óptico, e espectros ISO no infravermelho.	140

Abreviações

2MASS	2 (Two) Micron All Sky Survey (Levantamento de céu-inteiro em 2 microns)
AGB	Asymptotic Giant Branch (Ramo Assintótico das Gigantes)
HB	Horizontal Branch (Ramo Horizontal)
HST	Hubble Space Telescope (Telescópio Espacial Hubble)
IR	InfraRed (Infravermelho)
IRAS	InfraRed Astronomical Satellite (Satélite Astronômico Infravermelho)
MSX	Midcourse Space Experiment (Experimento Espacial Intermediário)
NP	Nebulosa Planetária
RGB	Red Giant Branch (Ramo das Gigantes Vermelhas)
SED	Spectral Energy Distribution (Distribuição Espectral de Energia)
SGB	Sub Giant Branch (Ramo das Subgigantes)
SP	Sequência Principal
WISE	Wide-field Infrared Survey Explorer (Explorador de Pesquisa Infravermelha de Campo-Ampla)

Constantes Físicas

Massa do Sol	M_{\odot}	=	1.98892×10^{30} kg
Luminosidade do Sol	L_{\odot}	=	3.846×10^{26} W
Raio do Sol	R_{\odot}	=	6.963×10^8 m

Sumário

1	Introdução	25
1.1	Sequência Principal	25
1.2	Estágios avançados de evolução	29
1.2.1	Ramo das Subgigantes (SGB)	30
1.2.2	Ramo das Gigantes Vermelhas (RGB)	32
1.2.3	Ramo Horizontal (HB)	33
1.2.4	Ramo Assintótico das Gigantes (AGB)	34
1.3	Estrelas Pós-AGB	37
2	Classes de Pós-AGBs	41
2.1	Pós-AGBs carbonadas	41
2.1.1	Objetos 21 μm	44
2.2	Pós-AGBs oxigenadas	46
2.3	Pós-AGBs de química dupla	48
2.4	RV Tauri	50
2.5	Water Fountains	52
2.6	Amostra utilizada	53
3	Análise dos Envoltórios Circunstelares	56
3.1	Distribuições Espectrais de Energia	56
3.2	Diagramas cor-cor	59
3.3	Modelos de envoltórios	66
4	Análise das Estrelas Centrais	72
4.1	Espectroscopia no óptico e determinação de abundâncias	73
4.2	Espectros no óptico	76
5	Discussão e Resultados	83
5.1	SEDs dos objetos da amostra	84
5.2	Diagramas cor-cor criados	91
5.2.1	IRAS [25]-[60] x [12]-[25]	92
5.2.2	WISE [3.4]-[4.6] x [12]-[22]	95
5.2.3	WISE-AKARI [09]-[18] x [12]-[22]	96
5.2.4	IRAS-MSX [25]-[60] x [8.3]-[14.7]	98
5.2.5	2MASS-MSX J-K x K-[8.3]	100
5.2.6	IRAS-WISE [3.4]-[4.6] x [25]-[60]	102
5.3	Candidatas a Pós-AGB	103
5.3.1	Candidata 1: IRAS 17460-3114	104
5.3.2	Candidata 2: HD 155448	106

5.3.3	Candidata 3: IRAS 19219+0947	108
5.3.4	Candidata 4: IRAS 11065-6026	110
5.3.5	Candidata 5: IRAS 15405-4945	112
5.3.6	Candidata 6: IRAS 15066-5532	114
5.3.7	Candidata 7: IRAS 10211-5922	115
5.3.8	Candidata 8: IRAS 10178-5958	117
5.3.9	Candidata 9: IRAS 06562-0337	118
5.3.10	Candidata 10: IRAS 07399-1435	120
6	Conclusões e Perspectivas	123
	Referências Bibliográficas	127
A	Banco de dados fotométricos	134
B	SEDs	141
C	Diagramas cor-cor	146

Capítulo 1

Introdução

Objetos Pós-AGBs são estrelas de baixa massa ou massa intermediária (0.8 a $8 M_{\odot}$) que já encerraram sua trajetória pelo Ramo Assintótico das Gigantes (AGB). Logo, se tornarão quentes o suficiente para ionizar o material circunstelar ejetado e dar origem a uma nebulosa planetária. Então, esse material vai se esfriar e se expandir, e a estrela central terminará sua evolução como uma anã branca. A seguir, neste capítulo, apresentamos uma discussão mais detalhada sobre a evolução de estrelas de massa baixa e intermediária até atingirem a fase Pós-AGB, tendo como base o livro-texto de Carroll & Ostlie (2017).

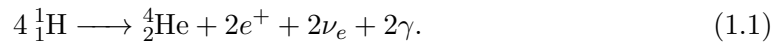
1.1 Sequência Principal

Todas as estrelas iniciam sua evolução a partir da fusão de hidrogênio em hélio em seu núcleo, e assim o fazem durante grande parte de sua vida. Enquanto realizam esse processo, as estrelas percorrem uma trajetória evolutiva no diagrama Hertzsprung-Russell (HR) denominada Sequência Principal (SP). O processo de evolução estelar é uma consequência direta das reações nucleares que dão origem a uma pressão interna que atua no sentido de compensar a atuação da força gravitacional estelar, mantendo o equilíbrio hidrostático da estrela.

Observamos que 80 a 90% das estrelas na vizinhança solar encontram-se na SP, o que pode ser explicado pelo fato de que esse é o estágio de evolução mais duradouro: para estrelas como o Sol, a duração da SP é da ordem de 10^{10} anos.

A evolução das estrelas depende fortemente de sua massa inicial, que é definida como sendo sua massa na Sequência Principal de Idade Zero (*Zero-Age Main-Sequence* - ZAMS), que marca o momento em que a estrela entra na SP. Por exemplo, estrelas de massa intermediária, com massas iniciais $M \geq 1.2 M_{\odot}$, possuem núcleos convectivos devido à predominância do ciclo CNO, que é extremamente dependente da temperatura. Ou seja, nos núcleos dessas estrelas a energia é transportada principalmente por convecção. Por outro lado, os processos internos em estrelas de baixa massa, com massas iniciais $M < 1.2 M_{\odot}$, são dominados por cadeias próton-próton (pp), que possuem uma dependência menor com a temperatura, de forma que a energia no núcleo dessas estrelas é transportada principalmente de forma radiativa. Contudo, as estrelas com massas iniciais ainda menores, $M < 0.3 M_{\odot}$, voltam a ter núcleos convectivos devido às suas altas opacidades superficiais, que levam as zonas convectivas até o interior estelar, de forma que a estrela inteira torna-se convectiva.

As cadeias próton-próton citadas, que ocorrem no interior estelar convertendo hidrogênio em hélio, podem ser divididas em 3 ramos. A primeira cadeia próton-próton (PP I) envolve uma série de reações que resultam em:



Acima, e^+ representa o pósitron, ν_e o neutrino do elétron, e γ é usado para representar fótons. A cadeia PP I ocorre em 69% das vezes em regiões como o interior do Sol, enquanto em 31% das vezes ocorre a segunda cadeia pp (PP II). Ainda, ao final da série de reações que compõem a cadeia PP II, ainda há a possibilidade de ocorrer a terceira cadeia pp (PP III). As três cadeias pp completas estão sumarizadas na Figura 1.1, onde também são mostradas as probabilidades de ocorrência de cada uma nas condições do núcleo do Sol.

Por outro lado, como foi mencionado, em estrelas de massas iniciais maiores do que a solar, o ciclo predominante em seu interior é o ciclo CNO, no qual carbono, nitrogênio e oxigênio atuam como catalisadores para a produção de hélio-4. Esse ciclo também possui diferentes ramos e o principal, que ocorre em 99.96% das vezes, tem como resultado a produção de carbono-12 e hélio-4 através das reações:

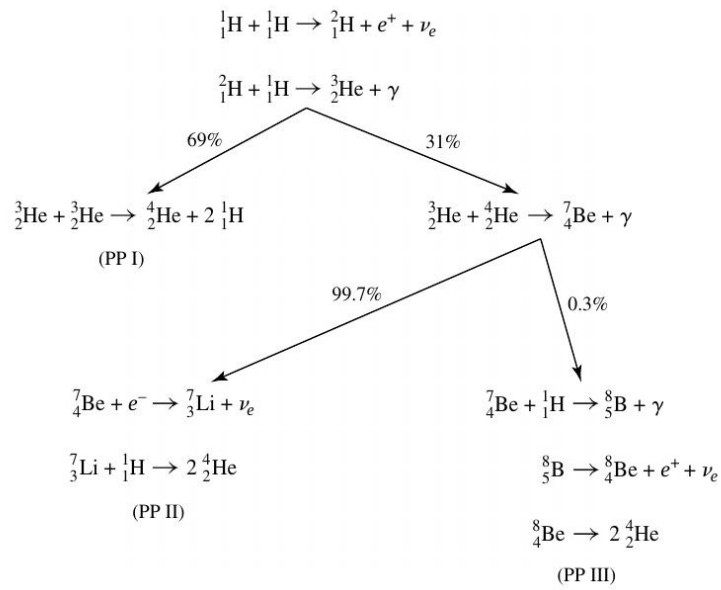


FIGURA 1.1. A figura apresenta os três ramos da cadeia pp, mostrando as reações completas de cada um, junto com as probabilidades de ocorrência no caso do núcleo solar. Retirado de Carroll & Ostlie (2017).



Como mencionado, dependendo de suas massas iniciais, as estrelas podem ter as cadeias pp ou o ciclo CNO como os processos mais eficientes para conduzir reações nucleares em seu interior, e, além disso, suas trajetórias evolutivas podem apresentar diferenças significativas. A Figura 1.2 mostra um diagrama HR, com as trajetórias evolutivas calculadas para estrelas de diferentes massas iniciais, a partir da SP. Podemos observar diferenças importantes nas trajetórias conforme a massa inicial muda. Além disso, a posição do Sol está marcada na figura com o símbolo \odot , e a linha diagonal que percorre o diagrama é a ZAMS.

Conforme a estrela evolui pela SP, chegará um momento em que o hidrogênio terá

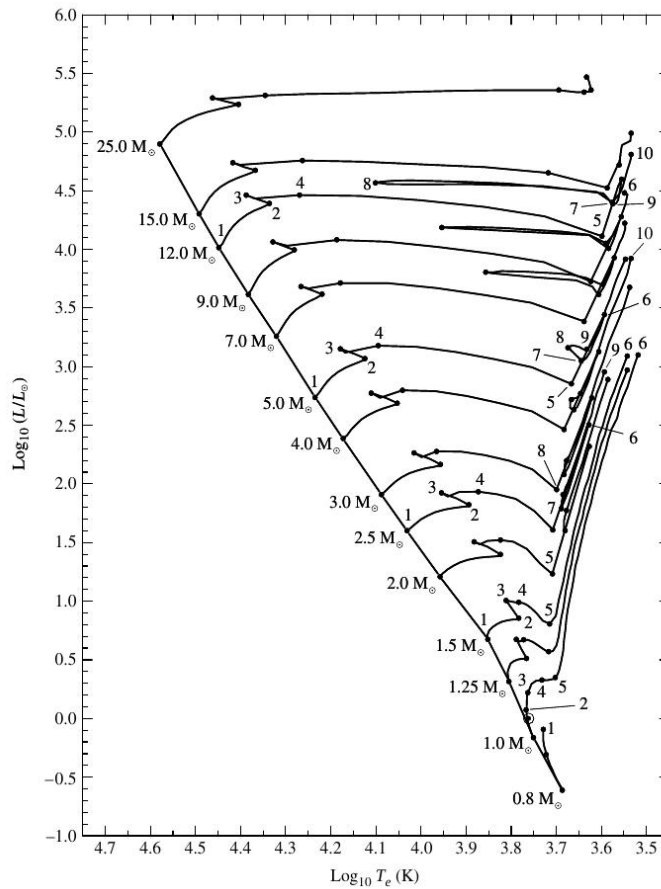


FIGURA 1.2. Trajetórias evolutivas da sequência principal e pós-sequência principal para estrelas com diferentes valores de massa inicial, e metalicidade fixa. No eixo horizontal está representado o logaritmo da temperatura efetiva estelar, em K, e no eixo vertical está representado o logaritmo da razão entre a luminosidade estelar e a luminosidade solar. A posição do Sol está marcada com o símbolo \odot na trajetória de $1 M_{\odot}$. A linha diagonal representa a sequência principal de idade-zero. Retirado de Carroll & Ostlie (2017).

se esgotado no núcleo. Para uma estrela de $1 M_{\odot}$, esse momento ocorre aproximadamente 9.8 bilhões de anos após sua entrada na SP, e no diagrama HR da Figura 1.2 corresponde ao ponto 3 em sua trajetória evolutiva. Com isso, sem hidrogênio no núcleo, a cadeia pp nessa região será interrompida. Contudo, quando isso ocorre, a temperatura do núcleo já encontra-se alta o suficiente para permitir a fusão nuclear do hidrogênio em uma camada mais externa, que agora encontra-se ao redor de um núcleo composto principalmente por hélio.

Quando se inicia a queima nessa camada, a luminosidade produzida por ele é maior do que aquela que o núcleo produz enquanto queima o hidrogênio. Isso permite que a estrela dê continuidade à sua trajetória evolutiva em direção à luminosidades maiores no diagrama HR. Porém, uma parte da energia gerada pela fusão do hidrogênio atinge a superfície, enquanto a outra parte se mantém no interior estelar, levando à expansão

do envelope. Por conta disso, a temperatura efetiva da estrela começa a diminuir. Além disso, à medida que o hidrogênio no envelope começa a se esgotar, as cinzas da fusão nuclear fazem com o que o núcleo de hélio cresça, de modo que a temperatura da estrela começa a diminuir de forma mais significativa: ela percorre uma trajetória para a direita do diagrama HR, em direção a valores menores de temperatura efetiva.

A fase de SP se encerra quando o núcleo de hélio atinge um certo limite de massa, no qual ele é grande demais para suportar as camadas estelares acima dele. Esse limite é denominado limite de Schönberg–Chandrasekhar (SC), e é uma função dos pesos moleculares médios do núcleo e do envelope. Então, quando a massa do núcleo de hélio ultrapassa esse limite, ocorre o colapso do núcleo e a estrela evolui muito rapidamente, em comparação com a escala de tempo nuclear de sua evolução na SP. Esse estágio é marcado pelo ponto 4 no diagrama HR da Figura 1.2, e determina o fim da SP para estrelas com massas $M < 1.2 M_{\odot}$, aproximadamente.

Em contrapartida, para estrelas com $M > 1.2 M_{\odot}$, o fim da SP é determinado por processos relacionados a seus núcleos convectivos. A zona convectiva é responsável por misturar o material no interior estelar, e pelo fato da escala de tempo convectiva ser muito menor do que a escala de tempo nuclear, o resultado é o de que a composição do núcleo se mantém aproximadamente homogênea. Quando a massa do envelope de hidrogênio atinge um certo valor crítico, a estrela começa a se contrair e, assim, a luminosidade aumenta para compensar a energia gravitacional liberada. Com a diminuição do raio, a temperatura efetiva aumenta. Para essas estrelas, o momento em que ocorre essa contração determina o fim da SP (ponto 2 no diagrama HR da Figura 1.2 para $M > 1.2 M_{\odot}$).

1.2 Estágios avançados de evolução

Após encerrar sua evolução na SP, as estrelas passam por diferentes estágios evolutivos nos quais podem realizar a queima de elementos no núcleo, ao mesmo tempo em que realizam fusão nuclear em camadas concêntricas. Além disso, esses processos são acompanhados por mudanças na estrutura estelar, envolvendo expansão e contração, incluindo processos de perda de massa nos estágios finais da evolução. Da mesma forma que

discutido anteriormente, estrelas de massas diferentes percorrem diferentes trajetórias evolutivas após a SP.

Para estrelas baixa massa, como mencionado anteriormente, o núcleo começa a se contrair após atingir o limite de SC, à medida que a camada ao redor do núcleo continua a queimar o hidrogênio disponível. Como essa camada produz maior luminosidade, a luminosidade total da estrela aumenta, o envelope se expande e a sua temperatura efetiva começa a diminuir.

Por outro lado, a Figura 1.3 mostra um esquema de uma estrela de massa intermediária ($5 M_{\odot}$) logo após o fim da SP. Nesse caso, toda a estrela sofre uma contração, que resulta no aumento da luminosidade e de sua temperatura efetiva. E então, a queima do hidrogênio em uma camada ao redor do núcleo faz com que o envelope se expanda, resultando agora em um decréscimo da luminosidade e temperatura efetiva. Além disso, as Figuras 1.4 e 1.5 mostram um esquema evolutivo realçando os estágios avançados de evolução para uma estrela de baixa massa ($1 M_{\odot}$) e de massa intermediária ($5 M_{\odot}$), respectivamente.

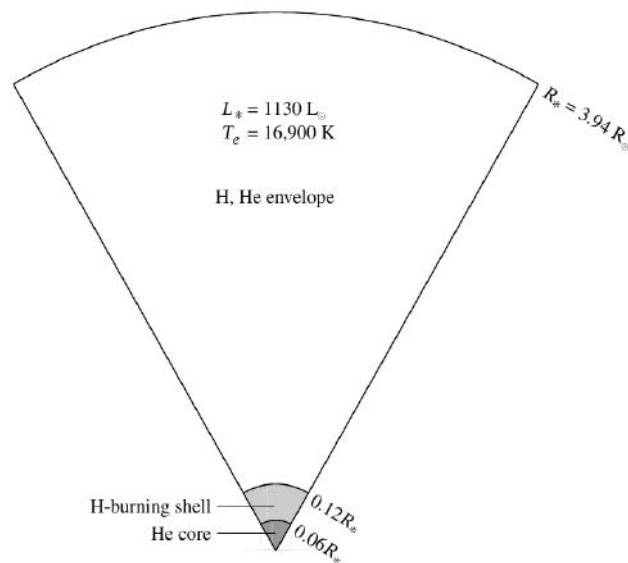


FIGURA 1.3. Esquema de uma estrela de $5 M_{\odot}$ com um núcleo de Hélio e uma camada de queima de hidrogênio, logo após o fim da SP. Retirado de Carroll & Ostlie (2017).

1.2.1 Ramo das Subgigantes (SGB)

Tanto estrelas de baixa massa como estrelas de massa intermediária atingem o Ramo das Subgigantes (*Subgiant Branch* - SGB) após seus núcleos terem ultrapassado

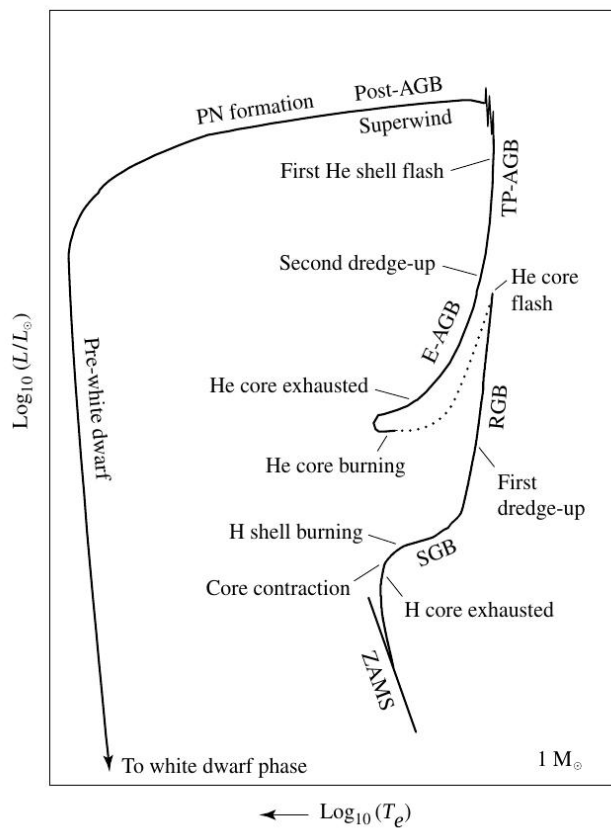


FIGURA 1.4. Esquema da trajetória evolutiva de uma estrela de baixa massa de $1 M_{\odot}$. Retirado de Carroll & Ostlie (2017).

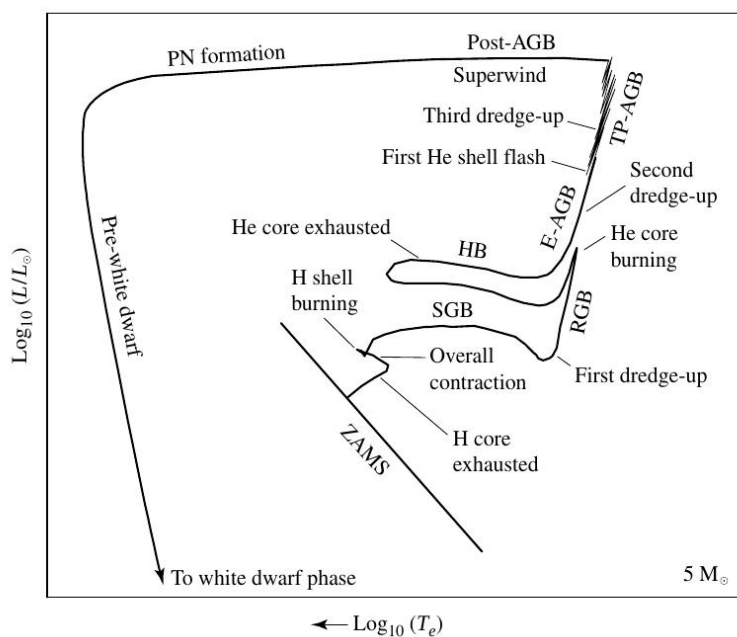


FIGURA 1.5. Esquema da trajetória evolutiva de uma estrela de massa intermediária de $5 M_{\odot}$. Retirado de Carroll & Ostlie (2017).

o limite de SC, e terem iniciado a contração. Esse momento é marcado pelo ponto 4 no diagrama HR (Figura 1.2) e, a partir dele, o envelope da estrela começa a se expandir e a temperatura efetiva começa a diminuir, levando a estrela para a direita no diagrama HR. Com a contração do núcleo, surge um gradiente de temperatura por conta da liberação de energia potencial gravitacional. Então, a temperatura e a densidade da camada de queima de hidrogênio aumentam simultaneamente, de forma que a taxa de energia gerada pela camada de queima aumenta rapidamente. Por conta disso, ocorre uma nova expansão do envelope estelar de hidrogênio e hélio, que se torna mais uma vez capaz de absorver a energia gerada pela camada de queima, resultando na diminuição da luminosidade total da estrela, como mostrado no ponto 5 da Figura 1.2, na trajetória evolutiva de estrelas de massa intermediária.

1.2.2 Ramo das Gigantes Vermelhas (RGB)

Após percorrer o SGB, a expansão do envelope e a diminuição da temperatura efetiva fazem surgir uma contribuição do ion H^- , que resulta no aumento da opacidade fotosférica. Com isso, uma zona convectiva se desenvolve próxima à superfície estelar, e sua base se estende até o interior da estrela ao longo de sua evolução após percorrer o SGB. A partir desse momento, energia é transportada para a superfície de maneira muito eficiente, de forma que a luminosidade aumenta significativamente, e a estrela se desloca para cima no diagrama HR, percorrendo o Ramo das Gigantes Vermelhas (*Red Giant Branch* - RGB).

Conforme a estrela percorre o RGB, sua zona convectiva atinge regiões internas da estrela onde a composição química foi modificada por reações nucleares e, nesse momento, o material processado interno se mistura com o material mais superficial. Esse fenômeno resulta em mudanças observáveis na composição química fotosférica da estrela e é conhecido como primeira dragagem (*dredge-up*).

No topo do RGB (ponto 6 da Figura 1.2), a temperatura e a densidade centrais da estrela tornam-se altas o suficiente para permitir o processo triplo-alfa, no qual três núcleos de hélio geram um núcleo de carbono. Esse processo insere uma nova fonte de energia no interior da estrela, fazendo com o que o núcleo se expanda. A expansão do núcleo, por sua vez, empurra a camada de queima de hidrogênio para regiões mais externas, o que causa seu esfriamento e uma consequente diminuição de sua produção

de energia. Com isso, há uma abrupta diminuição na luminosidade da estrela e, simultaneamente, ocorre a contração do envelope e um novo aumento da temperatura efetiva, como pode ser visto na Figura 1.5.

Contudo, um processo diferente ocorre para estrelas com massa inferior a aproximadamente $1.8 M_{\odot}$: à medida que o núcleo de hélio se contrai durante o RGB, ele se torna fortemente degenerado. Além disso, o núcleo sofre uma intensa perda de neutrinos antes de atingir o topo do RGB, dando origem a um gradiente de temperatura negativo no núcleo, ou seja: a grande quantidade de energia carregada pelos neutrinos resulta em um resfriamento do núcleo. Então, no momento em que a temperatura e densidade estelar atingem valores altos o suficiente para permitir que o processo triplo-alfa se inicie, a liberação de energia é gigantesca. A queima do hélio se inicia em uma camada ao redor do núcleo, mas logo começa a ocorrer no próprio núcleo da estrela, gerando uma luminosidade da ordem de $10^{11} L_{\odot}$.

Essa enorme liberação de energia dura apenas alguns segundos, e maior parte dela é absorvida pelas camadas mais superficiais do envelope. Esse fenômeno é conhecido como flash do hélio.

1.2.3 Ramo Horizontal (HB)

Com a contração do envelope após a estrela passar pelo topo do RGB, a compressão da camada de queima de hidrogênio eventualmente causa um novo aumento da produção de energia da estrela, levando a um novo aumento da temperatura efetiva. Consequentemente, a zona convectiva profunda do envelope atinge a superfície, enquanto surge um núcleo convectivo, como resultado da forte dependência do processo triplo-alfa com a temperatura. Esse estágio evolutivo é denominado de Ramo Horizontal (*Horizontal Branch* - HB). Quando a estrela atinge a extremidade mais azul do HB (ponto 8 no diagrama HR da Figura 1.2), o alto peso molecular médio do núcleo leva à uma nova contração, que acompanha uma expansão do envelope e uma diminuição de sua temperatura. Quando a estrela começa a percorrer a parte superior do *loop* do HB (ilustrado na Figura 1.5), o hélio no núcleo já encontra-se esgotado, tendo sido convertido em carbono e oxigênio. E então, a evolução restante através do HB se dá rapidamente, à medida que o núcleo de CO é contraído.

Nesse estágio evolutivo, os envelopes externos das estrelas podem desenvolver instabilidades, observáveis na forma de variações periódicas nos parâmetros estelares, como raio, luminosidade e temperatura efetiva.

A contração do núcleo de CO leva à um conseqüente aumento de sua temperatura, o que, por sua vez, permite o surgimento de uma camada de queima de hélio ao redor do núcleo. Eventualmente, a contração do núcleo leva à uma interrupção temporária da camada de queima de hidrogênio, à medida que está é afastada do núcleo e esfria.

1.2.4 Ramo Assintótico das Gigantes (AGB)

Após sair do HB, a estrela passa a percorrer uma trajetória ascendente no diagrama HR, chamada de Ramo Assintótico das Gigantes (*Asymptotic Giant Branch* - AGB), dividido em uma fase inicial, denominada *early* AGB (E-AGB) e uma fase posterior dominada por pulsos térmicos, chamada de *Thermal-Pulse* AGB (TP-AGB). A Figura 1.6 mostra um esquema de uma estrela de $5 M_{\odot}$ na fase E-AGB, com duas camadas de queima, sendo a camada de queima de hélio a principal responsável pela produção de energia da estrela nessa fase.

No início do AGB, o envelope em expansão absorve grande parte da energia produzida pela camada de queima de hélio. E, com a diminuição da temperatura efetiva, o envelope convectivo volta a atingir regiões mais internas da estrela, estendendo-se até a descontinuidade química entre a camada de queima de hidrogênio e a camada inerte de hélio, acima da camada de queima de hélio. Mais uma vez, ocorre mistura do material, a segunda dragagem. A segunda dragagem é responsável por aumentar o conteúdo de nitrogênio e hélio no envelope.

A seguir, após a segunda dragagem, a estrela atinge a fase TP-AGB. Nesta fase, o envelope de queima de hidrogênio, antes adormecido, é reacendido e volta a dominar a produção de energia da estrela. Contudo, por conta das cinzas resultantes da queima do hidrogênio, a massa da camada de hélio abaixo aumenta, e sua base começa a se tornar degenerada. Então, quando a temperatura na base dessa camada torna-se alta o suficiente, ocorre um flash de hélio, mas dessa vez associado à camada de queima do hélio, e não ao núcleo, como no caso das estrelas de baixa massa no topo do RGB.

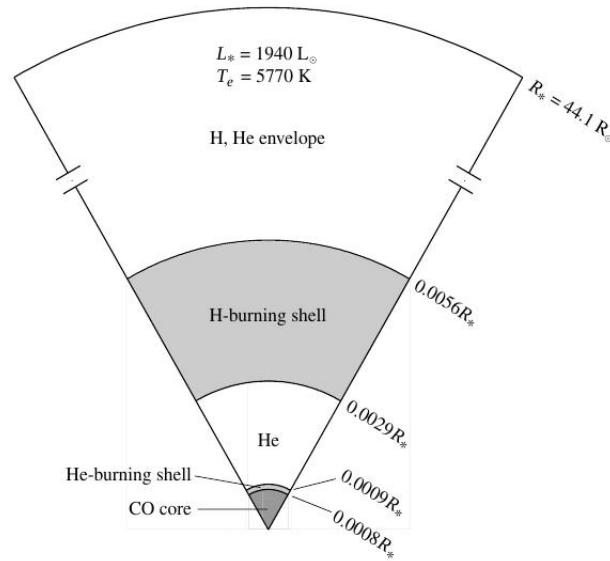


FIGURA 1.6. Esquema do interior de uma estrela de $5 M_{\odot}$ na fase E-AGB, com um núcleo de CO, uma camada de queima de hidrogênio e uma camada de queima de hélio. Retirado de Carroll & Ostlie (2017).

Dessa forma, a camada de queima de hélio começa a ser reacendida e apagada, num comportamento praticamente periódico.

Os flashes de hélio na camada de queima empurram a camada de queima do hidrogênio para regiões mais externas da estrela, fazendo com que a camada se esfrie e deixe de produzir energia. Porém, eventualmente, a queima na camada de hélio diminui, e a camada de queima do hidrogênio volta a se reacender, e o processo se repete. Os chamados pulsos térmicos das estrelas AGB possuem períodos que variam conforme a massa da estrela. Por exemplo, para uma estrela de $5 M_{\odot}$, os períodos são da ordem de milhares de anos, mas podem chegar a centenas de milhares de anos no caso de estrelas de baixa massa. Nessa fase, os pulsos térmicos aumentam de amplitude a cada período, e mudanças abruptas na luminosidade da estrela revelam a ocorrência desse fenômeno.

O aumento abrupto da produção de energia da camada de queima de hélio durante o flash do hélio origina uma zona de convecção entre as camadas de queima do hidrogênio e do hélio. Além disso, a profundidade da zona convectiva do envelope aumenta conforme a intensidade dos pulsos. Portanto, como a intensidade dos pulsos aumentam a cada flash ocorrido, esperamos que a profundidade da zona convectiva também aumente a cada evento desse tipo. Para estrelas massivas o suficiente, com aproximadamente $M > 2 M_{\odot}$, as zonas convectivas irão se fundir e eventualmente se estender até regiões onde o carbono foi produzido. Quando isso acontece, ocorre a terceira dragagem, responsável

por trazer material rico em carbono para a superfície da estrela, aumentando a chamada razão carbono oxigênio (C/O) nessa região. Como na região entre as camadas de queima de hidrogênio e hélio, a abundância de carbono excede a de oxigênio por um fator de 5 a 10, sucessivos eventos de terceira dragagem podem converter um química fotosférica rica em oxigênio em uma química fotosférica rica em carbono.

As estrelas gigantes que apresentam uma densidade numérica de átomos de carbono maior do que a de átomos de oxigênio são chamadas de estrelas carbonadas, que possuem moléculas de SiC em suas atmosferas, em contraste com as moléculas de SiO tipicamente encontradas em estrelas gigantes, por exemplo. Esse fenômeno ocorre porque a molécula de monóxido de carbono (CO) possui alta energia de ligação. Portanto, se a atmosfera da estrela contém mais oxigênio do que carbono, o carbono estará principalmente ligado nas moléculas de CO, deixando oxigênio livre na atmosfera. O contrário ocorre no caso de uma atmosfera com uma abundância de carbono maior do que a de oxigênio.

Em relação à abundância química de estrelas AGB, outro processo relevante é a nucleossíntese de elementos do processo-s, por captura lenta de nêutrons. Diversas reações nucleares liberam nêutrons e, como estes não possuem carga elétrica, facilmente colidem com núcleos devido à ausência de força Coulombiana. Assim, se o fluxo de nêutrons for baixo, núcleos radioativos produzidos pela absorção de nêutrons livres possuem tempo suficiente para decair em outros núcleos, antes de absorver outro nêutron: assim são produzidos elementos do processo-s, como o tecnécio-99 (Tc), que não possui isótopos estáveis e tem meia-vida de apenas 200 mil anos.

Além disso, destacamos que entre as características mais importantes das estrelas AGB, estão as suas altas taxas de perda de massa, que podem chegar a $\dot{M} \sim 10^{-4} M_{\odot}/\text{ano}$. Além disso, por possuírem temperaturas efetivas muito baixas, da ordem de 3000 K, a formação de grãos na matéria ejetada torna-se possível. Dessa forma, a perda de massa em estrelas AGB se relaciona diretamente com o enriquecimento do meio interestelar.

Conforme estrelas de até $8 M_{\odot}$ evoluem pelo AGB, a camada de queima de hélio converte cada vez mais o hélio em carbono, e o carbono em oxigênio, aumentando a massa do caroço. Contudo, as altas taxas de perda de massa dessas estrelas não permitem que o caroço de carbono e oxigênio ultrapasse o limite de massa além do qual ocorreria seu

colapso. Ao invés desse colapso, essas estrelas apresentam nucleossínteses adicionais em seus núcleos, resultando em núcleos de oxigênio, e no caso de estrelas com massas iniciais $M \geq 6 M_{\odot}$, de neônio e magnésio.

Observamos que as taxas de perda de massa aumentam com o tempo por conta do aumento da luminosidade e do raio ao longo da fase AGB, juntamente com a diminuição da massa. Esses fatores tornam o material menos ligado à superfície da estrela, devido à decrescente gravidade superficial. Dessa forma, a perda de massa torna-se cada vez mais significativa à medida que a estrela evolui por essa fase.

Nos estágios finais de evolução no AGB, surge o chamado supervento que leva à uma taxa de perda de massa de $\dot{M} \sim 10^{-4} M_{\odot}/\text{ano}$, que termina revelando a estrela central que antes encontrava-se obscurecida pelo material ejetado da estrela. Assim, revela-se uma supergigante de tipo F ou G, que percorre uma trajetória no diagrama HR em direção à maiores temperaturas, mantendo sua luminosidade praticamente constante, a chamada fase Pós-AGB. O material expelido, na forma de um envoltório circunstelar, será ionizado pela estrela Pós-AGB e eventualmente dará origem a uma nebulosa planetária. Por fim, a estrela central esfriará até se tornar uma anã branca, que para o caso de estrelas de massas mais baixas, é composta por um núcleo degenerado de carbono e oxigênio, coberto por uma fina camada de hidrogênio e hélio residual.

A seguir, discutimos em mais detalhes as estrelas Pós-AGB, que são o foco deste trabalho.

1.3 Estrelas Pós-AGB

Os objetos Pós-AGB são assim chamados por estarem percorrendo uma curta fase evolutiva, com duração que varia de $\sim 10^2$ a 10^4 anos, que se encontra entre o fim do AGB e a fase de Nebulosa Planetária (NP), a chamada fase Pós-AGB. Na fase AGB, a estrela passa por um intenso processo de perda de massa, entre 10^{-7} a $10^{-4} M_{\odot}/\text{ano}$, e esse material dá origem à um envoltório circunstelar enriquecido com a química da estrela que se expande e esfria lentamente, revelando assim, na fase Pós-AGB, a estrela central antes obscurecida. É um intenso vento estelar, denominado supervento, o responsável pelas altas taxas de perda de massa na fase AGB, como citado anteriormente.

São conhecidos atualmente poucos objetos Pós-AGB: na literatura recente, os autores Kluska et al. (2022) citam que são conhecidas cerca de 391 Pós-AGBs na Galáxia, de acordo com o *Toruń Catalogue* (Szczerba et al., 2007). Isso é explicado pelo fato de que esses objetos percorrem uma trajetória extremamente curta quando compara a outras trajetórias evolutivas. Por isso, é de extrema importância estudar as propriedades desses objetos para entender sua natureza química e evolutiva.

No diagrama HR, uma estrela que acabou de sair da fase AGB evolui em uma trajetória em direção a maiores temperaturas, mantendo sua luminosidade aproximadamente constante, como podemos ver no diagrama mostrado na Figura 1.7.

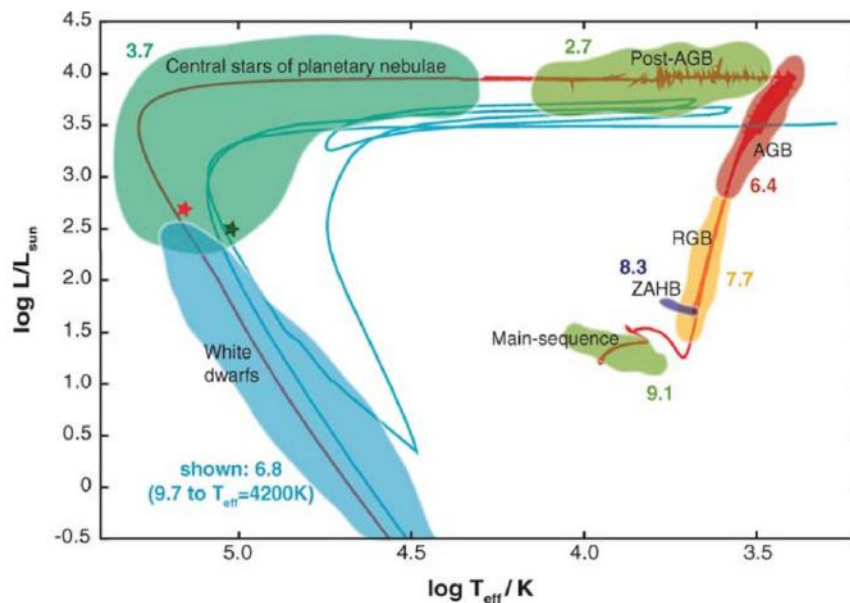


FIGURA 1.7. Diagrama HR mostrando a evolução de uma estrela de $2 M_{\odot}$ com metalicidade solar, desde a Sequência Principal (em verde) até a fase de Anã Branca (em azul). Os números representam o logaritmo da duração aproximada, em anos, de cada fase para esse caso. Retirado de Herwig (2005).

Logo depois de a estrela deixar a fase AGB, não conseguimos obter informações diretas sobre a estrela central, visto que esta se encontra fortemente obscurecida por seu envoltório circunstelar que ainda se encontra muito próximo. Esse fato ocorre especialmente com Pós-AGBs muito luminosas e, portanto, muito massivas, porque estas aumentam a temperatura de sua superfície em uma escala de tempo muito curta quando comparada à escala de tempo de expansão do envoltório. Nesse caso, as observações resultam em uma Distribuição Espectral de Energia (SED) com um único pico, que não permite a distinção entre a estrela central e seu envoltório.

Por outro lado, as Pós-AGB de menor massa são menos obscurecidas no óptico, e em muitos casos uma expansão adiantada do envoltório circunstelar causa uma redução

significativa na profundidade óptica da linha de visada da estrela central em uma curta escala de tempo, o que nos permite detectar uma contraparte no óptico, resultando em uma importante característica das estrelas Pós-AGB, a SED de duplo pico: o primeiro dado pela emissão da estrela central, que abrange o intervalo espectral do visível; e o segundo resultante da emissão dos grãos presentes no envoltório, no infravermelho próximo e infravermelho médio. Essa característica é mostrada na Figura 1.8.

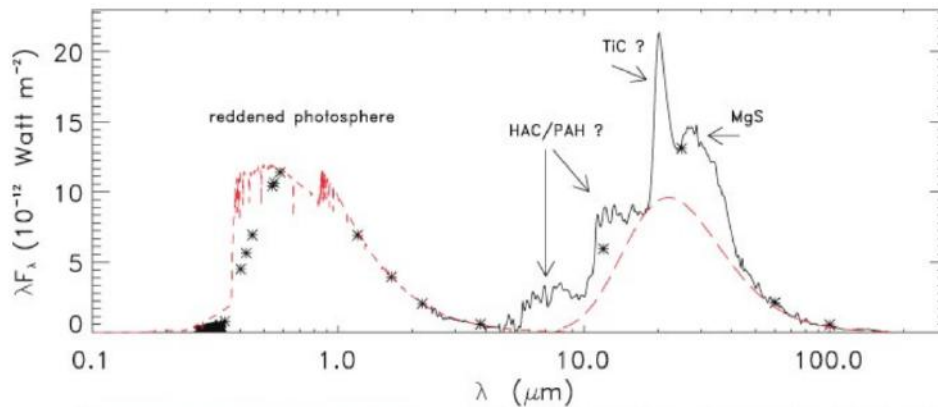


FIGURA 1.8. Distribuição espectral de energia de uma Pós-AGB mostrando a característica emissão de duplo pico: o primeiro associado à emissão da estrela central no óptico, e o segundo associado à emissão dos grãos presentes no envoltório, no infravermelho. Retirado de van Winckel (2003).

Por conta da emissão dos grãos no infravermelho, as observações neste intervalo espectral são fundamentais para o estudo desses objetos. Por isso, levantamentos como o realizado pelo *InfraRed Astronomical Satellite* (IRAS) foram fundamentais para descobrir objetos Pós-AGB e estudar suas propriedades. Além disso, dados espectroscópicos do *Infrared Space Observatory* (ISO) fornecem importantes contribuições para o estudo do material circunestelar. Neste trabalho, utilizamos dados de espectroscopia ISO e dados fotométricos do IRAS, além de outros levantamentos no infravermelho, para estudar as propriedades das Pós-AGB.

Esperamos que a composição química das Pós-AGBs reflita a composição inicial da estrela, influenciada pelos processos de dragagem mencionados anteriormente. Na fase Pós-AGB, são encontradas estrelas de tipos espectrais variando desde o tipo G até o tipo B, no caso das mais quentes. Por conta disso, podemos obter a abundância de diversas espécies químicas, desde elementos do ciclo CNO, a elementos pesados do processo-s. Além de analisarmos a abundância química nesses objetos para estudar a natureza das Pós-AGBs, essa análise permite também restringir os parâmetros de modelos químicos.

Como mencionado anteriormente, devido à alta energia de ligação da molécula de CO, podemos utilizá-la para estudar a química de estrelas AGB. Da mesma forma, podemos utilizar essa molécula para estudar a química dos envoltórios circunstelares de Pós-AGBs: estrelas que possuem em seu envoltório uma razão de abundância $C/O > 1$ são chamadas de ricas em carbono; as que possuem $C/O < 1$ são chamadas de ricas em oxigênio. Existem, ainda, aquelas que apresentam componentes carbonáceos e oxigenados na composição de seu envoltório, as chamadas Pós-AGBs de química dupla.

Neste trabalho, a partir de uma amostra de Pós-AGBs, analisamos e discutimos as propriedades dos envoltórios circunstelares e das estrelas centrais a fim de criar ferramentas que possam auxiliar na classificação desses objetos. Nossa amostra conta com seis classes de Pós-AGBs: ricas em carbono, ricas em oxigênio, Pós-AGBs de química dupla, estrelas 21 μm , RV Tauri e Water Fountains. Cada uma das classes é discutida no Capítulo 2.

Os estudos dos envoltórios e das estrelas centrais são realizados, respectivamente, nos Capítulos 3 e 4. Então, a partir desses estudos, criamos diagramas cor-cor utilizando cores no infravermelho como ferramenta para separar os objetos da amostra de acordo com suas classes, conforme é apresentado e discutido no Capítulo 5. Por último, as conclusões deste trabalho são apresentadas no Capítulo 6.

Capítulo 2

Classes de Pós-AGBs

Nesse capítulo, será apresentada uma análise sobre as classes das estrelas Pós-AGBs estudadas. Na literatura, encontramos diversas classificações de objetos Pós-AGBs que utilizam diferentes critérios, tais como aspectos observacionais, morfologia do envoltório observado, abundância fotosférica, entre outros. Neste trabalho, o critério de classificação adotado inicialmente para distinguir os objetos foi a química do envoltório circumstelar.

A amostra utilizada conta com 79 estrelas: 10 Pós-AGBs carbonadas, 10 Pós-AGBs oxigenadas, 7 Pós-AGBs de química dupla, 6 objetos 21 μm , 10 objetos Water Fountain, 26 RV Tauri e 10 candidatas a Pós-AGB. Segundo Kluska et al. (2022), 85 das 209 Pós-AGBs galácticas conhecidas são binárias e, 13 estrelas da nossa amostra encontram-se no catálogo de Pós-AGBs binárias desses autores. Nenhuma das candidatas está incluída.

A seguir, descreveremos as características de cada classes dos objetos presentes em nossa amostra. As 10 candidatas a Pós-AGB incluídas neste trabalho serão apresentadas na seção 5.3.

2.1 Pós-AGBs carbonadas

As Pós-AGBs ricas em carbono são aquelas que possuem em seu envoltório circumstelar uma razão $C/O > 1$. Segundo Molina et al. (2019), as Pós-AGBs carbonadas

apresentam um enriquecimento significativo por carbono e elementos do processo-s, são em geral não-binárias e compõem apenas uma pequena fração das Pós-AGBs conhecidas. Esperamos encontrar material rico em carbono ao redor da estrela central devido ao processo de terceira dragagem na fase de pulsos térmicos (TP-AGB), quando a estrela se encontra no fim do AGB, como discutido na introdução deste trabalho.

Em relação à espectroscopia, a presença de carbono molecular no espectro óptico de Pós-AGB é característica da classe das carbonadas. De acordo com Hrivnak (1995), entre as principais linhas espectrais que aparecem em emissão e absorção no espectro desses objetos, podemos citar as de C_2 em 4715, 4737, 5129 e 5165 Å; de C_3 em 3991 e 4050 Å; e de CN em 4216 Å. Além disso, também esperamos encontrar linhas associadas aos elementos do processo-s, como Ba, Sr e Y, elementos associados à terceira dragagem que também são transportados ao meio interestelar por ventos estelares. Podemos verificar algumas das linhas esperadas nos espectros observados por Hrivnak (1995), apresentados nas Figuras 2.1 e 2.2.

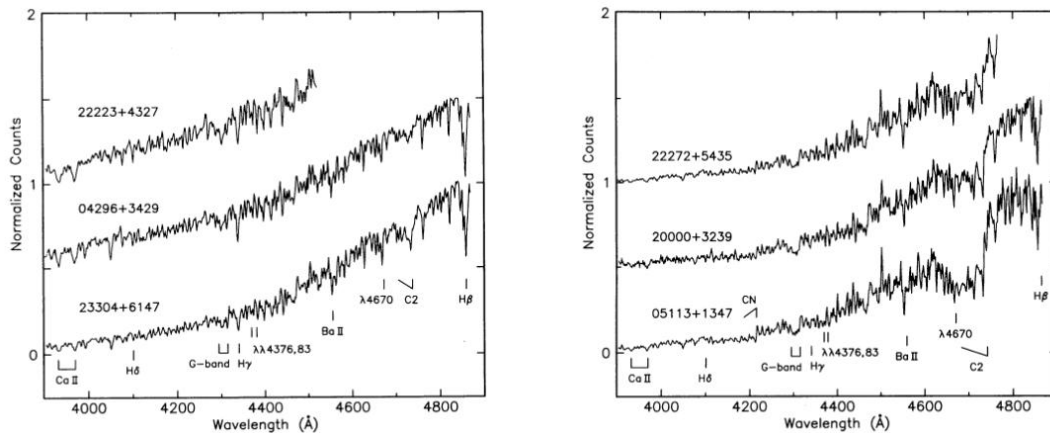


FIGURA 2.1. Espectros ópticos de seis estrelas Pós-AGB carbonadas, mostrando as linhas em 4715 e 4737Å de C_2 , e uma linha de Ba II em 4554Å, encontradas no espectro dessa classe de estrelas, junto com a marcação de outras linhas proeminentes. Retirado de Hrivnak (1995).

Além disso, características espectrais no infravermelho, que aparecem tanto em emissão quanto em absorção, também podem ser utilizadas para identificar e classificar essas fontes, dentre as quais podemos citar: as bandas em 3.3, 6.2, 7.7, 8.6, 11.3, 12.4 e 13.3 μm associadas a combinações de material carbonáceo, como Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (PAHs), acompanhadas de componentes em 3.4 e 6.9 μm associadas a grupos alifáticos anexados aos hidrocarbonetos aromáticos; uma banda em 13.7 μm associada à molécula C_2H_2 , e uma componente de emissão não-identificada em 20.1 μm . Além do mais, por vezes é observada uma emissão em 30 μm , associada à

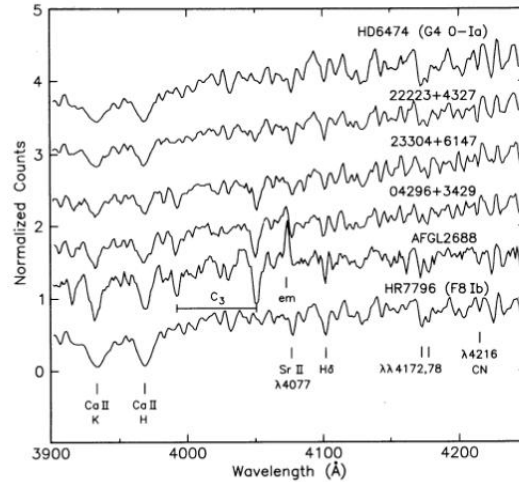


FIGURA 2.2. Espectros da Figura 2.2 expandidos mostrando as linhas de C_3 em 3991 e 4050 Å, de CN em 4216 Å, e uma linha de Sr II em 4077 Å, entre outras linhas proeminentes. Retirado de Hrivnak (1995).

molécula de MgS, apesar desta não ser capaz de explicar todos os fluxos observados no infravermelho (Mishra et al., 2016). A Figura 2.3 apresenta o espectro no infravermelho, no intervalo de 9 a 21 μm , de seis estrelas Pós-AGBs carbonadas, mostrando algumas das componentes espectrais citadas. Na figura, podemos observar uma marcação em 13.7 μm , onde é esperada a componente associada à molécula de C_2H_2 .

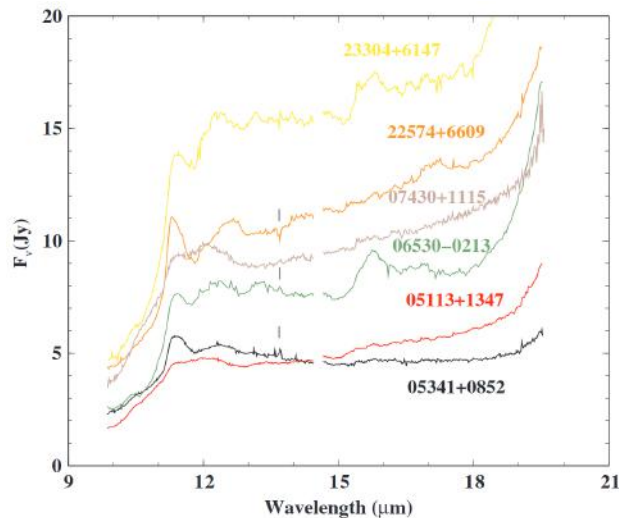


FIGURA 2.3. Espectros de alta resolução de seis estrelas Pós-AGBs carbonadas no intervalo de 9 a 21 μm , mostrando alguns dos componentes espectrais esperados para essa classe de objetos, como a banda em 13.7 μm , marcada na figura, associada à molécula de C_2H_2 . Retirado de Hrivnak et al. (2009).

Foram citadas as principais características espectrais que permitem distinguir as Pós-AGBs carbonadas de outras classes de Pós-AGBs. É importante citar também que a emissão ainda não-identificada em 20.1 μm define uma subclasse de Pós-AGBs carbonadas chamada de Pós-AGBs 21 μm , cuja análise é apresentada a seguir.

2.1.1 Objetos 21 μm

Essa classe de objetos foi inicialmente proposta por Kwok et al. (1989) com base nos espectros observados pelo IRAS de quatro fontes Pós-AGB que possuíam uma componente nova com pico em 20.1 μm . Por possuírem uma componente em aproximadamente 21 μm , essas fontes ficaram conhecidas como “objetos 21 μm ”. Posteriormente, descobriu-se que todos os objetos dessa classe possuíam em comum uma química rica em carbono: a natureza carbonada de certas fontes foi confirmada pela detecção de bandas de C_2 , C_3 e CN no óptico (Hrivnak, 1995) e posteriormente por estudos de abundância em alta resolução (Van Winckel & Reyniers, 2000; Reddy et al., 2002). Na literatura, são conhecidas 27 Pós-AGBs com a característica 21 μm , incluindo 18 objetos Galácticos e 9 objetos nas Nuvens de Magalhães (Mishra et al., 2016). Além disso, as fontes 21 μm apresentam também a emissão em 30 μm . Contudo, diferentemente da componente 21 μm , que é observada apenas em Pós-AGBs, a emissão em 30 μm também é observada em estrelas AGB e em nebulosas planetárias ricas em carbono (Mishra et al., 2016).

A Figura 2.4 mostra o espectro observado pelo instrumento *InfraRed Spectrograph* (IRS) do telescópio espacial Spitzer, no intervalo espectral de 10 a 35 μm , de sete fontes 21 μm estudadas por Hrivnak et al. (2009), onde observamos a componente de emissão característica em 21 μm . Na literatura, muitas espécies moleculares já foram sugeridas como sendo as responsáveis por essa emissão, como por exemplo fulerenos acoplados a átomos de titânio (Kimura et al., 2005); PAHs e carbono amorfo hidrogenado (Buss et al., 1993; Justtanont et al., 1996); e inclusive espécies não-carbonadas como FeO (Posch et al., 2004). Duas das melhores candidatas de espécies moleculares que podem explicar a componente em 21 μm são o TiC (von Helden et al., 2000) e o SiC (Speck & Hofmeister, 2004). Porém, a maior parte das moléculas sugeridas possuem componentes de emissão associados em outros comprimentos de onda que não são observados ou confirmados nessas fontes (Hrivnak et al., 2009). Por outro lado, o trabalho de Sánchez (2010) apresenta a modelagem de fontes 21 μm utilizando um código de transferência radiativa com diferentes espécies de grãos, e seus resultados sugerem que a molécula de FeO é adequada para representar a emissão em 21 μm .

Em seu trabalho, Hrivnak et al. (2009) concluem que todas as Pós-AGBs carbonadas galácticas (com exceção de uma) possuem a componente em 21 μm , mas essa componente parece estar ausente ou ser mais fraca em estrelas carbonadas extremas e

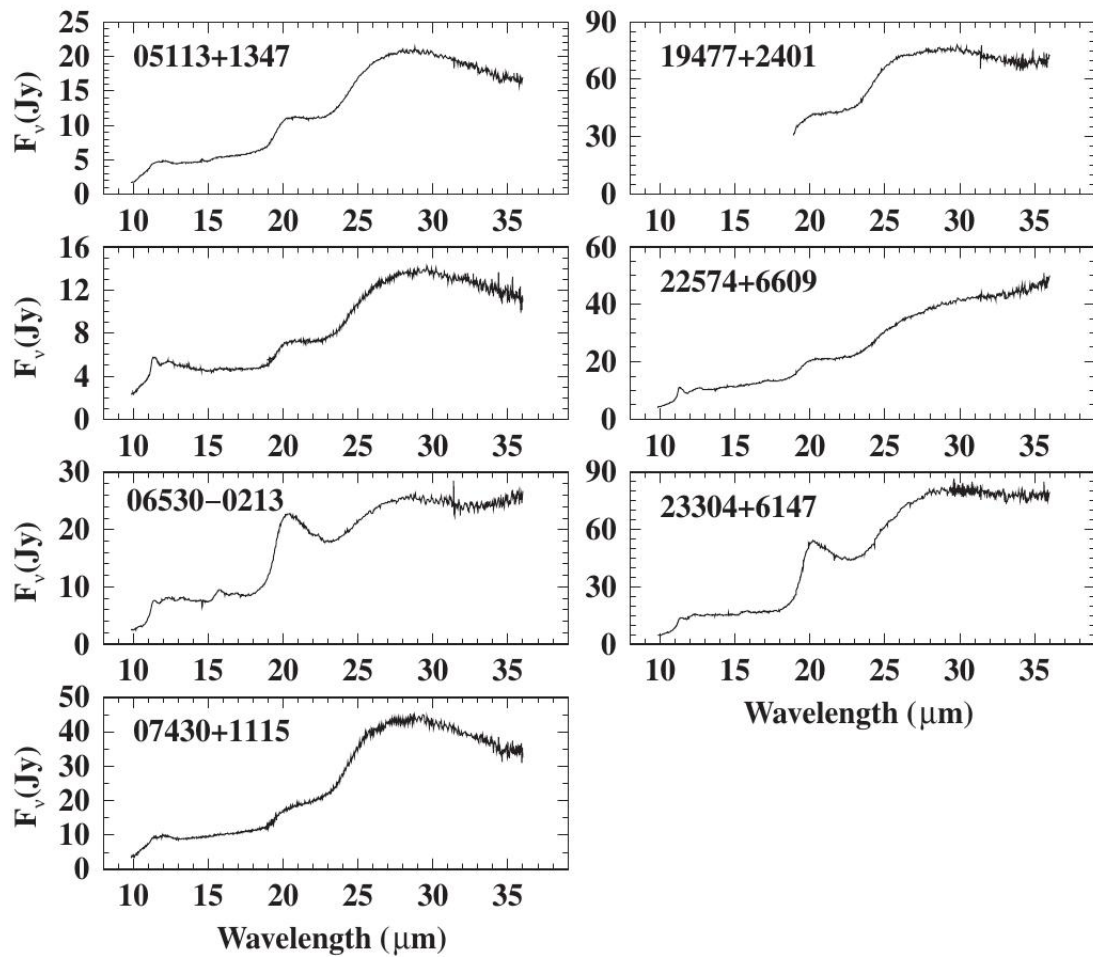


FIGURA 2.4. Espectros Spitzer IRS de alta resolução de sete fontes $21 \mu\text{m}$, com cada um mostrando a banda característica dessa classe de objetos. Retirado de Hrivnak et al. (2009).

nebulosas planetárias. De acordo com os autores, esse resultado sugere que o responsável pela emissão em $21 \mu\text{m}$ é produzido durante o período de extrema perda de massa ao final da fase AGB, excitado durante a fase de Pós-AGB, sendo destruído pelo campo de radiação ultravioleta (UV) na fase de nebulosa planetária, uma vez que essa componente não é observada nessas fontes. Essa hipótese concorda com o trabalho de Mishra et al. (2016), que apresenta um cenário onde a molécula responsável pela emissão em $21 \mu\text{m}$ encontra-se inicialmente envolta por uma estrutura de poeira carbonada na fase AGB, e então é liberada dessa estrutura e excitada por fótons de UV na fase Pós-AGB, e posteriormente destruída pelos fótons de UV muito mais intensos que estão presentes na fase de NP.

Na literatura recente, a emissão $21 \mu\text{m}$ continua a ser investigada por diversos autores, como por exemplo Zhang (2020) e Volk et al. (2020). Em seu trabalho, Zhang

(2020) estuda a possibilidade de fulerenos serem os responsáveis pela emissão em $20.1 \mu\text{m}$. Segundo o autor, fulerenos são sensíveis à radiação UV, e portanto podem fornecer uma explicação natural para o surgimento da emissão $21 \mu\text{m}$. Porém, o espectro teórico dos fulerenos apresenta características espectrais intensas no intervalo de 13 a $17 \mu\text{m}$, que não são observadas nos objetos $21 \mu\text{m}$.

Em conclusão, observamos que as componentes moleculares responsáveis pela emissão $21 \mu\text{m}$ ainda se mantêm como um problema em aberto na literatura. Com isso, a partir do estudo dos seis objetos $21 \mu\text{m}$ presentes em nossa amostra, este trabalho pode fornecer informações valiosas sobre a natureza desses objetos, como por exemplo, as características espectrais que podem ser utilizadas para diferenciar objetos da classe $21 \mu\text{m}$ de outras Pós-AGBs carbonadas.

2.2 Pós-AGBs oxigenadas

Dentre as estrelas que percorrem o AGB ao longo de sua evolução, esperamos que todas, dentro de um intervalo de massas iniciais, passem pelo processo de terceira dragagem. Nesse caso, é esperado encontrar um enriquecimento de carbono e de elementos do processo-s durante a subsequente fase Pós-AGB. Por outro lado, são observadas Pós-AGBs com uma razão $\text{C/O} < 1$ em seu envoltório circunstelar, e na literatura estas são comumente associadas a progenitoras cujas massas iniciais encontram-se fora deste intervalo. Essas Pós-AGBs são conhecidas como oxigenadas.

O limite inferior para esse intervalo de massas iniciais para o qual a estrela torna-se carbonada foi proposto há duas décadas por van Winckel (2003) como sendo de $M = 1.5 M_{\odot}$. Porém, o intervalo exato ainda é debatido na literatura recente. Por exemplo, para explicar a existência de Pós-AGBs oxigenadas, Kamath et al. (2022) apresentam as seguintes hipóteses: (a) a massa do envelope no início do AGB é baixa o suficiente para que todo o manto externo seja perdido após alguns pulsos térmicos, apresentando efeitos insignificantes da terceira dragagem; (b) a estrela sofreu uma perda antecipada do envelope, resultado de uma possível interação gravitacional ou de transferência de massa a uma companheira binária, por exemplo; (c) a estrela passou pelo processo de *hot bottom burning*, resultando na depleção de carbono através de reações de captura

de prótons nas regiões mais internas do envelope, uma vez que as temperaturas nessas regiões chegam a aproximadamente 3×10^4 K.

A hipótese (a) está associada com a evolução de estrelas de baixa massa, que possuem massa de aproximadamente $1 M_{\odot}$ ou menor no início do AGB; enquanto a hipótese (b) diz respeito à estrelas que sofrem um rápido processo de perda do envelope externo; e a hipótese (c) é a que envolve estrelas com massas iniciais de $M \geq 3 M_{\odot}$ (Kamath et al., 2022).

Devido ao baixo enriquecimento de carbono, no intervalo espectral do óptico dessa classe de Pós-AGBs esperamos encontrar um espectro dominado por linhas de oxigênio, com poucas linhas de carbono. A Figura 2.5 mostra algumas componentes de O II em absorção no intervalo espectral 4300 e 4370 Å de uma Pós-AGB quente.

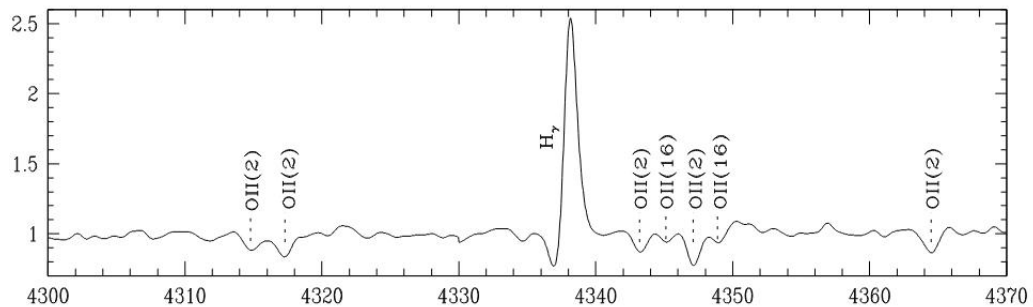


FIGURA 2.5. Espectro de alta resolução na região do óptico da Pós-AGB quente IRAS 22023+5249, mostrando algumas linhas de O II em absorção e a linha de $H\gamma$ em emissão. O eixo horizontal é medido em angstroms. Retirado de Sarkar et al. (2012).

Em relação ao espectro no infravermelho, esperamos encontrar componentes moleculares oxigenadas, tais como: uma banda em $9.7 \mu\text{m}$ devido à presença de grãos de silicatos amorfs, principal característica em envoltórios circumstelares ricos em oxigênio (Bunzel et al., 2009); componentes em 18 e $33.4 \mu\text{m}$, associadas, respectivamente, a grãos de silicato amorfo e de silicato cristalino; uma linha de absorção em $4.25 \mu\text{m}$ associada à molécula de CO_2 , juntamente com outras componentes associadas à molécula de H_2O ; e bandas associadas ao gelo de H_2O em 3.1 e $6 \mu\text{m}$ (Pereira et al., 2004). As Figuras 2.6 e 2.7 apresentam espectros no infravermelho de uma Pós-AGB oxigenada estudada por Pereira et al. (2004), mostrando algumas das componentes citadas.

Por fim, notamos que o estudo da relação entre a massa inicial da estrela e a química predominante do envoltório circumstelar na fase Pós-AGB se mantém relevante na literatura recente. A seguir, discutimos sobre Pós-AGBs que possuem em seu espectro infravermelho características tanto de Pós-AGBs carbonadas, como de oxigenadas.

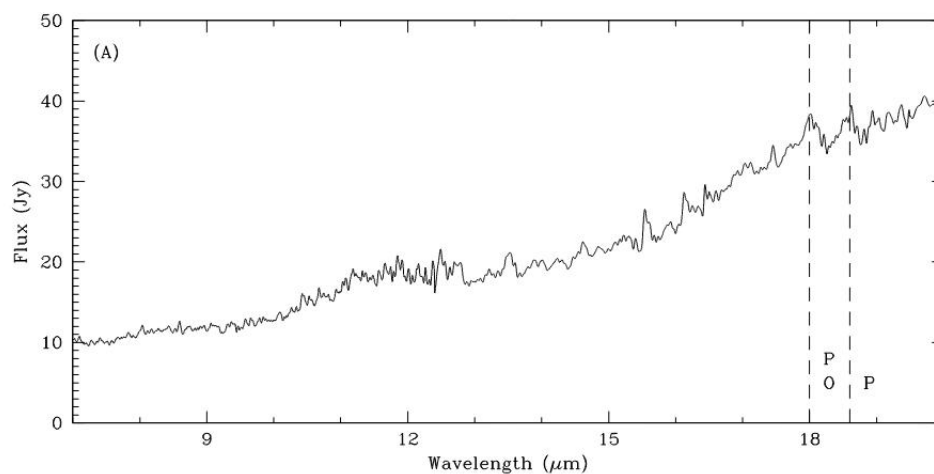


FIGURA 2.6. Espectro na região do infravermelho da Pós-AGB oxigenada IRAS 19386+0155, mostrando a componente de emissão associada a silicatos amorfos em 18 μm . Retirado de Pereira et al. (2004).

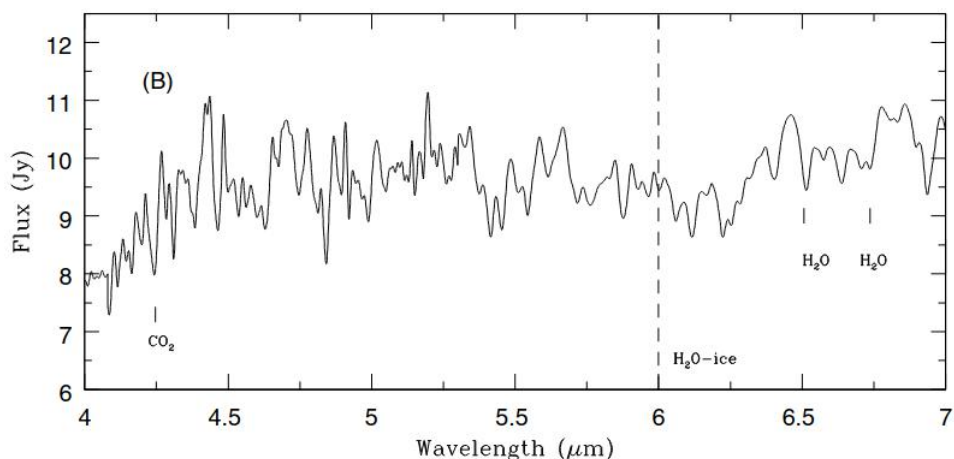


FIGURA 2.7. O mesmo que a Figura 2.6, mas mostrando componentes de CO_2 e H_2O entre 4 e 7 μm . Neste objeto, a componente em 6 μm associada ao gelo de H_2O está ausente. Retirado de Pereira et al. (2004).

2.3 Pós-AGBs de química dupla

As Pós-AGBs de química dupla são assim chamadas porque apresentam em seu envoltório tanto componentes espectrais carbonáceos como componentes oxigenados, como PAHs, silicatos amorfos e silicatos cristalinos. A origem da poeira de química ainda é debatida na literatura, e diversos mecanismos já foram propostos para explicá-la, entre eles a presença de um sistema binário, pulsos térmicos tardios nas fases AGB ou Pós-AGB, e a interrupção do processo de HBB por altas taxas de perda de massa.

Uma das Pós-AGBs de química dupla que é extensamente estudada na literatura é IRAS 22023+5249, caracterizada por uma estrela central rica em oxigênio, e um

envoltório circumstelar onde são encontradas moléculas carbonáceas e silicatos amorfos (Sarkar et al., 2012). A Figura 2.8 apresenta o espectro IRS no intervalo de 5 a 14 μm , e de 5 a 35 μm , de 5 Pós-AGBs de química dupla estudadas por Cerrigone et al. (2009), incluindo a estrela IRAS 22023+5249. Na figura, podemos observar as emissões em 6.2 e 7.7 μm associadas a PAHs, e a banda em 9.7 μm associada a silicatos amorfos. Algumas fontes também possuem linhas intensas em 7.5 e 12.8 μm , associadas ao [Ne II] e [Ar II], respectivamente.

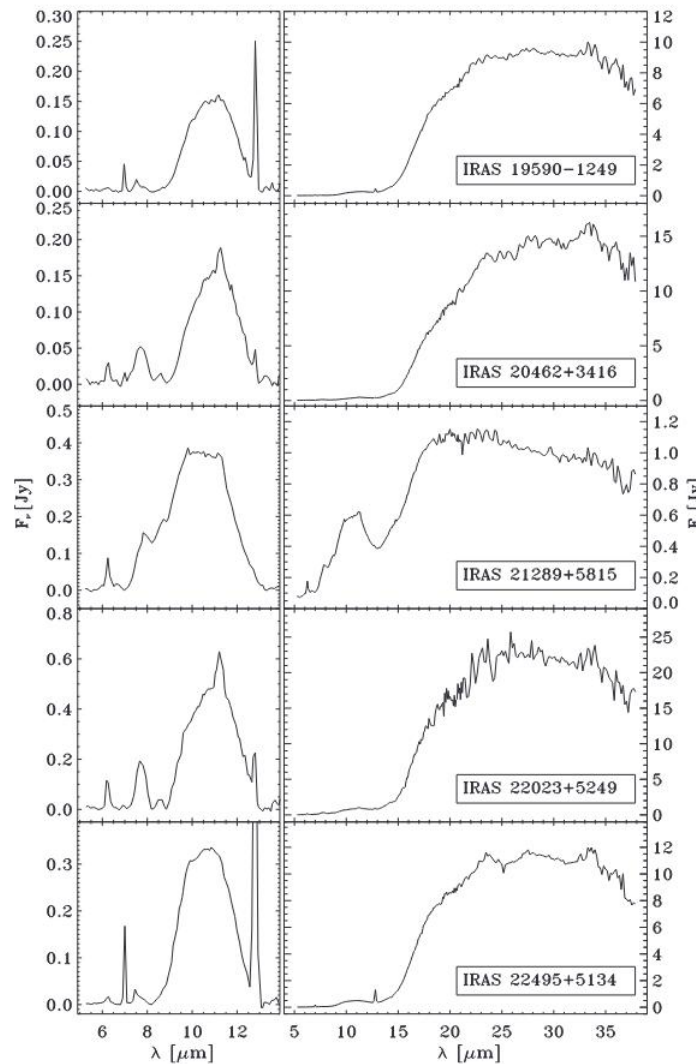


FIGURA 2.8. Espectro de Pós-AGBs de química dupla mostrando componentes carbonadas em 6.2 e 7.7 μm , associadas a PAHs, e a banda em 9.7 μm associada a grãos de silicato amorfo. À direita são mostrados os espectros inteiros obtidos, e à esquerda o intervalo de 5 a 14 μm do mesmo espectro após a subtração do contínuo. Retirado de Cerrigone et al. (2009).

Uma das hipóteses para explicar a presença de química dupla na estrela IRAS 22023+5249, e em outras Pós-AGBs quentes, é a de que esta característica é devida a um disco circumbinário onde moléculas oxigenadas seriam preservadas da terceira

dragagem, enquanto as moléculas carbonadas seriam formadas em uma outra região (Cerrigone et al., 2009).

Por outro lado, Guzman-Ramirez et al. (2011) apresentam uma ideia diferente em relação à origem da química dupla. Estes autores apresentam um modelo químico capaz de formar cadeias de hidrocarbonetos em um toro denso irradiado por fótons de UV, a fim de explicar a alta taxa de detecção de nebulosas planetárias de química dupla no bojo Galáctico. Porém, os campos de radiação UV em estrelas Pós-AGB nem sempre apresentam intensidades altas o suficiente para quebrar as moléculas de CO nos envoltórios (Sarkar et al., 2012).

Além disso, outra explicação é dada pela hipótese de uma química de não-equilíbrio induzida por choques, cenário demonstrado por Cherchneff (2011). Observações espectroscópicas de Pós-AGBs apresentam evidências que favorecem esse cenário: o espectro óptico de IRAS 22023+5249, por exemplo, apresenta evidências de choques e de ventos estelares fortes e variáveis. Assim, a ausência de moléculas carbonadas no espectro de Pós-AGBs oxigenadas, por exemplo, pode estar relacionada com a ausência de ventos estelares fortes e com a ausência de perda de massa significativa. Sem fortes ventos e perda de massa intensa, o processo de formação de moléculas carbonadas por choques é desfavorecido (Sarkar et al., 2012).

Em suma, estrelas Pós-AGBs podem apresentar envoltórios que possuem componentes carbonáceos e oxigenados. Essa classe de estrelas é detectada principalmente pela presença de PAHs e de silicatos cristalinos, que geram componentes observáveis no espectro infravermelho desses objetos. Como o processo de formação da poeira de química dupla ainda não é bem entendido na literatura, as análises das Pós-AGBs de química dupla realizadas neste trabalho podem contribuir para o estudo desses objetos.

2.4 RV Tauri

As estrelas RV Tauri são as estrelas mais luminosas entre as Cefeidas de tipo II e apresentam em geral tipos espectrais entre F e K. As Cefeidas de tipo II, por sua vez, formam um grupo de estrelas variáveis de baixa massa, com aproximadamente $0.5 M_{\odot}$, que podem ser classificadas de acordo com seus períodos de pulsação: estrelas BL Herculis, com períodos entre 1 e 5 dias; W Virginis, com períodos entre 5 e 20 dias; e

por fim as estrelas RV Tauri, cujos períodos são maiores do que 20 dias (Jurkovic et al., 2023).

Entre as características marcantes que definem as RV Tauri, podemos citar suas curvas de luz, que alternam-se entre mínimos profundos e rasos, e suas altas luminosidades. Além disso, a presença de poeira circunstelar ao redor de muitas estrelas RV Tauri é uma das principais responsáveis pela classificação desses objetos como Pós-AGBs (Lloyd Evans, 1985; Jura, 1986). De acordo com Manick et al. (2018), a natureza Pós-AGB das estrelas RV Tauri foi corroborada pelo estudo da relação período-luminosidade para as Cefeidas de tipo II na Pequena Nuvem de Magalhães, realizado por Alcock et al. (1998). Porém, alguns aspectos observacionais apresentam um cenário diferente para alguns desses objetos: algumas estrelas RV Tauri com uma SED de tipo disco, e portanto provavelmente binárias (van Winckel et al., 2009), possuem luminosidade menor do que uma estrela de baixa massa no topo do RGB. Assim, esses objetos poderiam ser vistos como exemplos de estrelas Pós-RGB.

Os resultados do trabalho de Manick et al. (2018) sugerem que as RV Tauri binárias mais luminosas que possuem poeira circunstelar são de fato objetos Pós-AGB, enquanto as menos luminosas são vistas como objetos Pós-RGB. Além disso, foram observadas RV Tauri sem poeira circunstelar, que podem ser explicadas por um cenário com Pós-AGBs sem companheiras binárias, de baixa massa inicial ($< 1.25 M_{\odot}$) e baixa luminosidade nas quais a poeira foi dissipada logo após o início da fase Pós-AGB (Manick et al., 2018).

Quimicamente, a maior parte das estrelas RV Tauri conhecidas não apresenta sinais da terceira dragagem nem de enriquecimento de elementos do processo-s em suas fotosferas (Giridhar et al., 1994; Gonzalez et al., 1997; Van Winckel et al., 1998; Giridhar et al., 2000), de forma que esperamos que esses objetos possuam características espectrais condizentes com uma química fotosférica rica em oxigênio.

A Figura 2.9 apresenta a curva de luz da estrela R Sct classificada como RV Tauri e estudada por Matsuura et al. (2002), onde podemos observar o padrão de mínimos característico dessa classe de estrelas. A Figura 2.10 mostra uma comparação entre o espectro de R Sct e a AGB rica em oxigênio *o* Cet no infravermelho, onde observamos componentes moleculares oxigenados, como a emissão bastante intensa em $9.7 \mu\text{m}$ associada a silicatos amorfos, presente apenas na estrela RV Tauri, e a absorção em $4.25 \mu\text{m}$ associada à molécula de CO_2 .

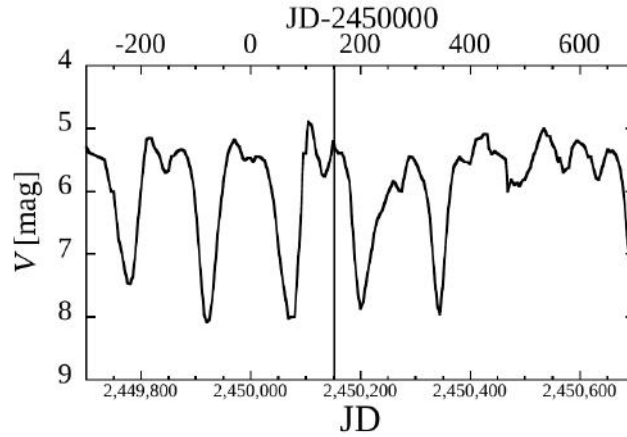


FIGURA 2.9. Curva de luz visual da RV Tauri R Sct, com magnitudes calculadas em intervalos de 5 dias. A linha vertical representa a data da observação ISO/SWS. Retirado de Matsuura et al. (2002).

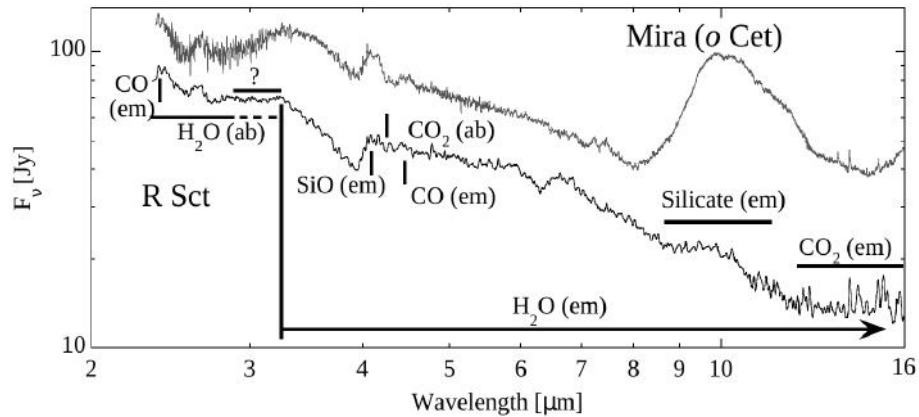


FIGURA 2.10. Espectro ISO/SWS da RV Tauri R Sct (espectro inferior), com indicação das componentes moleculares mais proeminentes. O espectro superior é da estrela AGB oxigenada *o Cet*. Observamos a componente característica de envoltórios oxigenados em $9.7 \mu\text{m}$, associada a grãos de silicatos amorfos. Retirado de Matsuura et al. (2002).

Deste modo, objetos RV Tauri são em geral estrelas oxigenadas variáveis que podem ser classificadas como Pós-AGBs e Pós-RGBs, e são identificadas por suas curvas de luz bastante características. Além disso, podem ser encontradas em sistemas únicos ou binários. O estudo das RV Tauri presentes neste trabalho podem ajudar no entendimento das diferentes características observadas nesses objetos.

2.5 Water Fountains

Os objetos da classe Water Fountain são estrelas oxigenadas que possuem envoltórios circumstelares extremamente opacos e que se encontram no final da fase AGB ou no início da fase Pós-AGB. Estes objetos apresentam intensas emissões características

de *maser* de H_2O em 22.2 GHz, e de OH em 1612, 1665 e 1667 MHz. Segundo Moreira (2014), citando os autores Desmurs (2012) e Engels (2012), as Water Fountains se destacam pelo perfil de duplo pico na emissão *maser* de H_2O , cujas velocidades são da ordem de 100 km/s, muito maiores do que as velocidades observadas nas estrelas AGB cujos valores típicos são da ordem de 15 km/s. Em geral, a escala de velocidades dos *masers* de água nas estrelas Water Fountains é da ordem de 10 vezes maior do que em outras estrelas na mesma fase evolutiva Moreira (2014), e por isso são objetos peculiares.

Na literatura, o estudo da emissão de *maser* de H_2O em estrelas do catálogo IRAS por Zuckerman & Lo (1987) revelou uma estrela cuja emissão possuía velocidade radial muito acima da esperada, da ordem de 140 km/s. Esse resultado foi posteriormente confirmado por Likkell et al. (1988), que definiram uma nova classe de objetos evoluídos com altas velocidades de emissão *maser* de H_2O , a classe Water Fountain.

Existem poucos objetos conhecidos pertencentes à essa classe: na literatura mais recente apenas 15 Water Fountains foram confirmadas (Amada et al., 2022). Além disso, observações recentes desses objetos sugerem que a componente estelar central pertence a um sistema binário, que compartilha um envoltório comum (Tafoya et al., 2020; Khouri et al., 2021). Porém, as condições evolutivas das Water Fountains ainda são pouco entendidas por conta das limitações impostas pela alta opacidade dos envoltórios aos estudos das componentes estelares centrais, o que realça a relevância do estudo desses objetos.

Como veremos no Capítulo 5, nosso trabalho foi relevante no sentido de definir as principais características espectrais das SEDs de cada classe de Pós-AGB das estrelas da nossa amostra, e assim criar diagramas cor-cor que podem ser utilizados para separar essa diferentes classes e atuar como ferramenta auxiliar para a classificação de candidatas a Pós-AGB. A seguir, apresentamos a amostra de Pós-AGBs e candidatas utilizada neste trabalho.

2.6 Amostra utilizada

A amostra de objetos Pós-AGBs e candidatas utilizada neste trabalho conta com 10 Pós-AGBs carbonadas, 10 Pós-AGBs oxigenadas, 7 Pós-AGBs de química dupla, 6 objetos 21 μm , 10 objetos Water Fountain, 26 RV Tauri e 10 candidatas a Pós-AGB,

totalizando 79 objetos. As candidatas a Pós-AGB são numeradas na tabela com o objetivo de permitir a análise desses objetos nos diagramas cor-cor, que serão apresentados no Capítulo 5, e simplificar a discussão. Ao longo da discussão deste trabalho, por vezes as candidatas são mencionadas conforme sua numeração definida nessa tabela.

Na Tabela 2.1 a seguir, que apresenta a nossa amostra, a primeira coluna contém o nome, seguido pelo identificador do objeto no catálogo IRAS, sua classe sugerida, e suas coordenadas de ascensão reta (RA) e declinação (DEC).

TABELA 2.1. Amostra utilizada nesse trabalho, com seus identificadores mais comuns, identificação no catálogo IRAS, classe, ascensão reta (RA) e declinação (DEC).

Objeto	ID IRAS	Classe	RA	DEC
V* V1610 Cyg	IRAS R21003+3629	Carbonada	21:02:18.27	+36:41:37.0
RAFGL 618	IRAS 04395+3601	Carbonada	04:42:53.62	+36:06:53.4
HD 56126	IRAS 07134+1005	Carbonada	07:16:10.26	+09:59:48.0
	IRAS 06530-0213	Carbonada	06:55:31.82	-02:17:28.2
HD 235858	IRAS 22272+5435	Carbonada	22:29:10.37	+54:51:06.3
	IRAS 23304+6147	Carbonada	23:32:44.79	+62:03:49.1
SS 293	IRAS 16594-4656	Carbonada	17:03:10.07	-47:00:27.7
	IRAS 19454+2920	Carbonada	19:47:24.80	+29:28:10.8
V* V340 Ser	IRAS 17279-1119	Carbonada	17:30:46.92	-11:22:08.3
HD 172481	IRAS 18384-2800	Carbonada	18:41:36.96	-27:57:01.2
HD 331319	IRAS 19475+3119	Oxigenada	19:49:29.56	+31:27:16.2
IRC +10420	IRAS 19244+1115	Oxigenada	19:26:48.10	+11:21:16.8
	IRAS 22036+5306	Oxigenada	22:05:30.29	+53:21:32.8
RAFGL 6815S	IRAS 17150-3224	Oxigenada	17:18:19.83	-32:27:21.4
	IRAS 17516-2525	Oxigenada	17:54:43.35	-25:26:28.1
OH 15.7 +0.8	IRAS 18135-1456	Oxigenada	18:16:25.78	-14:55:13.7
HD 161796	IRAS 17436+5003	Oxigenada	17:44:55.47	+50:02:39.5
Hen 3-1475	IRAS 17423-1755	Oxigenada	17:45:14.18	-17:56:46.8
CD-44 4961	IRAS 08544-4431	Oxigenada	08:56:14.18	-44:43:10.7
HD 93662	IRAS 10456-5712	Oxigenada	10:47:38.40	-57:28:02.7
HD 44179	IRAS 06176-1036	Química Dupla	06:19:58.22	-10:38:14.7
	IRAS 19306+1407	Química Dupla	19:32:55.08	+14:13:36.9
	IRAS 16279-4757	Química Dupla	16:31:38.74	-48:04:05.6
HD 302821	IRAS 10215-5916	Química Dupla	10:23:19.48	-59:32:04.6
EM* MWC 939	IRAS 18313-1738	Química Dupla	18:34:16.22	-17:36:14.0
HD 137569	IRAS F15240+1452	Química Dupla	15:26:20.82	+14:41:36.3
BD-13 5550	IRAS 19590-1249	Química Dupla	20:01:49.83	-12:41:17.8
V* RV Tau	IRAS 04440+2605	RV Tauri	04:47:06.72	+26:10:45.5
V* DF Cyg	IRAS 19472+4254	RV Tauri	19:48:53.95	+43:02:14.5
V* AC Her	IRAS F18281+2149	RV Tauri	18:30:16.24	+21:52:00.6
V* V Vul	IRAS 20343+2625	RV Tauri	20:36:32.02	+26:36:14.5
Cl* NGC 5904 KUST 756	IRAS F15160+0215	RV Tauri	15:18:36.14	+02:04:16.4
LS 5112	IRAS 18379-1707	RV Tauri	18:40:48.62	-17:04:38.3
V* TX Oph	IRAS F17015+0503	RV Tauri	17:04:00.09	+04:59:00.8
HD 172810	IRAS 18398-0741	RV Tauri	18:42:35.74	-07:38:16.8
V* V453 Oph		RV Tauri	17:26:49.13	-02:23:36.4
V* TT Oph		RV Tauri	16:49:35.88	+03:37:54.2
V* AD Aql	IRAS 18564-0814	RV Tauri	18:59:08.70	-08:10:14.0
V* BZ Sct	IRAS 18548-0552	RV Tauri	18:57:33.42	-05:47:55.7
V* UZ Oph		RV Tauri	17:21:59.26	+06:54:42.2
V* DY Aql	IRAS 19437-1104	RV Tauri	19:46:30.53	-10:56:54.9
V* V564 Oph	IRAS F17495+0757	RV Tauri	17:52:01.25	+07:56:29.2
V* V362 Aql		RV Tauri	19:24:57.84	-01:05:08.4
V* V381 Aql		RV Tauri	19:32:53.61	-01:02:13.3
BD+03 3950	IRAS 19125+0343	RV Tauri	19:15:01.18	+03:48:42.6
V* V861 Aql		RV Tauri	19:33:58.71	+04:09:53.3
HD 143352		RV Tauri	15:58:58.27	+26:08:04.6
V* DS Aqr		RV Tauri	22:53:17.04	-18:35:31.0
V* V870 Aql		RV Tauri	19:36:13.79	+07:04:18.5
V* EZ Aql	IRAS 19370+0829	RV Tauri	19:39:29.70	+08:36:28.0
V* QV Aql		RV Tauri	19:54:16.59	+07:36:40.5
V* LN Aql		RV Tauri	19:36:16.09	+11:53:20.6
Cl* NGC 7089 SAW V11		RV Tauri	21:33:32.41	-00:49:05.8
	IRAS 02408+5458	21um	02:44:24.85	+55:11:15.2
RAFGL 5098	IRAS 03313+6058	21um	03:35:31.46	+61:08:50.1
	IRAS 06582+1507	21um	07:01:08.63	+15:03:40.8
RAFGL 5625S	IRAS 21318+5631	21um	21:33:22.79	+56:44:34.5
RAFGL 3068	IRAS 23166+1655	21um	23:19:12.61	+17:11:33.1
HD 187885	IRAS 19500-1709	21um	19:52:52.70	-17:01:50.3
	IRAS 16342-3814	WF	16:37:39.87	-38:20:17.4
	IRAS 15544-5332	WF	15:58:18.83	-53:40:39.8
	IRAS 16552-3050	WF	16:58:27.31	-30:55:07.9
	IRAS 18043-2116	WF	18:07:20.87	-21:16:12.1
OH 12.8 -0.9	IRAS 18139-1816	WF	18:16:49.21	-18:15:01.7
	IRAS 18286-0959	WF	18:31:22.94	-09:57:21.4
OH 31.0 +0.0	IRAS 18450-0148	WF	18:47:41.14	-01:45:11.4
OH 37.1 -0.8	IRAS 18596+0315	WF	19:02:06.29	+03:20:16.0
	IRAS 15445-5449	WF	15:48:19.42	-54:58:20.1
	IRAS 18113-2503	WF	18:14:27.27	-25:03:00.5
HD 161853	IRAS 17460-3114	Candidata 1	17:49:16.56	-31:15:18.1
HD 155448		Candidata 2	17:12:58.77	-32:14:33.6
PN Vy 2-2	IRAS 19219+0947	Candidata 3	19:24:22.24	+09:53:56.3
MR 35	IRAS 11065-6026	Candidata 4	11:08:40.06	-60:42:51.7
OH 329.14 +3.92	IRAS 15405-4945	Candidata 5	15:44:11.06	-49:55:22.1
	IRAS 15066-5532	Candidata 6	15:10:26.68	-55:44:12.0
HD 90177	IRAS 10211-5922	Candidata 7	10:22:53.84	-59:37:28.4
THA 35-II-27	IRAS 10178-5958	Candidata 8	10:19:32.50	-60:13:29.5
PN MaC 1-1	IRAS 06562-0337	Candidata 9	06:58:44.36	-03:41:10.0
OH 231.8 +4.2	IRAS 07399-1435	Candidata 10	07:42:16.95	-14:42:50.2

Capítulo 3

Análise dos Envoltórios Circunstelares

Em certas Pós-AGBs, principalmente naquelas que acabaram de sair da fase AGB, o envoltório circumstelar ainda encontra-se muito próximo da estrela central de forma que, obscurecida pela poeira do envoltório, esta não pode ser observada diretamente. Dessa forma, apenas informações sobre o envoltório circumstelar estão disponíveis para análise. Isso é válido especialmente para Pós-AGBs de maior luminosidade (e portanto de maior massa), uma vez que esses objetos possuem uma escala de tempo evolutiva muito menor do que a escala de tempo de expansão do envoltório circumstelar (Habing & Olofsson, 2004). Como o envoltório contém a massa recentemente ejetada pela estrela quando esta estava no topo da fase AGB, estudá-lo pode fornecer importantes informações sobre as condições físicas e químicas da estrela central e, além disso, pode levar a um melhor entendimento dos ventos presentes na fase AGB.

Neste capítulo, descrevemos ferramentas que podem ser utilizadas para analisar a poeira presente no envoltório dos objetos Pós-AGB.

3.1 Distribuições Espectrais de Energia

Estudos observacionais das Pós-AGBs conhecidas na Galáxia e nas Nuvens de Magalhães mostram que suas distribuições espectrais de energia podem fornecer importantes informações sobre a natureza única ou binária do sistema, como apresentado no

trabalho de Kamath et al. (2022), citando os trabalhos de van Winckel et al. (2009); Kamath et al. (2015) e Oomen et al. (2018). As Pós-AGBs não-binárias, ou únicas, por vezes citadas na literatura como “fontes com envoltório”, apresentam uma característica de duplo pico em suas SEDs: além da emissão no infravermelho devida aos grãos presentes no envoltório, é detectada também a emissão da estrela central em menores comprimentos de onda. O envoltório circunstelar ainda relativamente quente, ejetado quando a estrela ainda estava na fase AGB continuará se expandindo e esfriando à medida que a estrela percorre a fase Pós-AGB até a fase de Nebulosa Planetária. A Figura 3.1 mostra uma típica SED de uma Pós-AGB única, com um pico no óptico e outro no infravermelho.

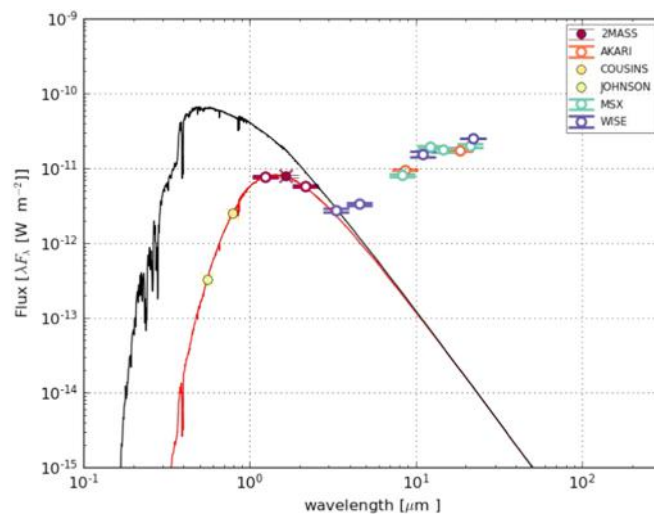


FIGURA 3.1. Distribuição Espectral de Energia da Pós-AGB não-binária IRAS Z02229+6208. Os símbolos coloridos representando a fotometria deste objeto em diferentes bandas, a linha sólida preta representa o modelo de atmosfera sem avermelhamento, e a linha vermelha é o modelo com avermelhamento ajustado aos dados observados. Retirado de Kamath et al. (2022).

Por outro lado, Pós-AGBs binárias apresentam uma SED com excesso no infravermelho próximo e distante, indicando a presença de poeira quente no sistema, e uma cauda no infravermelho distante exibindo uma inclinação de Rayleigh-Jeans (Kluska et al., 2022). Essas características indicam a presença de um disco estável circumbinário de gás e poeira em ao redor da estrela central. Por isso, essas estrelas também são conhecidas na literatura como “fontes com disco”. Além disso, estudos dessas Pós-AGBs de disco mostraram que esses sistemas são, em geral, binários (Oomen et al., 2018). As Figuras 3.2 e 3.3 mostram SEDs de duas Pós-AGBs binárias estudadas por Kluska et al. (2022). Ambas as estrelas encontram-se em nossa amostra: a Pós-AGB oxigenada IRAS 08455-4431 e a RV Tauri IRAS 18281+2149. Podemos observar que, diferentemente das

SEDs de Pós-AGBs únicas, o excesso devido à emissão da poeira se inicia no infravermelho próximo, em comprimentos de onda menores do que $2 \mu\text{m}$ no geral, indicando poeira circunstelar muito próxima da estrela central. Além disso, o pico da emissão da poeira costuma estar próximo de $10 \mu\text{m}$, e a cauda em maiores comprimentos de onda segue a inclinação de Rayleigh-Jeans até comprimentos de onda sub-milimétricos (Oomen et al., 2018).

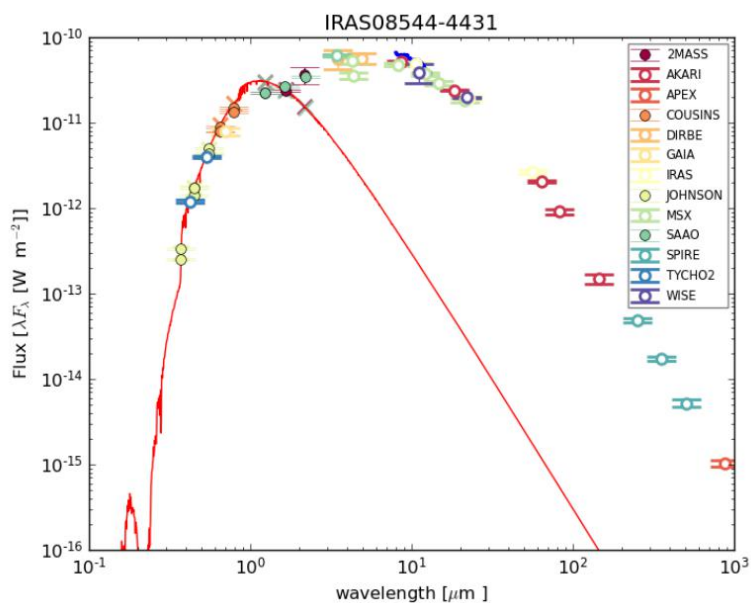


FIGURA 3.2. SED da Pós-AGB binária IRAS 08544-4431. Os dados fotométricos são representados pelos símbolos coloridos. Retirado de Kluska et al. (2022)

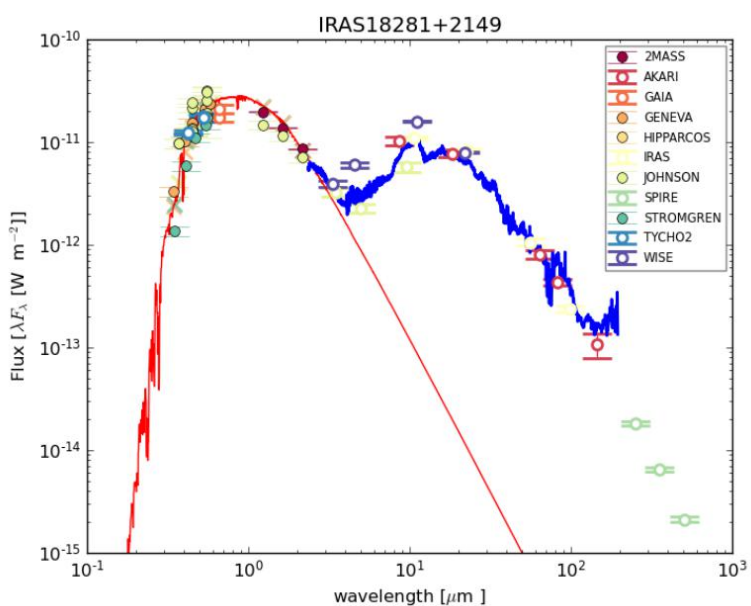


FIGURA 3.3. SED da Pós-AGB binária IRAS 18281+2149. Os dados fotométricos são representados pelos símbolos coloridos. Retirado de Kluska et al. (2022)

A análise das SEDs de Pós-AGBs é citada na literatura recente como sendo extrema importância: através do estudo das SEDs, pode-se testar modelos de formação de ventos estelares em estrelas evoluídas, o que foi recentemente implementado no estudo da fase AGB, e então aplicado na interpretação de observações no infravermelho e caracterizar estrelas AGB nas Nuvens de Magalhães e do Grupo Local de Galáxias (Dell’Agli et al., 2022).

Conforme a razão C/O no envoltório circunstelar das Pós-AGBs, sua SED pode apresentar características espectrais fundamentais para a classificação desses objetos. Neste trabalho, o estudo de componentes carbonáceas e oxigenadas nas SEDs das Pós-AGBs e candidatas da amostra, foi crucial para definir os comprimentos de onda que poderiam ser utilizados nos diagramas cor-cor para separar as diferentes classes.

3.2 Diagramas cor-cor

Diagramas cor-cor são uma variante do diagrama Hertzsprung-Russell (HR), uma vez que as cores das estrelas se relacionam com sua temperatura e sua luminosidade. Por exemplo, para algumas classes espectrais, a cor B-V tem relação direta com a temperatura da estrela, e a cor U-V relaciona-se com sua luminosidade. Na literatura, os diagramas cor-cor são utilizados para diferentes aplicações, tais como calibração fotométrica e estudo de propriedades estelares.

Para ilustrar a relação entre a temperatura efetiva de uma estrela e seu índice de cor B-V, a Figura 3.4 mostra a relação entre essas grandezas derivada por Sekiguchi & Fukugita (2000) para estrelas de tipos espectrais entre F e K. Na figura, podemos ver que a temperatura decresce à medida que o índice B-V aumenta.

Combinando as cores U-B e B-V pode-se, por exemplo, estudar as características de estrelas de um mesmo aglomerado estelar, uma vez que diagramas cor-cor são independentes da distância à estrela. A Figura 3.5 mostra o diagrama cor-cor de estrelas pertencentes ao aglomerado NGC 6866, estudado por Joshi et al. (2012). Observamos que, nesse diagrama, grande parte das estrelas se posiciona na linha da Sequência Principal de Idade Zero, o que indica que as estrelas desse aglomerado encontram-se na Sequência Principal.

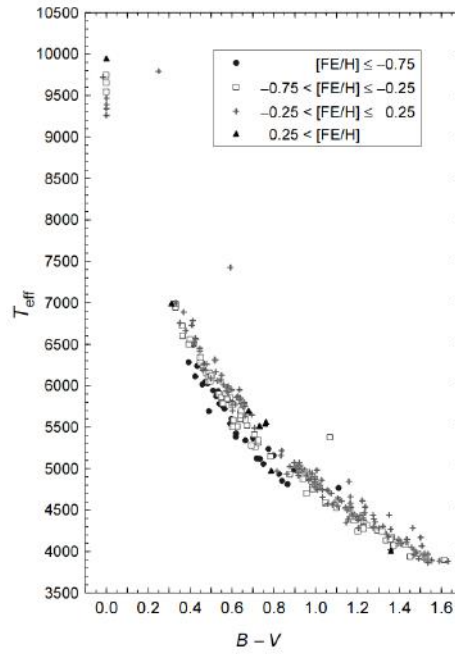


FIGURA 3.4. Temperatura efetiva em função do índice de cor B-V para estrelas de tipos espectrais entre F e K e metalicidades dentro de diferentes intervalos, conforme representado pelos diferentes símbolos na figura. (Sekiguchi & Fukugita, 2000)

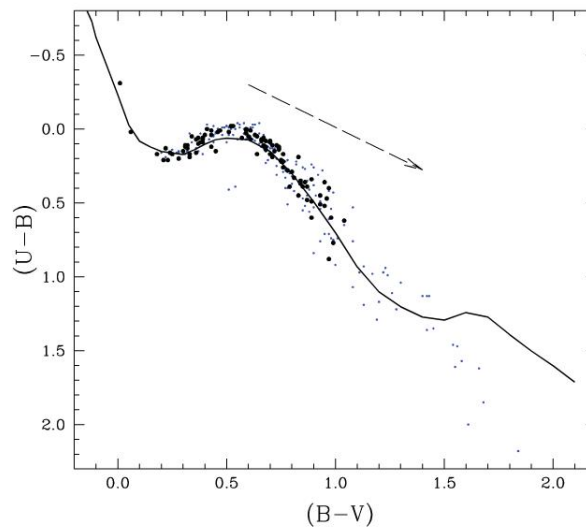


FIGURA 3.5. Diagrama cor-cor para estrelas do aglomerado aberto NGC 6866. A linha preta pontilhada representa a inclinação e a direção do vetor de avermelhamento e a curva sólida representa a Sequência Principal de Idade Zero. (Joshi et al., 2012)

Além disso, utilizando cores do infravermelho, diagramas cor-cor podem atuar como ferramenta de auxílio para a visualizar e classificar de diferentes tipos de estrelas AGB, de acordo com a química e com a opacidade do envoltório circunstelar, variabilidade da estrela e temperatura da poeira no envoltório, como mostrado no clássico trabalho de van der Veen & Habing (1988), citado a seguir.

Entre os levantamentos mais bem-sucedidos de observações no infravermelho está aquele realizado pelo satélite IRAS em 1983, que observou o céu no intervalo de 8 a 120 μm . Por exemplo, considerando as bandas fotométricas desse levantamento, de 12, 25 e 60 μm , pode-se definir as cores [12]-[25] e [25]-[60] em função dos fluxos do objeto nestas bandas, F_{12} , F_{25} e F_{60} , respectivamente, como:

$$[12] - [25] = 2.5 \log \left(\frac{F_{25}}{F_{12}} \right) \quad (3.1)$$

$$[25] - [60] = 2.5 \log \left(\frac{F_{60}}{F_{25}} \right) \quad (3.2)$$

Na literatura, diagramas cor-cor utilizando as bandas fotométricas do IRAS são citados há mais de 30 anos como ferramenta de análise de objetos que possuem envoltórios circunstelares, devido a seus intensos fluxos no infravermelho: Olnon et al. (1984) utilizaram as bandas de 12, 25 e 60 μm para estudar a evolução de estrelas OH/IR, objetos evoluídos ricos em oxigênio com envoltórios de poeira; Zuckerman & Dyck (1986) utilizaram as bandas de 12, 25, 60 e 100 μm para estudar estrelas gigantes vermelhas e classificá-las conforme a química de seu envoltório; entre outros. Além dos citados anteriormente, os autores van der Veen & Habing (1988) utilizaram com sucesso as cores [12]-[25] e [25]-[60] para confirmar a hipótese de que seria possível distinguir objetos com envoltórios circunstelares ricos em O de objetos com envoltórios circunstelares ricos em C, e para construir um diagrama cor-cor onde fosse possível definir regiões onde seria esperado encontrar certa classe de objetos. Esse diagrama cor-cor é mostrado na Figura 3.6. Na figura, podemos observar as regiões definidas para cada classe de objetos, sobreposta pela trajetória evolutiva de AGBs oxigenadas e pela curva de corpo negro da poeira. Foi encontrada uma correlação entre os estágios evolutivos de estrelas com envoltórios circunstelares ricos em oxigênio e as cores IRAS, devido às crescentes taxas de perda de massa que tornam a estrela central cada vez mais obscurecida (van der Veen & Habing, 1988).

Segundo van der Veen & Habing (1988), as regiões I, II, III, IV e VIb da Figura 3.6 são aquelas onde esperamos encontrar diferentes classes de objetos ricos em oxigênio, na região V esperamos encontrar nebulosas planetárias, nas regiões VIa e VII esperamos encontrar objetos carbonados e a região VIII compreende diferentes tipos de objetos.

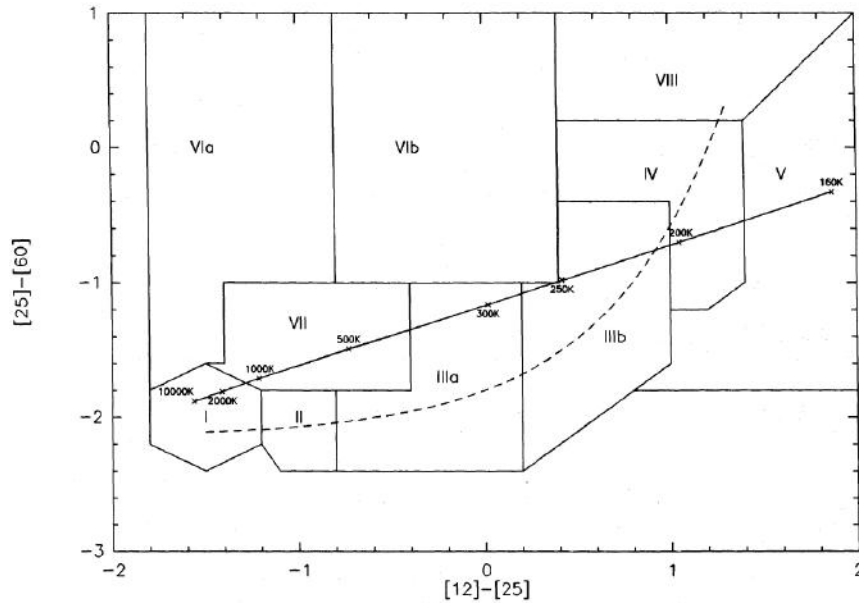


FIGURA 3.6. Regiões do diagrama cor-cor IRAS que separam diferentes tipos de objetos com envoltório circunstelar. A linha pontilhada representa a trajetória evolutiva de AGBs ricas em O e a linha cheia representa a curva de corpo negro da poeira circunstelar. Retirado de van der Veen & Habing (1988).

Posteriormente, Garcia-Lario et al. (1997) utilizaram o mesmo diagrama cor-cor para estudar fontes IRAS com cores parecidas com as de nebulosas planetárias. Os autores definiram uma região do diagrama cor-cor $[25]-[60] \times [12]-[25]$ onde são esperadas Pós-AGBs e nebulosas planetárias. Na literatura recente, Molina et al. (2019) utilizaram as regiões definidas por van der Veen & Habing (1988) e a região definida por Garcia-Lario et al. (1997) no diagrama cor-cor IRAS para estudar seis candidatas a Pós-AGB, e esse diagrama é apresentado na Figura 3.7. Podemos observar que 4 dos objetos estudados por Molina et al. (2019) se posicionam dentro da região definida para Pós-AGBs e nebulosas planetárias.

Além disso, Suh (2015) utilizaram diagramas cor-cor no infravermelho para estudar a trajetória evolutiva entre as fases AGB, Pós-AGB e NP, comparando a posição dos objetos nos diagramas com trajetórias evolutivas derivadas de diferentes modelos teóricos. A Figura 3.8 mostra o diagrama cor-cor com as cores $[8.28]-[14.65]$ e $[14.65]-[21.34]$. Podemos observar que a trajetória evolutiva das AGBs sugere a separação observada entre AGBs oxigenadas (pontos azuis) e carbonadas (triângulos vermelhos). Nesse diagrama, as Pós-AGBs (quadrados verdes) e nebulosas planetárias (pontos vermelhos) encontram-se espalhadas em uma região mais ampla. Por outro lado, o mesmo diagrama é mostrado na Figura 3.9, mas com as trajetórias evolutivas de Pós-AGBs carbonadas e oxigenadas. Observamos que, nos diferentes modelos teóricos, não parece

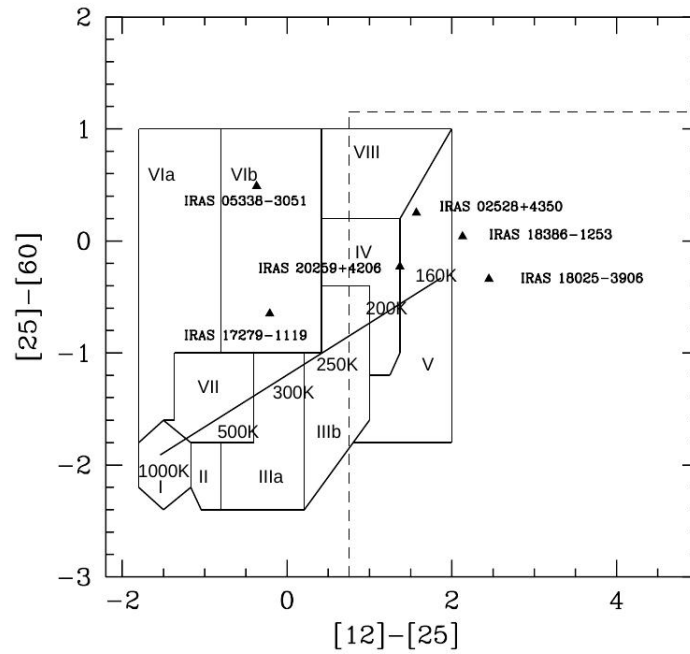


FIGURA 3.7. Diagrama cor-cor IRAS com as regiões definidas por van der Veen & Habing (1988), denotadas por numerais romanos, e a região de Pós-AGBs e NPs definida por Garcia-Lario et al. (1997), em linha pontilhada. A linha reta representa a curva de corpo negro. Retirado de Molina et al. (2019).

haver uma clara separação entre Pós-AGBs carbonadas e oxigenadas no diagrama, como é observado para AGBs. Esse diagrama pode indicar uma possível dificuldade de separar Pós-AGBs carbonadas de oxigenadas em diagramas cor-cor no infravermelho.

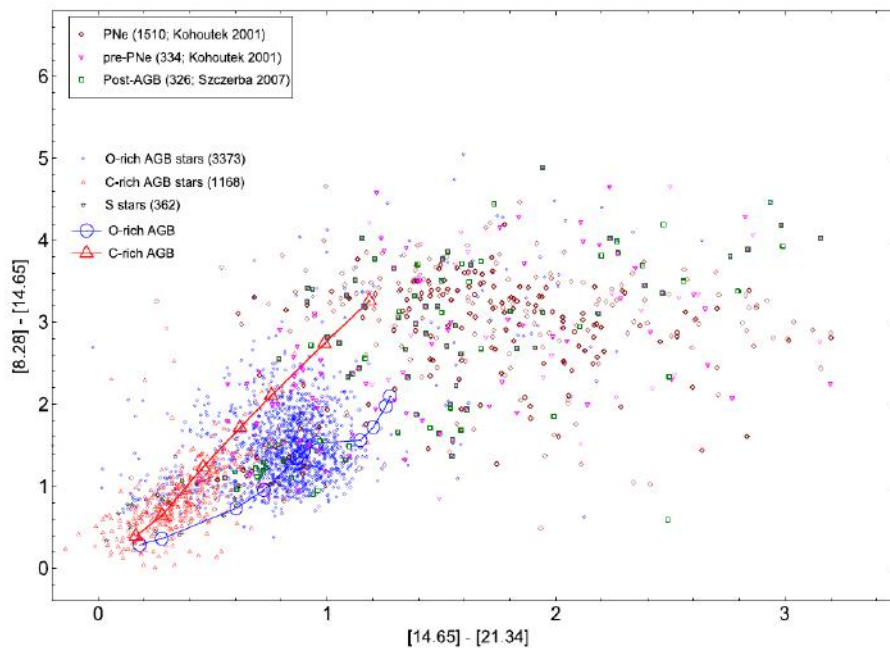


FIGURA 3.8. Diagrama cor-cor com as cores $[8.28]-[14.65]$ e $[14.65]-[21.34]$ mostrando AGBs, Pós-AGBs e nebulosas planetárias. Além disso, são mostradas trajetórias evolutivas de AGBs oxigenadas e AGBs carbonadas de diferentes modelos teóricos. Retirado de Suh (2015).

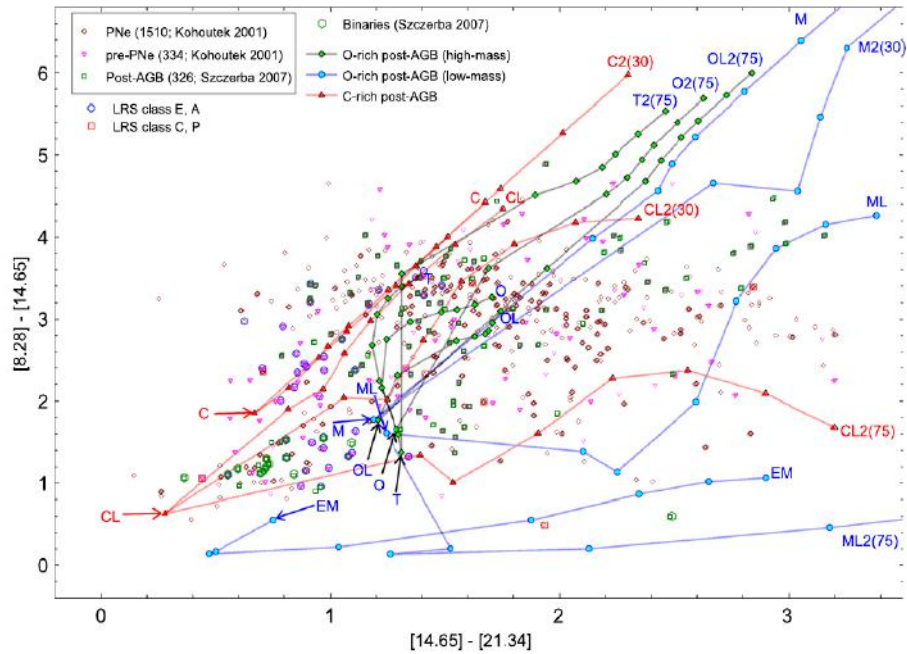


FIGURA 3.9. O mesmo que a Figura 3.8, mas mostrando trajetórias evolutivas de Pós-AGBs carbonadas e oxigenadas. Observamos que as trajetórias evolutivas de Pós-AGBs oxigenadas e de Pós-AGBs carbonadas não apresentam uma clara separação neste diagrama. Retirado de Suh (2015).

Por fim, como as RV Tauri compõem uma fração significativa de nossa amostra ($\sim 33\%$), citamos o trabalho de Gezer et al. (2015), que apresenta diagramas cor-cor utilizando as bandas fotométricas do *Wide-field Infrared Survey Explorer* (WISE) no infravermelho para estudar a população Galáctica de RV Tauri. Posteriormente, Manick et al. (2018) reconfirmaram a importância dos diagramas cor-cor WISE no estudo desses objetos, estendendo a análise para RV Tauri das Nuvens de Magalhães. Além de definir uma região do diagrama $[12]-[25] \times [25]-[60]$ definida para RV Tauri, Gezer et al. (2015) utilizam as cores $[3.4]-[4.6]$ e $[12]-[22]$ do WISE para mostrar como diferentes tipos de RV Tauri se concentram em diferentes regiões do diagrama, resultado de grande relevância para o presente trabalho. A Figura 3.10 mostra como uma amostra de Pós-AGBs de referências estudadas pelos autores se posicionam no diagrama, concentrando-se em duas regiões, denominadas de “região para objetos com disco” e “região para objetos com envoltório”, que diz respeito aos objetos que possuem SEDs com as respectivas características da presença de disco (associado a sistemas binários) e de envoltório (associado a estrelas não-binárias), conforme citado na Seção 3.1. Além disso, a Figura 3.11 mostra uma terceira região denominada de “região para objetos sem excesso no infravermelho (IR)”, onde são encontradas grande parte da população das RV Tauri Galácticas, que não apresentam excesso no infravermelho (Gezer et al., 2015)

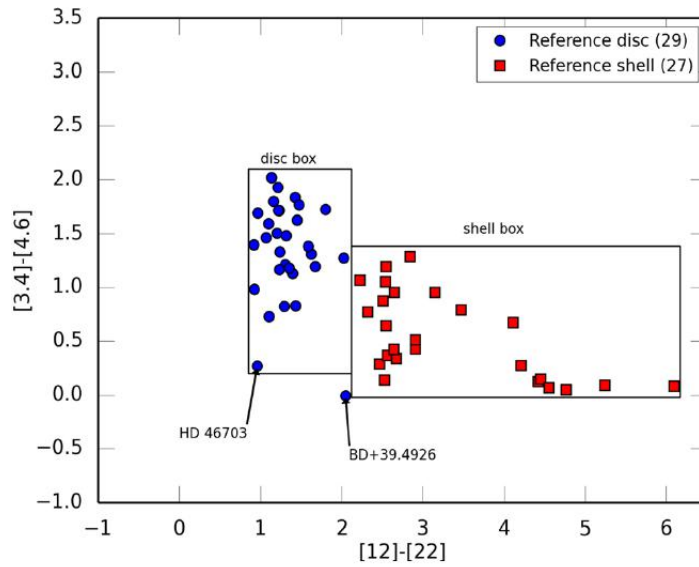


FIGURA 3.10. Diagrama cor-cor WISE mostrando as regiões para objetos com disco (*disc box*) e para objetos com envoltório (*shell box*) definidas para uma amostra de referência de RV Tauri com SEDs de tipo disco (pontos azuis) e com SEDs de tipo envoltório (quadrados vermelhos). Retirado de Gezer et al. (2015).

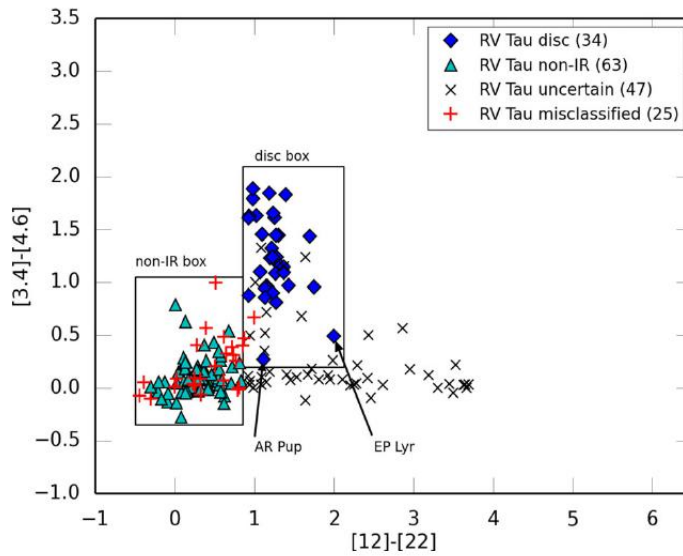


FIGURA 3.11. O mesmo que a Figura 3.10, mas dessa vez mostrando uma terceira região (*non-IR box*) para RV Tauri sem excesso no infravermelho (triângulos verdes). Na figura, as RV Tauri de tipo disco são agora mostradas com losangos azuis. Retirado de Gezer et al. (2015).

Podemos concluir que os diagramas cor-cor no infravermelho podem fornecer informações importantes sobre a natureza dos envoltórios circunstelares e das estrelas centrais. Neste trabalho, utilizamos as principais características observadas nas SEDs das Pós-AGBs da amostra para construir diagramas cor-cor no infravermelho e verificar se é possível separar Pós-AGBs de classes diferentes. Além disso, reproduzimos o diagrama cor-cor estudado por Molina et al. (2019), para verificar se as Pós-AGBs de

classes diferentes se dividem nas regiões definidas por van der Veen & Habing (1988) e Garcia-Lario et al. (1997). Os resultados são apresentados e discutidos no Capítulo 5.

3.3 Modelos de envoltórios

Assim como as distribuições espectrais de energia e os diagramas cor-cor citados nas seções anteriores deste capítulo, a modelagem de envoltórios circunstelares utilizando códigos de transferência radiativa se apresenta como uma poderosa ferramenta para a análise da poeira. A simulação de envoltórios pode ser utilizada para estudar a dependência da energia emitida pelo envoltório com parâmetros estelares como o raio interno, raio externo e temperatura efetiva da estrela; e com parâmetros do próprio envoltório tais como sua opacidade e o tamanho dos grãos presentes.

Na literatura, podemos citar alguns trabalhos relevantes que apresentaram modelagem de envoltórios para estrelas AGB e Pós-AGB. Por exemplo, Khouri (2010) estudou as estrelas AGB oxigenadas da classe OH/IR, utilizando o código de transferência radiativa MonRaT, que utiliza o método de simulação Monte Carlo, para modelar envoltórios simetricamente esféricos. Segundo o autor, o método Monte Carlo aplicado ao problema de transferência radiativa em envoltórios de poeira baseia-se em simular processos de natureza aleatória, como a absorção de energia pelos grãos e a direção de propagação da energia. O objetivo da modelagem dos envoltórios é se aproximar ao máximo possível das observações. A Figura 3.12 mostra o melhor modelo ajustado à observação do ISO da fonte IRAS 22177+5936, estudada por Khouri (2010). Observamos que o modelo se ajusta bem à característica de $9.7 \mu\text{m}$ do espectro.

Outro trabalho relevante que aqui destacamos, é o de Suh (2015), que realizou cálculos de modelos de transferência radiativa para os envoltórios circunstelares de estrelas Pós-AGB, novamente com simetria esférica. Para calcular os modelos, os autores utilizam o código RADMC-3D, também baseado no método Monte Carlo, e comparam os resultados com aqueles obtidos pelos códigos CSDUT3 e DUSTY presentes na literatura. A Figura 3.13 mostra os modelos apresentados por Suh (2015) de envoltório oxigenado para diferentes valores da temperatura efetiva T_{eff} da estrela e da temperatura interna T_c do envoltório. Observamos as componentes proeminentes em 9.7 e $18 \mu\text{m}$ associadas a silicatos no envoltório.

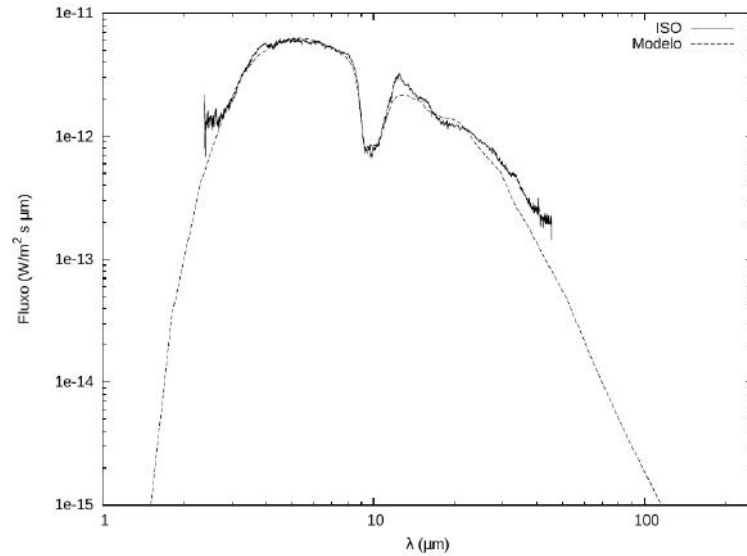


FIGURA 3.12. Modelo de envoltório que melhor se ajusta à observação ISO da fonte IRAS 22177+5936, mostrando a banda em $9.7 \mu\text{m}$ característica da natureza oxigenada do envoltório. Retirado de Khouri (2010).

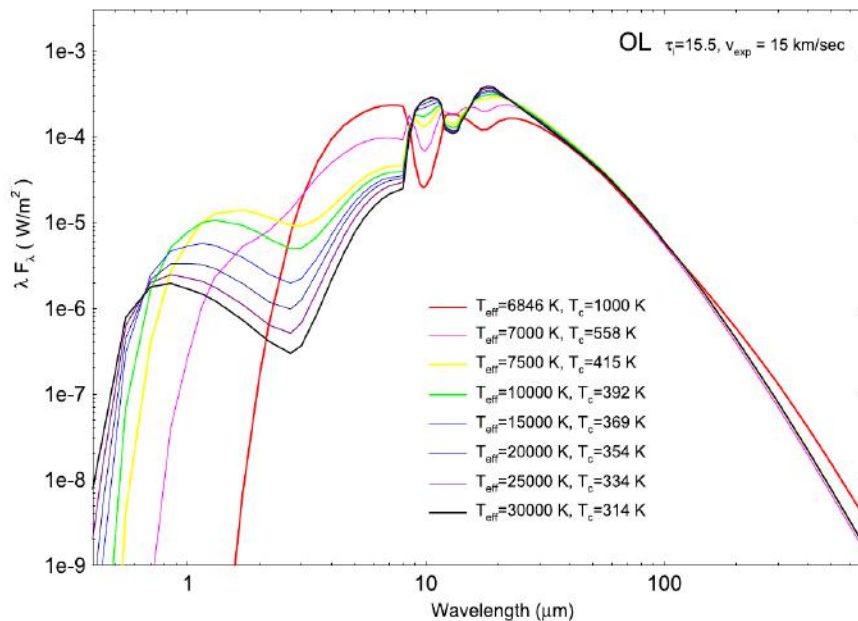


FIGURA 3.13. Modelos de envoltórios oxigenados de Pós-AGBs para diferentes valores de temperatura efetiva T_{eff} da estrela e de temperatura interna T_c do envoltório. Retirado de Suh (2015).

Neste trabalho, foi utilizado o código de transferência radiativa, baseado no método Monte Carlo, desenvolvido em Fortran por Celnikier & Lefevre (1974), posteriormente modificado por Lefevre et al. (1982) e por Lorenz-Martins & Lefevre (1994). Para a simulação, consideramos um envoltório com grãos de SiC, cuja emissão característica se apresenta em $11.3 \mu\text{m}$. O modelo padrão para as simulações contou com os seguintes parâmetros: raio interno $R_1 = 5 R_*$; raio externo $R_2 = 1000 R_*$; opacidade $\tau = 1.0$;

tamanho do grão igual a 1000 \AA ; temperatura efetiva $T_{\text{ef}} = 2500 \text{ K}$. Os raios interno e externo são dados em função de raios estelares.

Então, analisamos o comportamento da SED em função da variação de certos parâmetros, mantendo constantes os demais. Os resultados são apresentados a seguir.

A Figura 3.14 mostra o modelo de envoltório para diferentes valores do raio interno R1, em raios estelares. Observamos que a banda de emissão em $11.3 \mu\text{m}$ torna-se mais intensa e mais larga para maiores valores de R1. Além disso, as regiões de comprimento de onda $\lambda > 10^5 \text{ \AA}$ também se tornam mais energéticas. Além disso, podemos observar que as regiões da SED para $\lambda < 10^4 \text{ \AA}$ também são deslocadas para maiores energias com o aumento de R1.

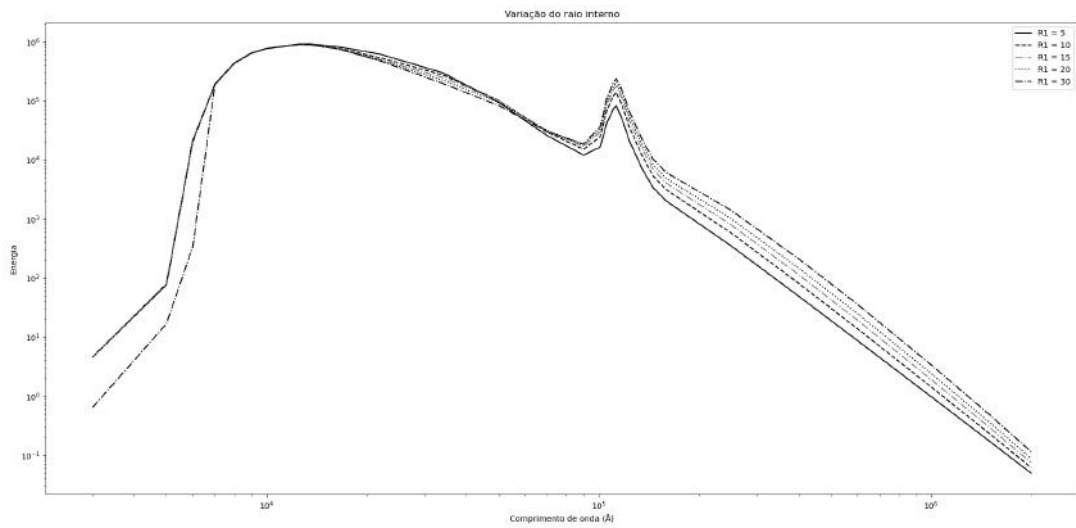


FIGURA 3.14. Modelo de envoltório circumstelar com grãos de SiC, mostrando como a distribuição espectral de energia varia com a variação do raio interno R1, em função de raios estelares, mantendo-se todos os outros parâmetros do modelo padrão constantes.

Em seguida, variamos o raio externo R2, mantendo os demais parâmetros constantes, e os modelos são mostrados na Figura 3.15. Observamos que a variação de R2 não produz mudanças significativas no perfil da SED. Podemos entender esse resultado considerando que a energia emitida pelo envoltório circumstelar em um dado comprimento de onda será aproximadamente a mesma independentemente de sua espessura, caso sejam mantidos constantes todos os outros parâmetros.

Então, realizamos a variação da opacidade τ , o que produziu mudanças expressivas na SED, conforme podemos ver na Figura 3.16. Em comprimentos de onda mais curtos, até $\lambda \approx 7000 \text{ \AA}$, o aumento de τ causa uma diminuição significativa da energia total

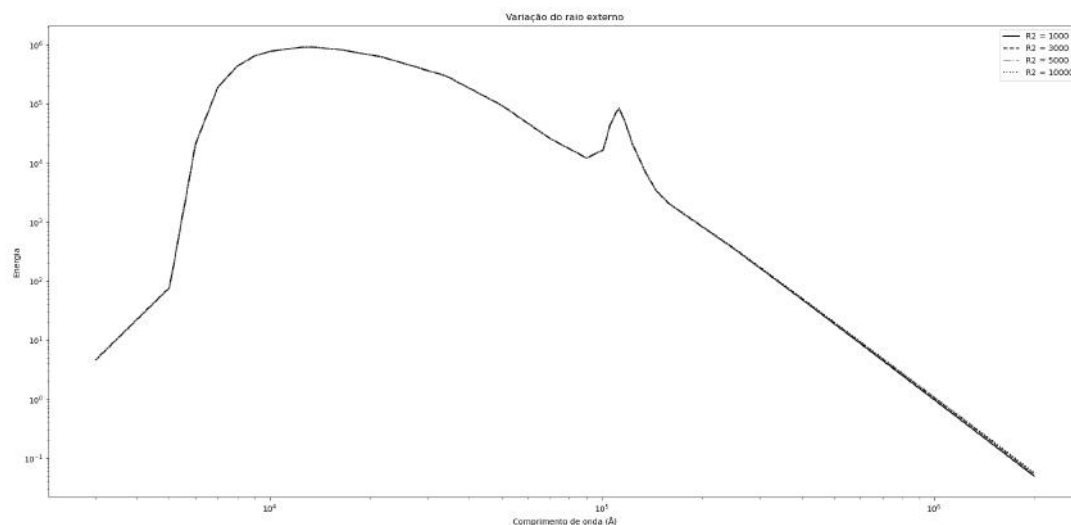


FIGURA 3.15. O mesmo que a Figura 3.14, mas variando-se o raio externo R2, em função de raios estelares.

emitida. Esse comportamento é esperado, uma vez que será menor a quantidade de fótons da componente estelar, no óptico, que conseguirão escapar do envoltório, conforme o valor de opacidade aumenta. Por outro lado, a emissão em comprimentos de onda maiores será reforçada, de forma que é destacada a emissão dos grãos presentes no envoltório. Podemos também observar que, à medida que a τ aumenta, a banda de emissão do SiC torna-se mais larga e as regiões da SED de $\lambda > 10^5 \text{ \AA}$ se deslocam para maiores energias.

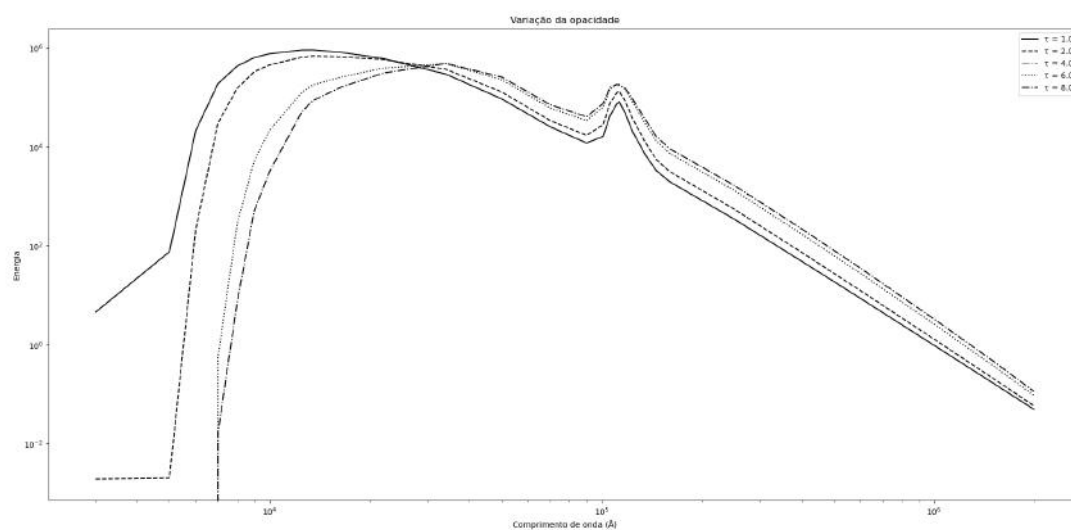


FIGURA 3.16. O mesmo que a Figura 3.14, mas variando-se a opacidade τ do envoltório.

Além disso, a Figura 3.17 mostra que a SED é fortemente dependente da temperatura efetiva da estrela em menores comprimentos de onda. Para maiores temperaturas, a luminosidade da componente estelar aumenta proporcionalmente, de forma que a emissão em comprimentos de onda menores também aumenta. A emissão em comprimentos de onda maiores não aumenta de forma tão significativa. Além disso, conforme os valores de temperatura aumentam, a emissão de energia parece se aproximar assintoticamente de um valor máximo.

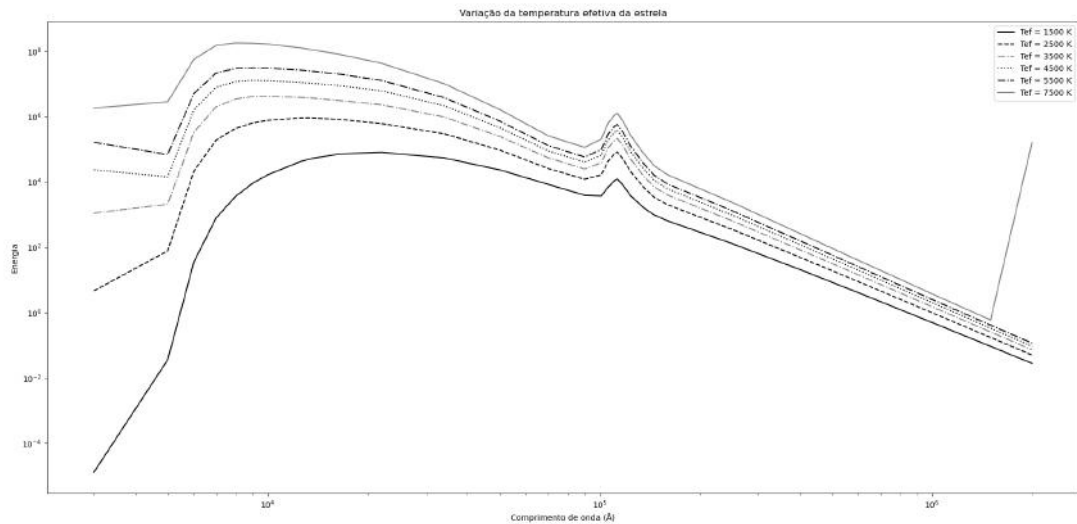


FIGURA 3.17. O mesmo que a Figura 3.14, mas variando-se a temperatura efetiva T_{ef} da estrela.

Por fim, a Figura 3.18 mostra o comportamento da SED com a variação do tamanho dos grãos presentes no envoltório. Notamos que a energia da SED apresenta um comportamento não-linear com a variação do tamanho dos grãos, de forma que a emissão de SiC possui a menor intensidade para um valor intermediário do tamanho dos grãos. Além disso, a energia é muito baixa em curtos comprimentos de onda para os menores grãos. Por outro lado, os menores grãos são aqueles que produzem a emissão de SiC mais intensa em $11.3\mu\text{m}$.

Os modelos de envoltórios construídos neste trabalho possuem alta relevância para trabalhos futuros, no sentido de que podem ser ajustados às SEDs das estrelas de nossa amostra, que contam com dados fotométricos e espectros ISO, para fornecer informações importantes sobre a poeira ao redor de estrelas Pós-AGBs. Além disso, os modelos também podem ser utilizados em um trabalho futuro para estimar a intensidade de componentes espectrais, e assim indicar bandas fotométricas úteis para a criação de

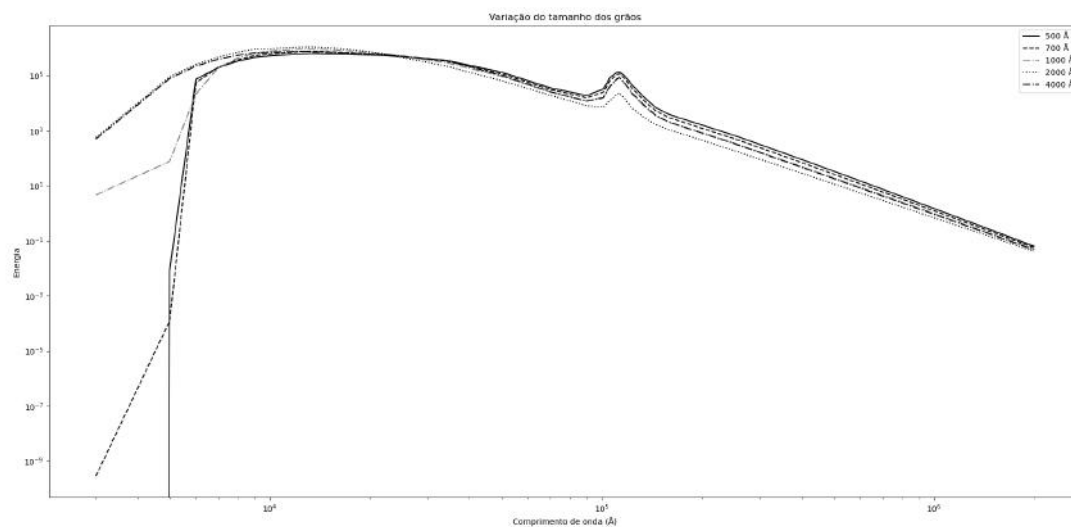


FIGURA 3.18. O mesmo que a Figura 3.14, mas variando-se o tamanho dos grãos presentes no envoltório.

diagramas cor-cor capazes de separar classes de Pós-AGBs, um dos principais objetivos do presente trabalho.

Capítulo 4

Análise das Estrelas Centrais

Nos casos em que o envoltório circunstelar encontra-se suficientemente afastado, podemos obter diretamente informações da estrela central através de seu espectro óptico. Nesse caso, pode-se obter informações importantes sobre os elementos produzidos pela estrela em suas fases evolutivas anteriores, analisando seu espectro fotosférico dominado por transições atômicas (Kamath et al., 2022). Porém, devido à alta opacidade do envoltório que se encontra muito próximo de Pós-AGBs mais massivas, a detecção destes objetos através de seu espectro óptico carrega um viés para a detecção de objetos de menor massa, cujos envoltórios encontram-se em geral mais distantes e possuem menor opacidade.

A análise das estrelas centrais de Pós-AGBs na literatura se iniciou quando Bidelman (1951) encontrou aparentes supergigantes de tipo espectral A e F em altas latitudes galácticas. Contudo, esperamos encontrar estrelas de População I (estrelas jovens com alta metalicidade) de classe de luminosidade de I a III no plano da galáxia, e portanto a existência de estrelas supergigantes em altas latitudes galácticas é inesperada. Porém, estrelas de baixa massa são abundantes nessas altas latitudes e, ao atingirem suas fases finais de evolução, por conta das altas luminosidades e baixa gravidade superficial, podem ser confundidas observacionalmente com supergigantes, e com isso podem ser detectadas com facilidade (Habing & Olofsson, 2004).

Além disso, a análise de estrelas centrais de Pós-AGBs se mantém relevante na literatura recente. Segundo Kamath et al. (2022), a determinação da luminosidade de Pós-AGBs em conjunto com a sua composição química superficial, permite o estudo

tanto da fase Pós-AGB, como também o estudo da evolução ao longo da fase AGB anterior. Porém, devido ao pouco conhecimento na literatura atual das distâncias de Pós-AGBs, a estimativa de suas luminosidades ainda caminha a passos curtos. Atualmente, o levantamento Gaia tem fornecido importantes contribuições para remover essa limitação.

Neste capítulo, discutimos a espectroscopia no óptico e a determinação de abundâncias como ferramentas para análise das estrelas centrais de objetos Pós-AGB.

4.1 Espectroscopia no óptico e determinação de abundâncias

O estudo dos espectros ópticos permite uma verificação direta da natureza de objetos Pós-AGB através da análise de abundâncias fotosféricas, que representam um forte indicador da importância relativa de dois mecanismos que são responsáveis por alterar a química superficial de estrelas na fase AGB: o *hot bottom burning* (HBB) e a terceira dragagem. Além disso, os espectros das Pós-AGB são dominados por transições atômicas e, dessa forma, fornecem a possibilidade de derivar de maneira precisa abundâncias químicas fotosféricas de diversos elementos, como aqueles do processo-s e do ciclo CNO (Dell’Agli et al., 2022).

Na literatura recente, Kamath et al. (2022) utilizaram observações de 31 Pós-AGB galácticas que possuem abundâncias superficiais bem estudadas para derivar suas luminosidades e identificar a massa inicial das estrelas. Em seu trabalho, estes autores citam que a natureza única ou binária de Pós-AGBs também gera um efeito significativo nas abundâncias fotosféricas observadas: como esperado, muitas Pós-AGBs únicas apresentam assinaturas da nucleossíntese ocorrida no AGB, porém Pós-AGBs em sistemas binários apresentam um padrão químico de “depleção”, no qual a fotosfera estelar se apresenta pobre em elementos refratários, aqueles que possuem altas temperaturas de condensação de equilíbrio, como o zircônio por exemplo (Oomen et al., 2018; Kamath & Van Winckel, 2019).

De acordo com Kluska et al. (2022), as atmosferas com “depleção” se assemelham ao gás presente no meio interestelar: baixa abundância de elementos refratários, enquanto a abundância de voláteis se mantém inalterada. Segundo os autores, esse fenômeno é entendido como sendo causado por um processo químico no qual o gás que

está sujeito à formação de grãos no envoltório circumstelar separa-se da poeira e é acregado na estrela. Nas fotosferas estelares, as razões de abundância $[\text{Fe}/\text{H}]$ e $[\text{Zn}/\text{Ti}]$ são importantes traços do padrão de depleção (Kluska et al., 2022). Além disso, Oomen et al. (2019, 2020) explicam os padrões de depleção a partir da acreção de matéria já depletada do disco circumbinário, dado que esse processo é eficiente e duradouro. Kluska et al. (2022) mostra que a massa extremamente baixa do envoltório de Pós-AGBs apresenta-se de tal forma que sua composição é dominada rapidamente pela matéria acregada, e que estudos de abundância fornecem uma maneira eficiente de comprovar a composição do gás acregado. Porém, a separação entre voláteis e refratários ainda não é bem entendida, e a origem do padrão de depleção ainda é debatida.

Além disso, segundo Molina et al. (2019), a extensiva lista de fontes IRAS estudada por Garcia-Lario et al. (1997) e refinada por espectroscopia no óptico realizada por Suárez et al. (2006) e Pereira & Miranda (2007) foram contribuições importantes para a identificação de novas candidatas a Pós-AGB.

A Figura 4.1 apresenta os espectros na região do óptico de Pós-AGBs estudadas no trabalho de Molina et al. (2019), incluindo as marcações dos comprimentos de onda esperados para linhas importantes de absorção, como Y II, La II, Ti II, Fe I, Ba II, Cr II, Cr I e Ni I. Através da utilização de espectroscopia de alta resolução e das luminosidades das Pós-AGBs estudadas, Molina et al. (2019) foram capazes de confirmar a natureza Pós-AGB de IRAS 05338-3051 e das duas candidatas a Pós-RGB IRAS 18025-3906 e IRAS 18386-3051. Além do mais, o padrão de abundância fotosférica de duas das estrelas estudadas permitiu inferir que estas são objetos não evoluídos.

Ademais, dentre objetos Pós-AGBs que são opticamente brilhantes, alguns objetos apresentam perfis de absorção semelhantes aos de estrelas OB típicas, e estes são denominados Pós-AGBs quentes (Mello et al., 2012). A Figura 4.2 apresenta alguns espectros de Pós-AGBs quentes estudadas por Mello et al. (2012). Neles, podemos observar diversos componentes em emissão, e linhas com perfil P-Cygni, o que indica perda de massa contínua nesses objetos. Além disso, uma das estrelas estudadas pelo autor apresenta perfis de linha dupla, indicando um sistema binário espectroscópico, como podemos observar na Figura 4.3.

Concluimos reafirmando a importância fundamental que a análise das estrelas centrais de Pós-AGBs tem para o entendimento a natureza desses objetos e a evolução

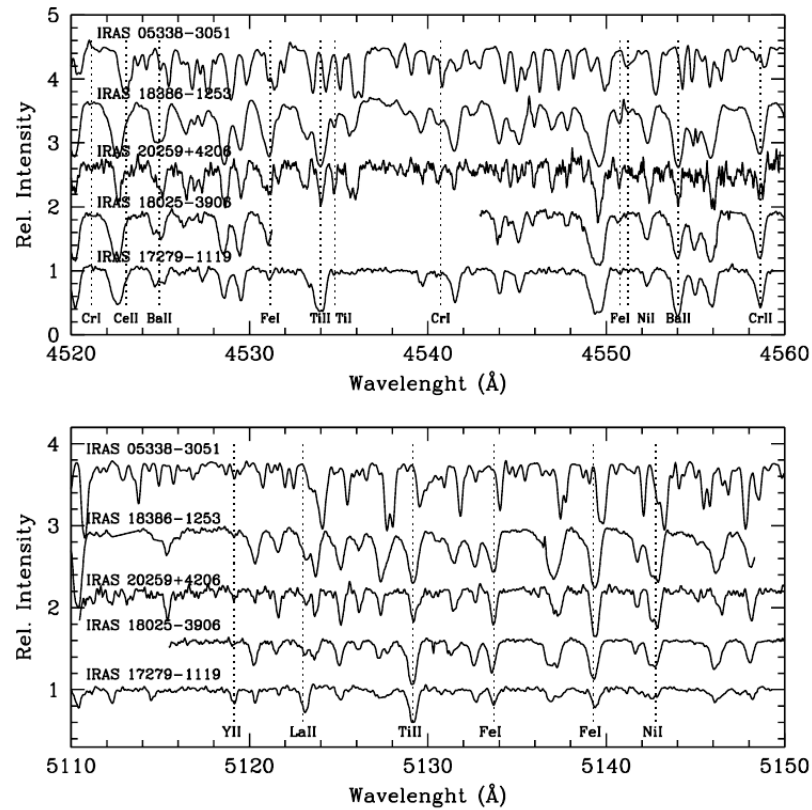


FIGURA 4.1. Espectro no óptico de Pós-AGBs estudadas por Molina et al. (2019), com a marcação da localização de linhas espectrais importantes. Retirado de Molina et al. (2019).

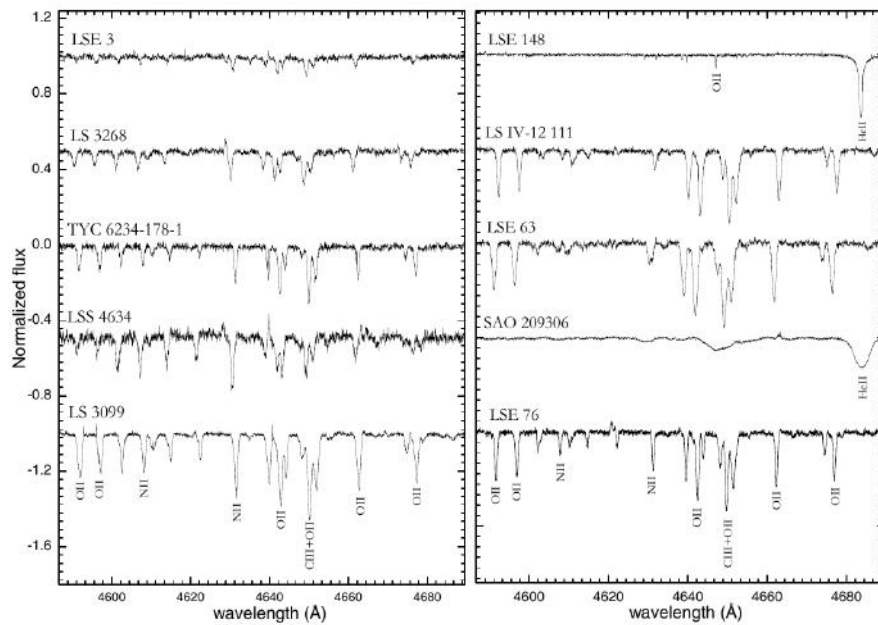


FIGURA 4.2. Espectros normalizados das Pós-AGBs quentes estudadas por Mello et al. (2012) com a identificação de alguns dos principais componentes espectrais. Retirado de Mello et al. (2012).

química das fases anteriores, como o AGB, nas quais é mais difícil a realização dessa análise. A seguir, apresentamos os espectros no óptico para Pós-AGBs presentes em

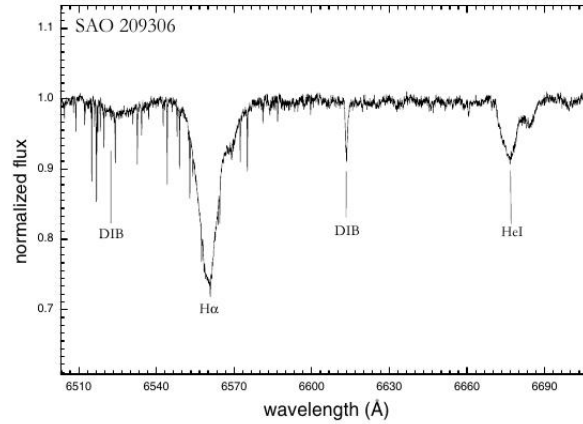


FIGURA 4.3. Espectro normalizado da binária espectroscópica SAO 209306, mostrando o perfil de linhas duplas. Retirado de Mello et al. (2012).

nossa amostra.

4.2 Espectros no óptico

Neste trabalho, com o objetivo de analisar as características espectrais das estrelas centrais de diferentes classes, e utilizá-las como referência para estudar os objetos Pós-AGB, buscamos na literatura por espectros no óptico de algumas estrelas da nossa amostra, que são bem conhecidas na literatura, e por isso são representativas de suas respectivas classes. Para isso, realizamos uma busca no banco de dados *Polarbase* (Donati et al., 1997; Petit et al., 2014) e no catálogo de observações do instrumento *Halfwave Spectropolarimeter* (HPOL), e encontramos espectros de alta e baixa resoluções para pelo menos uma Pós-AGB de cada classe estudada neste trabalho, com exceção das Water Fountains, que são muito obscurecidas no óptico, e portanto são difíceis de serem estudadas neste intervalo espectral. Além disso, não encontramos dados de espectroscopia no óptico para as nossas candidatas a Pós-AGB, o que reforça a importância das análises realizadas neste trabalho para o estudo desses objetos. Os espectros de alta resolução foram obtidos no banco de dados *Polarbase*, e foram observados pelos espectropolarímetros *ESPaDOnS* e *NARVAL*, que possuem resoluções de $R = 68000$ a 81000 e $R = 65000$, e funcionam no *Canada-France-Hawaii Telescope* (CFHT, Observatório Mauna Kea) e *Télescope Bernard Lyot* (TBL, Observatório Pic du Midi), respectivamente. Por sua vez, os espectros de baixa resolução, que foram reunidos do catálogo HPOL, possuem resolução espectral de 10 \AA e foram observados com resolução $R = 730$.

Utilizando os trabalhos de Biemont & Godefroid (1980); Luck & Bond (1981); Hanaford et al. (1982); Luck & Bond (1991); Jaschek & Jaschek (1995); Hrivnak (1995); Bakker et al. (1996); Pereira et al. (2004); Mello et al. (2012); Molina et al. (2019); Martinez et al. (2020) e Pereira et al. (2021), juntamente com o banco de dados de linhas espectrais NIST-ASD (Kramida et al., 2022), identificamos de maneira preliminar algumas das principais linhas nos espectros ópticos das estrelas. A seguir apresentamos os espectros obtidos, juntamente com uma breve discussão sobre as características espectrais observadas. As linhas marcadas com um “ ? ” são aquelas cujo comprimento de onda de repouso está distante da componente observada no espectro, e portanto a identificação deve ser confirmada em estudos mais aprofundados.

Em primeiro lugar, a Figura 4.4 mostra o espectro de alta resolução da Pós-AGB carbonada IRAS 18384-2800 da nossa amostra, no intervalo de 4700 a 4800 Å, com uma identificação preliminar de algumas das principais linhas observadas. Encontramos linhas associadas à molécula de C₂ em 4715 e 4737 Å, e linhas intensas associadas aos elementos do processo-s Y e Zr. Essas características são compatíveis com o enriquecimento de elementos do processo-s esperado na fotosfera de estrelas ricas em carbono, que sofreram o processo de terceira dragagem.

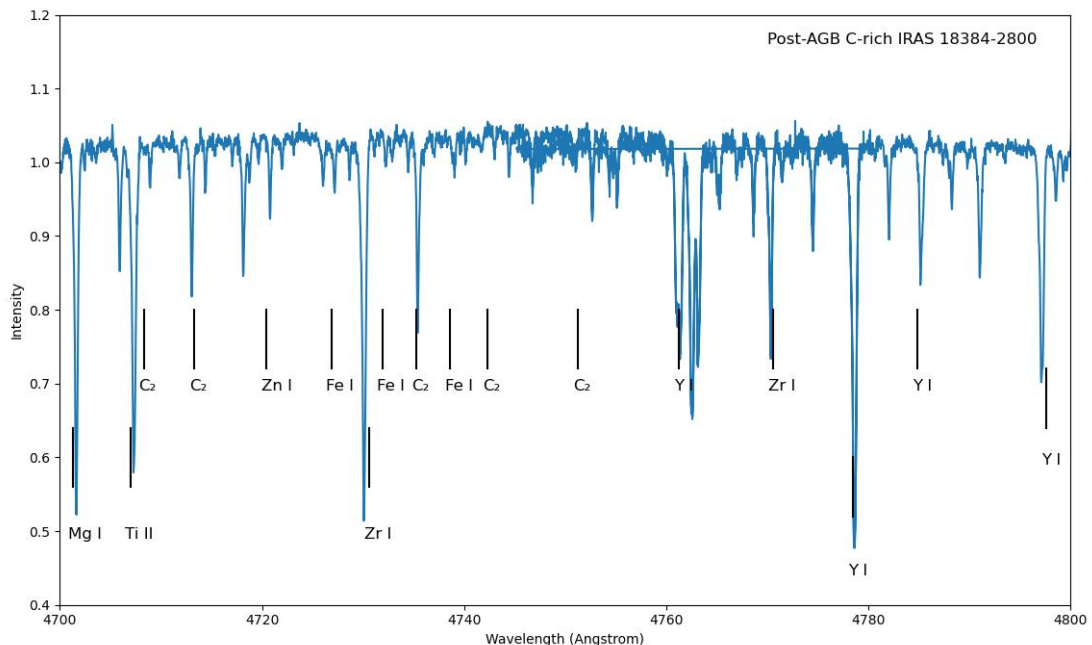


FIGURA 4.4. Espectro de alta resolução no intervalo de 4700 a 4800 Å da Pós-AGB carbonada IRAS 18384-2800. Algumas das principais linhas são identificadas, mostrando diversas componentes associadas à molécula de C₂ e linhas intensas associadas a elementos do processo-s, como Y e Zr, por exemplo.

Em segundo lugar, na Figura 4.5 observamos o espectro da fonte $21 \mu\text{m}$ IRAS 19500-1709 no mesmo intervalo espectral. Nesse espectro, apesar da menor quantidade de linhas espectrais intensas, observamos novamente linhas intensas associadas a elementos do processo-s, como esperado para estrelas cujo envoltório circunstelar é rico em carbono. Portanto, em trabalhos futuros, a determinação da abundância desses elementos nos espectros das estrelas pode ser utilizada para diferenciar objetos com fotosferas ricas em carbono de objetos com fotosferas ricas em oxigênio.

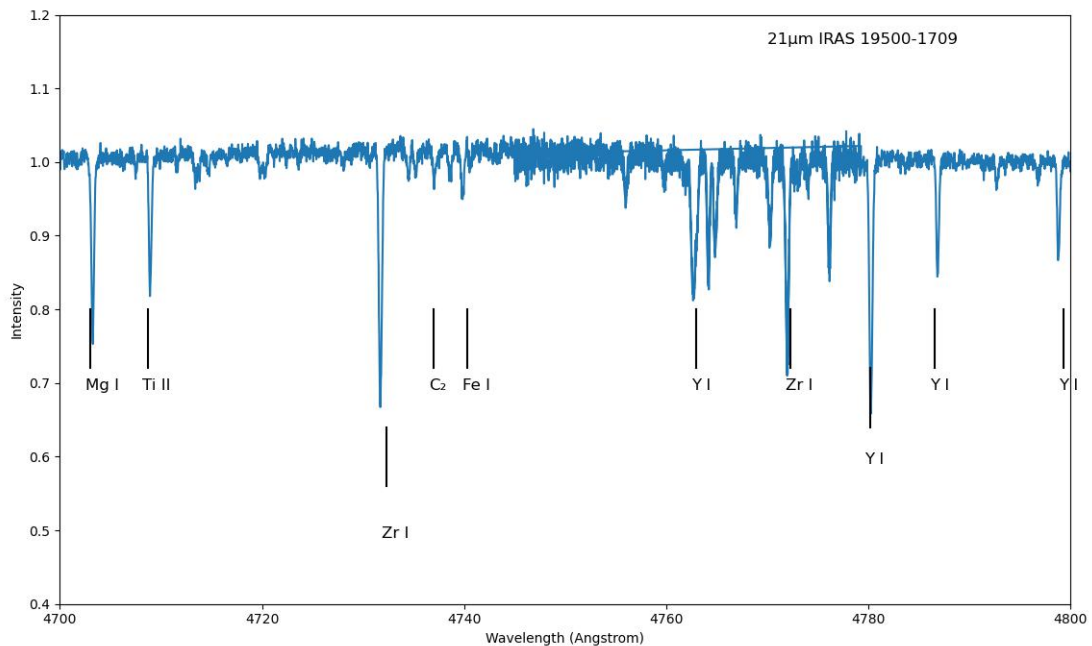


FIGURA 4.5. Espectro de alta resolução no intervalo de 4700 a 4800 Å da fonte $21 \mu\text{m}$ IRAS 19500-1709. Identificamos componentes de Mg I, Ti II, Zr I, Fe I e Y I, além de uma linha de C_2 .

A seguir, o espectro da RV Tauri IRAS F18281+2149, no intervalo espectral de 6510 a 6600 Å, é mostrado na Figura 4.6. Nele, além de linhas de Fe I e Fe II, e de uma possível linha de Ni I, podemos observar um intenso perfil P-Cygni da linha de $\text{H}\alpha$, em 6562 Å. O perfil P-Cygni é formado por uma absorção em comprimentos de onda mais azuis, gerada pela região do envoltório que se encontra linha de visada da estrela, e por uma emissão em comprimentos de onda mais vermelhos, gerada pelas regiões do envoltório em expansão perpendiculares à linha de visada. Esse perfil constitui um forte indicador de perda de massa em estrelas quentes, indicando um envoltório em expansão neste objeto. A partir desse espectro, podemos citar que, como esperado, a presença de linhas com perfil P-Cygni é uma importante característica que pode ser utilizada para identificar objetos com envoltórios de poeira em expansão, como é o caso de Pós-AGBs.

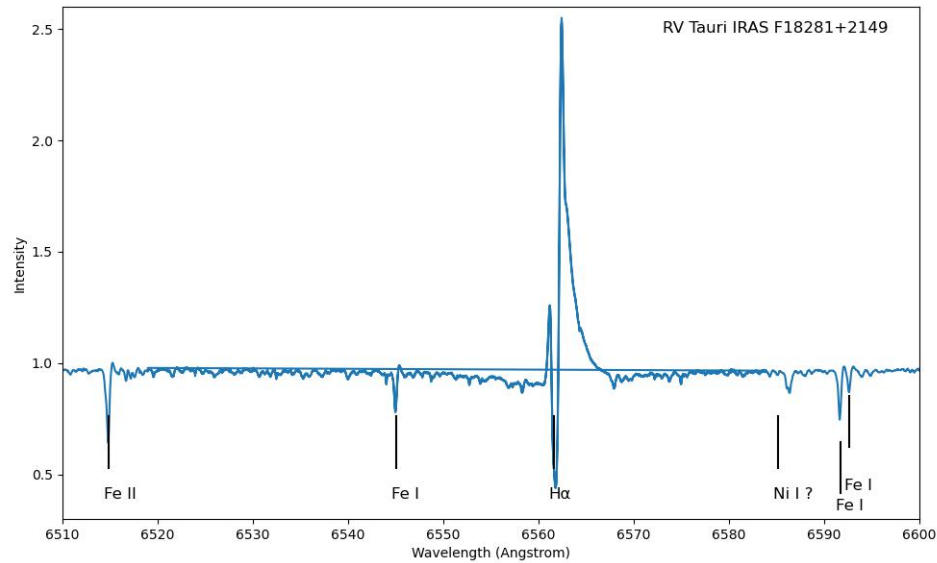


FIGURA 4.6. Espectro de alta resolução da RV Tauri IRAS F18281+2149, no intervalo espectral de 6510 a 6600 Å. Podemos observar o perfil P-Cygni da linha de H α em 6562 Å, com a componente vermelha extremamente intensa, e linhas de Fe I e Fe II, juntamente com uma possível linha de Ni I.

Além disso, a Figura 4.7 mostra o espectro da Pós-AGB oxigenada IRAS 19475+3119, no intervalo de 4580 a 4670 Å, com uma grande quantidade de linhas em absorção. Encontramos algumas das componentes oxigenadas estudadas no trabalho de Mello et al. (2012) (Figura 4.2), e observamos linhas de O II, Fe I, Ti I e N II, além de possíveis linhas de Fe II, Ce II e Cr I.

Ademais, a Figura 4.8 mostra o espectro da Pós-AGB de química dupla IRAS 1833-1738, no intervalo de 5900 a 6000 Å. O espectro dessa estrela é rico em linhas de emissão muito intensas, comum em Pós-AGBs mais evoluídas e, portanto, muito quentes. Por exemplo, encontramos linhas de emissão intensas de Fe I, Ti I e Zr I.

A seguir, apresentamos os espectros de baixa resolução, obtidos para uma Pós-AGB carbonada, uma Pós-AGB oxigenada e duas RV Tauri. Identificamos as principais linhas nesses espectros: as linhas da série de Balmer (H α até H η), a absorção associada ao duplete de sódio (Na D) próxima a 5900 Å, e as linhas de absorção da atmosfera terrestre de O $_2$ próximas a 6900 e 7600 Å, e de H $_2$ O próxima a 7200 Å, que surgem por conta das observações realizadas por instrumentos na Terra.

Por fim, as Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 mostram os espectros de baixa resolução no óptico para três estrelas da amostra: respectivamente, a Pós-AGB carbonada IRAS

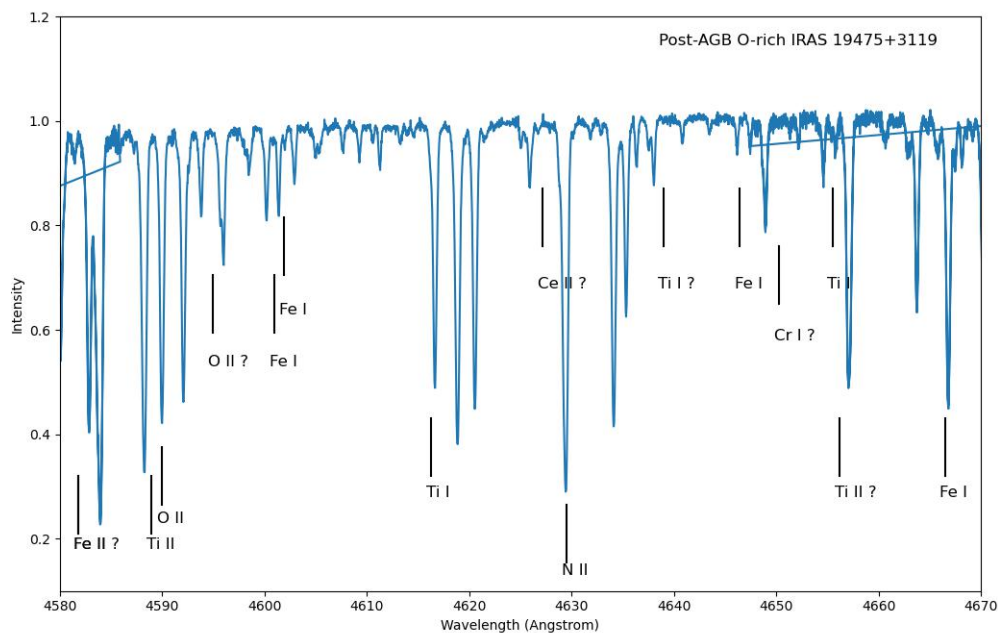


FIGURA 4.7. Espectro de alta resolução da Pós-AGB oxigenada IRAS 19475+3119, no intervalo espectral de 4600 a 4700 Å. São observadas muitas linhas nesse intervalo espectral. Foram identificadas linhas de O II, Fe I, Ti I e N II, além de possíveis componentes de Fe II, Ce II e Cr I.

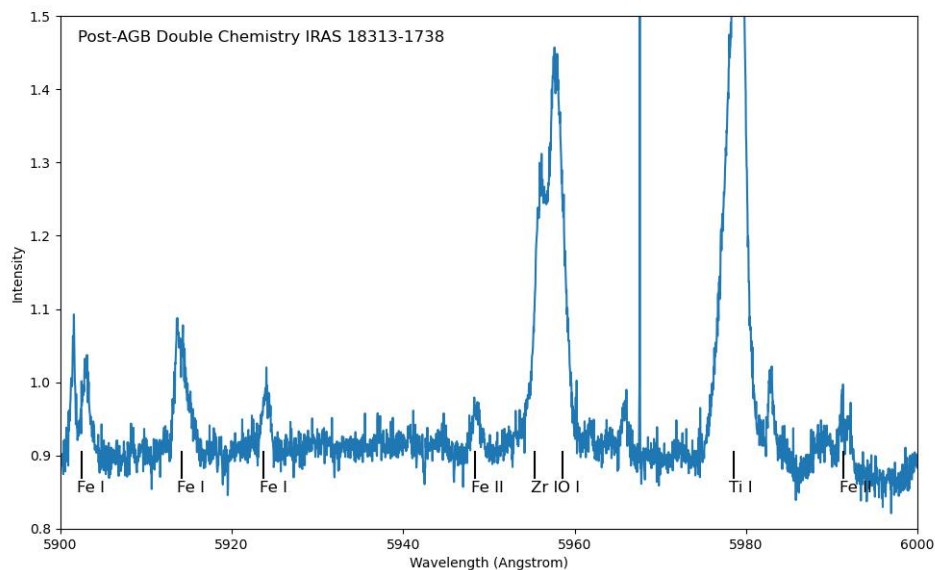


FIGURA 4.8. Espectro de alta resolução da Pós-AGB de química dupla IRAS 18313-1738, no intervalo espectral de 5900 a 6000 Å. São observadas linhas de emissão muito intensas de Fe I, Ti I, Zr I e O I. Linhas de emissão intensas são comuns no espectro de Pós-AGBs muito quentes.

18313-1738, a Pós-AGB oxigenada IRAS 17436+5003 e a RV Tauri AC Her. Ademais, a Figura 4.9 apresenta as marcações das linhas da série de Balmer.

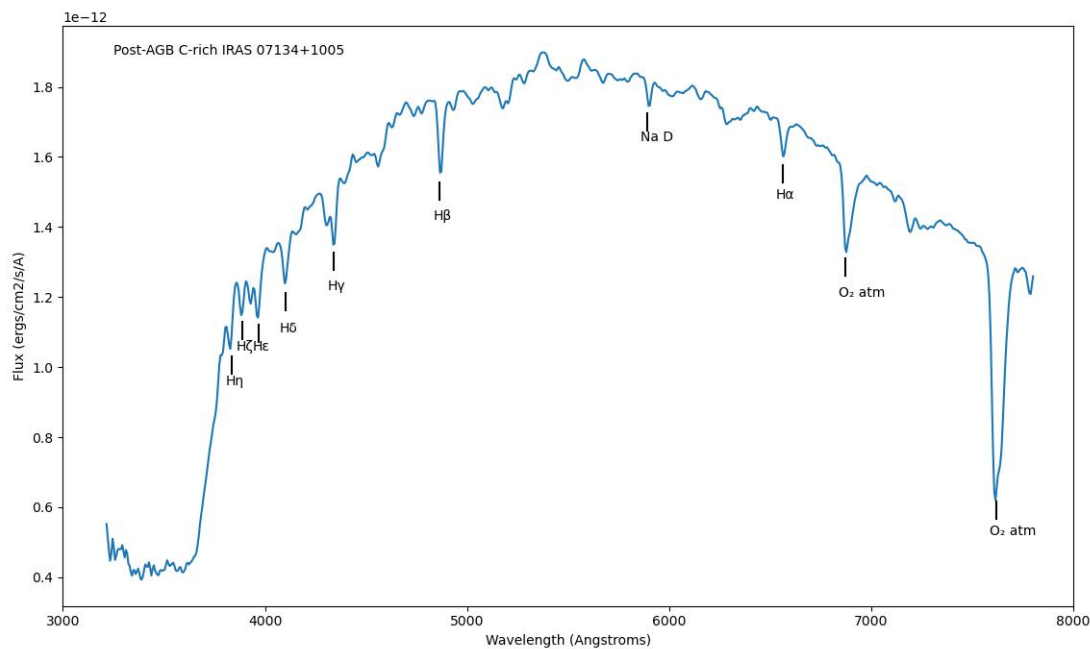


FIGURA 4.9. Espectro de baixa resolução no intervalo de 3000 a 8000 Å da Pós-AGB carbonada IRAS 07134+1005, com as marcações das linhas da série de Balmer, da absorção associada ao dupletto de sódio (Na D) e das principais linhas de absorção atmosféricas presentes.

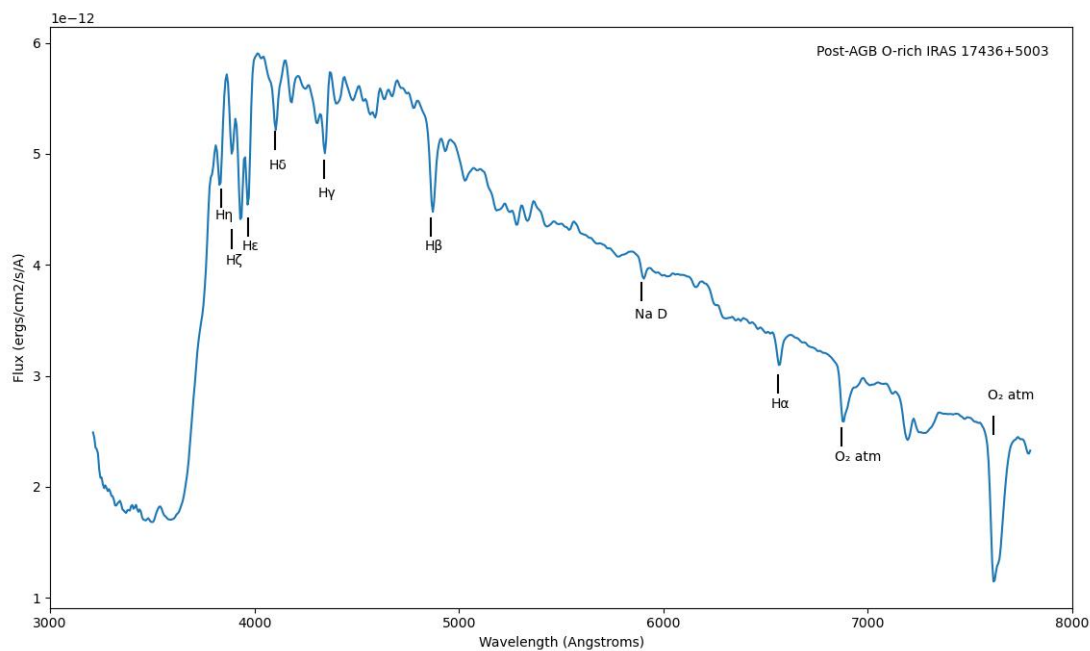


FIGURA 4.10. O mesmo que a Figura 4.9, mas para a Pós-AGB oxigenada IRAS 17436+5003.

Por fim, concluímos este capítulo reiterando que a espectroscopia no óptico é uma ferramenta muito eficiente para identificar e caracterizar objetos Pós-AGB. As características espectrais das Pós-AGBs identificadas e apresentadas anteriormente, podem ser utilizados em análises futuras para o estudo de Pós-AGBs e para a classificação de candidatas a Pós-AGB. Porém, são necessários estudos mais aprofundados, como a

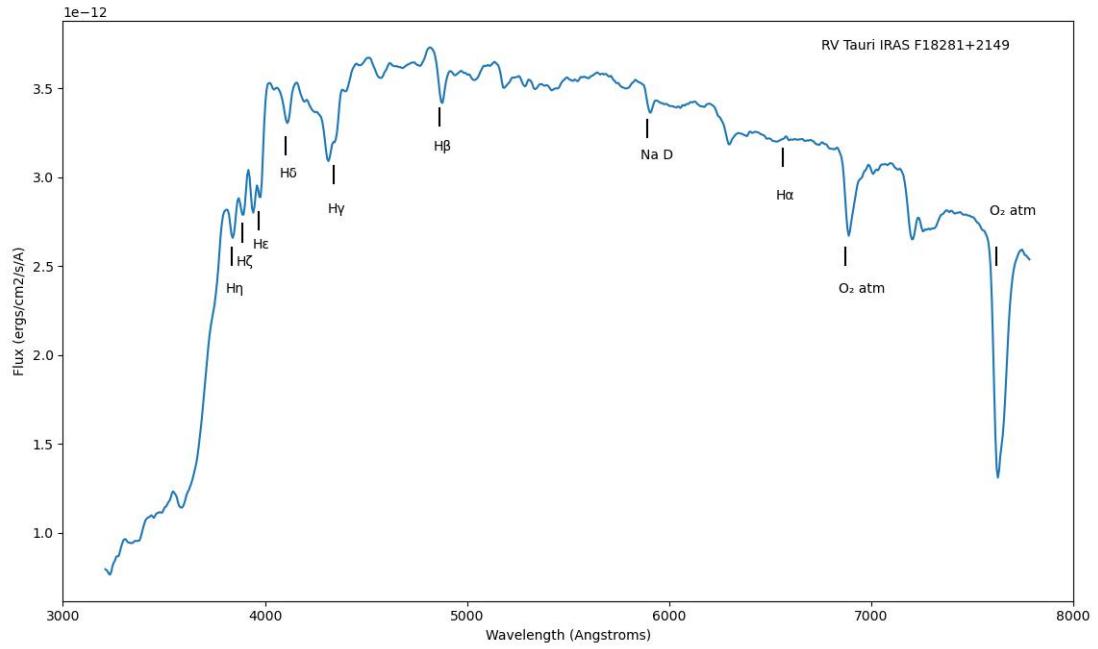


FIGURA 4.11. O mesmo que a Figura 4.9, mas para a RV Tauri IRAS F18281+2149.

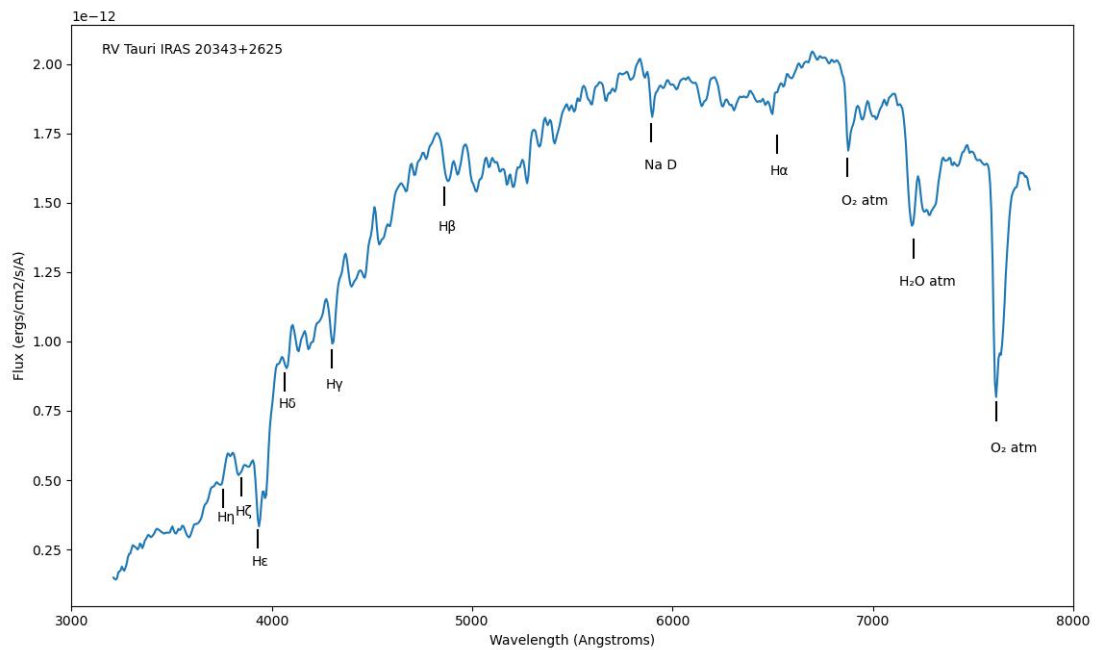


FIGURA 4.12. O mesmo que a Figura 4.9, mas para a RV Tauri IRAS 20343+2625

análise de abundâncias fotosféricas, para complementar a discussão apresentada.

Capítulo 5

Discussão e Resultados

Neste capítulo discutimos e apresentamos os resultados da aplicação das ferramentas de classificação de Pós-AGBs citadas nos Capítulos 3 e 4 nas estrelas presentes em nossa amostra (Tabela 2.1).

No presente trabalho, realizamos uma extensiva busca por dados fotométricos e espectroscópicos das estrelas de nossa amostra de Pós-AGBs a fim de construir as SEDs dos objetos e utilizar as características observadas para criar diagramas cor-cor que possam ser utilizados como ferramenta de classificação. Utilizando as ferramentas *Simbad Astronomical Database* e *IRSA Data Discovery*, criamos um banco de dados fotométricos para as estrelas, que é apresentado no Apêndice A.

Com esse banco de dados e dados de espectroscopia no infravermelho obtidos com o auxílio da ferramenta *ESA ISO Data Science Archive*, foram construídas 35 SEDs, utilizando programação em *Python* para a montagem dos gráficos. Encontramos dados fotométricos para 75 das 79 estrelas, incluindo as 10 candidatas a Pós-AGB. Em relação aos espectros ISO, estes foram encontrados para apenas 21 estrelas, incluindo 4 candidatas. Para os objetos restantes, foram encontrados dados fotométricos e espectroscópicos insuficientes para a construção e análise de suas SEDs. Em particular, apesar de aproximadamente 33% da nossa amostra ser composta por objetos RV Tauri, poucos dados fotométricos e de espectroscopia no infravermelho foram encontrados para essa classe. Isso pode ser explicado pelo fato de serem encontradas RV Tauri sem poeira circunstelar, devido a interações com companheiras binárias, conforme citado no Capítulo 2.

As 4 candidatas para as quais foram encontrados espectros ISO são: IRAS 19219+0947 (candidata 3), IRAS 11065-6026 (candidata 4), IRAS 10211-5922 (candidata 7) e IRAS 10178-5958 (candidata 8). As respectivas SEDs são apresentadas na discussão de cada candidata.

A partir das características das SEDs, criamos diagramas cor-cor utilizando a fotometria presente no banco de dados criado. Para criar os diagramas, utilizamos o fluxo das estrelas nas bandas fotométricas de diferentes levantamentos no infravermelho: as bandas J e K do 2MASS, centradas em 1.25 e 2.2 μm , respectivamente; as bandas 3.4, 4.6, 12 e 22 μm do WISE; 8.3 e 14.7 μm do MSX; 9, 18 e 65 μm do AKARI; e as bandas 12, 25 e 60 μm do IRAS.

A seguir discutimos as características observadas nas SEDs, e quais cores podem ser utilizadas a partir destas para separar as diferentes classes de Pós-AGBs, e então discutimos os diagramas cor-cor criados a partir dessas características. Nas SEDs, os dados de fotometria são mostrados como pontos azuis e o espectro ISO é mostrado em laranja. Ademais, as SEDs não discutidas neste capítulo constam no Apêndice B, e os diagramas cor-cor que não foram discutidos constam no Apêndice C.

5.1 SEDs dos objetos da amostra

Primeiramente, a SED da Pós-AGB carbonada IRAS 16594-4656 é mostrada na Figura 5.1. Nela, apesar do espectro muito ruidoso no infravermelho próximo, podemos observar a característica de duplo pico, o primeiro devido à emissão da estrela central no óptico, e o segundo devido à emissão dos grãos de poeira no envoltório, no infravermelho. Observamos claramente algumas componentes carbonadas em emissão, como as de PAHs em 6.2, 7.7 e 8.6 μm , e possíveis componentes em 11.3 e 13.3 μm , também associadas a PAHs. Além disso, notamos um excesso em 20.1 μm , cuja componente molecular responsável ainda não foi identificada. Quase todas as mesmas características são observadas na SED da Pós-AGB carbonada IRAS 22272+5435, mostrada na Figura 5.2, com exceção da ausência das componentes em 7.7 e 8.6 μm , e da presença da emissão em 6.9 μm , também associada a PAHs, e ausente na SED de IRAS 16594-4656. Ademais, a banda em 11.3 μm aparece de forma mais clara na SED de HD 235858.

Portanto, caso sejam observadas essas mesmas características nas SEDs de grande parte das Pós-AGBs carbonadas da amostra, poderíamos utilizar, por exemplo, as bandas fotométricas de 8.3, 9 e 12 μm para buscar uma separação das Pós-AGBs carbonadas nos diagramas cor-cor.

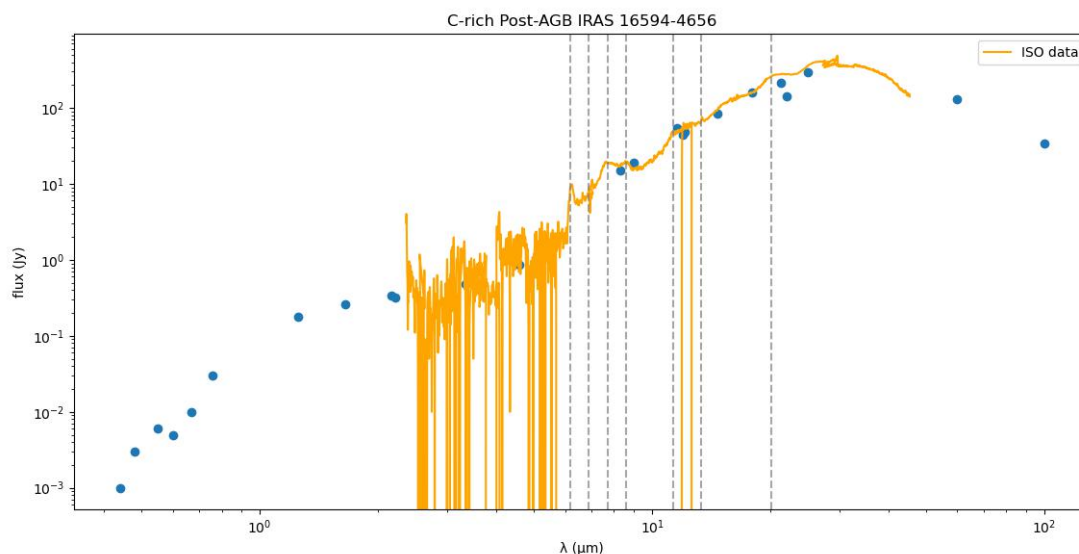


FIGURA 5.1. Distribuição espectral de energia da Pós-AGB carbonada IRAS 16594-4656. Em azul estão apresentados os dados de fotometria e em laranja está sobreposto o espectro ISO desse objeto. Além da emissão de duplo pico, observamos as marcações de diferentes componentes associadas a PAHs em 6.2, 6.9, 7.7, 8.6, 11.3, 13.3 μm , e a emissão ainda sem identificação em 20.1 μm .

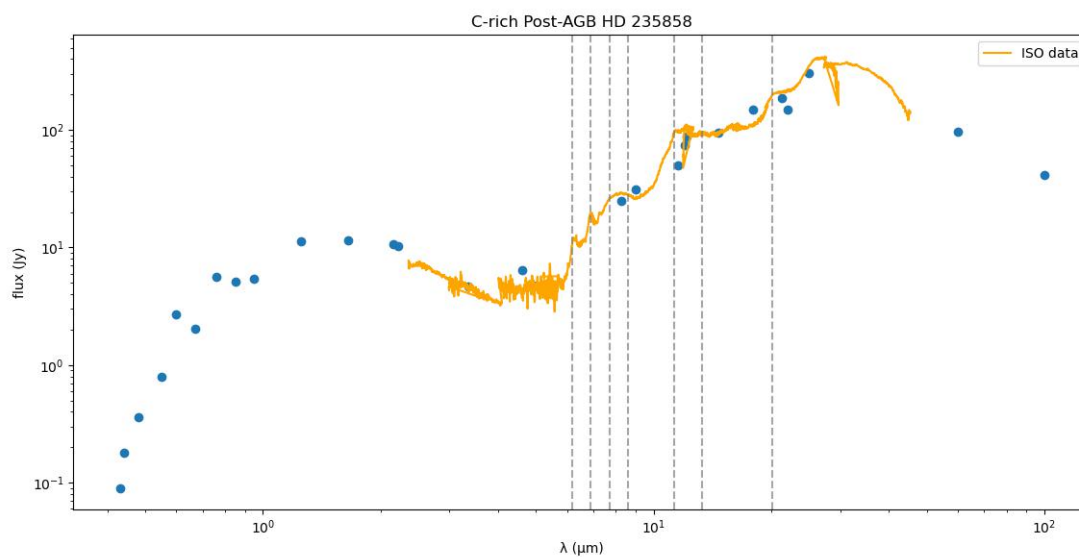


FIGURA 5.2. O mesmo que a Figura 5.1, mas para a Pós-AGB carbonada IRAS 22272+5435. As componentes em 7.7 e 8.6 μm parecem estar ausentes, mas observamos a presença de uma emissão em 6.9 μm

O segundo passo foi analisar as SEDs de algumas das Pós-AGBs oxigenadas de nossa amostra. A Figura 5.3 mostra a SED da Pós-AGB oxigenada IRAS 19475+3119, onde podemos observar novamente uma clara emissão de duplo pico. O espectro ISO

dessa estrela é muito ruidoso na região do infravermelho próximo, impossibilitando a identificação das componentes em 9.7 e $18 \mu\text{m}$, características importantes de envoltórios ricos em oxigênio. Porém, conseguimos identificar uma emissão em $33.4 \mu\text{m}$ associada a grãos de silicato amorfo no envoltório circunstelar. Por outro lado, a SED da Pós-AGB oxigenada IRAS 19244+1115 é mostrada na Figura 5.4. Na SED desse objeto, não observamos a emissão de duplo pico, o que indica um envoltório de alta opacidade. Na figura, estão marcados os comprimentos de onda de 9.7 e $18 \mu\text{m}$, onde observamos claros excessos, associados novamente a grãos de silicato amorfo. Não observamos outras componentes espectrais na SED de IRAS 19244+1115.

Com base nas características observadas, a fim de separar as Pós-AGBs oxigenadas nos diagramas cor-cor, podem ser utilizadas as bandas centradas em 9 e $18 \mu\text{m}$. Porém, o fluxo na banda centrada em $9 \mu\text{m}$, além de poder revelar a componente oxigenada em $9.7 \mu\text{m}$, também pode ser influenciado pela emissão de PAHs em $8.6 \mu\text{m}$, que está presente nas SEDs de algumas Pós-AGBs com envoltórios ricos em carbono ou de química dupla. Por isso, pode ser difícil caracterizar Pós-AGBs oxigenadas utilizando apenas o fluxo medido na banda de $9 \mu\text{m}$. Além disso, como nenhum dos levantamentos incluídos neste trabalho possui uma banda fotométrica próxima a $33.4 \mu\text{m}$, seria necessário buscar outros levantamentos se quiséssemos utilizar essa característica espectral na tentativa de separar esses objetos.

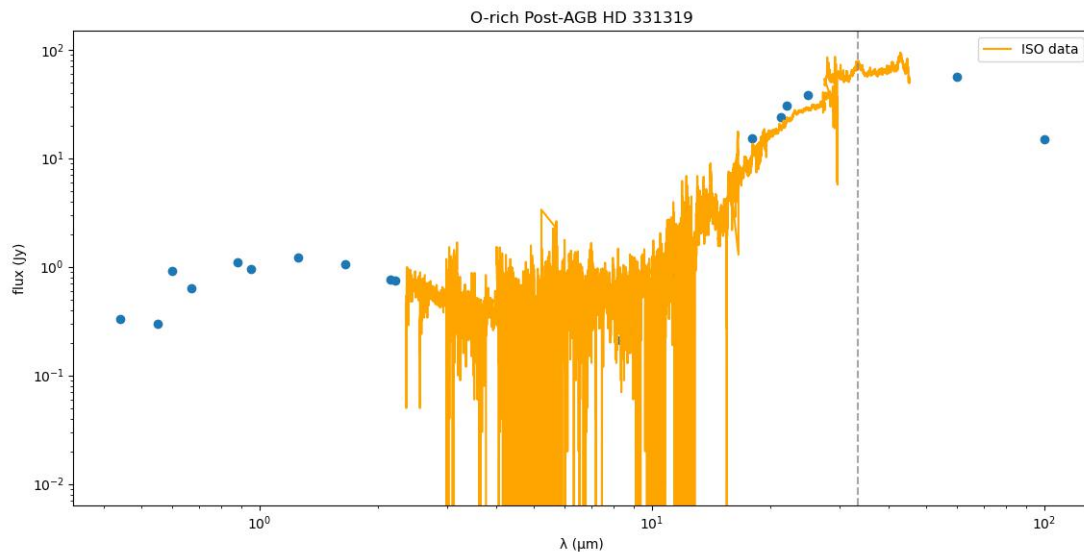


FIGURA 5.3. O mesmo que a Figura 5.1, mas para a Pós-AGB rica em oxigênio IRAS 19475+3119, sem a marcação das componentes carbonáceas. O comprimento de onda marcado é o de $33.4 \mu\text{m}$, onde é observada uma emissão associada à presença de grãos de silicatos cristalinos.

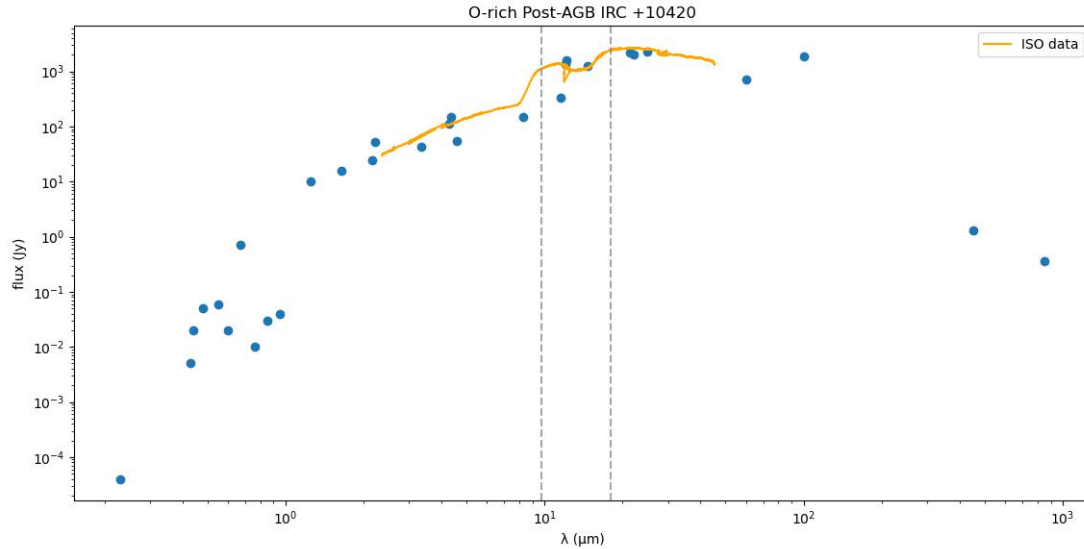


FIGURA 5.4. O mesmo que a Figura 5.1, mas para a Pós-AGB rica em oxigênio IRAS 19244+1115. Estão marcados os comprimentos de onda 9.7 e 18 μm onde esperamos encontrar as componentes associadas a grãos de silicato amorfo no envoltório. Não observamos a emissão de duplo pico nesta SED.

Em terceiro, observamos as características das SEDs das Pós-AGBs de química dupla que podem ser utilizadas para separar esses objetos nos diagramas cor-cor. Vemos na Figura 5.5 a SED da Pós-AGB de química dupla IRAS 06176-1036, que apresenta emissões proeminentes associadas a PAHs em 3.3, 6.2, 7.7, 8.6 e 11.3 μm . Ainda, observamos a emissão associada aos grãos de silicatos cristalinos em 33.4 μm . Portanto, a SED dessa Pós-AGB reúne tanto componentes presentes na SED de Pós-AGBs carbonadas quanto aqueles presentes na SED de Pós-AGBs oxigenadas. Ainda, a Figura 5.6 apresenta outra SED de uma das Pós-AGBs de química dupla da nossa amostra, a IRAS 16279-4757. Em comparação com a SED anterior, não observamos emissão em 3.3 e em 33.4 μm . Por outro lado, observamos as emissões de PAHs em 6.2, 7.7, 8.6 e 11.3 μm . Ambas as SEDs possuem apenas um único pico.

A presença de componentes oxigenadas e carbonadas na SED de Pós-AGBs de química dupla indica, a princípio, uma dificuldade em encontrar cores que pudessem diferenciar esses objetos de Pós-AGBs carbonadas e oxigenadas em diagramas cor-cor no infravermelho. Baseando-se apenas nas componentes observadas nas SEDs deste trabalho, que acreditamos ser representativas dessa classe, dois exemplos de cores que poderíamos utilizar para tentar diferenciar as Pós-AGBs de química dupla é a cor [8.3]-[18] e a cor [3.4]-[18], que poderiam realçar tanto a presença de PAHs (em 3.3 e 8.6 μm) como de silicatos amorfos (em 18 μm). Porém, além da componente oxigenada

em $9.7 \mu\text{m}$ esperada em envoltórios oxigenadas, que poderia influenciar no fluxo em $8.3 \mu\text{m}$, o excesso em $18 \mu\text{m}$ não foi observado em nenhuma das SEDs das Pós-AGBs de química dupla deste trabalho. Poderia ser interessante realizar uma análise espectral mais profunda com o objetivo de buscar características que possam ser exclusivas dessa classe e, então, buscar outros levantamentos cujas bandas fotométricas levem em consideração essas características. Contudo, de acordo com as hipóteses para o surgimento da química dupla discutidas no Capítulo 2, não esperamos que a SED dessa classe de objetos apresente características espectrais diferentes quando comparada às SEDs de Pós-AGBs carbonadas e oxigenadas. Dessa forma, diagramas cor-cor no infravermelho parecem não ser a ferramenta mais eficiente para separar e classificar de forma inequívoca objetos Pós-AGBs oxigenados.

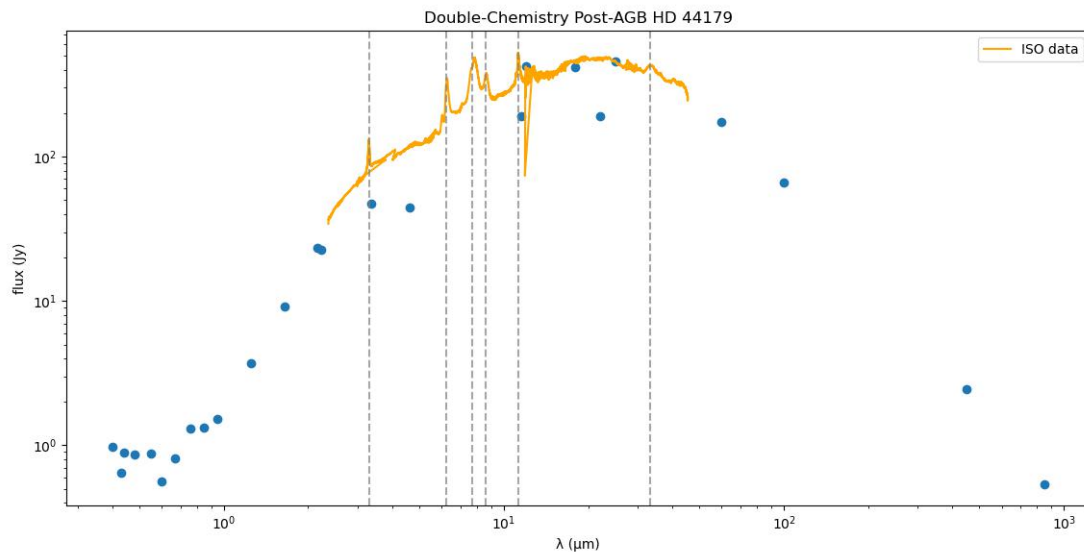


FIGURA 5.5. O mesmo que a Figura 5.1, mas para a Pós-AGB de química dupla IRAS 06176-1036. As marcações estão nos comprimentos de onda de 3.3 , 6.2 , 7.7 , 8.6 e $11.3 \mu\text{m}$, associados a emissões devidas a PAHs; em $33.4 \mu\text{m}$, associado à emissão de grãos de silicatos cristalinos. A SED deste objeto não apresenta emissão de duplo pico.

Em relação às estrelas RV Tauri, destacamos a SED de IRAS F18281+2149, mostrada na Figura 5.7. Nessa SED, observamos uma emissão de duplo pico característica de Pós-AGBs binárias, conforme discutido no Capítulo 3: nesse caso, o excesso no infravermelho devido à emissão da poeira se inicia no infravermelho próximo, indicando poeira quente muito perto da estrela central, na forma de um disco circumbinário. Além disso, observamos uma emissão em $4.25 \mu\text{m}$, associada a molécula de CO_2 , um excesso em $9.7 \mu\text{m}$ associado a silicatos amorfos, e uma emissão em $33.4 \mu\text{m}$ associada a silicatos cristalinos. Na poeira dessas estrelas, esperamos encontrar componentes oxigenadas, uma vez que esses objetos não apresentam enriquecimento de carbono.

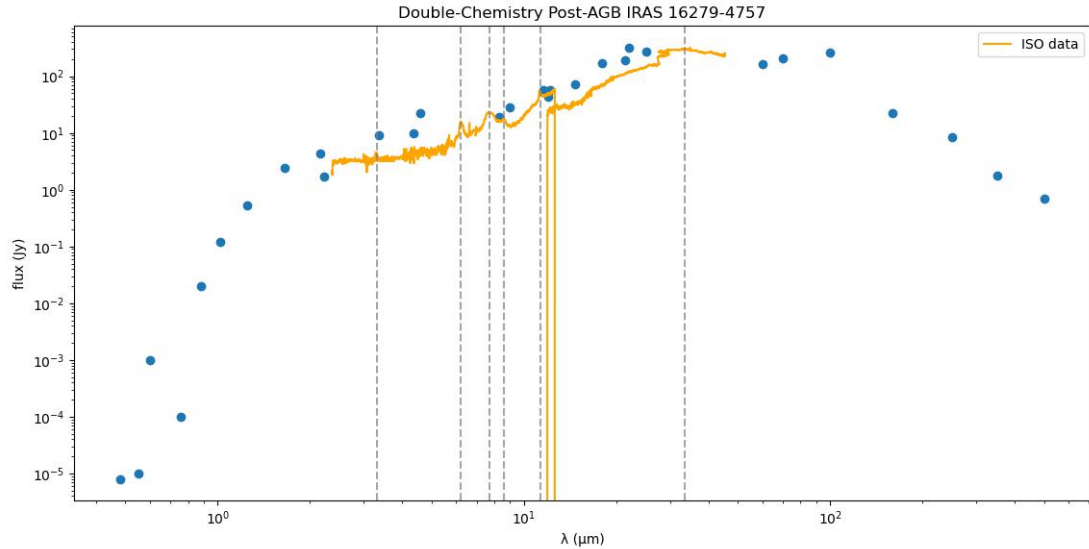


FIGURA 5.6. O mesmo que a Figura 5.1, mas para a Pós-AGB de química dupla IRAS 16279-4757. Estão presentes as emissões de PAHs em 6.2, 7.7 e 11.3 μm . Não é observada a emissão de duplo pico.

Utilizando apenas as características observadas citadas acima para separar as RV Tauri nos diagramas cor-cor, poderíamos utilizar as bandas fotométricas de 4.6 e 9 μm . Porém, utilizando cores a partir dessas bandas, haveria a contaminação de Pós-AGBs oxigenadas, nas quais também são esperadas essas componentes espectrais. Assim como no caso das Pós-AGBs de química dupla, as características espectrais em comum entre as SEDs das RV Tauri e das Pós-AGBs oxigenadas podem dificultar a classificação inequívoca desses objetos em diagramas cor-cor no infravermelho. Contudo, uma fração significativa das RV Tauri Galácticas não apresenta excesso no infravermelho, e por isso se destacam bem de outras Pós-AGBs no diagrama cor-cor WISE com as cores [3.4]-[4.6] e [12]-[22], como mostrado no trabalho de Gezer et al. (2015). Grande parte das RV Tauri presentes em nossa amostra encontra-se no intervalo definido para esses objetos sem excesso infravermelho no diagrama cor-cor, como será discutido mais adiante.

Por fim, discutimos as SEDs de duas Water Fountains presentes em nossa amostra: IRAS 18139-1816 e IRAS 18286-0959. A SED da primeira é mostrada na Figura 5.8. Nela, apesar do espectro ISO ruidoso no infravermelho próximo, podemos ver a emissão de pico único, como esperado para objetos fortemente obscurecidos pela poeira, como é o caso das Water Fountains. Observamos uma larga e intensa absorção centrada em 9.7 μm , associada à presença de silicatos amorfs na poeira. Além disso, observamos uma emissão próxima à 4 μm , mas que não corresponde à emissão da molécula de CO_2 em 4.25 μm , característica da química oxigenada. A responsável por essa componente de

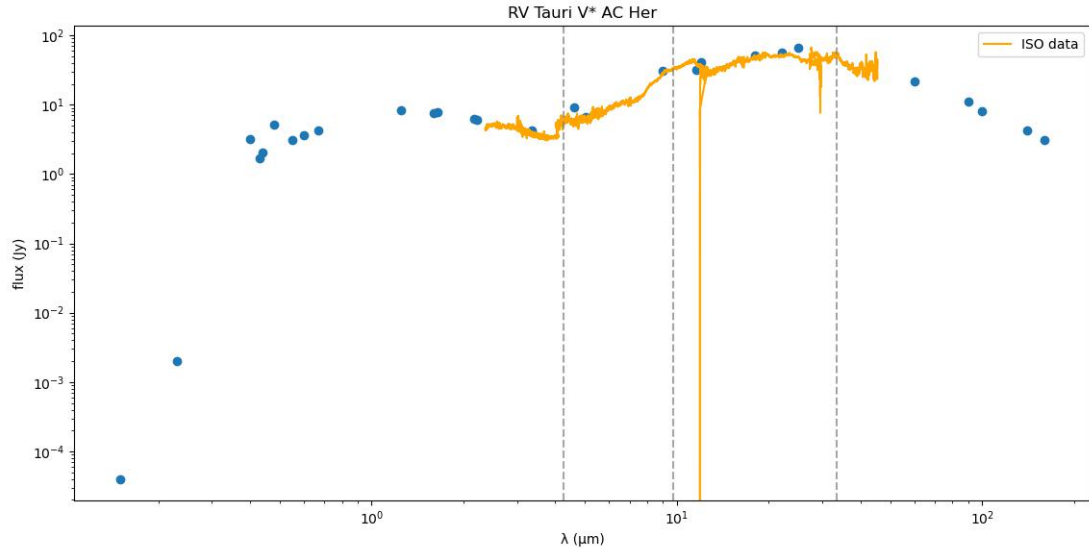


FIGURA 5.7. O mesmo que a Figura 5.1, mas para a RV Tauri IRAS F18281+2149. Observamos emissões em $4.25 \mu\text{m}$, associada com a molécula de CO_2 , um excesso em $9.7 \mu\text{m}$ associado a grãos de silicato amorfo, e uma componente em $33.4 \mu\text{m}$ associada a grãos de silicato cristalino.

emissão não foi identificada na literatura e portanto não será considerada neste trabalho. Em relação à segunda estrela, sua SED é mostrada na Figura 5.9. Apesar de o espectro ISO não se ajustar bem aos dados fotométricos, novamente não observamos a emissão de duplo pico, indicando um envoltório muito opaco. Assim como na SED da Water Fountain anterior, observamos uma emissão larga, porém menos intensa, em $9.7 \mu\text{m}$. Portanto, uma emissão de pico único e uma absorção intensa em $9.7 \mu\text{m}$ parecem ser características importantes na SED das Water Fountains estudadas nesse trabalho.

Dessa forma, podemos utilizar a banda fotométrica em $9 \mu\text{m}$ para tentar separar esses objetos nos diagramas cor-cor. Apesar de ser uma característica que também é esperada nas SEDs de Pós-AGBs oxigenadas, ela se apresenta de forma mais intensa, no geral, nas estrelas Water Fountain, indicando que pode ser uma característica útil para ser explorada nos diagramas.

Nesta seção, discutimos as principais características espectrais observadas nas SEDs de cada classe de objetos da nossa amostra. A seguir, apresentamos os diagramas cor-cor que foram construídos a partir das características citadas acima.

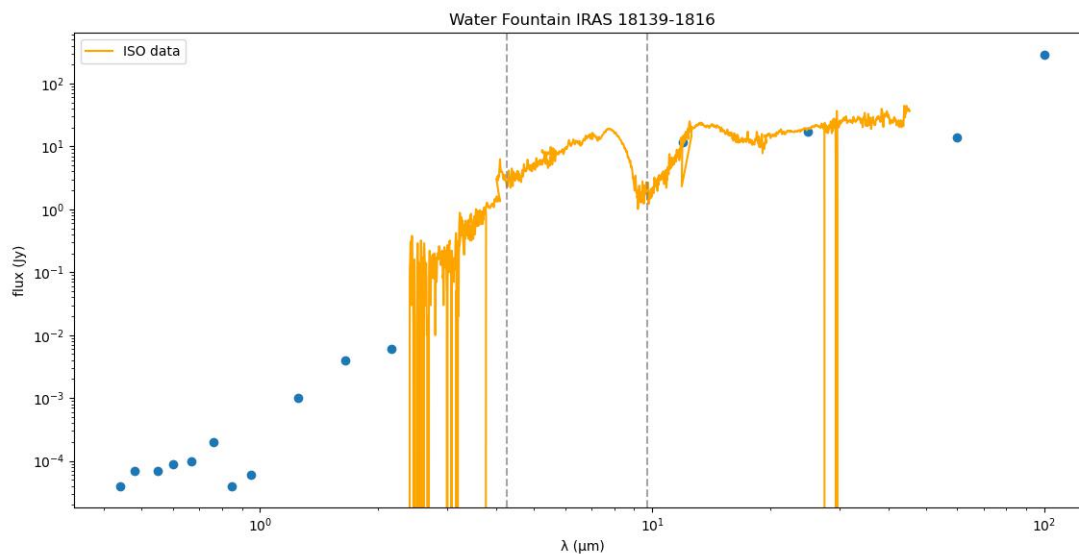


FIGURA 5.8. O mesmo que a Figura 5.1, mas para a Water Fountain IRAS 18139-1816. Há a presença de uma intensa absorção em $9.7 \mu\text{m}$, associada a grãos de silicato amorfo, e a SED mostra um perfil de pico único.

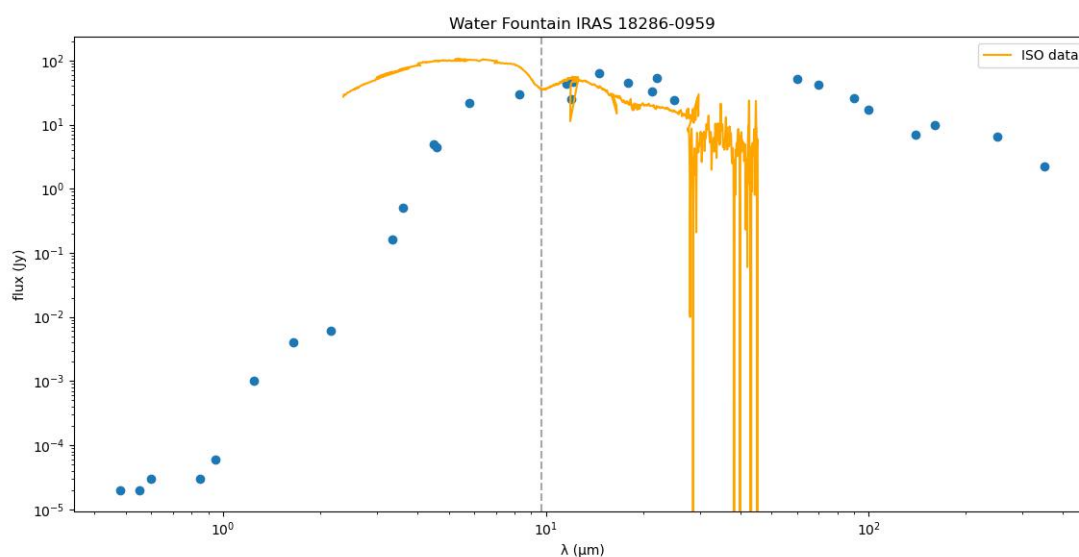


FIGURA 5.9. O mesmo que a Figura 5.1, mas para a Water Fountain IRAS 18286-0959. Há a presença de uma intensa emissão em $9.7 \mu\text{m}$, associada a grãos de silicato amorfo, e a SED mostra um perfil de pico único.

5.2 Diagramas cor-cor criados

A partir das características observadas nas SEDs, criamos diagramas cor-cor combinando as bandas dos diferentes levantamentos, com o objetivo de verificar se as diferentes classes de Pós-AGBs poderiam ser separadas nesses diagramas, e de classificar as candidatas a Pós-AGB presentes em nossa amostra. Realizamos a combinação de cada uma das bandas citadas anteriormente, resultando em 156 diagramas. Então, os

diagramas foram analisados e selecionamos 24, considerados os mais relevantes para este trabalho, no sentido de possuir objetos o suficiente, ser capaz de separar diferentes classes de Pós-AGB e/ou de permitir uma classificação preliminar das candidatas. Dentre os 24 diagramas, discutimos os seis mais relevantes a seguir. Os diagramas não discutidos neste trabalho constam no Apêndice C.

Nos diagramas que apresentaremos a seguir, os objetos oxigenados são representados por círculos, os objetos carbonados por triângulos, e os objetos de química dupla por losangos. As cores foram definidas de acordo com as diferentes classes de objetos: Pós-AGBs carbonadas, oxigenadas e de química dupla em preto, objetos 21 μm em ciano, Water Fountains em azul escuro e RV Tauri em verde.

Além disso, as candidatas (símbolos “x” amarelos) são marcadas com seus respectivos números, conforme definido na Tabela 2.1. O termo Pós-AGB é abreviado por “PAGB” nos diagramas. Como foram utilizados dados fotométricos de diferentes levantamentos, nem todos os objetos da amostra possuem observações em todas as bandas utilizadas, de forma que alguns diagramas cor-cor não contêm a amostra em sua totalidade.

5.2.1 IRAS [25]-[60] x [12]-[25]

Inicialmente, reproduzimos o diagrama cor-cor IRAS com as regiões definidas por van der Veen & Habing (1988) e Garcia-Lario et al. (1997), e estudado por Molina et al. (2019), conforme discutido no Capítulo 3. O diagrama que construímos é mostrado na Figura 5.10. Daqui pra frente, as regiões citadas são denominadas “regiões de Veen” e “região de Garcia”, fazendo menção aos autores que propuseram essas regiões pela primeira vez na literatura.

As regiões de Veen coloridas na Figura correspondem às regiões definidas para os seguintes tipos de objetos, conforme definida pelos autores: região dos objetos variáveis ricos em carbono em verde; dos objetos não variáveis ou NPs com envoltórios frios em laranja; objetos variáveis ricos em oxigênio com envoltório espesso em roxo; diferentes tipos de objetos muito frios em vermelho; e estrelas variáveis (algumas ricas em oxigênio) em rosa.

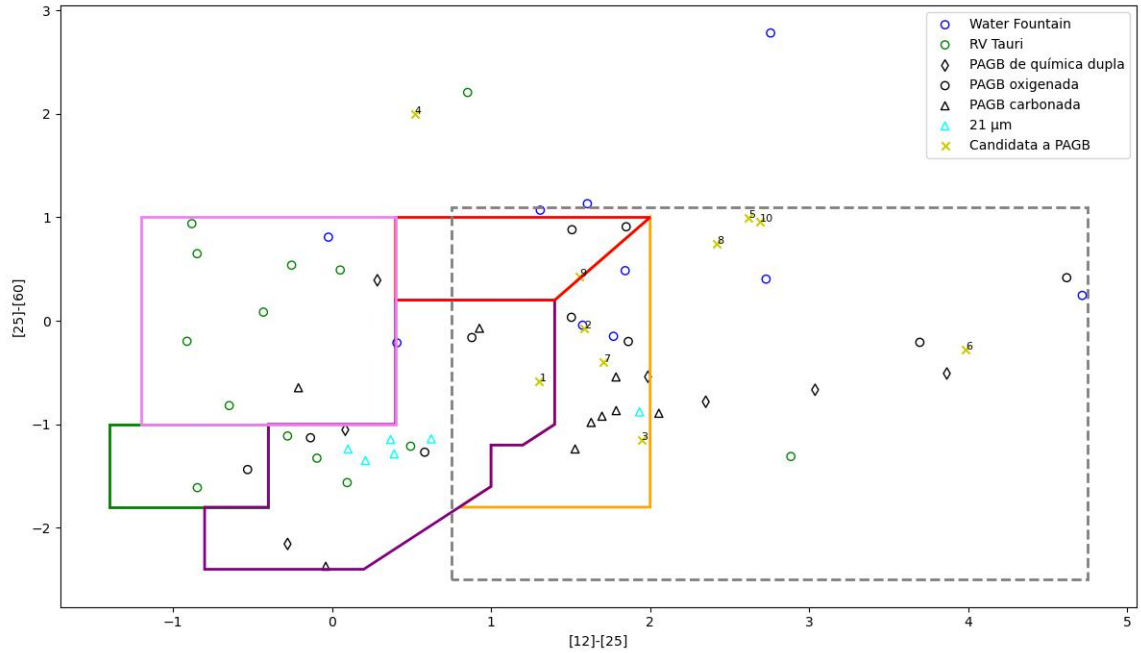


FIGURA 5.10. Diagrama cor-cor IRAS com os objetos que compõem a amostra deste trabalho. As regiões coloridas correspondem àquelas definidas por van der Veen & Habing (1988) (explicitadas no texto), e a região pontilhada em cinza é a definida por Garcia-Lario et al. (1997) para Pós-AGBs e NPs.

Na Figura 5.10, observamos que a maior parte dos objetos posiciona-se dentro das regiões de Veen, apesar das classes se misturarem dentro de cada delimitação. Contudo, observamos que uma parte das RV Tauri encontra-se na região definida para objetos variáveis ricos em oxigênio (em rosa), o que está de acordo com a natureza dessas estrelas. Por outro lado, quase todos os objetos $21 \mu\text{m}$ presentes encontram-se na região definida para objetos oxigenados variáveis (em roxo), o que dessa vez não corresponde à natureza desses objetos, que possuem envoltórios ricos em carbono e não são variáveis.

Dentre os objetos fora das regiões de Veen, encontramos que quase todos se posicionam dentro da região de Garcia para Pós-AGBs e nebulosas planetárias (em cinza). No entanto, 5 objetos são exceção: uma Water Fountain e uma Pós-AGB oxigenada possuem índices de cor $[12]-[25]$ superiores ao limite da região de Garcia, e portanto encontram-se fora dessa região; uma RV Tauri, uma Water Fountain e a candidata 4, que possuem índices $[25]-[60]$ maiores do que aqueles abrangidos pelas regiões de Veen e de Garcia. Notamos que, com exceção da candidata 4, todos os objetos que se posicionam fora das regiões delimitadas possuem química rica em oxigênio. Esse fato poderia ser um indicativo da natureza química da candidata 4, IRAS 11065-6026. Por outro

lado, talvez essa candidata não seja uma Pós-AGB, por conta da sua posição no diagrama. Uma discussão aprofundada sobre a natureza das candidatas será discutida mais adiante.

Em relação às outras candidatas no diagrama da Figura 5.10, observamos que a candidata 1 se posiciona na região dos objetos oxigenados variáveis (em roxo), mesma região onde se encontra a maior parte dos objetos $21 \mu\text{m}$. Porém, objetos de todas as classes são observados nessa região, e, apesar de haver mais objetos oxigenados do que carbonados, isso poderia ser devido ao fato de que a nossa amostra conta com mais objetos oxigenados. Portanto, a posição da candidata 1 neste diagrama não permite uma possível classificação preliminar. Além disso, as candidatas 2, 3 e 7 posicionam-se na região das NPs ou objetos não-variáveis. Nessa região, observamos tanto objetos carbonados como oxigenados, e também uma Pós-AGB de química dupla, no limite da região. Contudo, dentro dessa região, os objetos carbonados se concentram na parte inferior, enquanto os oxigenados ficam na parte superior. Levando isso em consideração, a candidata 2 está junto dos objetos oxigenados na parte superior, a candidata 3 na parte inferior com os carbonados, e a candidata 7 parece estar no meio, entre essas duas concentrações (Figura 5.10)

Além do mais, as candidatas 5, 6, 8 e 10 encontram-se fora das regiões de Veen, mas dentro da região de Garcia. Em particular, as candidatas 5, 8 e 10 encontram-se próximas no diagrama, o que pode indicar alguma característica em comum entre esses objetos. Ainda, a candidata 9 encontra-se no limite da região de objetos muito frios (em vermelho) do diagrama, podendo ser um indicativo de sua baixa temperatura efetiva.

Por último, observamos que as Pós-AGBs oxigenadas encontram-se espalhadas pelo diagrama, as Pós-AGBs carbonadas estão concentradas na região de objetos não-variáveis ou de NPs com envoltório frio (em laranja), as Water Fountain também encontram-se espalhadas na região mais à direita, e as RV Tauri encontram-se quase todas divididas entre as regiões de Veen rosa, verde e roxa da Figura 5.10. Os dois objetos que encontram-se na região dos variáveis carbonados (em verde) são oxigenados, indicando que a definição dessa região pode não ser adequada para a nossa amostra.

Em suma, em relação ao diagrama IRAS da Figura 5.10, notamos que as regiões de Veen parecem não ser as mais adequadas para o estudo da natureza química de classes diferentes de Pós-AGB, e portanto não são adequadas para o objetivo deste trabalho.

Isso pode ser entendido pelo fato de que, em seu trabalho, van der Veen & Habing (1988) utilizaram os diagramas para analisar diversos tipos de objetos com envoltórios circunstelares, e não exclusivamente Pós-AGBs. A partir desse resultado, utilizando as características observadas nas SEDs, criamos novos diagramas cor-cor que pudessem ser mais adequados para a análise dos objetos da nossa amostra, e estes são discutidos a seguir.

5.2.2 WISE [3.4]-[4.6] x [12]-[22]

O diagrama cor-cor [3.4]-[4.6] x [12]-[22] foi construído a partir das bandas fotométricas do WISE, e é mostrado na Figura 5.11. Nele, uma parte significativa das RV Tauri (círculos verdes) se posiciona dentro da região definida por Gezer et al. (2015) para objetos sem excesso no infravermelho, característica de grande parte das RV Tauri Galácticas. Essa região se encontra no canto inferior esquerdo do gráfico e está marcada em preto na figura. Esse resultado indica que a maior parte das RV Tauri da nossa amostra são objetos Galácticos e não possuem excesso no infravermelho. Além disso, com exceção de alguns objetos, todas as RV Tauri restantes encontram-se na região definida pelos mesmos autores para objetos com SED tipo disco, associados a sistemas binários, marcada em azul na figura.

Outra classe de objetos que se distingue das demais nesse diagrama é a classe 21 μm (triângulos em ciano). Dentre os 5 objetos dessa classe que estão presentes no diagrama, 4 deles se posicionam na região superior, com índices de cor [3.4]-[4.6] superiores aos dos objetos restantes da amostra, com exceção de uma Water Fountain (círculo azul), como pode ser observado na figura. Esse comportamento pode ter relação com as características das emissões de PAHs na poeira dos objetos 21 μm . Por sua vez, as Water Fountain encontram-se, em sua maioria, na região mais à direita do diagrama, para [12]-[22] ≥ 2.5 , comportamento que talvez esteja relacionado à intensa absorção em 9.7 μm presente nas SEDs das Water Fountain, que pode influenciar no fluxo em 12 μm . As Pós-AGBs carbonadas e oxigenadas encontram-se espalhadas pelo diagrama.

Na figura, estão marcadas as regiões de Gezer para objetos com SEDs que indicam a presença de envoltório circunstelar (em vermelho), objetos com SEDs que indicam a presença de um disco circumbinário (em azul), e objetos que não apresentam excesso no infravermelho (em preto).

É de extrema relevância para este trabalho destacar que todas as candidatas, com exceção das candidatas 5, 8 e 10, encontram-se na região de Gezer definida para objetos com envoltório circunstelar, marcada em vermelho na figura. Como a presença de envoltório circunstelar indica um sistema não-binário, em contraste com a presença de um disco circumbinário de poeira que indica binariedade estelar, isso pode ser um indicativo de que a maior parte das nossas candidatas são objetos não-binários e portanto constitui um importante resultado preliminar no estudo desses objetos. Ainda, esse resultado reforça a hipótese de que as candidatas 5, 8 e 10 possuem características em comum relacionadas ao seus excessos no infravermelho, e assim se distinguem das demais, como observado anteriormente na discussão do diagrama IRAS [25]-[60] x [12]-[25]. Porém, análises mais detalhadas são necessárias.

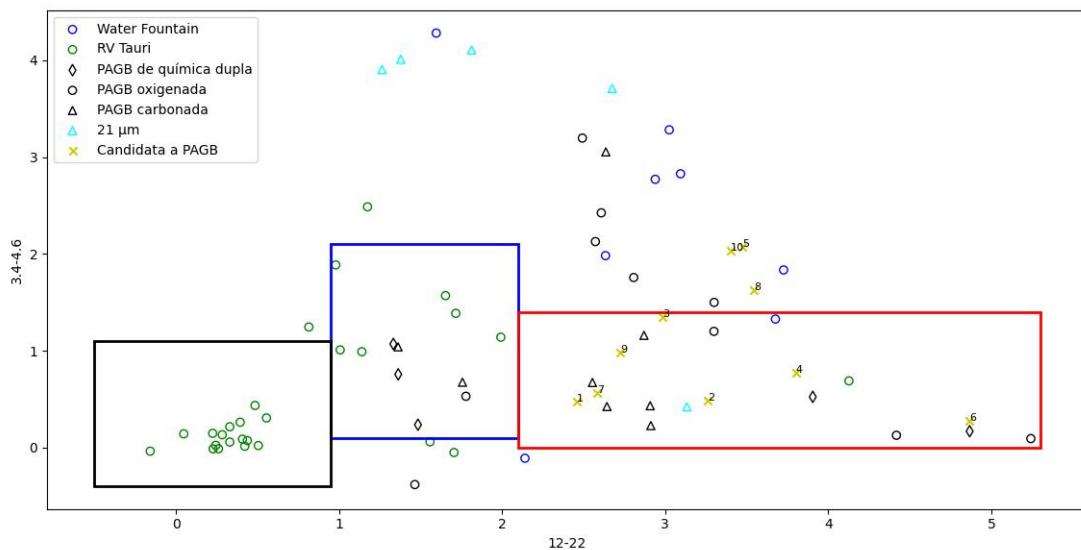


FIGURA 5.11. Diagrama cor-cor WISE com os objetos que compõem a amostra deste trabalho. Pode-se observar uma concentração de algumas estrelas RV Tauri na região de Gezer para objetos sem excesso no infravermelho (em preto). Além disso, estão marcadas as regiões de Gezer para objetos com discos circumbinários (em azul), e para objetos com envoltórios circunstelares (em vermelho).

Portanto, esse diagrama cor-cor com as cores WISE, apesar de não separar claramente diferentes classes de Pós-AGBs, pode ser utilizado como uma ferramenta adequada para a análise de classes específicas, como as RV Tauri e $21 \mu\text{m}$, e para a análise da natureza binária ou não-binária dos objetos, utilizando as regiões de Gezer.

5.2.3 WISE-AKARI [09]-[18] x [12]-[22]

Este diagrama combina as bandas fotométricas do WISE e do AKARI, com a cor AKARI [09]-[18] e a cor WISE [12]-[22], e é mostrado na Figura 5.12. Pelo fato de que

muitos objetos da amostra não possuem observações nas bandas fotométricas do AKARI, esse diagrama conta com um número significativamente menor de objetos, quando comparado aos diagramas anteriores. Apesar disso, algumas observações relevantes podem ser realizadas. Verificamos novamente que a cor $[12]-[22]$ é adequada para separar objetos RV Tauri, e constatamos que todas as RV Tauri do diagrama possuem índice de cor $[09]-[18]$ entre 0 e 1, e portanto concentram-se mais uma vez em uma região no canto inferior do diagrama. Ainda, os três objetos da classe $21 \mu\text{m}$ presentes posicionam-se no intervalo $1 \leq [12]-[22] \leq 2$, $0 \leq [09]-[18] \leq 1$, o que pode indicar uma região onde são esperados esses objetos. Contudo, um número maior de objetos é necessário para verificar esse comportamento.

A região superior do diagrama, para $[09]-[18] > 3.5$ é povoada apenas por objetos ricos em oxigênio (círculos pretos e azuis) e pela candidata 6. Conforme discutido na análise das SEDs dos objetos da amostra, a cor $[09]-[18]$ pode realçar as componentes espectrais de 9.7 e $18 \mu\text{m}$ esperadas em envoltórios ricos em oxigênio. Assim, de forma preliminar, esse resultado indica que a candidata 6, IRAS 15066-5532, possui um envoltório cuja química é rica em oxigênio. Contudo, são necessárias análises mais aprofundadas para confirmar sua natureza. Como citado anteriormente, a natureza das candidatas com base em dados da literatura e nos resultados desse trabalho será discutida mais adiante, na Seção 5.3.

Além do mais, as outras candidatas concentram-se na região central do diagrama, junto com Pós-AGBs carbonadas e oxigenadas, e Water Fountains. Pela terceira vez, observamos que as candidatas 5, 8 e 10 posicionam-se próximas entre si no diagrama. Nesse caso, além do índice de cor $[12]-[22]$, discutido no diagrama anterior, essas candidatas também possuem índices $[09]-[18]$ semelhantes, reforçando características em comum. Ainda, 4 das 5 Pós-AGBs carbonadas do diagrama concentram-se na região central, e as candidatas 3 e 7 encontram-se particularmente próximas a essa concentração. As candidatas restantes, 1 e 9, posicionam-se relativamente próximas a três objetos oxigenados no centro do diagrama, como podemos ver na Figura 5.12. Contudo, outras análises são necessárias para sugerir uma classificação preliminar para essas candidatas.

Assim, apesar da baixa quantidade de objetos neste diagrama, os resultados indicam que a cor $[09]-[18]$ pode ser adequada para analisar objetos RV Tauri e $21 \mu\text{m}$, que estão concentrados em uma mesma região no canto inferior esquerdo do diagrama,

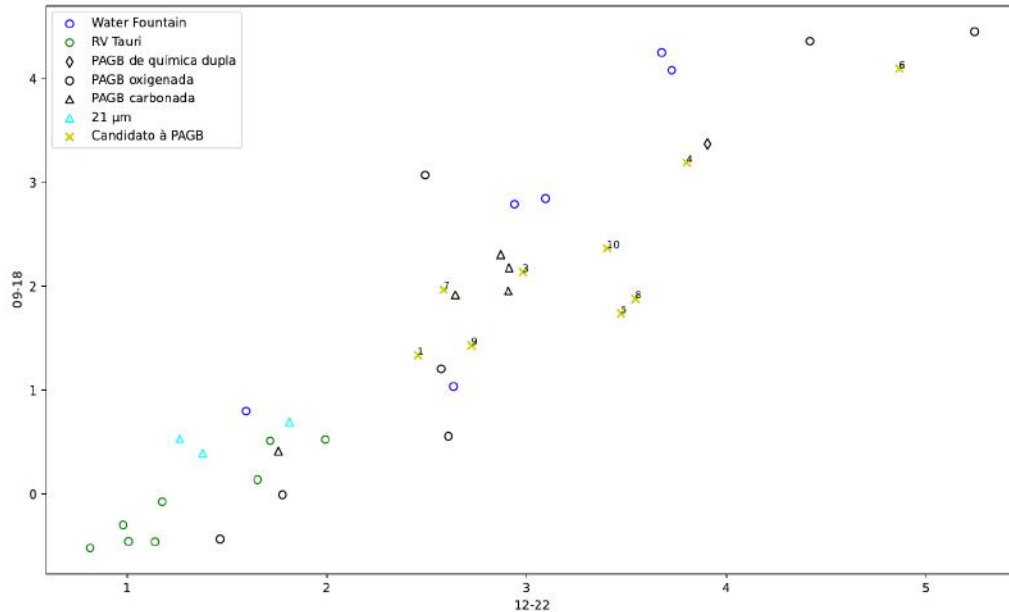


FIGURA 5.12. Diagrama cor-cor combinando cores WISE e AKARI com os objetos que compõem a amostra deste trabalho. Observamos que os objetos RV Tauri e $21\ \mu\text{m}$ concentram-se todos no canto inferior esquerdo do diagrama, e que a candidata 6 posiciona-se no canto superior direito, onde são observados apenas objetos oxigenados.

e alguns objetos oxigenados que encontram-se no canto superior direito. No caso dos objetos $21\ \mu\text{m}$, as emissões de PAHs em 8.6 e $12.4\ \mu\text{m}$ podem afetar respectivamente o fluxo nas bandas de 9 e $12\ \mu\text{m}$, e o excesso em $20.1\ \mu\text{m}$ pode afetar o fluxo nas bandas de 18 e $22\ \mu\text{m}$, de forma a resultar na posição específica desses objetos neste diagrama, como observado na figura. Além disso, a concentração de algumas RV Tauri no canto inferior esquerdo, próxima ao ponto $(0,0)$ do diagrama, pode estar associada aos objetos dessa classe que não apresentam excesso no infravermelho, conforme observado no diagrama WISE (Figura 5.11). Por fim, os objetos oxigenados que encontram-se no topo desse diagrama devem possuir uma absorção intensa em $9.7\ \mu\text{m}$, como a observada na SED da Water Fountain IRAS 18139-1816 (Figura 5.8), levando à um fluxo menor na banda em $9\ \mu\text{m}$ comparado ao fluxo em $18\ \mu\text{m}$, o que resulta nos altos índices de cor $[09]-[18]$ observados.

5.2.4 IRAS-MSX $[25]-[60]$ x $[8.3]-[14.7]$

Para criar este diagrama, que é mostrado na Figura 5.13, utilizamos as bandas fotométricas do IRAS e do MSX. Em primeiro lugar, notamos que apenas duas RV Tauri da amostra possuem observações do MSX, de forma que, neste trabalho, não

podemos utilizar este diagrama para estudar essa classe de objetos. Em segundo, observamos que, entre si, os objetos $21 \mu\text{m}$ possuem índices [8.3]-[14.7] semelhantes e índices [25]-[60] praticamente iguais, de forma que ficam limitados à uma pequena região do diagrama. Contudo, novamente, apenas 4 objetos $21 \mu\text{m}$ estão presentes, de forma que são necessários mais objetos para observar se esse padrão é mantido. Em particular, 8 dos 9 objetos carbonados do diagrama encontram-se próximos, de forma que definimos uma região deste diagrama para objetos carbonados, marcada com a linha pontilhada em verde na figura.

Na região direita do diagrama, observamos uma concentração de objetos oxigenados: Pós-AGBs oxigenadas e Water Fountains. Observamos que, neste diagrama, a candidata 6 volta a se encontrar em uma região composta em sua maioria por objetos oxigenados, o que é mais um resultado que reforça uma possível classificação da química do envoltório desta candidata, em conjunto com o diagrama [09]-[18] x [12]-[22], discutido anteriormente. Podemos observar que na região superior do diagrama, sem incluir as candidatas, encontramos apenas objetos oxigenados, o que indica que podemos definir também uma região para objetos oxigenados neste diagrama. Essa região está marcada em linha pontilhada roxa na figura. Nesta região, encontramos as candidatas 2, 4, 5, 8, 9 e 10, e candidata 6 encontra-se no limite dessa região. Isso poderia indicar uma classificação preliminar em conjunto com outras análises. Reforçamos, porém, que o fato de a maior parte dos objetos da amostra ser oxigenada pode introduzir um viés nesse resultado.

Por outro lado, citamos na discussão das SEDs das Pós-AGBs carbonadas da amostra, que a banda fotométrica centrada em $8.3 \mu\text{m}$ poderia realçar a emissão de PAHs na poeira, em $8.6 \mu\text{m}$. E além disso, principalmente, a banda em $20 \mu\text{m}$ pode realçar os excessos proeminentes em 21 e $30 \mu\text{m}$, que são amplamente observados nos envoltórios carbonados de Pós-AGBs, conforme discutido no Capítulo 2. Dessa forma, essas características espectrais podem ser as responsáveis pela posição peculiar dos objetos carbonados nesse diagrama, concentrados na região definida na figura. Nessa região, observamos também a candidata 3, IRAS 19219+0947. Esse resultado pode, portanto, ser um indicativo de componentes carbonados no envoltório dessa candidata, sugerindo a presença de uma química rica em carbono.

Concluimos a discussão desse diagrama citando que este pode ser uma ferramenta

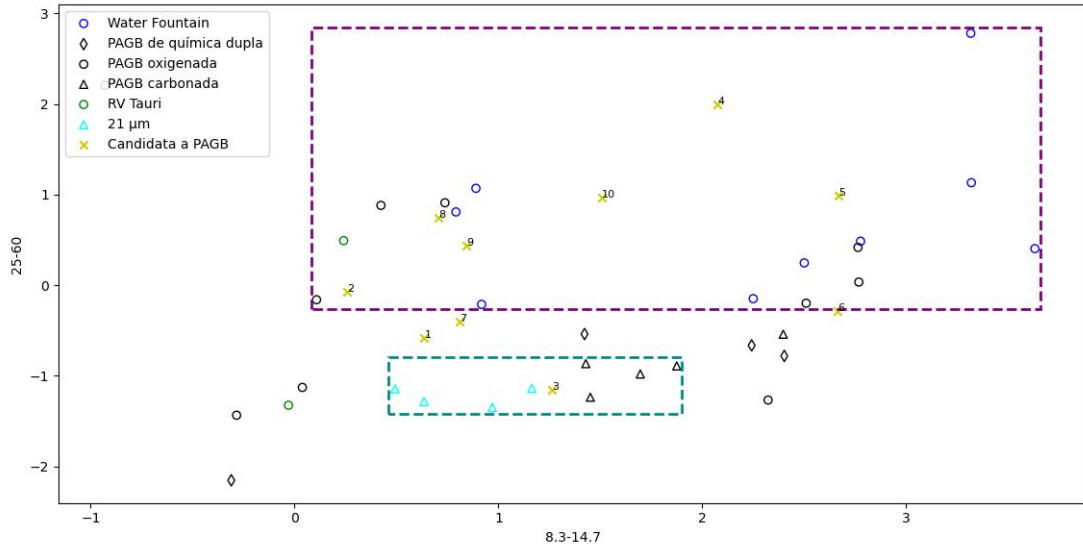


FIGURA 5.13. Diagrama cor-cor combinando cores MSX e IRAS com os objetos que compõem a amostra deste trabalho. Definimos uma região, em verde, onde são encontrados apenas objetos carbonados, e outra região, em roxo, onde encontramos apenas objetos oxigenados neste diagrama.

fundamental para definir regiões específicas para objetos oxigenados e carbonados, e assim auxiliar a classificação de candidatas a Pós-AGB. Contudo, é necessário realizar uma análise desse diagrama incluindo mais objetos Pós-AGB de classes conhecidas, de forma a confirmar as tendências observadas neste trabalho.

5.2.5 2MASS-MSX J-K x K-[8.3]

Este diagrama combina as bandas fotométricas dos levantamentos 2MASS e MSX, e é mostrado na Figura 5.14. Inicialmente, notamos que os dois objetos $21 \mu\text{m}$ presentes, quatro Water Fountains e uma Pós-AGB oxigenada possuem índices de cor K-[8.3] significativamente maiores do que os do restante dos objetos no diagrama. Isso indica que esses objetos são muito mais brilhantes em $8.3 \mu\text{m}$ do que em $2.2 \mu\text{m}$, onde é centrada a banda K. Essa característica pode ser observada nas duas SEDs de Water Fountains que foram discutidas na Seção 5.1. Ambas apresentam emissão de único pico, e um envoltório muito próximo da estrela central tem como consequência uma SED com baixo fluxo nos comprimentos de onda mais curtos. Além disso, no caso dos objetos oxigenados, o fluxo em $8.3 \mu\text{m}$ pode ser influenciado pela componente espectral em $9.7 \mu\text{m}$ associada a grãos de silicato amorfo no envoltório. Por sua vez, nos objetos $21 \mu\text{m}$, a banda fotométrica em $8.3 \mu\text{m}$ pode realçar a emissão de PAHs em $8.6 \mu\text{m}$, o que é esperado nesses objetos devido à sua natureza carbonada.

Além disso, os únicos 4 objetos carbonados deste diagrama encontram-se na região inferior, misturados com Water Fountain e RV Tauri. Em particular, a candidata 6, que encontra-se próxima apenas de objetos oxigenados em dois dos diagramas discutidos anteriormente, aparece bem próxima a dois objetos carbonados. Por outro lado, as candidatas 5 e 10 posicionam-se em uma região que contém apenas objetos oxigenados, assim como acontece com a candidata 7, mas para uma outra região, como pode ser observado na Figura 5.14. As candidatas 1 e 2 encontram-se próximas entre si, mas relativamente afastadas de outros objetos. E, ainda, a posição das candidatas 3, 4, 9 e 10 não indicam nenhuma proximidade clara com alguma classe de objetos.

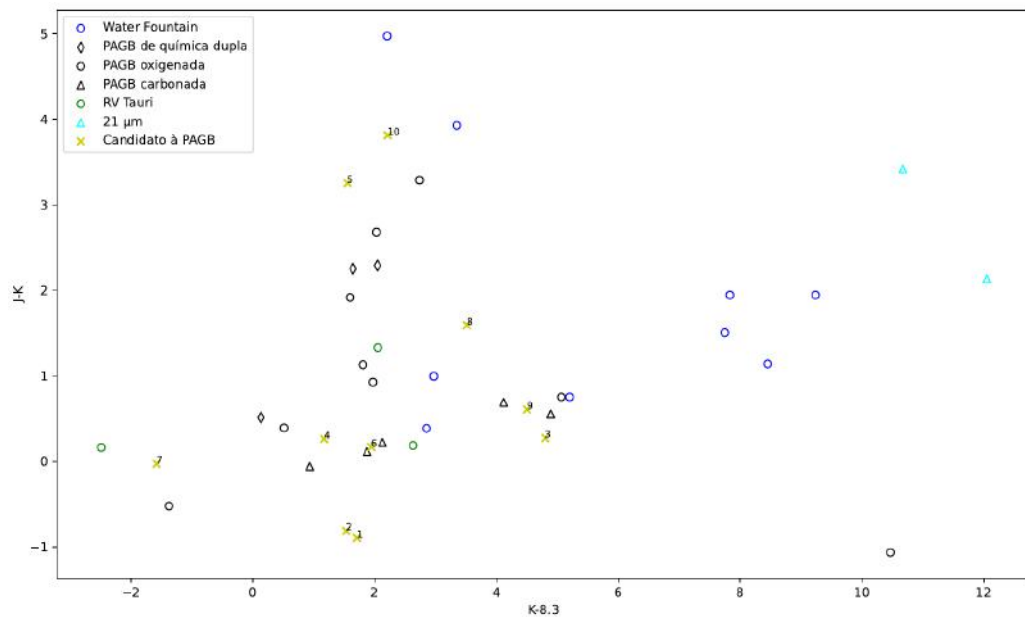


FIGURA 5.14. Diagrama cor-cor combinando cores MSX e 2MASS com os objetos que compõem a amostra deste trabalho. Observamos que alguns objetos da classe Water Fountain e objetos da classe $21 \mu\text{m}$ ocupam regiões mais à direita do diagrama, separados do restante dos objetos no espaço de cor.

Como citado na discussão das SEDs, é esperado que o fluxo em $8.3 \mu\text{m}$ seja afetado tanto por componentes carbonadas como componentes oxigenadas na poeira dos objetos da amostra. Por isso, não é esperada uma clara separação entre as classes de Pós-AGBs em diagramas utilizando essa banda fotométrica. Além disso, não esperamos que haja grandes variações de fluxo em curtos comprimentos de onda para diferentes classes de Pós-AGBs, que pudessem influenciar nos fluxos das bandas J e K, em $1.25 \mu\text{m}$ e $2.2 \mu\text{m}$ respectivamente.

Apesar disso, o diagrama construído indica que a cor K-[8.3] pode ser adequada para separar alguns objetos da classe Water Fountain, $21 \mu\text{m}$ e talvez Pós-AGBs oxigenadas. Porém, é necessário analisar nesse diagrama um número maior de objetos para

confirmar essas tendências.

5.2.6 IRAS-WISE [3.4]-[4.6] x [25]-[60]

O último diagrama discutido nessa seção é o [3.4]-[4.6] x [25]-[60], utilizando cores WISE e IRAS, e este é mostrado na Figura 5.15. Observamos, em primeiro lugar, que a maior parte dos objetos 21 μm encontram-se significativamente separados dos demais, no canto superior esquerdo do gráfico. Todos possuem índices [25]-[60] semelhantes, mas 2 objetos possuem índices [3.4]-[4.6] bem menor do que os demais, de forma que encontram-se separados. Dessa forma, definimos uma região para objetos 21 μm no canto superior do diagrama, em linha pontilhada de cor ciana. Outro resultado relevante deste trabalho é o de que 12 dos 13 objetos carbonados do diagrama encontram-se no intervalo $-1.5 \leq [25]-[60] \leq 0$, indicando uma possível região para delimitar objetos carbonados neste diagrama. Porém, nesse intervalo também são observados Pós-AGBs de todas as classes. Por outro lado, neste diagrama podemos destacar novamente a região dos objetos oxigenados definida no diagrama IRAS-MSX a partir da cor [25]-[60] (Figura 5.13), marcada em roxo neste diagrama. Esse resultado indica que os dois diagramas poderiam ser utilizados em conjunto para separar objetos oxigenados e carbonados, em particular, os objetos da classe 21 μm .

As características das Pós-AGBs carbonadas e 21 μm , discutidas no Capítulo 2, e as características das SEDs das Pós-AGBs carbonadas discutidas na seção anterior podem explicar o porquê de não serem encontrados objetos carbonados na região direita do gráfico. As emissões em 3.6, 20.1 e 30 μm dos envoltórios carbonados podem ser as responsáveis por limitar a posição desses objetos a uma certa região neste diagrama. Dessa forma, não podemos concluir sobre a natureza dos objetos na região esquerda, onde encontramos objetos de todas as classes, mas podemos inferir sobre a natureza daqueles que encontram-se na região definida anteriormente para objetos oxigenados, que está marcada em roxo na figura.

Na região para objetos oxigenados, encontramos as candidatas 2, 4, 5, 8, 9 e 10, e a candidata 6 novamente encontra-se na fronteira desta região. Como foi discutido anteriormente, isso poderia indicar que essas candidatas possuem envoltórios ricos em oxigênio. Assim, podemos utilizar esse resultado em conjunto com a análise dos diagramas anteriores para chegar à uma conclusão sobre a química desses objetos.

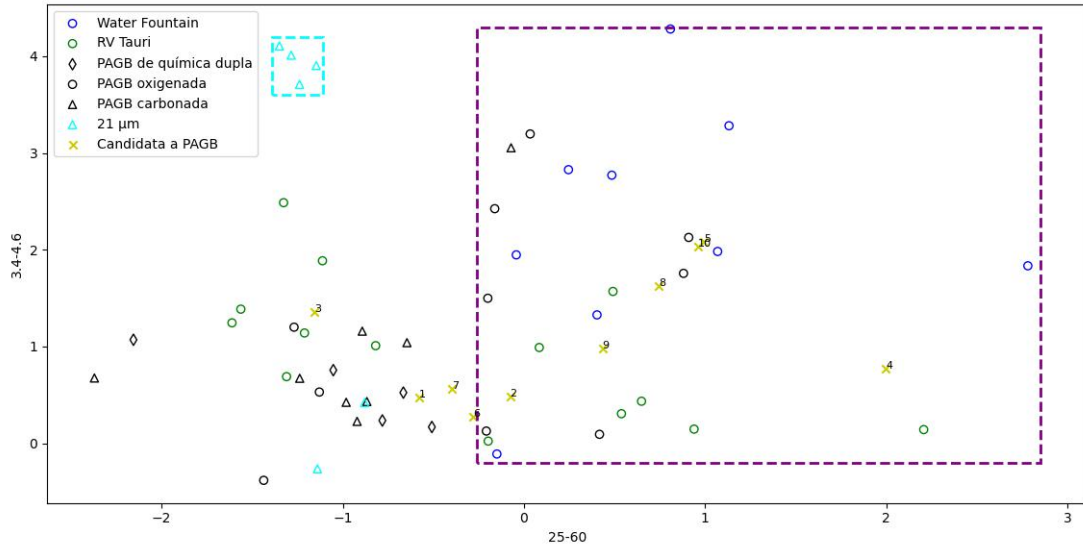


FIGURA 5.15. Diagrama cor-cor combinando bandas fotométricas IRAS e WISE com os objetos que compõem a amostra deste trabalho. Estão marcadas duas regiões: uma para objetos $21 \mu\text{m}$ no canto superior esquerdo, em ciano, e outra para objetos oxigenados, em roxo.

Em relação à esse diagrama, podemos concluir que a cor $[25]-[60]$ em conjunto com a cor $[3.4]-[4.6]$, é adequada para separar alguns objetos $21 \mu\text{m}$, e parece limitar os objetos carbonados ao intervalo $[25]-[60] < 0$.

Encerramos a discussão dos diagramas cor-cor mais relevantes para este trabalho no estudo das estrelas da amostra e, a seguir, a natureza das candidatas a Pós-AGB é discutida a partir de dados da literatura e dos resultados deste trabalho. No entanto, foram construídos outros 18 diagramas cor-cor, que são mostrados no Apêndice C, e um banco de dados com a fotometria dos objetos da amostra, que podem ser utilizados para análises futuras dos objetos Pós-AGB, apresentado no Apêndice A.

5.3 Candidatas a Pós-AGB

Nesta seção, apresentamos a discussão sobre a natureza das candidatas a Pós-AGB presentes em nossa amostra, e também sobre como podemos classificá-las utilizando os resultados do nosso trabalho.

5.3.1 Candidata 1: IRAS 17460-3114

Também conhecido como HD 161853, esse objeto possui diferentes classificações na literatura. Ratag et al. (1990) sugeriram que esse objeto fosse uma nebulosa planetária por conta de sua emissão de rádio em 4.8 GHz e de suas cores IRAS típicas desses objetos; Parthasarathy (1993) considerou que fosse uma Pós-AGB evoluindo rapidamente para o estágio de NP. Como esse objeto possui tipo espectral O conhecido, essa candidata não se encaixa no intervalo de tipos espectrais esperados para Pós-AGBs. No geral, estrelas de tipo O são capazes de ionizar o envoltório ejetado, e por isso são consideradas estrelas centrais de nebulosas planetárias,. Ademais, Szczerba et al. (2007) descartam esse objeto como Pós-AGB devido à sua alta temperatura efetiva, de 35000 K, mas não esclarecem sobre sua real natureza.

Por outro lado, Mello et al. (2012) encontraram linhas duplas de absorção de He I, indicando que esse objeto possui natureza binária, e observações de Gamen et al. (2015) confirmaram a natureza binária dessa candidata através de espectroscopia, separando os espectros compostos e obtendo os espectros de HD 161853 A e B (Figura 5.16). Além disso, os autores Gamen et al. (2015) determinaram o tipo espectral O8 Vz para a primária e B1-3 V para a secundária, utilizando as relações de intensidade entre as fracas linhas do He I para a segunda. Através da fotometria do objeto, foram limitados os valores para a inclinação orbital do sistema e foram determinadas massas mínimas de 22 e 7.2 massas solares para a primária e para a secundária, respectivamente. Portanto, a estrela de tipo O não se encaixa nos parâmetros de massa de uma Pós-AGB e assim estima-se que é uma estrela jovem e massiva. A 50 segundos de arco a noroeste da estrela, foi identificada uma região de emissão compacta cujo fluxo no infravermelho pode ter sido o responsável pela classificação desse objeto como uma estrela Pós-AGB pelas últimas duas décadas (Gamen et al., 2015).

Como pode ser visto na Figura 5.17, a distribuição espectral de energia apresentada neste trabalho a partir dos dados fotométricos do objeto mostra uma clara emissão de duplo pico, indicando poeira significativamente afastada da estrela central, compatível com a região de poeira identificada por Gamen et al. (2015). No diagrama cor-cor IRAS [25]-[60] x [12]-[25] (Figura 5.10), essa candidata posiciona-se na região de Veen para objetos variáveis ricos em oxigênio. Ademais, em relação aos diagramas discutidos, essa candidata aparece próxima a objetos carbonados no diagrama [3.4]-[4.6] x [12]-[22],

próxima a objetos oxigenados no diagrama [09]-[18] x [12]-[22], próxima à candidata 7 em diferentes cores e próxima à candidata 2 no diagrama J-K x K - [8.3], afastada dos demais dos objetos.

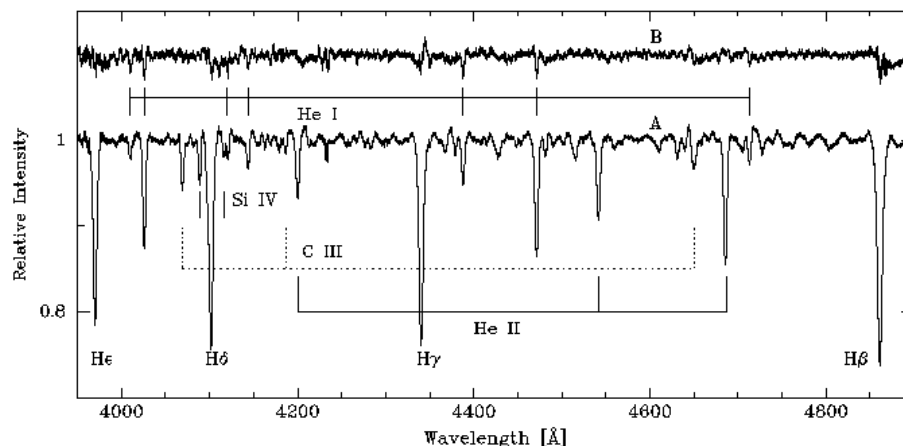


FIGURA 5.16. Espectros ópticos separados de HD 161853 A e B, com marcações nas linhas mais notáveis. Retirado de Gamen et al. (2015).

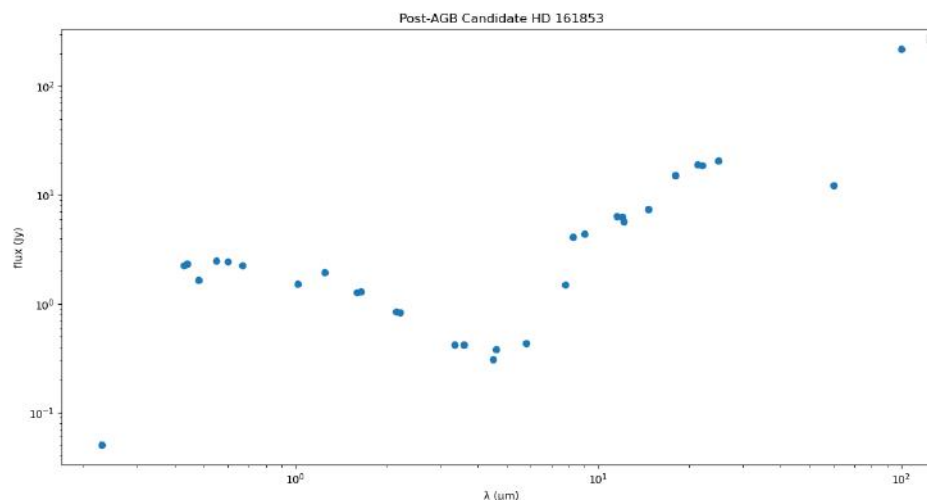


FIGURA 5.17. Distribuição espectral de energia da candidata 1, HD 161853. Em azul estão apresentados os dados de fotometria. Não foram encontrados dados de espectroscopia para esse objeto na literatura.

Pela análise da literatura, podemos concluir que a candidata 1 faz parte de um sistema binário, com uma estrela primária de tipo O, e uma secundária de tipo B. Além disso, a poeira observada parece não pertencer ao envoltório da candidata 1, mas sim a uma região de poeira próxima, o que pode explicar as posições inconsistentes dessa candidata nos diagramas cor-cor. Contudo, a SED dessa candidata, que mostra emissão de poeira afastada do sistema estelar, poderia ser de uma Pós-AGB e pode ter sido a responsável pela classificação imprecisa desse objeto. Ainda, a ausência de análise de abundâncias fotosféricas para as estrelas desse sistema na literatura, e de espectroscopia

no infravermelho, não possibilita uma classificação da química fotosférica desses objetos. Por fim, concluímos que IRAS 17460-3114 não é uma Pós-AGB, mas sim um sistema binário com uma estrela primária de tipo O e uma secundária de tipo B.

5.3.2 Candidata 2: HD 155448

Essa candidata é inserida na literatura junto de estrelas Herbig Ae/Be, classificação realizada na literatura recente por Guzmán-Díaz et al. (2021). Objetos Herbig Ae/Be são estrelas jovens com massas entre 2 e 12 M_{\odot} , com idade de aproximadamente até 10 milhões de anos (Myr), que se encontram na pré-Sequência Principal. São opticamente visíveis e, pelo fato de apresentarem linhas de emissão e excesso no infravermelho associado a envoltórios circunstelares, são frequentemente classificados como Pós-AGBs de forma errônea.

Guzmán-Díaz et al. (2021) utilizaram o *software* VOSA para classificar e estimar parâmetros estelares desse objeto. Segundo os autores, HD 155448 possui tipo espectral B8, temperatura $T = (11500 \pm 125)$ K, massa $M \approx 5.08 M_{\odot}$ e idade estimada de 0.52 Myr.

Neste trabalho, para ilustrar a natureza evolutiva desta candidata, utilizamos *software* de simulação de evolução estelar MESA para mostrar que um objeto com esses parâmetros de massa e idade encontra-se na fase de pré-Sequência Principal, como podemos ver na Figura 5.18. Além disso, nós mostramos também que, ao atingir o início da Sequência Principal, um objeto com essa massa deve possuir ao menos uma idade aproximada de 3.89 Myr, quase 7.5 vezes mais do que a idade calculada para este objeto, resultado que é mostrado na Figura 5.19. Ainda, a SED desse objeto apresenta uma emissão de duplo pico e poderia ser a SED de uma Pós-AGB, com poeira afastada da estrela central. Nos diagramas cor-cor, destacamos que essa candidata-se posiciona na região de Veen para objetos não-variáveis ou nebulosas planetárias no diagrama IRAS (Figura 5.10), na região de Gezer para objetos com envoltórios circunstelares e próxima a objetos carbonados no diagrama WISE (Figura 5.11), e na região do diagrama IRAS-WISE (Figura 5.15) onde são encontrados apenas objetos oxigenados.

A conclusão que nós obtivemos, a partir dos parâmetros estelares derivados por Guzmán-Díaz et al. (2021) e da SED desse objeto, é a de que esse objeto encontra-se na

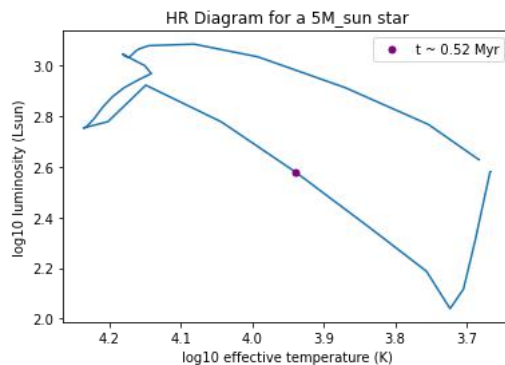


FIGURA 5.18. Diagrama HR em escala logarítmica para um objeto de $5 M_{\odot}$, sendo o eixo vertical a luminosidade do objeto em luminosidades solares, e o eixo horizontal a temperatura efetiva em K. Podemos observar que um objeto com idade $t \approx 0.52$ Myr encontra-se antes do início da Sequência Principal no diagrama.

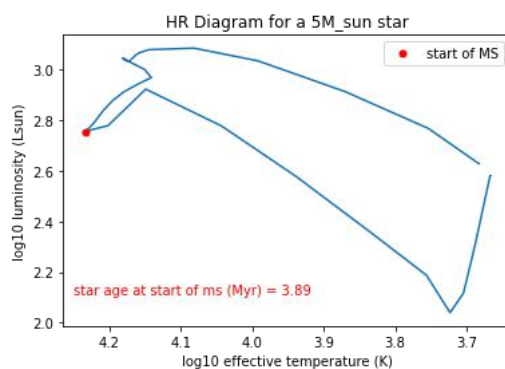


FIGURA 5.19. Diagrama HR em escala logarítmica para um objeto de $5 M_{\odot}$, sendo o eixo vertical a luminosidade do objeto em luminosidades solares, e o eixo horizontal a temperatura efetiva em K. O ponto vermelho indica o início da sequência principal no diagrama e o texto em vermelho apresenta a idade aproximada que um objeto de $5M_{\odot}$ teria neste ponto, $t \approx 3.89$ Myr.

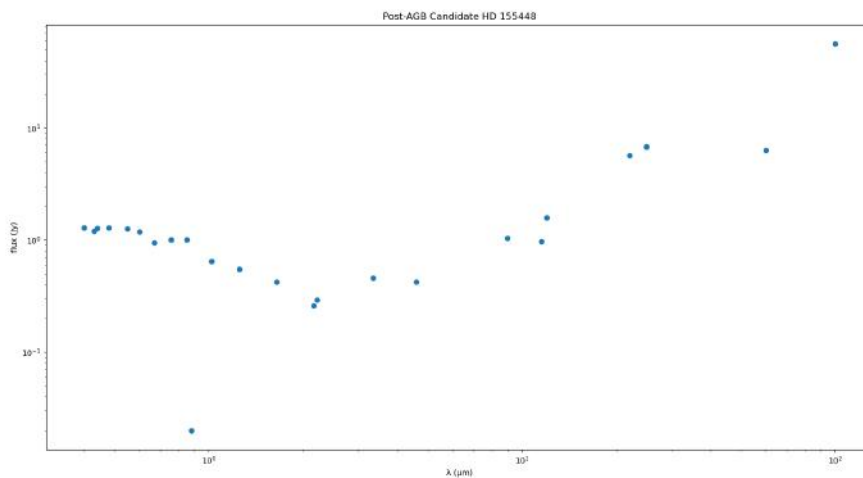


FIGURA 5.20. O mesmo que a Figura 5.17, mas para a candidata 2, HD 155448.

fase de pré-Sequência Principal e possui um envoltório circumstelar, associado ao excesso no infravermelho. O fato dessa candidata ainda não ter alcançado a SP pode explicar o

resultado inconclusivo dos diagramas cor-cor: a estrela ainda não passou pelos processos de dragagem que ocorrem após a estrela deixar a SP.

Assim, concluímos que HD 155448 não é uma Pós-AGB, e sim um objetos Herbig Ae/Be, erroneamente classificado como Pós-AGB na literatura por conta de suas linhas de emissão e excesso no infravermelho.

5.3.3 Candidata 3: IRAS 19219+0947

Também conhecida como PN Vy 2-2, esta candidata é listada como nebulosa planetária em diferentes catálogos, como o *The Strasbourg-ESO Catalogue of Galactic Planetary Nebulae* (Acker et al., 1992). Na literatura, Sahai et al. (2011) realizaram imageamento com o *Hubble Space Telescope* (HST), mostrado na Figura 5.24, e estudaram a morfologia e a abundância desta candidata. Além disso, muito recentemente, Ruiz-Escobedo & Peña (2022) classificam este objeto como sendo uma nebulosa muito compacta, jovem e densa, cuja poeira dominante apresenta indícios de química dupla.

A SED construída neste trabalho para esta candidata é mostrada na Figura 5.22. Apesar dos dados fotométricos inconsistentes em baixos comprimentos de onda e do espectro ISO bastante ruidoso no infravermelho próximo, podemos observar uma emissão de duplo pico característica de Pós-AGBs, indicando que o envoltório já encontra-se afastado da estrela central. Além disso, conforme mostrado na Figura 5.22, observamos emissões associadas a componentes carbonáceos e oxigenados: em $7.7 \mu\text{m}$, associado a PAHs; em $13.7 \mu\text{m}$, associado à molécula de C_2H_2 ; e em $33.4 \mu\text{m}$, associado a grãos de silicato cristalino. Esse resultado está de acordo com o trabalho de Ruiz-Escobedo & Peña (2022), mostrando que PN Vy 2-2 apresenta indícios de um envoltório de química dupla.

Nos diagramas cor-cor discutidos, IRAS 19219+0947 posiciona-se na região de Veem para objetos não-variáveis ou nebulosas planetárias no diagrama IRAS (Figura 5.10), na região de Gezer para objetos com envoltórios circunstelares no diagrama WISE (Figura 5.11), próxima a Pós-AGBs carbonadas nos diagramas WISE-AKARI (Figura 5.12) e IRAS-MSX (Figura 5.13) e próxima a objetos oxigenados no diagrama IRAS-WISE (Figura 5.15). Portanto, as posições desta candidata nos diagramas cor-cor são

compatíveis com sua natureza de química dupla, mostrando que diagramas cor-cor podem revelar a característica de química dupla nos envoltórios circumstelares.

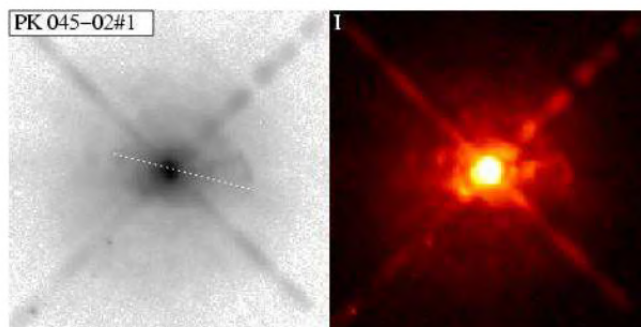


FIGURA 5.21. Imageamento da nossa candidata à Pós-AGB de número 3, IRAS 19219+0947. À esquerda é apresentada a imagem em $H\alpha$ do HST, e à direita é apresentada a mesma imagem, mas processada, em cor falsa, para destacar certas características da estrutura. Nas imagens, podemos observar a morfologia típica de nebulosas planetárias. Retirada de Sahai et al. (2011).

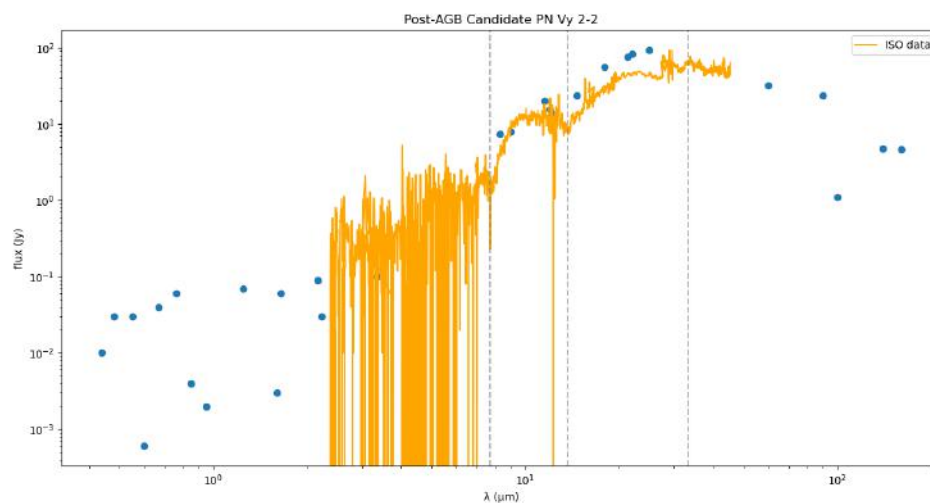


FIGURA 5.22. Distribuição espectral de energia da candidata 3, IRAS 19219+0947. Em azul estão apresentados os dados de fotometria e em laranja foi sobreposto o espectro ISO desse objeto. Estão marcados os comprimentos de onda 7.7, 13.7, associados a emissões de componentes carbonáceos, e de 33.4 μm , associado à emissão de grãos de silicatos cristalinos no envoltório.

Podemos concluir, a partir do imageamento realizado por Sahai et al. (2011), pelas características observadas na SED dessa candidata, e pela análise dos diagramas cor-cor criados neste trabalho, que IRAS 19219+0947 parece ser uma nebulosa planetária com uma poeira de química dupla.

5.3.4 Candidata 4: IRAS 11065-6026

Esta candidata foi inicialmente considerada uma possível estrela Wolf-Rayet (WR) na literatura por Roberts (1962) por causa de uma perceptível ampliação da linha de emissão da linha de $H\alpha$. Posteriormente, Hu et al. (1990), baseando-se em estudos fotométricos e espectroscópicos, concluíram que o objeto é uma estrela variável de tipo espectral O9.5, com temperatura efetiva $T_{\text{eff}} = 35000$ K. Utilizando os dados obtidos em um diagrama evolutivo, os autores mostraram que esse objeto está localizado na região das estrelas LBV (*Luminous Blue Variables*), com um limite inferior de massa inicial $M = 50 M_{\odot}$.

Além disso, de Winter et al. (1992) concluíram que o objeto é uma LBV em fase de quietude com um envoltório de poeira fria com forte emissão no infravermelho distante. Utilizando fotometria, Sterken et al. (2008) mostraram uma intensa variabilidade dentro de um ciclo da ordem de décadas para esta estrela: em 1989 possuía magnitude $V \approx 12.5$ e $T_{\text{eff}} \approx 30000$ K, e em 2008 possuía $V \approx 10.5$ e $T_{\text{eff}} \approx 9000$ K. Foi constatado também que este objeto possui poeira rica em Fe, com depleção de C e O e enriquecimento de N, resultado esperado para estrelas muito evoluídas.

Por fim, na última década, Vamvatira-Nakou et al. (2013) dedicaram um artigo ao estudo deste objeto, confirmando sua natureza como uma LBV na fase de quietude.

Luminous Blue Variables (LBVs) ou *Doradus Variables*, como também são conhecidas na literatura, são estrelas que percorrem um estágio curto (que pode durar de 10^4 a 10^5 anos) na evolução de estrelas massivas ($\geq 30M_{\odot}$). Possuem variabilidade fotométrica, alta luminosidade e altas taxas de perda de massa, porém ainda menores do que as taxas de perda de massa em estrelas AGB. De acordo com os cenários evolutivos atuais, uma estrela de tipo O evolui para o estágio de WR perdendo uma fração significativa de sua massa inicial. As camadas externas são removidas, revelando um “núcleo” que se torna uma estrela WR. A maioria das LBVs são rodeadas pela nebulosa ejetada. Assim como nas Pós-AGBs, além da poeira, são encontradas moléculas de CO no gás. A ejeção da nebulosa causa episódios de perda de massa, que levam às gigantes erupções observadas em alguns desses objetos (Vamvatira-Nakou et al., 2013)

A SED de IRAS 11065-6026 é mostrada na Figura 5.23. Nela, observamos claramente uma emissão de duplo pico, mas o espectro ISO desse objeto, muito ruidoso no

infravermelho próximo, não revela nenhuma das componentes moleculares proeminentes que esperamos encontrar em Pós-AGBs. Esse resultado é esperado, considerando a classificação dessa candidata como LBV na literatura, com baixo enriquecimento de carbono e oxigênio. Contudo, sua SED poderia ser de uma Pós-AGB devido a seu duplo pico. Além disso, destacamos que essa candidata posiciona-se fora das regiões de Veen e da região de Garcia para Pós-AGBs e nebulosas planetárias e afastada da maior parte dos objetos no diagrama IRAS (Figura 5.10), o que indica sua natureza discrepante. Ainda, IRAS 11065-6026 se posiciona na região de Gezer para objetos com envoltórios de poeira no diagrama WISE (Figura 5.11), próxima a uma Pós-AGB de química dupla no diagrama WISE-AKARI (Figura 5.12), dentro de uma região que contém só objetos oxigenados no diagrama IRAS-MSX (Figura 5.13) e IRAS-WISE (Figura 5.15), e próxima a objetos de diferentes classes no diagrama 2MASS-MSX (Figura 5.14). Contudo, na maior parte dos diagramas, essa candidata posiciona-se afastada da maior parte dos objetos, o que é um indicativo de sua natureza divergente, quando comparada a objetos Pós-AGB.

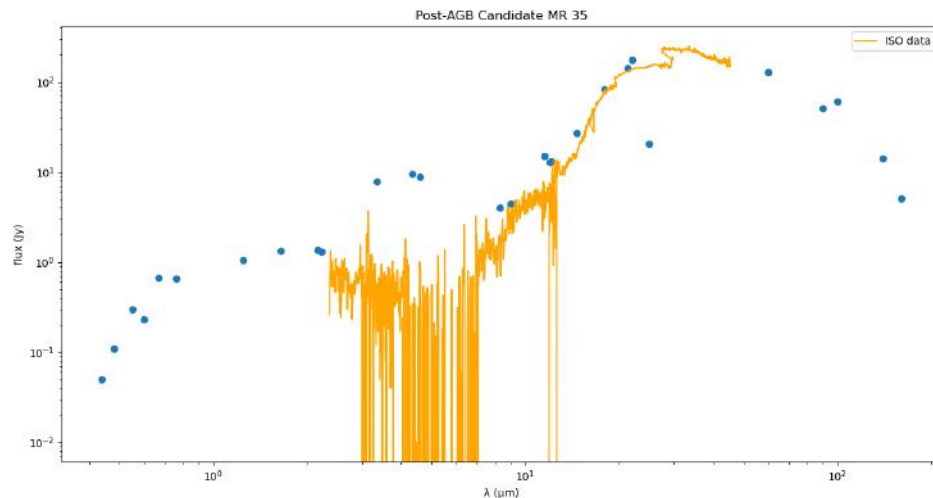


FIGURA 5.23. O mesmo que a Figura 5.22, mas para a candidata 4, IRAS 11065-6026. Não observamos nenhuma das componentes moleculares esperadas em estrelas Pós-AGB.

Concluimos que a candidata IRAS 11065-6026 é uma estrela LBV, com base na análise da literatura e dos resultados deste trabalho: sua SED sem componentes moleculares proeminentes no infravermelho e suas posições destoantes nos diagramas cor-cor indicam que esta candidata não é uma Pós-AGB.

5.3.5 Candidata 5: IRAS 15405-4945

Este objeto foi estudado por Zijlstra (2001), cujos resultados mostram que a estrela possui linhas de emissão de maser de OH em 1612, 1665 e 1667 MHz, e apresenta ejeções de matéria bipolares, características compatíveis com as observadas em objetos da classe Water Fountain (Moreira, 2014). Essas linhas de emissão podem ser explicadas por um envoltório circunestelar rico em oxigênio, e na fase Pós-AGB, essas linhas podem se manter observáveis por um período de aproximadamente 1000 anos. Zijlstra (2001) também inclui esse objeto em uma lista de estrelas com propriedades não-usuais de maser de OH, que podem ser um indicativo de que este objeto é uma Pós-AGB. Dentre essas propriedades, são citadas a emissão de maser de OH com intervalo de velocidade de pelo menos 50km/s em uma ou mais linhas de emissão, e um espectro com um platô de emissão e/ou mais de duas características espectrais. O espectro deste objeto apresenta intervalos de velocidade de 80km/s em 1612 MHz, 105km/s em 1665 MHz e 155km/s em 1667 MHz.

Além disso, Sahai et al. (2007) apresentam imageamento deste objeto do *Hubble Space Telescope* (HST), mostrando uma nebulosa de morfologia bipolar com lóbulos complexos e altamente estruturados. Na Figura 5.24, pode-se observar um fraco halo elíptico que, caso seja resultado da perda de massa de uma estrela AGB, indica que o envoltório está sendo indiretamente iluminado pelos lóbulos, e não por uma fonte central, ou ainda que a luz da estrela central não consegue atingir grandes distâncias em baixas altitudes. Estes mesmos autores classificam quimicamente essa candidata como sendo rica em oxigênio

Por fim, Vickers et al. (2015) apresentam como estimativa para a luminosidade deste objeto $L = (6000 \pm 1500) L_{\odot}$, valor que se encontra dentro dos esperados para estrelas Pós-AGB.

Não foram encontrados dados de espectroscopia para essa candidata, porém, na Figura 5.25, observamos que sua SED é compatível com a de Pós-AGBs, apresentando evidência da emissão de duplo pico mas indicando poeira ainda muito próxima da estrela central, como observado nas SEDs de Pós-AGBs ainda obscurecidas pelo envoltório circunestelar, como é o caso das Water Fountains.

Essa candidata aparece em conjunto com as candidatas 8 e 10 em 3 dos 6 diagramas estudados: nos diagramas IRAS (Figura 5.10), WISE (Figura 5.11) e WISE-AKARI (Figura 5.12). Além disso, aparece próxima à candidata 10 no diagrama 2MASS-MSX (Figura 5.14). No diagrama IRAS, posiciona-se fora das regiões de Veen mas dentro da região de Garcia para Pós-AGBs e PN. No diagrama WISE, encontra-se fora da região de Gezer para Pós-AGBs com envoltórios circunstelares. Em todos os diagramas cor-cor estudados neste trabalho, com exceção do diagrama IRAS, a candidata 5 é encontrada em regiões onde objetos oxigenados são predominantes, em geral Pós-AGBs oxigenadas e Water Fountain. Esse resultado é um forte indicador da natureza química de seu envoltório, e sua proximidade com as candidatas 8 e 10 pode indicar características semelhantes entre elas.

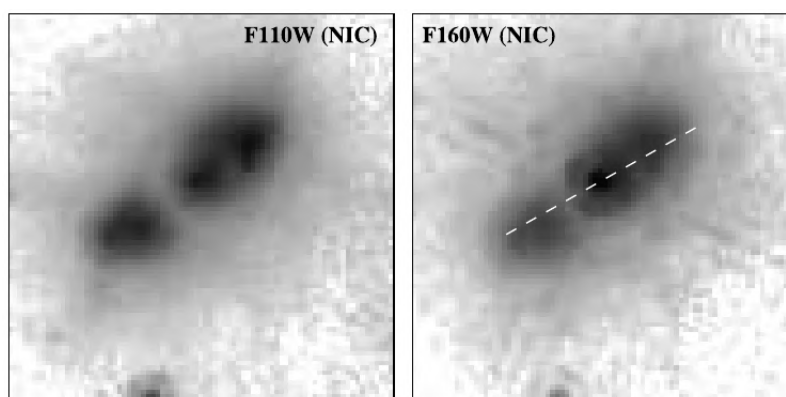


FIGURA 5.24. Imagens do HST da nossa candidata à Pós-AGB IRAS 15405-4945, mostrando sua morfologia bipolar. A linha branca pontilhada na imagem da direita denota a orientação (-45°) e a extensão da ejeção de matéria bipolar vista na emissão de maser OH. Retirada de Sahai et al. (2007).

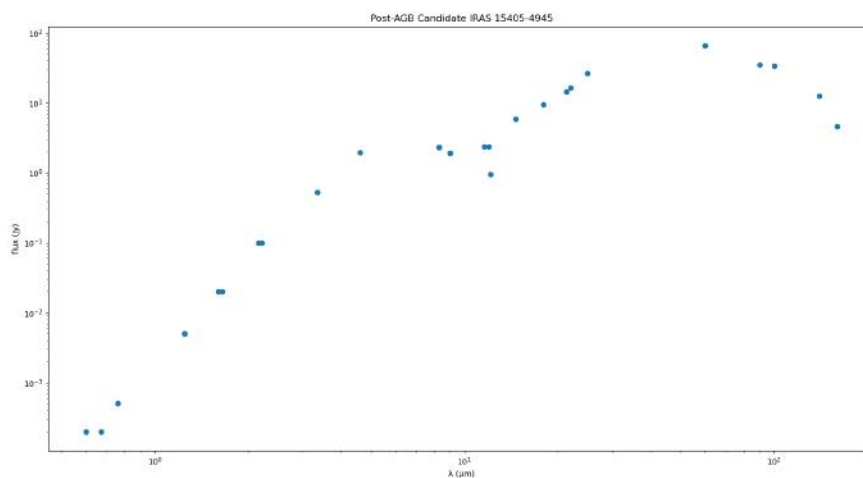


FIGURA 5.25. O mesmo que a Figura 5.17, mas para a candidata 5, IRAS 15405-4945.

Portanto, as linhas de emissão de maser de OH observadas por Zijlstra (2001), a SED indicando uma estrela central obscurecida, e os resultados praticamente unânimes dos diagramas cor-cor estudados, nos permitem concluir que a candidata 5, IRAS 15405-4945, é uma Pós-AGB da classe Water Fountain, com uma poeira rica em oxigênio, como o esperado para essas estrelas.

5.3.6 Candidata 6: IRAS 15066-5532

Esta candidata é considerada como uma Pós-AGB de transição, em um estágio intermediário entre a fase de Pós-AGB e a fase de NP, por Suárez et al. (2006), devido à detecção de um contínuo estelar proeminente e linhas de emissão formadas por excitação colisional. Estes mesmos autores incluem este objeto em uma lista de possíveis Pós-AGBs utilizando critérios que envolvem a temperatura típica da poeira destes objetos e considerando uma luminosidade típica de $10000 L_{\odot}$ (Suárez et al., 2006). Posteriormente, Suárez et al. (2009) voltam a classificar esta candidata como objeto de transição e Vickers et al. (2015) apresentam uma estimativa de $L = (6000 \pm 1500) L_{\odot}$ para a luminosidade deste objeto.

A SED desse objeto apresenta uma clara emissão de duplo pico, indicando um envoltório circumstelar afastado o suficiente da estrela central, mas não foram encontrados dados de espectroscopia no infravermelho para essa candidata. Os diagramas cor-cor fornecem resultados relevantes para o estudo da natureza química desta candidata: ela se posiciona fora das regiões de Veen mas dentro da região de Garcia no diagrama IRAS (Figura 5.10), indicando que este objeto é uma Pós-AGB ou NP. Além disso, nos diagramas WISE-AKARI (Figura 5.12), IRAS-MSX (Figura 5.13) e IRAS-WISE (Figura 5.15), a candidata 6 encontra-se em regiões onde encontramos apenas objetos ricos em oxigênio e relativamente próxima a Pós-AGBs oxigenadas. Portanto, 3 dos 6 diagramas discutidos neste trabalho indicam que IRAS 15066-5532 é uma Pós-AGB oxigenada.

Sabendo que esta candidata foi classificada como Pós-AGB por Suárez et al. (2006) e Suárez et al. (2009), mas a química do seu envoltório ainda não foi determinada na literatura, os resultados deste trabalho apresentam uma importante classificação preliminar. As posições que esse objeto ocupa nos diagramas cor-cor estudados indicam que IRAS 15066-5532 possui uma química rica em oxigênio. Portanto, um trabalho

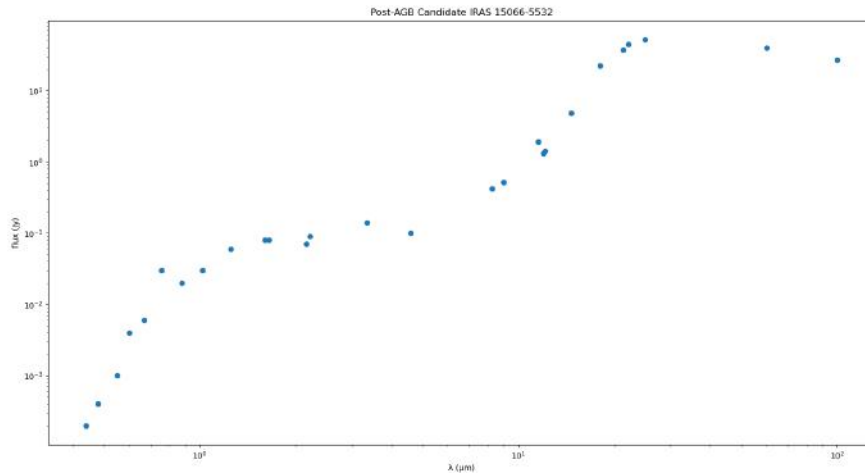


FIGURA 5.26. O mesmo que a Figura 5.17, mas para a candidata 6, IRAS 15066-5532.

posterior pode ser dedicado a realizar uma análise da química da estrela central a fim confirmar o resultado indicado por nossos resultados.

5.3.7 Candidata 7: IRAS 10211-5922

Também conhecido como HR Car, este objeto é apresentado na literatura recente como um exemplo notório de LBV na galáxia. Segundo Mehner et al. (2021), IRAS 10211-5922 possui morfologia bipolar e, através de estudos de interferometria, indicam que este objeto é a estrela primária de um sistema binário, com massa de aproximadamente $21 M_{\odot}$, acompanhado de uma estrela secundária com massa de aproximadamente $10 M_{\odot}$.

A massa estimada para IRAS 10211-5922 não encontra-se no intervalo de massas iniciais de estrelas que percorrerão a fase Pós-AGB. Contudo, suas altas taxas de perda de massa poderiam ter motivado uma classificação desse objeto como Pós-AGB na literatura.

Foram encontrados poucos dados fotométricos para esse objeto, mas o espectro ISO foi obtido. Como podemos ver na Figura Figura 5.27, a SED apresenta características diferentes das esperadas em Pós-AGBs, e o espectro ISO não parece apresentar as principais componentes moleculares esperadas.

Contudo, para verificar possíveis emissões, foram marcados na Figura 5.27 os comprimentos de onda 13.3 e 13.7 μm , associados a PAHs e à molécula de C_2H_2 , respectivamente. Porém, essas emissões não parecem estar presentes em uma análise preliminar. Esse resultado pode ser explicado pela natureza LBV desse objeto, significativamente diferente da natureza das estrelas Pós-AGB, como citado na discussão da candidata 4.

Analisando os diagramas cor-cor, notamos que esse objeto encontra-se na região de Veen para objetos não-variáveis ou NPs no diagrama IRAS (Figura 5.10), dentro de regiões onde encontramos apenas objetos carbonados nos diagramas WISE (Figura 5.11) e WISE-AKARI (Figura 5.12) e junto de objetos oxigenados no diagrama 2MASS-MSX (Figura 5.14). Em 5 dos 6 diagramas estudados, IRAS 10211-5922 posiciona-se próxima à candidata 1, classificada como um sistema binário cuja estrela primária é de tipo O. Esse resultado pode indicar que alguns dos diagramas cor-cor são úteis para estudar estrelas LBV ou estrelas de tipo O. Contudo, para confirmar essa tendência, é necessário utilizar os diagramas cor-cor para estudar exclusivamente estrelas LBV ou de tipo espectral O.

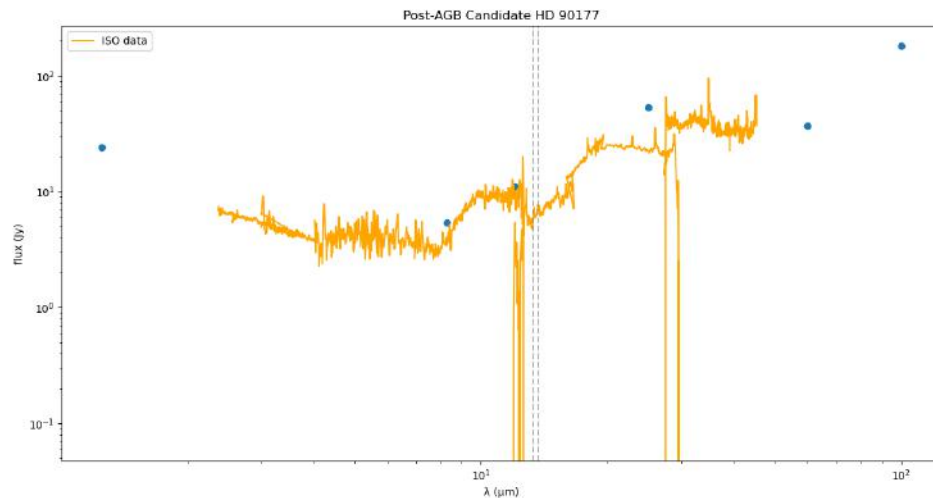


FIGURA 5.27. O mesmo que a Figura 5.22, mas para a candidata 7, HD 90177. Os comprimentos de onda marcados são os de 13.3 e 13.7 μm , associados a componentes carbonáceos.

Uma análise do estudo dessa candidata na literatura revela que IRAS 10211-5922 é uma LBV bem conhecida na literatura e pode ter sido classificada erroneamente como Pós-AGB por conta de seu excesso no infravermelho. Apesar disso, os resultados desse trabalho indicam que estrelas LBV ou de tipo O podem se destacar de Pós-AGBs em diagramas cor-cor, resultados que podem ser explorados em um trabalho posterior.

5.3.8 Candidata 8: IRAS 10178-5958

A candidata IRAS 10178-5958, identificada também como THA 35-II-27, foi inicialmente considerada como uma Pós-AGB por causa de suas cores típicas no infravermelho distante (Parthasarathy & Pottasch, 1989). A partir do estudo das cores no infravermelho distante de dados polarimétricos, Scarrott & Scarrott (1995) inferiram a presença de um disco circunstelar. Posteriormente, imageamento do HST revelou lóbulos bipolares de formato cilíndricos, envoltos por um fraco halo elíptico possivelmente remanescente da fase AGB da estrela (Sahai et al., 1999). Além disso, considerando a extinção visual de 2.4 mag, Pereira et al. (2008) chegaram à estimativa de luminosidade $L = 2000 L_{\odot}$ para este objeto, valor típico de luminosidade de Pós-AGBs. Ainda, o espectro de alta resolução deste objeto revela uma linha de $H\alpha$ com perfil duplo, indicativo da presença de um envoltório circunstelar; e linhas de He I com perfil P-Cygni, o que é uma evidência direta de que a estrela está passando por um processo de perda de massa.

Pereira et al. (2008) estimam $v = 90$ km/s para a velocidade de expansão do envoltório circunstelar desse objeto, valor abaixo dos valores típicos de estrelas centrais de nebulosas planetárias, que podem chegar a milhares de quilômetros por segundo. Portanto, estes autores concluem que IRAS 10178-5958 é uma Pós-AGB. Porém, a partir de características da sua SED, o objeto é classificado como uma nebulosa planetária rica em carbono no catálogo THROES (Ramos-Medina et al., 2018). Dessa forma, a classificação desse objeto na literatura é incerta.

Na SED deste objeto, mostrada na Figura 5.28, está marcado o comprimento de onda de $7.7 \mu\text{m}$, onde observamos uma emissão associada a PAHs, o que indica química rica em carbono. Por outro lado, não observamos claramente uma emissão de duplo pico, indicando um envoltório ainda muito próximo da estrela central.

Além disso, a candidata 8 se posiciona fora das regiões de Veen, mas dentro da região de Garcia para Pós-AGBs e NPs no diagrama IRAS (Figura 5.10). Em relação aos outros diagramas, observamos o seguinte: nos diagramas WISE (Figura 5.11), IRAS-MSX (Figura 5.13) e IRAS-WISE (Figura 5.13) encontra-se claramente próxima a objetos ricos em oxigênio; e no diagrama WISE-AKARI encontra-se afastada de outros objetos, mas próxima das candidatas 5 e 10. Como citado na discussão da candidata 5, classificada como Water Fountain, IRAS 10178-5958 aparece próxima às candidatas 5 e

10 em diferentes cores, o que poderia indicar alguma característica em comum em seus envoltórios circumstelares.

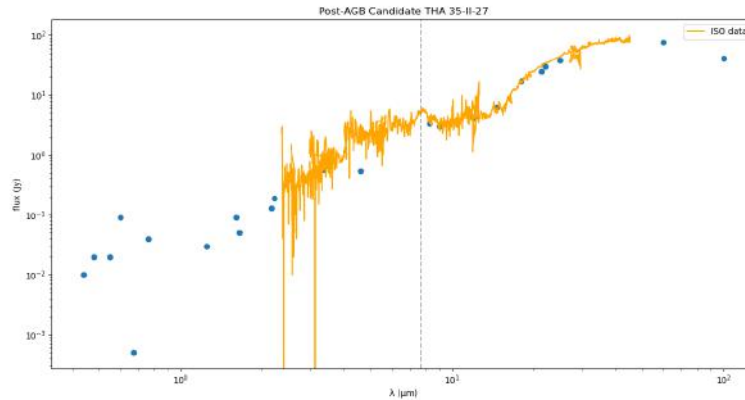


FIGURA 5.28. O mesmo que a Figura 5.22, mas para a candidata 8, THA 35-II-27. É observada uma componente em emissão em $7.7 \mu\text{m}$, associada a PAHs.

Os diagramas cor-cor indicam que IRAS 10178-5958 pode ser uma Pós-AGB ou uma nebulosa planetária e mostram que ela se posiciona junto de objetos oxigenados em maior parte dos diagramas. Apesar disso, observamos uma emissão em $7.7 \mu\text{m}$ em sua SED, associada a PAHs. Como apenas a posição nos diagramas cor-cor não é suficiente para classificar essa candidata conforme a química de seu envoltório, a evidência mais concreta é apresentada pela componente espectral observada na SED. Dessa forma, concluímos que a candidata 8 é uma Pós-AGB ou nebulosa planetária carbonada, mas reiteramos a necessidade de um estudo mais aprofundado, levando os resultados deste trabalho em consideração.

5.3.9 Candidata 9: IRAS 06562-0337

Essa candidata, também conhecida como PN Mac 1-1, foi classificada como nebulosa planetária por MacConnell (1978) com base na análise de seu espectro, que apresenta uma linha de emissão em $H\alpha$ e a ausência de emissão no contínuo. O objeto foi então nomeado como *Ironclad Nebula* e então classificado como Pós-AGB devido a sua alta variabilidade e linhas espectrais proibidas e permitidas de Fe II (Kerber et al., 1996).

Na literatura recente, López et al. (2021) classificam essa candidata como um objeto Herbig Ae/Be por conta da presença de moléculas de monossulfeto de carbono no material circumstelar, moléculas que são destruídas quando a estrela atinge a fase

Pós-AGB. Portanto, os autores concluem que o objeto está em seus estágios iniciais de evolução, e é provavelmente um objeto Herbig Ae/Be, com variabilidade espectral associada a ventos estelares em sua atmosfera. Ainda, IRAS 06562-0337 é encontrado na “região dos objetos Herbig Ae/Be” do diagrama cor-cor IRAS construído por López et al. (2021), como pode ser visto na Figura 5.29.

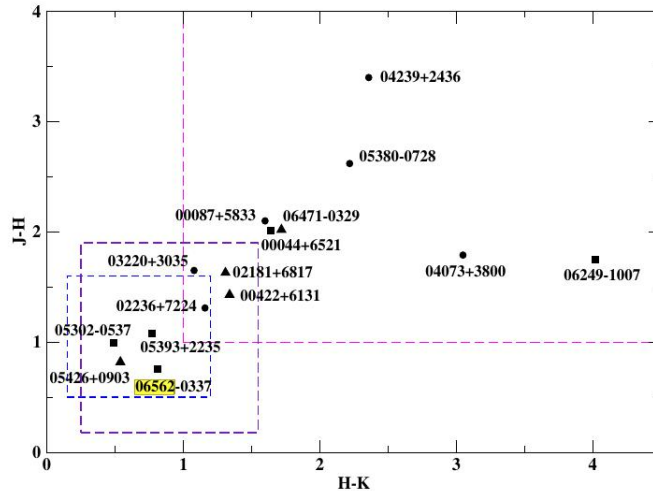


FIGURA 5.29. Diagrama cor-cor indicando uma região esperada para objetos T Tauri (em azul) e uma região delimitada para estrelas Herbig Ae/Be (em magenta). Observamos que a candidata 9 encontra-se dentro da região esperada para estrelas Herbig Ae/Be. Retirado de López et al. (2021).

Foram encontrados poucos dados fotométricos para esse objeto, e não foram encontrados dados de espectroscopia no infravermelho. Por isso, a Figura 5.30 conta com muitos poucos dados. Por conta disso, não podemos concluir se essa candidata possui uma SED de duplo pico ou de pico único. Porém, os diagramas cor-cor podem indicar qual é a real natureza desse objeto: no diagrama IRAS (Figura 5.10), essa candidata encontra-se no limite entre a região de Veen para objetos muito frios e a região para objetos não-variáveis ou NPs. Além disso, aparece próxima a Pós-AGBs carbonadas no diagrama WISE (Figura 5.11), próxima a objetos oxigenados nos diagramas IRAS-MSX (Figura 5.13) e IRAS-WISE (Figura 5.15). Nos demais diagramas, posiciona-se junto de objetos oxigenados e carbonados.

Observamos que os resultados deste trabalho não permitem uma classificação preliminar da natureza desse objeto. Contudo, o fato dessa candidata estar posicionada na região de Veen para diferentes tipos de objetos muito frios no diagrama IRAS pode indicar que, de fato, é um objeto Herbig Ae/Be. Portanto, com base nisso e na análise dos dados da literatura, concluímos que IRAS 06562-0337 é um objeto da classe Herbig Ae/Be, e não uma Pós-AGB.

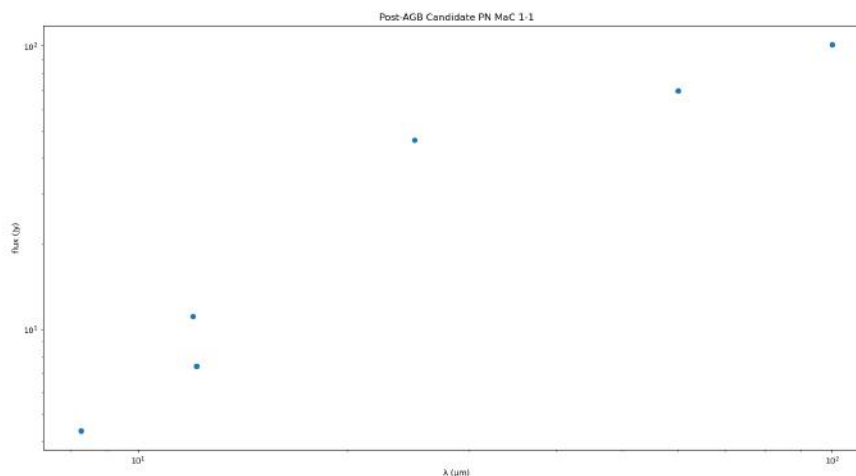


FIGURA 5.30. Os poucos dados fotométricos encontrados para a candidata 9, IRAS 06562-0337, não permitem visualizar sua SED.

5.3.10 Candidata 10: IRAS 07399-1435

Este objeto, também identificado como OH 231.8 +4.2., é citado como incomum por diversos autores na literatura. Os autores Contreras et al. (2018) realizaram uma extensa análise desse objeto e apresentam as informações de que IRAS 07399-1435 é uma nebulosa bipolar com química rica em oxigênio, com morfologia de Pós-AGB e rápidos jatos de ejeção de massa, e tem um sistema binário central ainda pouco estudado, que inclui uma estrela AGB, QX Pup. Além disso, o envoltório circunstelar desse objeto é mais rico quimicamente do que qualquer outro já observado em objetos AGB e Pós-AGB ricos em oxigênio conhecidos, com moléculas nunca antes observadas em AGBs, como a molécula de CH_3OH (Contreras et al., 2018). Na Figura 5.31 é mostrado um esquema, criado por esses autores para ilustrar a morfologia extremamente complexa desse objeto.

A SED desse objeto, mostrada na Figura 5.32, apresenta características incomuns, mostrando possivelmente três picos de emissão. Contudo, essa característica pode ser explicada pela natureza igualmente incomum desta candidata, ilustrada na Figura 5.31. Como mencionado anteriormente, a candidata 10 posiciona-se próxima das candidatas 5 e 8 em diferentes diagramas cor-cor. Além disso, IRAS 07399-1435 encontra-se fora da região de Veen mas dentro da região de Garcia no diagrama IRAS (Figura 5.10), e é encontrada em regiões compostas apenas por objetos oxigenados nos diagramas

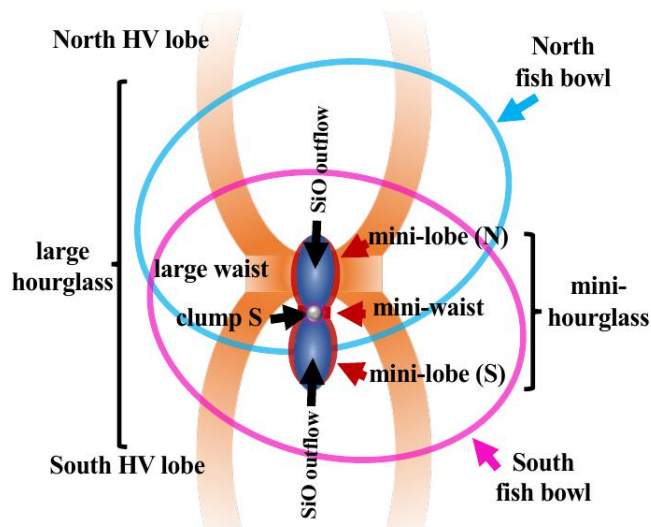


FIGURA 5.31. Esquema da morfologia complexa da nebulosa ao redor do sistema binário IRAS 07399-1435, a candidata 10 do nosso trabalho. Retirado de Contreras et al. (2018).

WISE (Figura 5.11), 2MASS-MSX e IRAS-WISE. No diagrama MSX-IRAS, posiciona-se relativamente distante de todos os outros objetos do diagrama, o que pode indicar uma característica exclusiva, não observada em outros objetos.

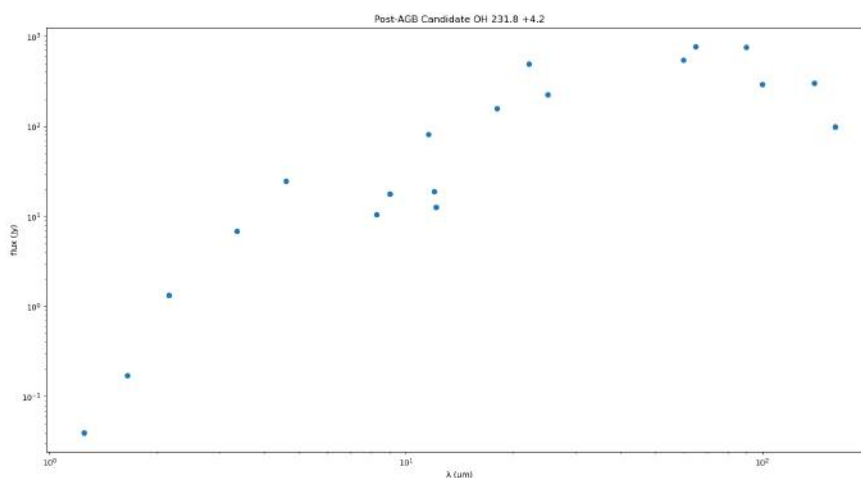


FIGURA 5.32. O mesmo que a Figura 5.17, mas para a candidata 10, IRAS 07399-1435.

Uma análise das informações desse objeto na literatura revela que ele possui características incomuns, com uma nebulosa de morfologia complexa, tendo uma estrela AGB como parte do sistema binário central, e mostrando jatos de ejeção de massa, o que é observado apenas em estrelas Water Fountains, na forma de masers de emissão de OH. Além disso, segundo Contreras et al. (2018), essa candidata possui uma química singular, não observada em outras estrelas AGB. Em relação à poeira, os diagramas

cor-cor indicam que há características em comum entre esse objeto e as candidatas 5 e 8, classificadas como Water Fountain e Pós-AGB (ou nebulosa planetária) carbonada, respectivamente. Esse resultado pode ser explicado pelas semelhanças entre as SEDs das 3 candidatas: todas apresentam evidência de poeira muito próxima da estrela central. Dessa forma, observamos que nossos resultados indicam que certos diagramas cor-cor podem ser utilizados para separar e analisar objetos com envoltórios muito opacos.

Em relação à natureza da candidata 10, pela análise da literatura, podemos concluir que IRAS 07399-1435 não é um objeto Pós-AGB, mas sim um sistema incomum com uma nebulosa de morfologia complexa ao redor de um sistema binário. Por outro lado, os diagramas cor-cor indicam uma natureza oxigenada para esse objeto, o que concorda com o resultado da literatura. Assim concluimos que IRAS 07399-1435 provavelmente é um sistema binário composto por uma estrela AGB com um envoltório próximo da estrela central, cuja química é rica em oxigênio.

Capítulo 6

Conclusões e Perspectivas

Neste trabalho, analisamos as propriedades de 6 classes de estrelas Pós-AGB e discutimos sobre as propriedades dos seus envoltórios circunstelares e das estrelas centrais. Mostramos como o estudo dessas características permite a criação de ferramentas para analisar e confirmar a natureza desses objetos. Criamos um banco de dados fotométricos para construir as SEDs das estrelas da nossa amostra, que consta no Apêndice A, e utilizando as principais características observadas, criamos diagramas cor-cor utilizando bandas fotométricas do infravermelho com o objetivo de encontrar cores capazes de separar as classes de Pós-AGBs. Em seguida, utilizamos esses diagramas em conjunto com as SEDs e dados da literatura, para classificar as 10 candidatas a Pós-AGB presentes em nossa amostra.

A partir dos 156 diagramas criados da combinação de todas as bandas fotométricas utilizadas, selecionamos 24 deles que poderiam ser relevantes para este trabalho. Dentre os 24, seis diagramas foram discutidos. A partir da análise desses diagramas, concluímos que:

- O diagrama IRAS [25]-[60] x [12]-[25], em conjunto com as regiões de Veen e com a região de Garcia, é adequado para delimitar um espaço onde esperamos encontrar Pós-AGBs e NPs. Porém, este diagrama não é adequado para separar os objetos Pós-AGB de acordo com suas classes. Por outro lado, todos os objetos $21 \mu\text{m}$ parecem se concentrar em uma pequena região deste diagrama, mas encontram-se misturados com objetos de outras classes.

- Reconfirmamos os resultados de Gezer et al. (2015) mostrando que o diagrama WISE [3.4]-[4.6] x [12]-[22] é adequado para o estudo das estrelas RV Tauri, e para determinar a característica de disco ou de envoltório das SEDs de Pós-AGBs. Além disso, verificamos que os objetos 21 μm ocupam uma posição especial na região superior deste diagrama, porém é necessária a inclusão de mais objetos desta classe no diagrama para confirmar esta tendência.
- O diagrama WISE-AKARI [09]-[18] x [12]-[22] permite separar ao menos uma parte das estrelas RV Tauri no canto inferior esquerdo, e o mesmo comportamento é observado para os objetos 21 μm . Além do mais, observamos que alguns objetos oxigenados encontram-se confinados na região superior direita deste diagrama.
- Os objetos 21 μm encontram-se confinados a uma pequena região do diagrama IRAS-MSX [25]-[60] x [8.3]-[14.7], e quase todos os objetos carbonados encontram-se concentrados em uma mesma região. Além disso, o diagrama parece sugerir que a cor [25]-[60] pode ser utilizada para separar objetos oxigenados. Dessa forma, esse diagrama nos permitiu definir uma região para objetos carbonados e outra para objetos oxigenados, sendo de grande relevância para classificar preliminarmente nossas candidatas.
- O diagrama 2MASS-MSX J-K x K-[8.3] pode ser adequado para analisar certas estrelas Water Fountain e objetos 21 μm , que parecem ocupar a região mais à direita deste diagrama. Porém, como são observados apenas 2 objetos 21 μm , precisamos incluir mais objetos dessa classe para verificar essa tendência.
- O diagrama IRAS-WISE [3.4]-[4.6] x [25]-[60] indica que a cor [3.4]-[4.6] pode ser usada para separar alguns objetos 21 μm . Sabendo que a cor [25]-[60] parece separar objetos oxigenados, este diagrama é de grande relevância para separar objetos 21 μm e Pós-AGBs com envoltórios ricos em oxigênio, além de permitir a classificação preliminar das nossas candidatas.

Em relação às 10 candidatas presentes em nossa amostra, a análise dos dados na literatura em conjunto com os resultados deste trabalho nos permitiram concluir que:

- A candidata 1, IRAS 17460-3114, é um sistema binário composto por uma estrela primária de tipo O e uma secundária de tipo B.

- Duas candidatas são na verdade objetos Herbig Ae/Be, percorrendo a fase de pré-Sequência Principal: a candidata 2, HD 155448, e a candidata 9, IRAS 17460-3114.
- A candidata 3, IRAS 19219+0947, é uma nebulosa planetária de química dupla.
- Duas candidatas são estrelas LBV: IRAS 11065-6026 (candidata 4) e IRAS 10211-5922 (candidata 7).
- A candidata 5 é uma Water Fountain, IRAS 15405-4945.
- A candidata 6, IRAS 15066-5532, é provavelmente uma Pós-AGB oxigenada.
- A candidata 8, IRAS 10178-5958, é provavelmente uma Pós-AGB carbonada.
- A candidata 10, IRAS 07399-1435, é um sistema binário com uma AGB extremamente incomum com uma nebulosa de morfologia complexa.

Portanto, desqualificamos de maneira preliminar 7 objetos, que não parecem se adequar como candidatas a Pós-AGB. Entre as três candidatas restantes, voltamos nossa atenção para duas delas, IRAS 15066-5532 (candidata 6) e IRAS 10178-5958 (candidata 8). No caso da candidata 6, esta ainda é pouco estudada na literatura, e os resultados deste trabalho podem fornecer importantes informações para a determinação da química de seu envoltório. Em relação à candidata 8, classificada na literatura como Pós-AGB e também como nebulosa planetária rica em carbono, trabalhos posteriores podem utilizar nossos resultados atuais para confirmar sua natureza.

Ademais, citamos que os diagramas cor-cor podem ser utilizados como ferramenta para separar algumas classes de objetos, em especial estrelas RV Tauri, 21 μm e Water Fountains. Além disso, análises futuras, utilizando uma amostra maior de objetos Pós-AGB, podem confirmar certas tendências para a determinação de regiões para objetos oxigenados e objetos carbonados em certos diagramas cor-cor.

Acreditamos que não parece haver uma cor específica que separe as classes de Pós-AGB nos diagramas cor-cor, mas certas cores no infravermelho parecem se relacionar com a opacidade do envoltório e com a presença de uma SED de duplo pico. Além disso, em alguns diagramas observamos agrupamentos de objetos que possuem a mesma química do envoltório. Dessa forma, a posição dos objetos nos diagramas cor-cor parece estar mais relacionada com a química do seu envoltório do que com sua classe, de forma

que podemos separar objetos com envoltórios ricos em oxigênio, mas não observamos uma clara separação entre as classes de Pós-AGBs com envoltórios oxigenados, como as RV Tauri e Water Fountain, por exemplo. Ainda, citamos que algumas cores, como [09]-[18] e [12]-[22], realçam a presença de poeira muito próxima da estrela central, o que resulta em uma SED com picos menos separados, como observado no caso das candidatas 5, 8 e 10.

Além disso, ainda existem muitas classificações imprecisas na literatura envolvendo estrelas Pós-AGB. Nesse sentido, o nosso trabalho mostrou que certos diagramas cor-cor, utilizando cores adequadas, podem evidenciar características desses objetos, e assim, revelar essas classificações errôneas. Embora a utilização desses diagramas não forneça uma conclusão definitiva, a vantagem deste método é obter uma classificação preliminar, que possa direcionar de forma mais precisa o estudo aprofundado das Pós-AGBs.

Por fim, concluímos destacando que, como foram encontrados na literatura poucos dados fotométricos e espectroscópicos das candidatas, é de extrema importância realizar observações dessas estrelas para confirmar os resultados deste trabalho, em especial das candidatas 6 e 8, como citado anteriormente. As análises discutidas aqui de forma preliminar podem ser concluídas em um projeto posterior, considerando uma amostra maior de objetos Pós-AGBs, e incluindo a análise química das estrelas centrais.

Referências Bibliográficas

- Acker, A., Marcout, J., Ochsenbein, F., et al. 1992, The Strasbourg-ESO Catalogue of Galactic Planetary Nebulae. Parts I, II.
- Alcock, C., Allsman, R. A., Alves, D. R., et al. 1998, *AJ*, 115, 1921, doi: 10.1086/300317
- Amada, K., Imai, H., Hamae, Y., et al. 2022, *AJ*, 163, 85, doi: 10.3847/1538-3881/ac3fb6
- Bakker, E. J., Lambert, D. L., & van Dishoeck, E. F. 1996, arXiv e-prints, astro, doi: 10.48550/arXiv.astro-ph/9609030
- Bidelman, W. P. 1951, *ApJ*, 113, 304, doi: 10.1086/145399
- Biemont, E., & Godefroid, M. 1980, *A&A*, 84, 361
- Bunzel, F., García-Hernández, D. A., Engels, D., Perea-Calderón, J. V., & García-Lario, P. 2009, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 418, AKARI, a Light to Illuminate the Misty Universe, ed. T. Onaka, G. J. White, T. Nakagawa, & I. Yamamura, 431. <https://arxiv.org/abs/0904.4134>
- Buss, R. H., J., Tielens, A. G. G. M., Cohen, M., et al. 1993, *ApJ*, 415, 250, doi: 10.1086/173160
- Carroll, B. W., & Ostlie, D. A. 2017, *An introduction to modern astrophysics*, Second Edition
- Celnikier, L. M., & Lefevre, J. 1974, *A&A*, 36, 429
- Cerrigone, L., Hora, J. L., Umana, G., & Trigilio, C. 2009, *ApJ*, 703, 585, doi: 10.1088/0004-637X/703/1/585
- Cherchneff, I. 2011, *A&A*, 526, L11, doi: 10.1051/0004-6361/201016035

- Contreras, C., Alcolea, J., Bujarrabal, V., & Castro-Carrizo, A. 2018, *Galaxies*, 6, 94, doi: 10.3390/galaxies6030094
- de Winter, D., Perez, M. R., Hu, J. Y., & The, P. S. 1992, *A&A*, 257, 632
- Dell'Agli, F., Tosi, S., Kamath, D., et al. 2022, arXiv e-prints, arXiv:2211.13029. <https://arxiv.org/abs/2211.13029>
- Desmurs, J. F. 2012, in *Cosmic Masers - from OH to H0*, ed. R. S. Booth, W. H. T. Vlemmings, & E. M. L. Humphreys, Vol. 287, 217–224, doi: 10.1017/S1743921312006990
- Donati, J. F., Semel, M., Carter, B. D., Rees, D. E., & Collier Cameron, A. 1997, *MNRAS*, 291, 658, doi: 10.1093/mnras/291.4.658
- Engels, D. 2012, in *Cosmic Masers - from OH to H0*, ed. R. S. Booth, W. H. T. Vlemmings, & E. M. L. Humphreys, Vol. 287, 256–257, doi: 10.1017/S1743921312007089
- Gamen, R., Putkuri, C., Morrell, N. I., et al. 2015, *A&A*, 584, A7, doi: 10.1051/0004-6361/201425558
- Garcia-Lario, P., Manchado, A., Pych, W., & Pottasch, S. R. 1997, *A&AS*, 126, 479, doi: 10.1051/aas:1997277
- Gezer, I., Van Winckel, H., Bozkurt, Z., et al. 2015, *MNRAS*, 453, 133, doi: 10.1093/mnras/stv1627
- Giridhar, S., Lambert, D. L., & Gonzalez, G. 2000, *ApJ*, 531, 521, doi: 10.1086/308451
- Giridhar, S., Rao, N. K., & Lambert, D. L. 1994, *ApJ*, 437, 476, doi: 10.1086/175011
- Gonzalez, G., Lambert, D. L., & Giridhar, S. 1997, *ApJ*, 479, 427, doi: 10.1086/303852
- Guzmán-Díaz, J., Mendigutía, I., Montesinos, B., et al. 2021, *A&A*, 650, A182, doi: 10.1051/0004-6361/202039519
- Guzman-Ramirez, L., Zijlstra, A. A., Níchuimín, R., et al. 2011, *MNRAS*, 414, 1667, doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.18502.x
- Habing, H. J., & Olofsson, H. 2004, *Asymptotic Giant Branch Stars*, doi: 10.1007/978-1-4757-3876-6
- Hannaford, P., Lowe, R. M., Grevesse, N., Biemont, E., & Whaling, W. 1982, *ApJ*, 261, 736, doi: 10.1086/160384

- Herwig, F. 2005, *ARA&A*, 43, 435, doi: 10.1146/annurev.astro.43.072103.150600
- Hrivnak, B. J. 1995, *ApJ*, 438, 341, doi: 10.1086/175078
- Hrivnak, B. J., Volk, K., & Kwok, S. 2009, *ApJ*, 694, 1147, doi: 10.1088/0004-637X/694/2/1147
- Hu, J. Y., de Winter, D., The, P. S., & Perez, M. R. 1990, *A&A*, 227, L17
- Jaschek, C., & Jaschek, M. 1995, *The Behavior of Chemical Elements in Stars*
- Joshi, Y. C., Joshi, S., Kumar, B., Mondal, S., & Balona, L. A. 2012, *MNRAS*, 419, 2379, doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.19890.x
- Jura, M. 1986, *ApJ*, 309, 732, doi: 10.1086/164642
- Jurkovic, M. I., Plachy, E., Molnár, L., et al. 2023, *MNRAS*, 518, 642, doi: 10.1093/mnras/stac2957
- Justtanont, K., Barlow, M. J., Skinner, C. J., et al. 1996, *A&A*, 309, 612
- Kamath, D., Dell’Agli, F., Ventura, P., et al. 2022, *MNRAS*, doi: 10.1093/mnras/stac3366
- Kamath, D., & Van Winckel, H. 2019, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 486, 3524, doi: 10.1093/mnras/stz1076
- Kamath, D., Wood, P. R., & Van Winckel, H. 2015, *MNRAS*, 454, 1468, doi: 10.1093/mnras/stv1202
- Kerber, F., Lercher, G., & Roth, M. 1996, *MNRAS*, 283, L41, doi: 10.1093/mnras/283.2.L41
- Khouri, T. 2010, Master’s thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Observatório do Valongo, Brasil
- Khouri, T., Vlemmings, W. H. T., Tafuya, D., et al. 2021, *Nature Astronomy*, 6, 275, doi: 10.1038/s41550-021-01528-4
- Kimura, Y., Nuth, Joseph A., I., & Ferguson, F. T. 2005, *ApJ*, 632, L159, doi: 10.1086/497987

- Kluska, J., Van Winckel, H., Coppée, Q., et al. 2022, *A&A*, 658, A36, doi: 10.1051/0004-6361/202141690
- Kramida, A., Yu. Ralchenko, Reader, J., & and NIST ASD Team. 2022, NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.10), [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/asd> [2023, February 7]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- Kwok, S., Volk, K. M., & Hrivnak, B. J. 1989, *ApJ*, 345, L51, doi: 10.1086/185550
- Lefevre, J., Bergeat, J., & Daniel, J. Y. 1982, *A&A*, 114, 341
- Likkel, L., Maddalena, R. J., & Morris, M. 1988, in *Bulletin of the American Astronomical Society*, Vol. 20, 997
- Lloyd Evans, T. 1985, *MNRAS*, 217, 493, doi: 10.1093/mnras/217.3.493
- López, R., Riera, A., Estalella, R., & Gómez, G. 2021, *A&A*, 648, A57, doi: 10.1051/0004-6361/202037752
- Lorenz-Martins, S., & Lefevre, J. 1994, *A&A*, 291, 831
- Luck, R. E., & Bond, H. E. 1981, *ApJ*, 244, 919, doi: 10.1086/158767
- Luck, R. E., & Bond, H. E. 1991, *ApJS*, 77, 515, doi: 10.1086/191615
- MacConnell, D. J. 1978, *AJ*, 83, 436, doi: 10.1086/112218
- Manick, R., Van Winckel, H., Kamath, D., Sekaran, S., & Kolenberg, K. 2018, *A&A*, 618, A21, doi: 10.1051/0004-6361/201833130
- Martinez, C. F., Holanda, N., Pereira, C. B., & Drake, N. A. 2020, *MNRAS*, 494, 1470, doi: 10.1093/mnras/staa647
- Matsuura, M., Yamamura, I., Zijlstra, A. A., & Bedding, T. R. 2002, *A&A*, 387, 1022, doi: 10.1051/0004-6361:20020391
- Mehner, A., Janssens, S., Agliozzo, C., et al. 2021, *A&A*, 655, A33, doi: 10.1051/0004-6361/202141473
- Mello, D. R. C., Daflon, S., Pereira, C. B., & Hubeny, I. 2012, *A&A*, 543, A11, doi: 10.1051/0004-6361/201117591

- Mishra, A., Li, A., & Jiang, B. W. 2016, *ApJ*, 825, 68, doi: 10.3847/0004-637X/825/1/68
- Molina, R. E., Pereira, C. B., & Arellano Ferro, A. 2019, arXiv e-prints, arXiv:1901.05866. <https://arxiv.org/abs/1901.05866>
- Moreira, C. 2014, Bachelor's thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Observatório do Valongo, Brasil
- Olson, F. M., Baud, B., Habing, H. J., et al. 1984, *ApJ*, 278, L41, doi: 10.1086/161766
- Oomen, G.-M., Pols, O., Van Winckel, H., & Nelemans, G. 2020, *A&A*, 642, A234, doi: 10.1051/0004-6361/202038341
- Oomen, G.-M., Van Winckel, H., Pols, O., & Nelemans, G. 2019, *A&A*, 629, A49, doi: 10.1051/0004-6361/201935853
- Oomen, G.-M., Van Winckel, H., Pols, O., et al. 2018, *A&A*, 620, A85, doi: 10.1051/0004-6361/201833816
- Parthasarathy, M. 1993, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 45, Luminous High-Latitude Stars, ed. D. D. Sasselov, 173
- Parthasarathy, M., & Pottasch, S. R. 1989, *A&A*, 225, 521
- Pereira, C. B., Lorenz-Martins, S., & Machado, M. 2004, *A&A*, 422, 637, doi: 10.1051/0004-6361:20035592
- Pereira, C. B., Marcolino, W. L. F., Machado, M., & de Araújo, F. X. 2008, *A&A*, 477, 877, doi: 10.1051/0004-6361:20077669
- Pereira, C. B., & Miranda, L. F. 2007, *A&A*, 467, 1249, doi: 10.1051/0004-6361:20077154
- Pereira, C. B., Miranda, L. F., & Marcolino, W. L. F. 2021, *AJ*, 162, 71, doi: 10.3847/1538-3881/abfe65
- Petit, P., Louge, T., Théado, S., et al. 2014, *PASP*, 126, 469, doi: 10.1086/676976
- Posch, T., Mutschke, H., & Andersen, A. 2004, *ApJ*, 616, 1167, doi: 10.1086/425113
- Ramos-Medina, J., Sánchez Contreras, C., García-Lario, P., et al. 2018, *A&A*, 611, A41, doi: 10.1051/0004-6361/201731940

- Ratag, M. A., Pottasch, S. R., Zijlstra, A. A., & Menzies, J. 1990, *A&A*, 233, 181
- Reddy, B. E., Lambert, D. L., Gonzalez, G., & Yong, D. 2002, *ApJ*, 564, 482, doi: 10.1086/324216
- Roberts, M. S. 1962, *AJ*, 67, 79, doi: 10.1086/108603
- Ruiz-Escobedo, F., & Peña, M. 2022, *MNRAS*, 510, 5984, doi: 10.1093/mnras/stac003
- Sahai, R., Bujarrabal, V., & Zijlstra, A. 1999, *ApJ*, 518, L115, doi: 10.1086/312084
- Sahai, R., Morris, M., Sánchez Contreras, C., & Claussen, M. 2007, *AJ*, 134, 2200, doi: 10.1086/522944
- Sahai, R., Morris, M. R., & Villar, G. G. 2011, *AJ*, 141, 134, doi: 10.1088/0004-6256/141/4/134
- Sarkar, G., García-Hernández, D. A., Parthasarathy, M., et al. 2012, *MNRAS*, 421, 679, doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.20345.x
- Scarrott, S. M., & Scarrott, R. M. J. 1995, *MNRAS*, 277, 277, doi: 10.1093/mnras/277.1.277
- Sekiguchi, M., & Fukugita, M. 2000, *AJ*, 120, 1072, doi: 10.1086/301490
- Speck, A. K., & Hofmeister, A. M. 2004, *ApJ*, 600, 986, doi: 10.1086/379973
- Sterken, C., van Genderen, A. M., Plummer, A., & Jones, A. F. 2008, *A&A*, 484, 463, doi: 10.1051/0004-6361:200809763
- Suárez, O., García-Lario, P., Manchado, A., et al. 2006, *A&A*, 458, 173, doi: 10.1051/0004-6361:20054108
- Suárez, O., Gómez, J. F., Miranda, L. F., et al. 2009, *A&A*, 505, 217, doi: 10.1051/0004-6361/200911777
- Suh, K.-W. 2015, *ApJ*, 808, 165, doi: 10.1088/0004-637X/808/2/165
- Szczerba, R., Siódmiak, N., Stasińska, G., & Borkowski, J. 2007, *A&A*, 469, 799, doi: 10.1051/0004-6361:20067035
- Sánchez, A. F. P. 2010, Master's thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Observatório do Valongo, Brasil

- Tafoya, D., Imai, H., Gómez, J. F., et al. 2020, *ApJ*, 890, L14, doi: 10.3847/2041-8213/ab70b8
- Vamvatira-Nakou, C., Hutsemékers, D., Royer, P., et al. 2013, *A&A*, 557, A20, doi: 10.1051/0004-6361/201321853
- van der Veen, W. E. C. J., & Habing, H. J. 1988, *A&A*, 194, 125
- van Winckel, H. 2003, *ARA&A*, 41, 391, doi: 10.1146/annurev.astro.41.071601.170018
- Van Winckel, H., & Reyniers, M. 2000, *A&A*, 354, 135. <https://arxiv.org/abs/astro-ph/9910112>
- Van Winckel, H., Waelkens, C., Waters, L. B. F. M., et al. 1998, *A&A*, 336, L17
- van Winckel, H., Lloyd Evans, T., Briquet, M., et al. 2009, *A&A*, 505, 1221, doi: 10.1051/0004-6361/200912332
- Vickers, S. B., Frew, D. J., Parker, Q. A., & Bojčić, I. S. 2015, *MNRAS*, 447, 1673, doi: 10.1093/mnras/stu2383
- Volk, K., Sloan, G. C., & Kraemer, K. E. 2020, *Ap&SS*, 365, 88, doi: 10.1007/s10509-020-03798-2
- von Helden, G., Tielens, A. G. G. M., van Heijnsbergen, D., et al. 2000, *Science*, 288, 313, doi: 10.1126/science.288.5464.313
- Zhang, Y. 2020, *Chinese Journal of Chemical Physics*, 33, 101, doi: 10.1063/1674-0068/cjcp1911203
- Zijlstra, A. A. 2001, *Ap&SS*, 275, 79
- Zuckerman, B., & Dyck, H. M. 1986, *ApJ*, 311, 345, doi: 10.1086/164776
- Zuckerman, B., & Lo, K. Y. 1987, *A&A*, 173, 263

Apêndice A

Banco de dados fotométricos

A seguir apresentamos os dados fotométricos que foram reunidos da literatura para as estrelas da nossa amostra, no intervalo de 0.15 a 850 μm , utilizados para montar as SEDs desses objetos. Não foram encontrados dados fotométricos para 4 objetos da classe RV Tauri: HD 143352, V* DS Aqr, V* V870 Aql e Cl* NGC 7089 SAW V11. Além disso, a Tabela A.6 mostra para quais estrelas da nossa amostra foram encontrados espectros no óptico de baixa e alta resoluções, e espectros ISO no infravermelho.

TABELA A.2. O mesmo que a Tabela A.1, mas para o intervalo de 0.85 a 3.4 μm .

Objeto	Classe	0.85 μm (Jy)	0.88 μm (Jy)	0.95 μm (Jy)	1.02 μm (Jy)	1.25 μm (Jy)	1.60 μm (Jy)	1.65 μm (Jy)	2.16 μm (Jy)	2.22 μm (Jy)	3.40 μm (Jy)
IRAS R21003+3629	Carbonada					0.179				0.0599	
IRAS 04395+3601	Carbonada					0.0063				0.2	
IRAS 07134+1005	Carbonada					2.82				1.54	
IRAS 06530-0213	Carbonada	0.08		0.07		0.22	0.28	0.29	0.27	0.26	0.18
IRAS 22272+5435	Carbonada	5.12		5.43		11.2		11.6	10.6	10.3	4.64
IRAS 23304+6147	Carbonada		0.26	0.11		0.63	0.77	0.77	0.7	0.67	0.46
IRAS 16594-4656	Carbonada					0.18		0.26	0.34	0.32	0.48
IRAS 19454+2920	Carbonada					0.03				0.05	
IRAS 17279-1119	Carbonada					1.15				1.66	
IRAS 18384-2800	Carbonada					3.68				4.46	
IRAS 19475+3119	Oxigenada		1.09	0.95		1.23		1.06	0.76	0.74	0.41
IRAS 19244+1115	Oxigenada	0.03		0.04		10.3		16	24.2	51.9	43.2
IRAS 22036+5306	Oxigenada		0.004	0.007		0.03		0.15	0.62	0.6	1.76
IRAS 17150-3224	Oxigenada				0.03	0.06	0.09	0.08	0.12	0.1	0.13
IRAS 17516-2525	Oxigenada					0.53				6.26	
IRAS 18135-1456	Oxigenada		0.002	0.0005		0.001		0.003	0.004		
IRAS 17436+5003	Oxigenada					5.75				2.86	
IRAS 17423-1755	Oxigenada					0.219				1.28	
IRAS 08544-4431	Oxigenada					9.29				26.3	
IRAS 10456-5712	Oxigenada					71.8				103	
IRAS 06176-1036	Química Dupla	1.33		1.52		3.69		9.19	23.3	22.5	47.2
IRAS 19306+1407	Química Dupla	0.02		0.03		0.05		0.05	0.05	0.05	0.04
IRAS 16279-4757	Química Dupla		0.02		0.12	0.54		2.39	4.3	1.74	8.99
IRAS 10215-5916	Química Dupla					27.3		43.4	43.8	42.4	73.1
IRAS 18313-1738	Química Dupla					0.16				1.32	
IRAS F15240+1452	Química Dupla										
IRAS 19590-1249	RV Tauri	0.02	0.04	0.002	0.04	5.3		6.7	8.29	8.02	6.01
IRAS 04440+2605	RV Tauri					0.06		0.09	0.18		0.77
IRAS 19472+4254	RV Tauri				21.4	8.28	7.6	7.69	6.3	6.09	4.24
IRAS F18281+2149	RV Tauri					3.8	4.01		4.63		
IRAS 20343+2625	RV Tauri					0.75				0.12	
IRAS F15160+0215	RV Tauri					0.09				0.06	
IRAS 18379-1707	RV Tauri					0.78				0.59	
IRAS F17015+0503	RV Tauri					13.6				15.8	
IRAS 18398-0741	RV Tauri					0.479				0.324	
V* V453 Oph	RV Tauri										
V* TT Oph	RV Tauri										
IRAS 18564-0814	RV Tauri					0.24				0.17	
IRAS 18548-0552	RV Tauri					0.16				0.19	
V* UZ Oph	RV Tauri										
IRAS 19437-1104	RV Tauri					2.69				3.11	
IRAS F17495+0757	RV Tauri					2.53				2.52	
V* V362 Aql	RV Tauri					0.28				0.29	
V* V381 Aql	RV Tauri					0.58				0.63	
IRAS 19125+0343	RV Tauri					1.09				3.71	
V* V861 Aql	RV Tauri										
HD 143352	RV Tauri										
V* DS Aqr	RV Tauri										
V* V870 Aql	RV Tauri										
IRAS 19370+0829	RV Tauri					0.15				0.21	
V* QV Aql	RV Tauri										
V* LN Aql	RV Tauri					0.0455				0.0334	
CI* NGC 7089 SAW V11	RV Tauri										
IRAS 02408+5458	21um										
IRAS 03313+6058	21um					0.00007				0.0005	
IRAS 06582+1507	21um					0.0006				0.0014	
IRAS 21318+5631	21um										
IRAS 23166+1655	21um					0.0002				0.0476	
IRAS 19500-1709	21um					2.03				1.22	
IRAS 16342-3814	WF					0.04		0.06	0.1	0.11	0.26
IRAS 15544-5332	WF		0.0009		0.0002	0.004	0.06	0.06	0.39	0.002	1.32
IRAS 16552-3050	WF	0.00002				0.0004		0.0008	0.001		0.0003
IRAS 18043-2116	WF	0.0007		0.001		0.002	0.005	0.005	0.004	0.0002	0.004
IRAS 18139-1816	WF	0.00004		0.00006		0.001		0.004	0.006		
IRAS 18286-0959	WF	0.00003		0.00006		0.001		0.004	0.006		0.16
IRAS 18450-0148	WF	0.0002	0.0002	0.0003		0.0005		0.001	0.002		0.0009
IRAS 18596+0315	WF	0.00001		0.00003		0.00007		0.0002		0.0002	0.01
IRAS 15445-5449	WF										
IRAS 18113-2503	WF										
IRAS 17460-3114	Candidata 1				1.51	1.94	1.28	1.29	0.85	0.83	0.42
HD 155448	Candidata 2	1	0.02		0.65	0.55		0.42	0.26	0.29	0.46
IRAS 19219+0947	Candidata 3	0.004		0.002		0.07	0.003	0.06	0.09	0.03	0.1
IRAS 11065-6026	Candidata 4					1.06		1.33	1.35	1.3	7.78
IRAS 15405-4945	Candidata 5					0.04		0.17	1.34		6.82
IRAS 15066-5532	Candidata 6		0.02		0.03	0.06	0.08	0.08	0.07	0.09	0.14
IRAS 10211-5922	Candidata 7					23.9					
IRAS 10178-5958	Candidata 8					0.03	0.09	0.05	0.13	0.19	0.56
IRAS 06562-0337	Candidata 9										
IRAS 07399-1435	Candidata 10					0.04				1.34	

TABELA A.3. O mesmo que a Tabela A.1, mas para o intervalo de 3.6 a 9 μm .

Objeto	Classe	3.60 μm (Jy)	4.29 μm (Jy)	4.35 μm (Jy)	4.50 μm (Jy)	4.60 μm (Jy)	5.03 μm (Jy)	5.80 μm (Jy)	7.80 μm (Jy)	8.30 μm (Jy)	9 μm (Jy)
IRAS R21003+3629	Carbonada										1004
IRAS 04395+3601	Carbonada		470.8						1106	1036	
IRAS 07134+1005	Carbonada		24.5			66.2			117	50.1	2.177
IRAS 06530-0213	Carbonada	7.26	6.11	7.66	9.13	13.8	18.5	22	27.4	11.1	
IRAS 22272+5435	Carbonada	49.5	73.9	87.8	95.4	149	187	149	302	96.6	
IRAS 23304+6147	Carbonada	12.4	11.4	13.4	14.7	27.1	41	49.2	59.1	26.6	
IRAS 16594-4656	Carbonada	54.8	44.9	49	84.8	159	214	141	298	131	
IRAS 19454+2920	Carbonada		17.3	18.96	41.08	56.55	64.99		89.6	54.4	
IRAS 17279-1119	Carbonada		3.52						2.9	1.6	
IRAS 18384-2800	Carbonada		5.41			4.078			5.22	0.588	
IRAS 19475+3119	Oxigenada	0.85	0.54	0.87	2.73	15.3	24	30.4	38	55.8	
IRAS 19244+1115	Oxigenada	337	1350	1590	1260		2220	2020	2310	718	
IRAS 22036+5306	Oxigenada	11.7	8.43	6.29	15.2	22.7	30.1	35.7	46.3	107	
IRAS 17150-3224	Oxigenada	63.5	57.9	62	128	196	247	380	322	268	
IRAS 17516-2525	Oxigenada		51.6		44.74	73.91			116	100	100.9
IRAS 18135-1456	Oxigenada		31	26.1	59	71.69	82.1		124	158	142.3
IRAS 17436+5003	Oxigenada		6.12			81.6			184	152	139
IRAS 17423-1755	Oxigenada		7.05		8.23	13.6			28.3	63.7	56.2
IRAS 08544-4431	Oxigenada		180		144	156			159	56.2	45.7
IRAS 10456-5712	Oxigenada		189		127	114			116	30.9	23.4
IRAS 06176-1036	Química Dupla	191	422			414		192	456	173	139.1
IRAS 19306+1407	Química Dupla	4.51	3.58	3.65	9.12	30.3	46.3	53.4	58.7	31.8	26.76
IRAS 16279-4757	Química Dupla	58	43	57.3	72.4	170	188	312	268	163	
IRAS 10215-5916	Química Dupla	155	201	183	452			189	1750	852	
IRAS 18313-1738	Química Dupla		9.41		6.523	6.901			7.28	1	
IRAS F15240+1452	Química Dupla		0.113						0.147	0.211	
IRAS 19590-1249	Química Dupla		0.293			4.793			10.3	6.45	4.959
IRAS 04440+2605	RV Tauri	21.3	23.4			14.3		15.1	18.1	6.5	
IRAS 19472+4254	RV Tauri	1.03	1.54			0.877		0.74	0.85	0.4	
IRAS F18281+2149	RV Tauri	31.6	41.4			50.5		56.6	65.3	21.4	17.9
IRAS 20343+2625	RV Tauri		12.4			5.664			5.69	1.29	
IRAS F15160+0215	RV Tauri		0.273						0.118	0.0984	
IRAS 18379-1707	RV Tauri		1.67						23.8	7.12	4.298
IRAS F17015+0503	RV Tauri		0.0923						0.0731	0.12	
IRAS 18398-0741	RV Tauri		1.29		0.68				2.83	21.6	
V* V453 Oph	RV Tauri										
V* TT Oph	RV Tauri										
IRAS 18564-0814	RV Tauri		2.49		2.205				2.72	0.645	
IRAS 18548-0552	RV Tauri		2.63		2.673	2.216			2.76	4.34	
V* UZ Oph	RV Tauri										
IRAS 19437-1104	RV Tauri		0.48						0.22	0.4	
IRAS F17495+0757	RV Tauri		0.18						0.08	0.19	
V* V362 Aql	RV Tauri										
V* V381 Aql	RV Tauri										
IRAS 19125+0343	RV Tauri		28.9		23.9	22.88			26.5	7.81	
V* V861 Aql	RV Tauri										
HD 143352	RV Tauri										
V* DS Aqr	RV Tauri										
V* V870 Aql	RV Tauri										
IRAS 19370+0829	RV Tauri		0.55			0.352			0.37	0.4	
V* QV Aql	RV Tauri										
V* LN Aql	RV Tauri										
Cl* NGC 7089 SAW V11	RV Tauri										
IRAS 02408+5458	21um		11.7		15.698	23			20.8	7.28	6.626
IRAS 03313+6058	21um		30.9		51.8	40.7			43.4	15.1	12.46
IRAS 06582+1507	21um		38.7		46.5	59.2			55.5	17	15.3
IRAS 21318+5631	21um		257		134.19	225.9			312	90	62.62
IRAS 23166+1655	21um		707		620				776	248	201.3
IRAS 19500-1709	21um		27.8			81.07			165	73.4	50.36
IRAS 16342-3814	WF	22.7	16.2	13.3	43.7	89.4	126	177	200	290	
IRAS 15544-5332	WF	3.59	4.64	4.29	6.74	7.32	8.65	11.1	15.5	41.5	
IRAS 16552-3050	WF	0.06	2.46			5.55		7.99	10.5	10.1	
IRAS 18043-2116	WF	1.21	0.07	1.98	4.63	4.35	4.35	5.52	5.39	6.76	
IRAS 18139-1816	WF		11.6						16.9	13.9	
IRAS 18286-0959	WF	43.5	25	46.5	62.8	45.8	33.4	54.1	24.5	51.6	
IRAS 18450-0148	WF	19.1	23.7	23.9	53.4		78.8	91.8	104	295	
IRAS 18596+0315	WF	2.64	2.6	2.51	6.19	7.82	9.31	11.8	14.2	22.2	
IRAS 15445-5449	WF										
IRAS 18113-2503	WF										
IRAS 17460-3114	Candidata 1	6.37	6.26	5.69	7.37	15.1	19.1	18.8	20.8	12.2	
HD 155448	Candidata 2	0.97	1.58					5.67	6.79	6.33	
IRAS 19219+0947	Candidata 3	20.2	15.4	13.7	23.9	56.2	75	82	92.4	31.9	
IRAS 11065-6026	Candidata 4	15	12.7	13	26.8	82.7	142	177	20.5	129	
IRAS 15405-4945	Candidata 5	81.04	19	12.78		158.6		491.54	226	548	768.1
IRAS 15066-5532	Candidata 6	1.91	1.32	1.41	4.88	22.5	36.8	44.6	51.8	40	
IRAS 10211-5922	Candidata 7		11.1	9.07					53.5	37.1	
IRAS 10178-5958	Candidata 8	4.42	4.12	4.46	6.33	17	25	30.4	38.3	76.1	
IRAS 06562-0337	Candidata 9		11.1	7.4					46.5	69.3	
IRAS 07399-1435	Candidata 10									10.29	17.95

TABELA A.4. O mesmo que a Tabela A.1, mas para o intervalo de 11.56 a 65 μm .

Objeto	Classe	11.56 μm (Jy)	12 μm (Jy)	12.13 μm (Jy)	14.70 μm (Jy)	18 μm (Jy)	21.34 μm (Jy)	22.08 μm (Jy)	25 μm (Jy)	60 μm (Jy)	65 μm (Jy)
IRAS R21003+3629	Carbonada										1004
IRAS 04395+3601	Carbonada		470.8						1106	1036	
IRAS 07134+1005	Carbonada		24.5			66.2			117	50.1	2.177
IRAS 06530-0213	Carbonada	7.26	6.11	7.66	9.13	13.8	18.5	22	27.4	11.1	
IRAS 22272+5435	Carbonada	49.5	73.9	87.8	95.4	149	187	149	302	96.6	
IRAS 23304+6147	Carbonada	12.4	11.4	13.4	14.7	27.1	41	49.2	59.1	26.6	
IRAS 16594-4656	Carbonada	54.8	44.9	49	84.8	159	214	141	298	131	
IRAS 19454+2920	Carbonada		17.3	18.96	41.08	56.55	64.99		89.6	54.4	
IRAS 17279-1119	Carbonada		3.52						2.9	1.6	
IRAS 18384-2800	Carbonada		5.41			4.078			5.22	0.588	
IRAS 19475+3119	Oxigenada	0.85	0.54	0.87	2.73	15.3	24	30.4	38	55.8	
IRAS 19244+1115	Oxigenada	337	1350	1590	1260		2220	2020	2310	718	
IRAS 22036+5306	Oxigenada	11.7	8.43	6.29	15.2	22.7	30.1	35.7	46.3	107	
IRAS 17150-3224	Oxigenada	63.5	57.9	62	128	196	247	380	322	268	
IRAS 17516-2525	Oxigenada		51.6		44.74	73.91			116	100	100.9
IRAS 18135-1456	Oxigenada		31	26.1	59	71.69	82.1		124	158	142.3
IRAS 17436+5003	Oxigenada		6.12			81.6			184	152	139
IRAS 17423-1755	Oxigenada		7.05		8.23	13.6			28.3	63.7	56.2
IRAS 08544-4431	Oxigenada		180		144	156			159	56.2	45.7
IRAS 10456-5712	Oxigenada		189		127	114			116	30.9	23.4
IRAS 06176-1036	Química Dupla	191	422			414		192	456	173	139.1
IRAS 19306+1407	Química Dupla	4.51	3.58	3.65	9.12	30.3	46.3	53.4	58.7	31.8	26.76
IRAS 16279-4757	Química Dupla	58	43	57.3	72.4	170	188	312	268	163	
IRAS 10215-5916	Química Dupla	155	201	183	452			189	1750	852	
IRAS 18313-1738	Química Dupla		9.41		6.523	6.901			7.28	1	
IRAS F15240+1452	Química Dupla		0.113						0.147	0.211	
IRAS 19590-1249	Química Dupla		0.293			4.793			10.3	6.45	4.959
IRAS 04440+2605	RV Tauri	21.3	23.4			14.3		15.1	18.1	6.5	
IRAS 19472+4254	RV Tauri	1.03	1.54			0.877		0.74	0.85	0.4	
IRAS F18281+2149	RV Tauri	31.6	41.4			50.5		56.6	65.3	21.4	17.9
IRAS 20343+2625	RV Tauri		12.4			5.664			5.69	1.29	
IRAS F15160+0215	RV Tauri		0.273						0.118	0.0984	
IRAS 18379-1707	RV Tauri		1.67						23.8	7.12	4.298
IRAS F17015+0503	RV Tauri		0.0923						0.0731	0.12	
IRAS 18398-0741	RV Tauri		1.29		0.68				2.83	21.6	
V* V453 Oph	RV Tauri										
V* TT Oph	RV Tauri										
IRAS 18564-0814	RV Tauri		2.49		2.205				2.72	0.645	
IRAS 18548-0552	RV Tauri		2.63		2.673	2.216			2.76	4.34	
V* UZ Oph	RV Tauri										
IRAS 19437-1104	RV Tauri		0.48						0.22	0.4	
IRAS F17495+0757	RV Tauri		0.18						0.08	0.19	
V* V362 Aql	RV Tauri										
V* V381 Aql	RV Tauri										
IRAS 19125+0343	RV Tauri		28.9		23.9	22.88			26.5	7.81	
V* V861 Aql	RV Tauri										
HD 143352	RV Tauri										
V* DS Aqr	RV Tauri										
V* V870 Aql	RV Tauri										
IRAS 19370+0829	RV Tauri		0.55			0.352			0.37	0.4	
V* QV Aql	RV Tauri										
V* LN Aql	RV Tauri										
CI* NGC 7089 SAW V11	RV Tauri										
IRAS 02408+5458	21um		11.7		15.698	23			20.8	7.28	6.626
IRAS 03313+6058	21um		30.9		51.8	40.7			43.4	15.1	12.46
IRAS 06582+1507	21um		38.7		46.5	59.2			55.5	17	15.3
IRAS 21318+5631	21um		257		134.19	225.9			312	90	62.62
IRAS 23166+1655	21um		707			620			776	248	201.3
IRAS 19500-1709	21um		27.8			81.07			165	73.4	50.36
IRAS 16342-3814	WF	22.7	16.2	13.3	43.7	89.4	126	177	200	290	
IRAS 15544-5332	WF	3.59	4.64	4.29	6.74	7.32	8.65	11.1	15.5	41.5	
IRAS 16552-3050	WF	0.06	2.46			5.55		7.99	10.5	10.1	
IRAS 18043-2116	WF	1.21	0.07	1.98	4.63	4.35	4.35	5.52	5.39	6.76	
IRAS 18139-1816	WF		11.6						16.9	13.9	
IRAS 18286-0959	WF	43.5	25	46.5	62.8	45.8	33.4	54.1	24.5	51.6	
IRAS 18450-0148	WF	19.1	23.7	23.9	53.4		78.8	91.8	104	295	
IRAS 18596+0315	WF	2.64	2.6	2.51	6.19	7.82	9.31	11.8	14.2	22.2	
IRAS 15445-5449	WF										
IRAS 18113-2503	WF										
IRAS 17460-3114	Candidata 1	6.37	6.26	5.69	7.37	15.1	19.1	18.8	20.8	12.2	
HD 155448	Candidata 2	0.97	1.58					5.67	6.79	6.33	
IRAS 19219+0947	Candidata 3	20.2	15.4	13.7	23.9	56.2	75	82	92.4	31.9	
IRAS 11065-6026	Candidata 4	15	12.7	13	26.8	82.7	142	177	20.5	129	
IRAS 15405-4945	Candidata 5	81.04	19	12.78		158.6		491.54	226	548	768.1
IRAS 15066-5532	Candidata 6	1.91	1.32	1.41	4.88	22.5	36.8	44.6	51.8	40	
IRAS 10211-5922	Candidata 7		11.1	9.07					53.5	37.1	
IRAS 10178-5958	Candidata 8	4.42	4.12	4.46	6.33	17	25	30.4	38.3	76.1	
IRAS 06562-0337	Candidata 9		11.1	7.4					46.5	69.3	
IRAS 07399-1435	Candidata 10		19		41.25	158.6			226	548	768.1

TABELA A.5. O mesmo que a Tabela A.1, mas para o intervalo de 70 a 350 μm .

Objeto	Classe	70 μm (Jy)	90 μm (Jy)	100 μm (Jy)	140 μm (Jy)	160 μm (Jy)	250 μm (Jy)	350 μm (Jy)
IRAS R21003+3629	Carbonada							
IRAS 04395+3601	Carbonada							
IRAS 07134+1005	Carbonada							
IRAS 06530-0213	Carbonada		8.33	4.1	1.98	1.6		
IRAS 22272+5435	Carbonada			41				
IRAS 23304+6147	Carbonada		11.8	30.9		0.76		
IRAS 16594-4656	Carbonada			34.4				
IRAS 19454+2920	Carbonada			14.7				
IRAS 17279-1119	Carbonada							
IRAS 18384-2800	Carbonada							
IRAS 19475+3119	Oxigenada			14.8				
IRAS 19244+1115	Oxigenada			1860				
IRAS 22036+5306	Oxigenada			50.7				
IRAS 17150-3224	Oxigenada			82.4				
IRAS 17516-2525	Oxigenada							
IRAS 18135-1456	Oxigenada			429				
IRAS 17436+5003	Oxigenada							
IRAS 17423-1755	Oxigenada							
IRAS 08544-4431	Oxigenada							
IRAS 10456-5712	Oxigenada							
IRAS 06176-1036	Química Dupla			66.2				
IRAS 19306+1407	Química Dupla			10				
IRAS 16279-4757	Química Dupla	209		265		22	8.56	1.78
IRAS 10215-5916	Química Dupla			181				
IRAS 18313-1738	Química Dupla							
IRAS F15240+1452	Química Dupla							
IRAS 19590-1249	Química Dupla							
IRAS 04440+2605	RV Tauri			2.44				
IRAS 19472+4254	RV Tauri			3.12				
IRAS F18281+2149	RV Tauri		11	8.04	4.19	3.07		
IRAS 20343+2625	RV Tauri			7.25				
IRAS F15160+0215	RV Tauri							
IRAS 18379-1707	RV Tauri							
IRAS F17015+0503	RV Tauri							
IRAS 18398-0741	RV Tauri							
V* V453 Oph	RV Tauri							
V* TT Oph	RV Tauri							
IRAS 18564-0814	RV Tauri							
IRAS 18548-0552	RV Tauri							
V* UZ Oph	RV Tauri							
IRAS 19437-1104	RV Tauri							
IRAS F17495+0757	RV Tauri							
V* V362 Aql	RV Tauri							
V* V381 Aql	RV Tauri							
IRAS 19125+0343	RV Tauri							
V* V861 Aql	RV Tauri							
HD 143352	RV Tauri							
V* DS Aqr	RV Tauri							
V* V870 Aql	RV Tauri							
IRAS 19370+0829	RV Tauri							
V* QV Aql	RV Tauri							
V* LN Aql	RV Tauri							
Cl* NGC 7089 SAW V11	RV Tauri							
IRAS 02408+5458	21um							
IRAS 03313+6058	21um							
IRAS 06582+1507	21um							
IRAS 21318+5631	21um							
IRAS 23166+1655	21um							
IRAS 19500-1709	21um							
IRAS 16342-3814	WF			139				
IRAS 15544-5332	WF	39.1		288		11.4	6.54	1.64
IRAS 16552-3050	WF		7.9	17	4.16	0.98		
IRAS 18043-2116	WF	13.6		1.2		2.6	5.73	2.33
IRAS 18139-1816	WF			289				
IRAS 18286-0959	WF	41.6	25.8	17.2	6.91	9.81	6.5	2.27
IRAS 18450-0148	WF	174		2520		46.1	16.8	8.23
IRAS 18596+0315	WF	20.2		111		4.46	4.51	1.81
IRAS 15445-5449	WF							
IRAS 18113-2503	WF							
IRAS 17460-3114	Candidata 1			220				
HD 155448	Candidata 2			56.3				
IRAS 19219+0947	Candidata 3		23.9	1.09	4.71	4.64		
IRAS 11065-6026	Candidata 4		51.2	60.5	14.2	5.07		
IRAS 15405-4945	Candidata 5		759.8	294	304.7	98.88		
IRAS 15066-5532	Candidata 6			26.9				
IRAS 10211-5922	Candidata 7			181				
IRAS 10178-5958	Candidata 8			41.5				
IRAS 06562-0337	Candidata 9			101				
IRAS 07399-1435	Candidata 10							

TABELA A.6. Tabela mostrando para quais estrelas da nossa amostra foram encontrados dados espectroscópicos de alta e baixa resoluções no óptico, e espectros ISO no infravermelho.

Objeto	Classe	Espectro óptico de baixa resolução	Espectro óptico de alta resolução	Espectro ISO
IRAS R21003+3629	Carbonada			
IRAS 04395+3601	Carbonada			
IRAS 07134+1005	Carbonada	x		
IRAS 06530-0213	Carbonada			
IRAS 22272+5435	Carbonada			x
IRAS 23304+6147	Carbonada			x
IRAS 16594-4656	Carbonada			x
IRAS 19454+2920	Carbonada			x
IRAS 17279-1119	Carbonada			
IRAS 18384-2800	Carbonada		x	
IRAS 19475+3119	Oxigenada		x	x
IRAS 19244+1115	Oxigenada			x
IRAS 22036+5306	Oxigenada			x
IRAS 17150-3224	Oxigenada			x
IRAS 17516-2525	Oxigenada			
IRAS 18135-1456	Oxigenada			
IRAS 17436+5003	Oxigenada	x		
IRAS 17423-1755	Oxigenada			
IRAS 08544-4431	Oxigenada			
IRAS 10456-5712	Oxigenada			
IRAS 06176-1036	Química Dupla			x
IRAS 19306+1407	Química Dupla			x
IRAS 16279-4757	Química Dupla			x
IRAS 10215-5916	Química Dupla			x
IRAS 18313-1738	Química Dupla		x	
IRAS F15240+1452	Química Dupla			
IRAS 19590-1249	Química Dupla			
IRAS 04440+2605	RV Tauri			
IRAS 19472+4254	RV Tauri			
IRAS F18281+2149	RV Tauri	x	x	x
IRAS 20343+2625	RV Tauri	x		
IRAS F15160+0215	RV Tauri			
IRAS 18379-1707	RV Tauri			
IRAS F17015+0503	RV Tauri			
IRAS 18398-0741	RV Tauri			
V* V453 Oph	RV Tauri			
V* TT Oph	RV Tauri			
IRAS 18564-0814	RV Tauri			
IRAS 18548-0552	RV Tauri			
V* UZ Oph	RV Tauri			
IRAS 19437-1104	RV Tauri			
IRAS F17495+0757	RV Tauri			
V* V362 Aql	RV Tauri			
V* V381 Aql	RV Tauri			
IRAS 19125+0343	RV Tauri			
V* V861 Aql	RV Tauri			
HD 143352	RV Tauri			
V* DS Aqr	RV Tauri			
V* V870 Aql	RV Tauri			
IRAS 19370+0829	RV Tauri			
V* QV Aql	RV Tauri			
V* LN Aql	RV Tauri			
Cl* NGC 7089 SAW V11	RV Tauri			
IRAS 02408+5458	21um			
IRAS 03313+6058	21um			
IRAS 06582+1507	21um			
IRAS 21318+5631	21um			
IRAS 23166+1655	21um			
IRAS 19500-1709	21um		x	x
IRAS 16342-3814	WF			x
IRAS 15544-5332	WF			
IRAS 16552-3050	WF			
IRAS 18043-2116	WF			
IRAS 18139-1816	WF			x
IRAS 18286-0959	WF			x
IRAS 18450-0148	WF			
IRAS 18596+0315	WF			x
IRAS 15445-5449	WF			
IRAS 18113-2503	WF			
IRAS 17460-3114	Candidata 1			
HD 155448	Candidata 2			
IRAS 19219+0947	Candidata 3			x
IRAS 11065-6026	Candidata 4			x
IRAS 15405-4945	Candidata 5			
IRAS 15066-5532	Candidata 6			
IRAS 10211-5922	Candidata 7			x
IRAS 10178-5958	Candidata 8			x
IRAS 06562-0337	Candidata 9			
IRAS 07399-1435	Candidata 10			

Apêndice B

SEDs

Neste apêndice, apresentamos as distribuições espectrais de energia das estrelas de nossa amostra que não foram mostradas anteriormente. Como mencionado no Capítulo 5, os dados fotométricos reunidos da literatura permitiram montar as SEDs de 35 estrelas da nossa amostra, incluindo a das 10 candidatas a Pós-AGB. Dessas SEDs, 21 contam também com dados de espectroscopia ISO, no infravermelho. No Capítulo 5, discutimos 9 SEDs de objetos da amostra, que utilizamos para definir as cores que poderiam separar as classes de Pós-AGBs nos diagramas cor-cor. Além disso, discutimos as SEDs das 10 candidatas da nossa amostra na Seção 5.3. A seguir são apresentadas as 16 distribuições espectrais de energia restantes.

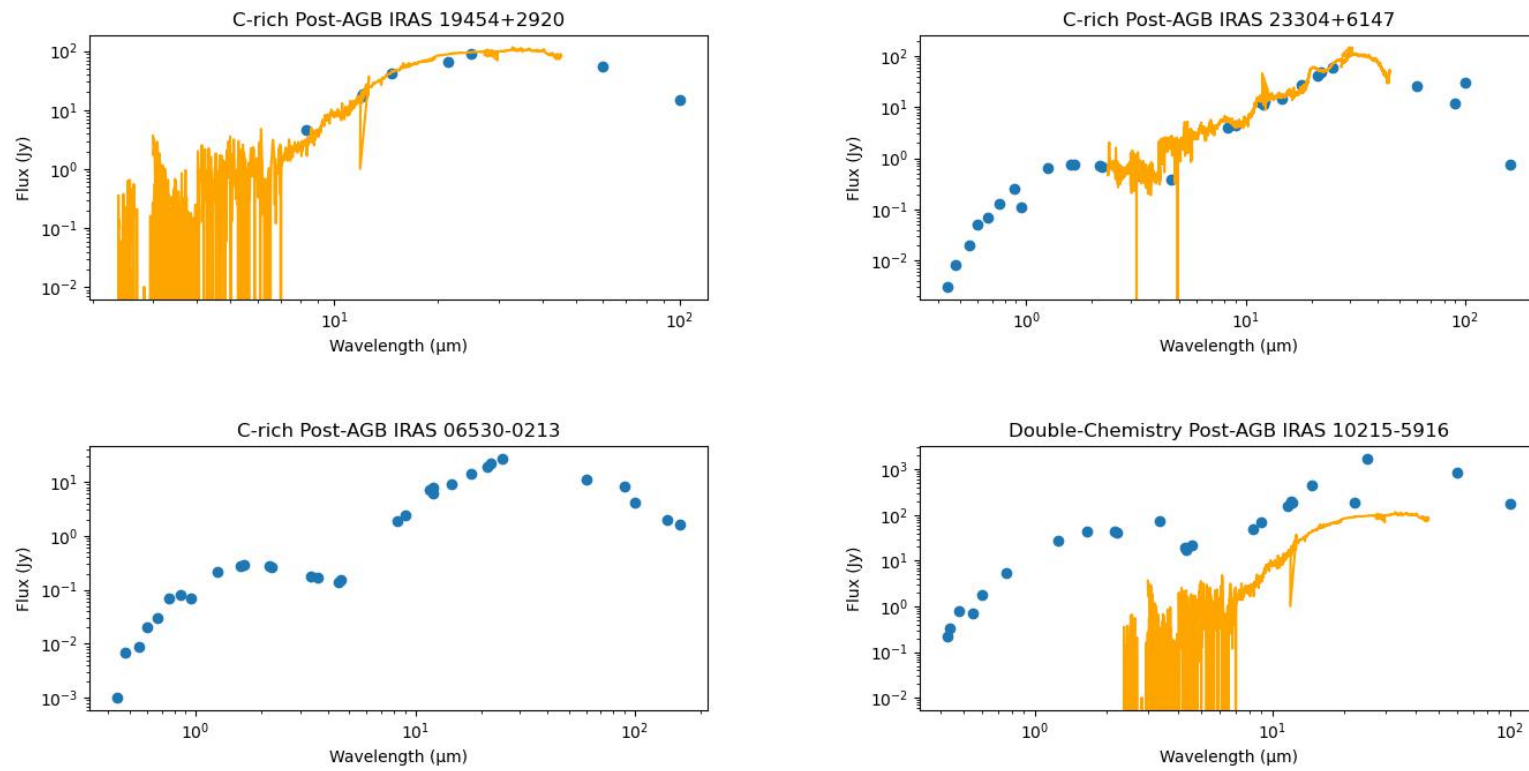


FIGURA B.1. Distribuições espectrais de energia das Pós-AGBs carbonadas IRAS 19454+2920, IRAS 23304+6147, IRAS 23304+6147 e da Pós-AGB de química dupla IRAS 10215-5916. Os dados de fotometria são representados pelos pontos azuis, e a espectroscopia ISO, quando disponível, é mostrada em laranja.

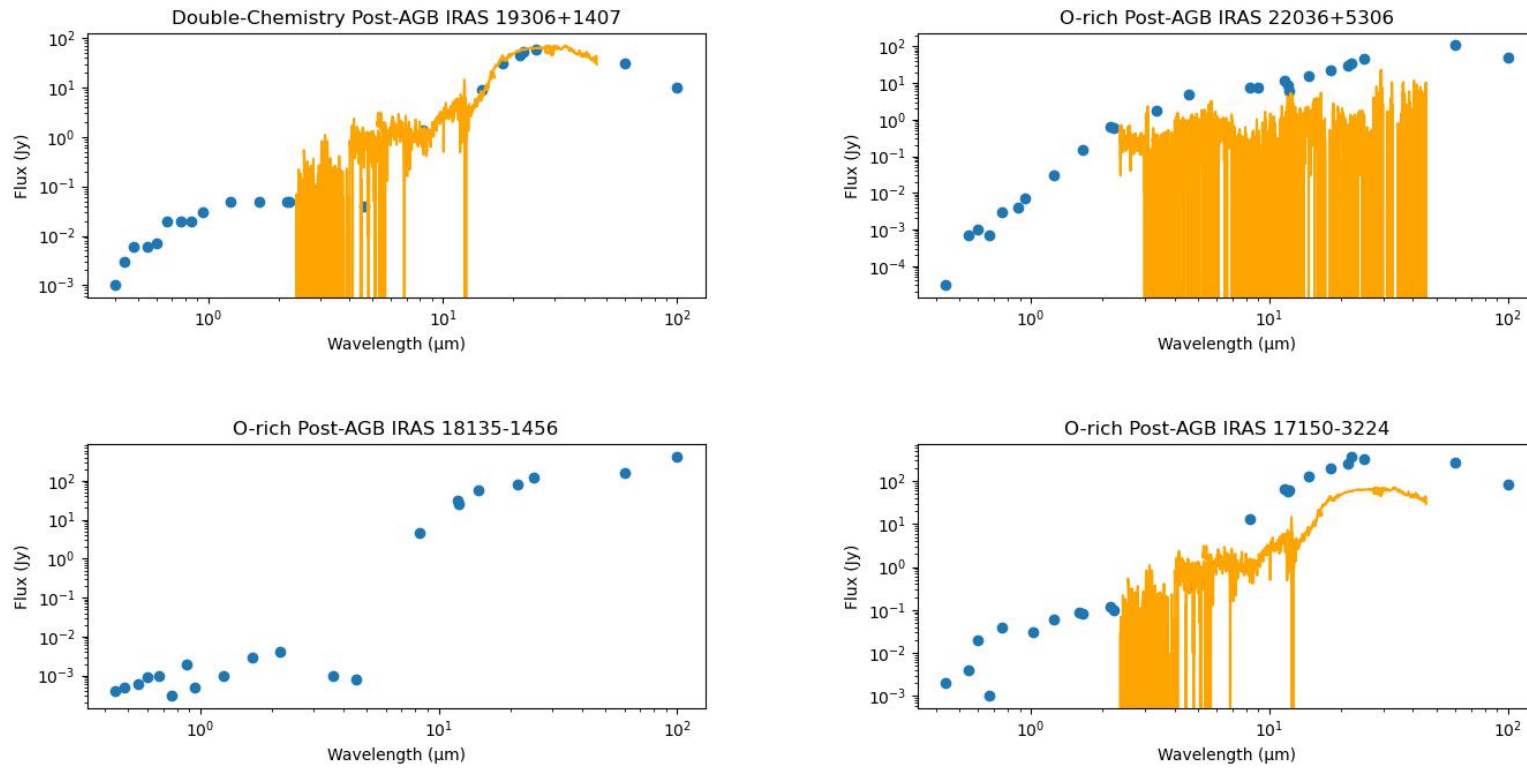


FIGURA B.2. O mesmo que a Figura B.1, mas para a Pós-AGB de química dupla IRAS 19306+1407, e para as Pós-AGBs oxigenadas IRAS 22036+5306, IRAS 18135-1456 e IRAS 17150-3224.

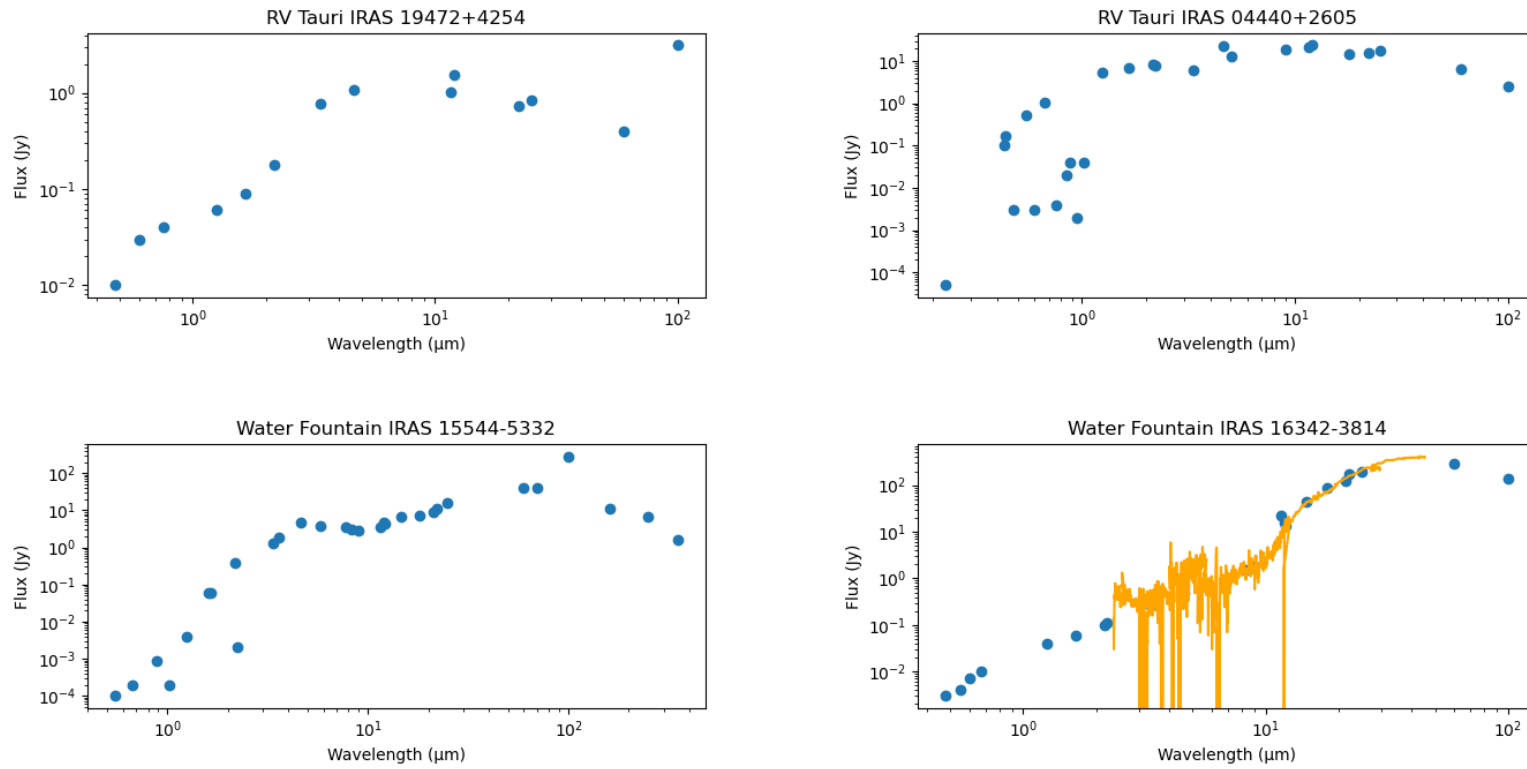


FIGURA B.3. O mesmo que a Figura B.1, mas para as RV Tauri IRAS 19472+4254, IRAS 04440+2605, IRAS 15544-5332, e para a Water Fountain IRAS 16342-3814.

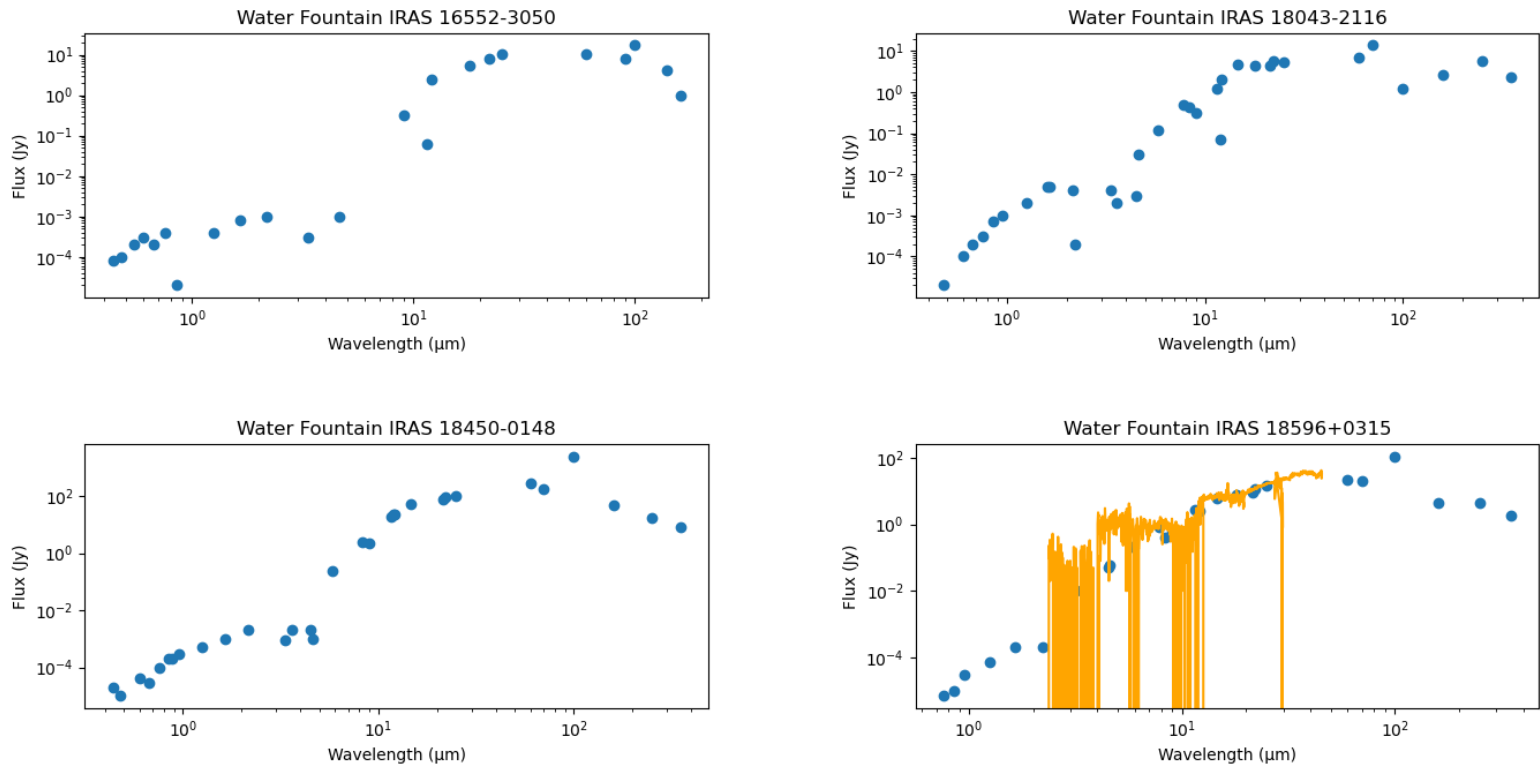


FIGURA B.4. O mesmo que a Figura B.1, mas para as Water Fountains IRAS 16552-3050, IRAS 18043-2116, IRAS 18450-0148 e IRAS 18596+0315.

Apêndice C

Diagramas cor-cor

Este apêndice apresenta os 18 diagramas cor-cor, dentre aqueles considerados mais relevantes, com as cores dos levantamentos IRAS, WISE, AKARI e MSX. Além dos que serão apresentados a seguir, seis diagramas foram discutidos no Capítulo 5 como ferramenta de análise e identificação de classes de Pós-AGBs e candidatas. Os diagramas deste apêndice são considerados relevantes por auxiliarem no estudo desses objetos, no sentido de separar certas classes de Pós-AGBs em regiões específicas, e podem ser utilizados em trabalhos futuros.

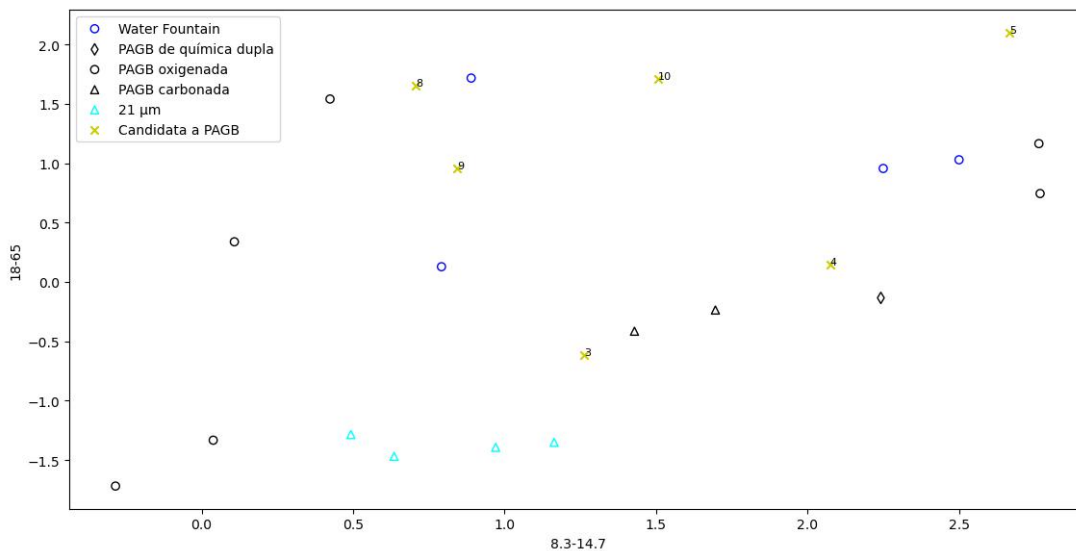


FIGURA C.1. Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 8.3 e 14.7 μm do MSX, e 18 e 65 μm do AKARI.

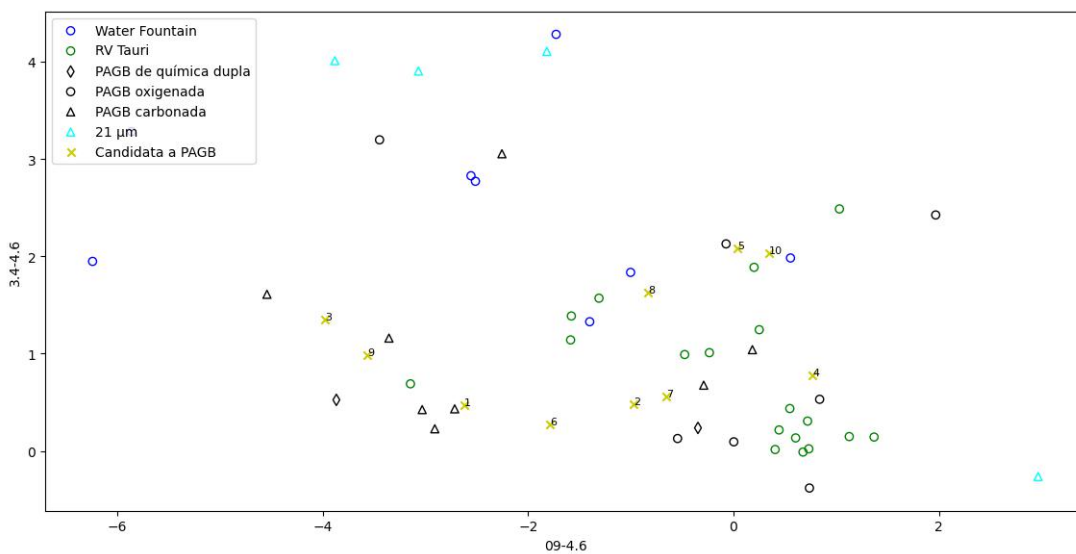


FIGURA C.2. Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 3.4 e 4.6 μm do WISE, e 9 μm do AKARI.

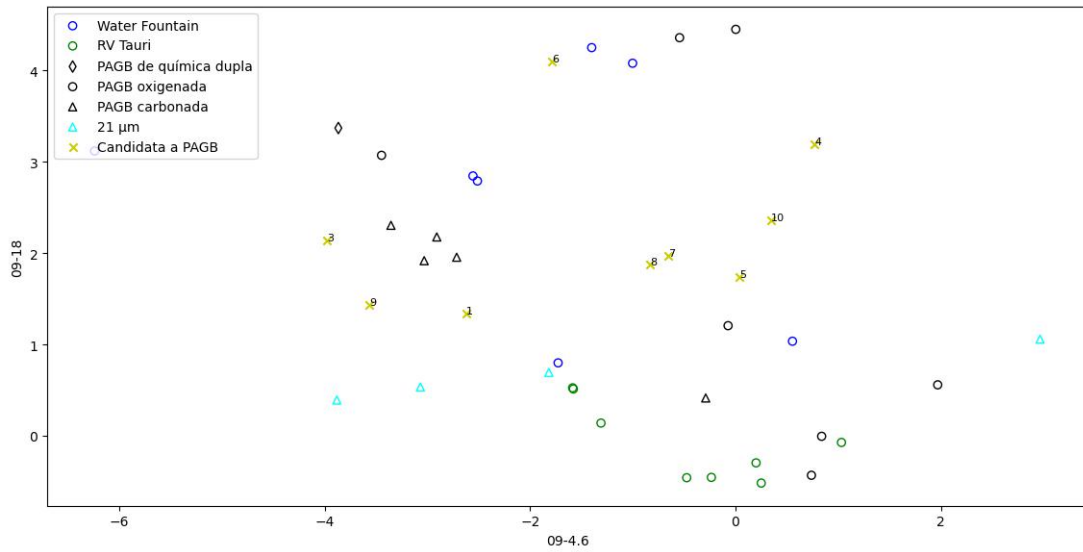


FIGURA C.3. Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 4.6 μm do WISE, e 9 e 18 μm do AKARI.

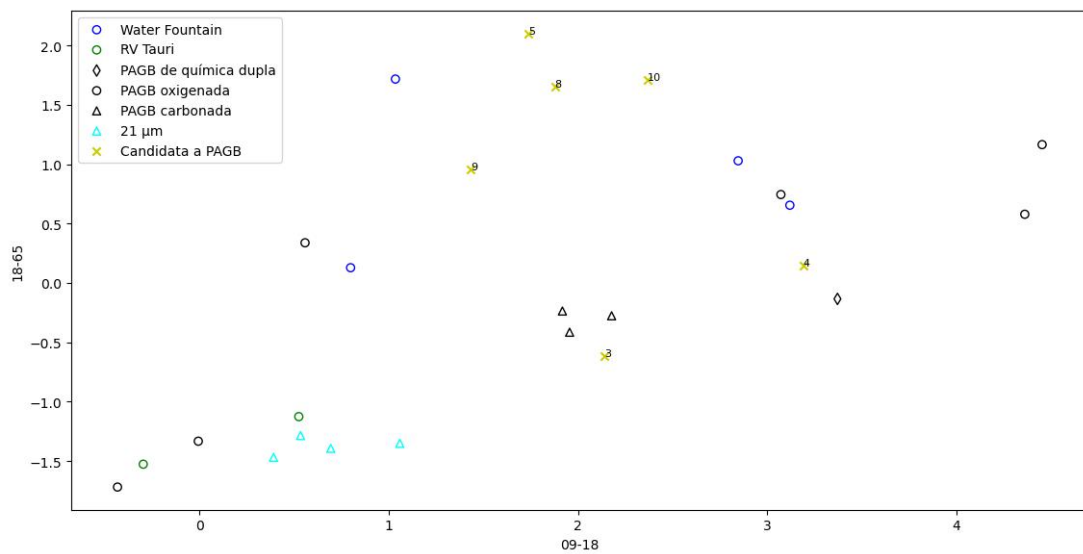


FIGURA C.4. Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 9, 18 e 65 μm do AKARI.

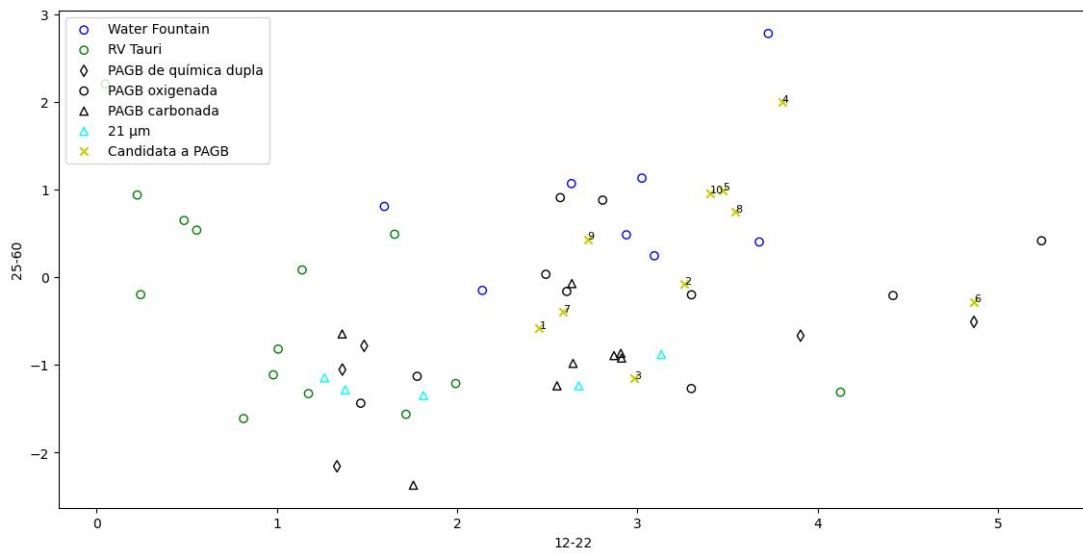


FIGURA C.5. Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 12 e 22 μm do WISE, e 25 e 60 do IRAS.

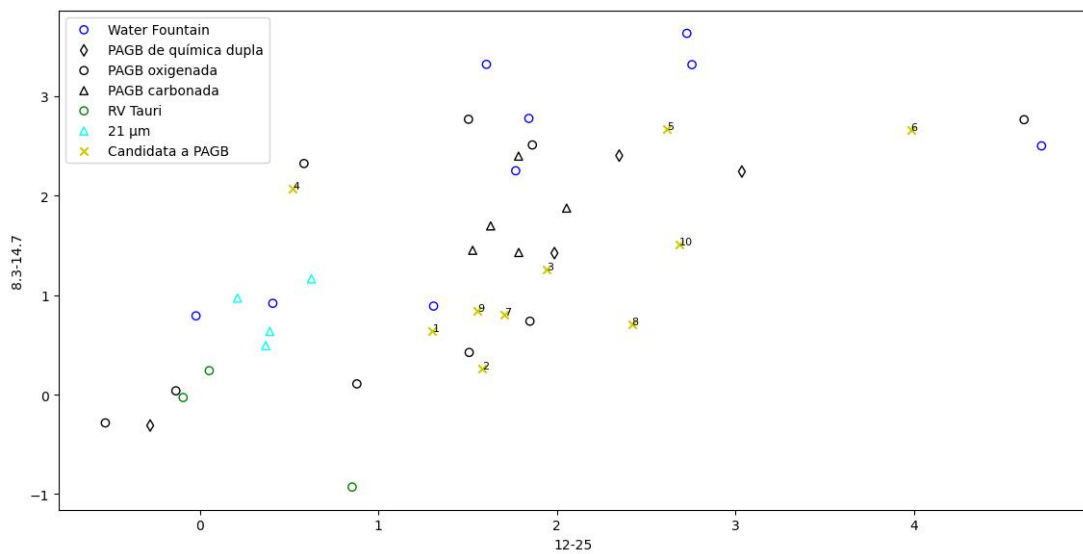


FIGURA C.6. Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 8.3 e 14.7 μm do MSX, e 12 e 25 do IRAS.

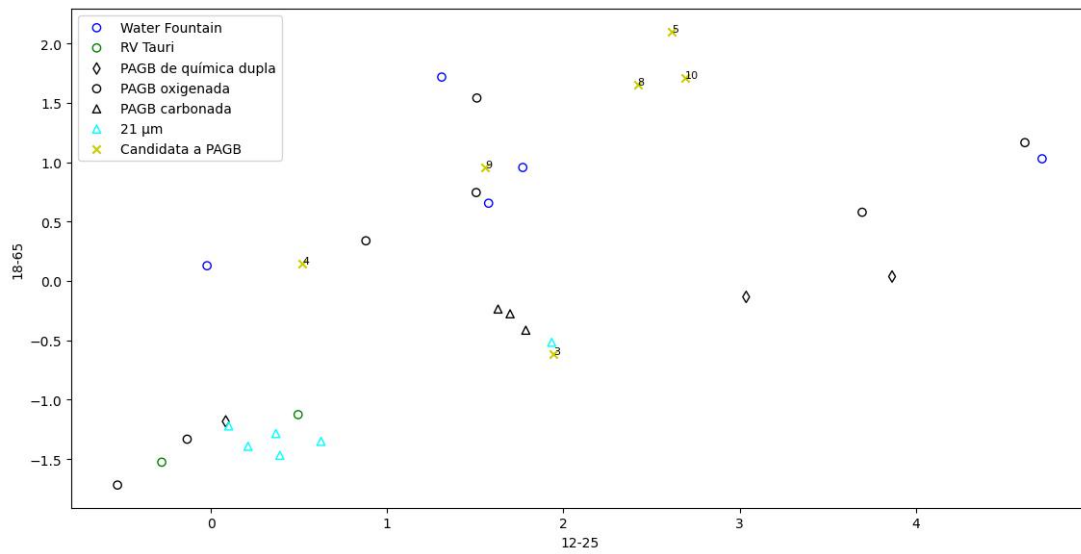


FIGURA C.7. Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 12 e 25 μm do IRAS, e 18 e 65 μm do AKARI.

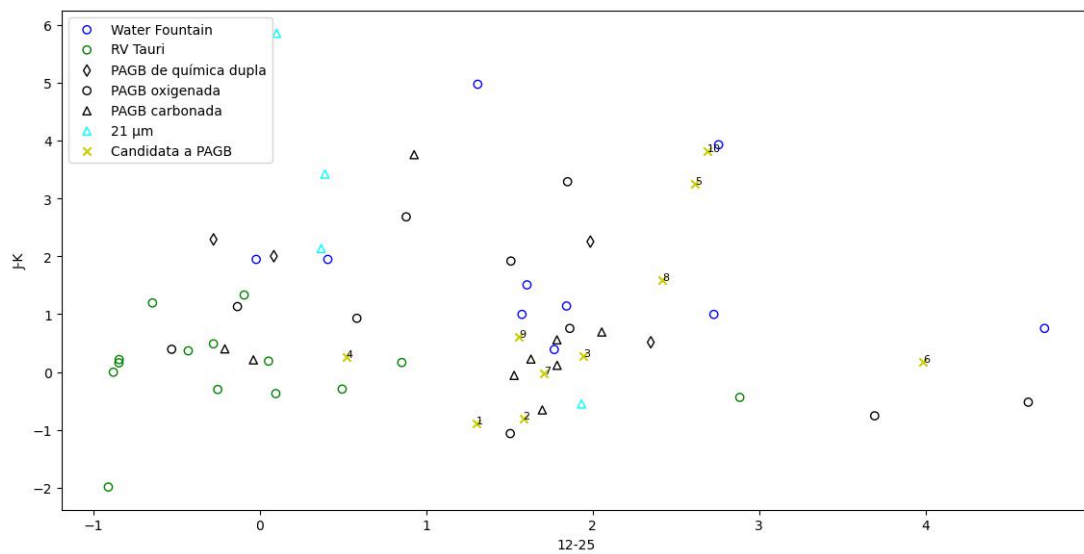


FIGURA C.8. Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 12 e 25 μm do IRAS, e J e K do 2MASS.

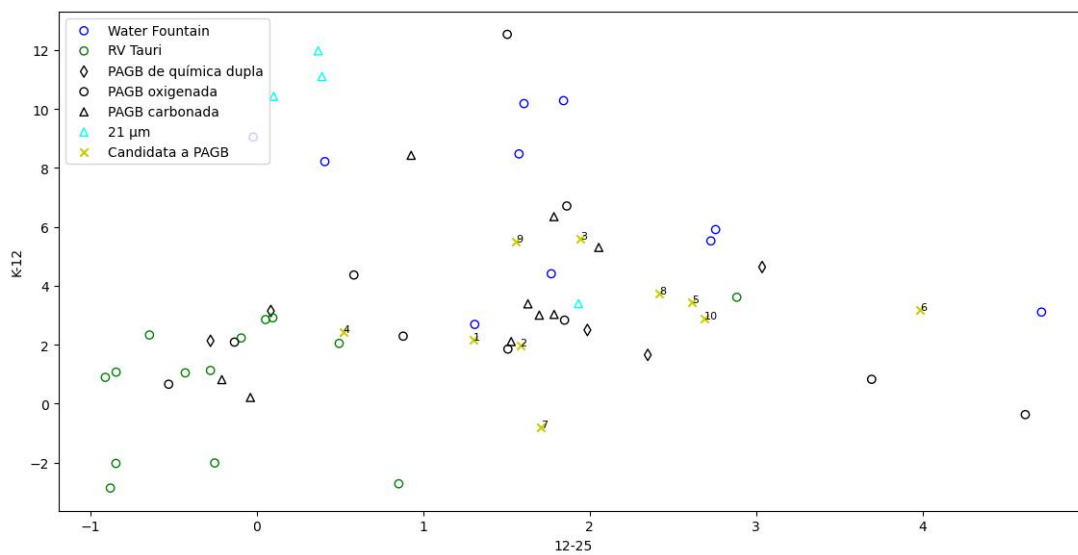


FIGURA C.9. Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 12 e 25 μm do IRAS, e K do 2MASS.

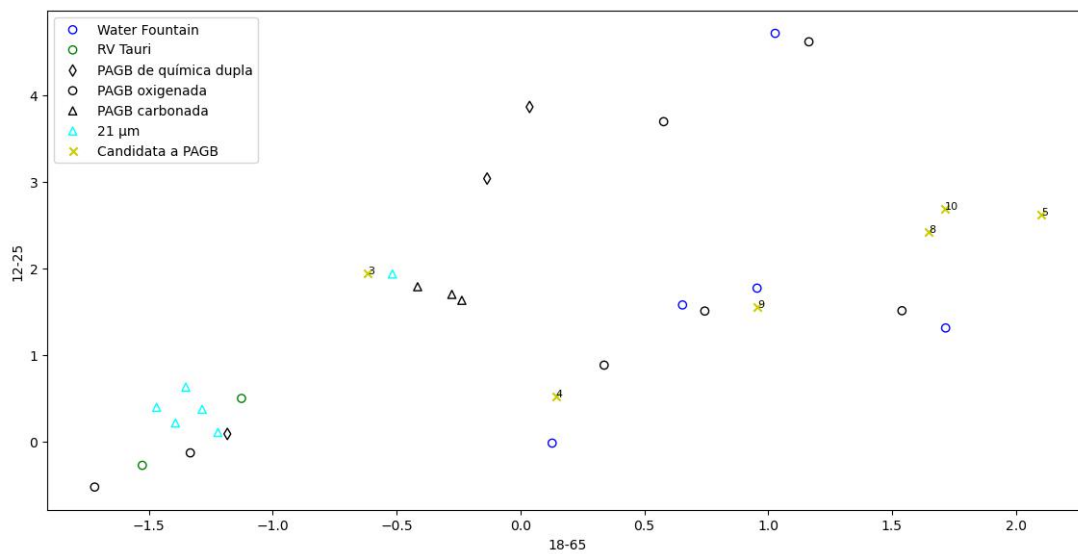


FIGURA C.10. Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 12 e 25 μm do IRAS, e 18 e 65 μm do AKARI.

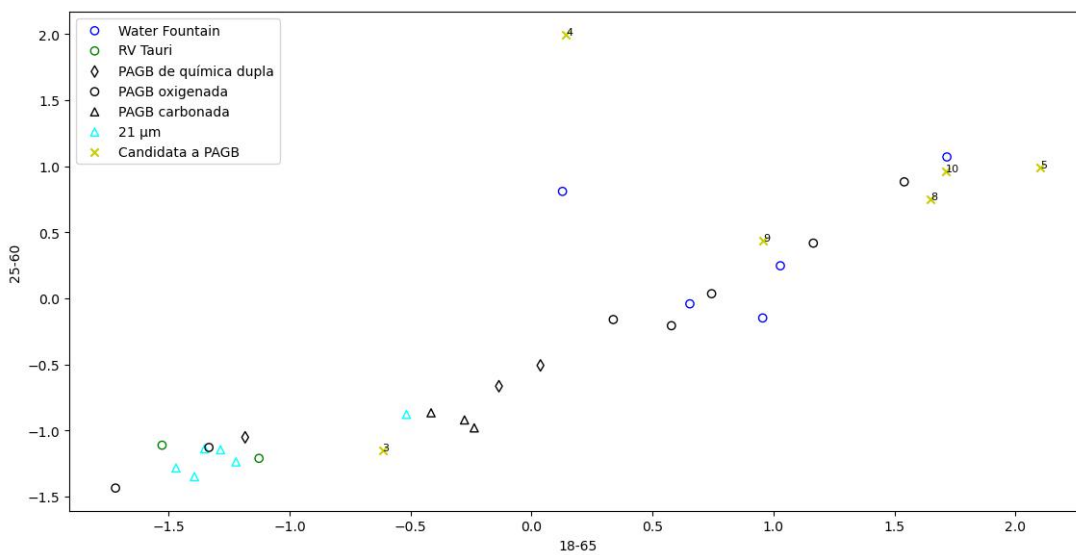


FIGURA C.11. Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 25 e 60 μm do IRAS, e 18 e 65 μm do AKARI.

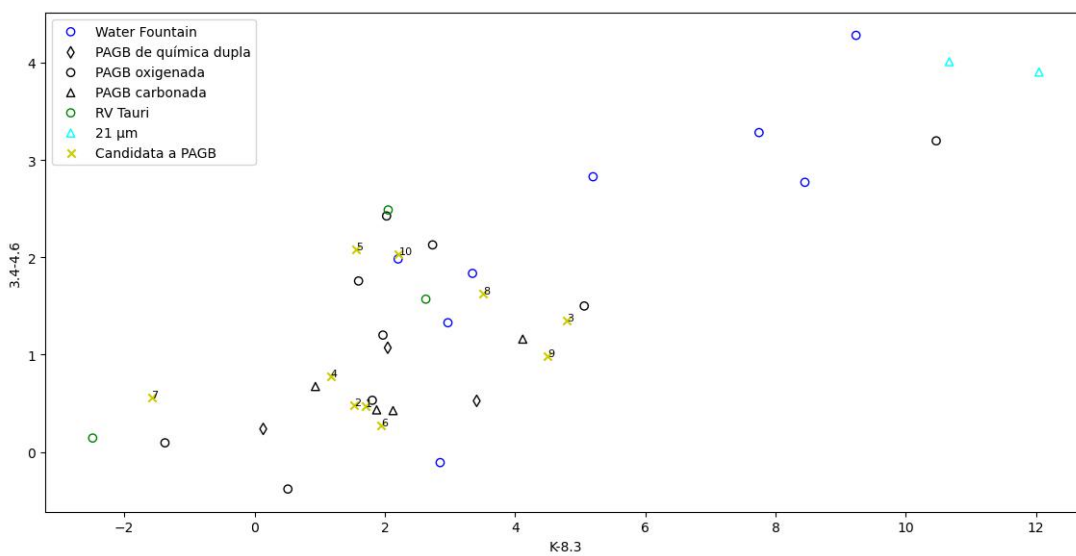


FIGURA C.12. Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 3.4 e 4.6 μm do WISE, 8.3 μm do MSX, e K do 2MASS.

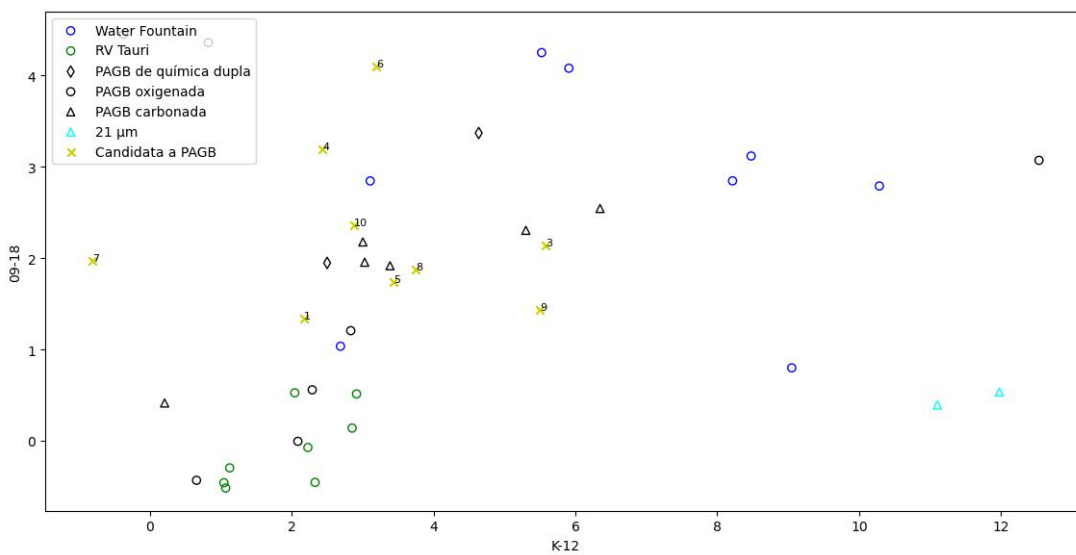


FIGURA C.13. Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 12 μm do IRAS, K do 2MASS, e 9 e 18 μm do AKARI.

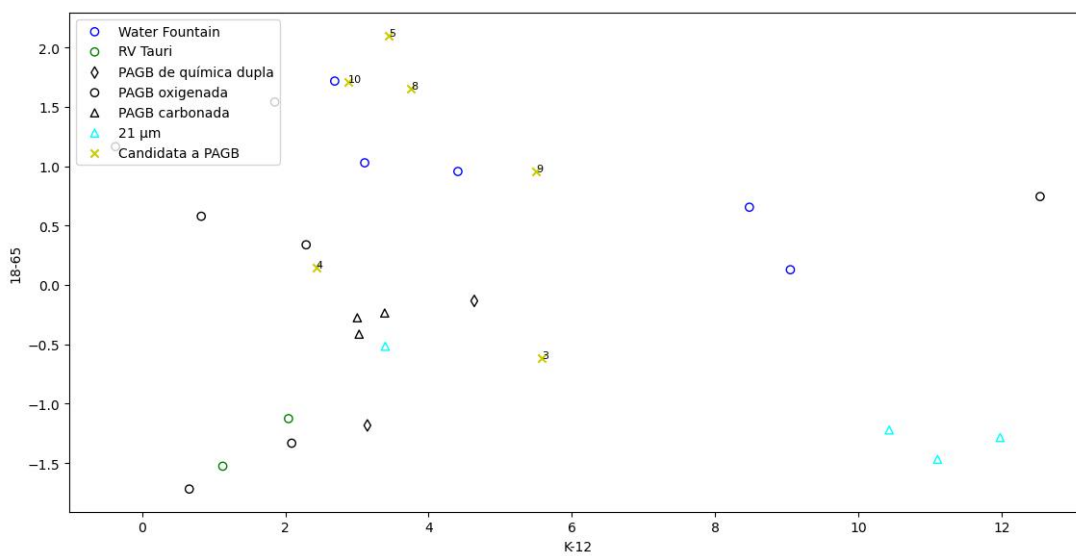


FIGURA C.14. Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 12 μm do IRAS, K do 2MASS, e 18 e 65 μm do AKARI.

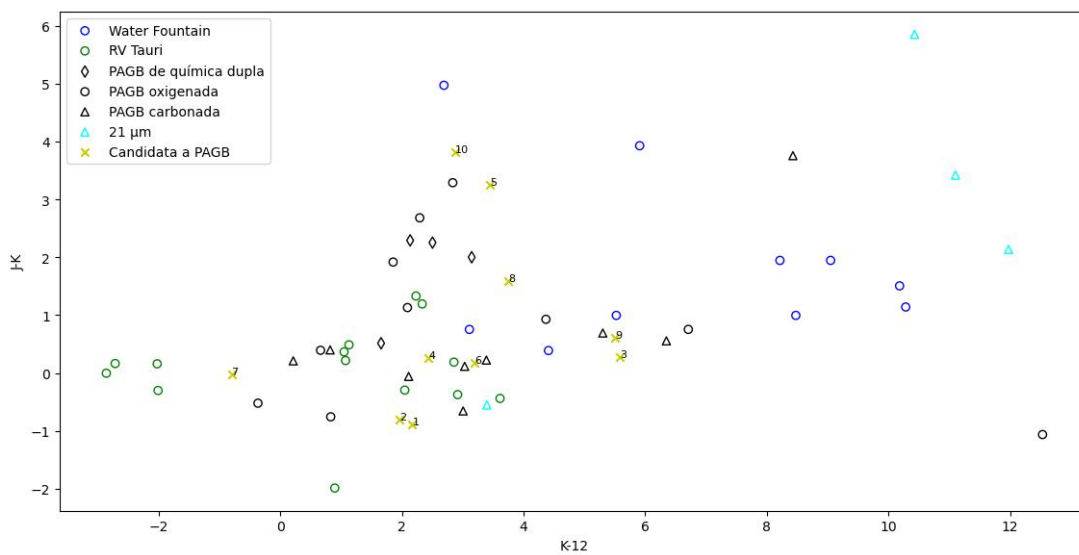


FIGURA C.15. Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas J e K do 2MASS, e 12 μm do IRAS.

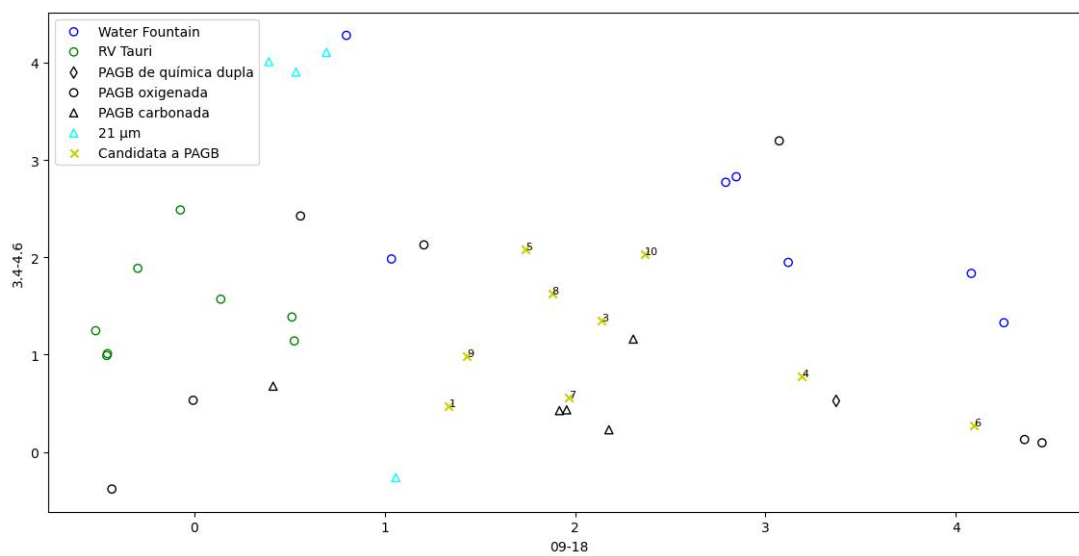


FIGURA C.16. Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 3.4 e 4.6 μm do WISE, e 9 e 18 μm do AKARI.

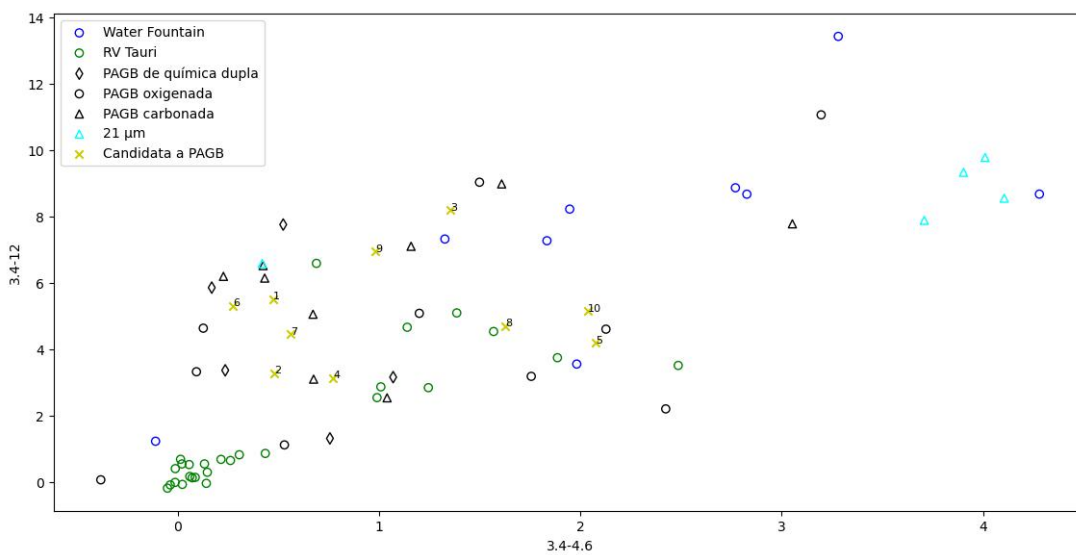


FIGURA C.17. Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 3.4, 4.6 e 12 μm do MSX.

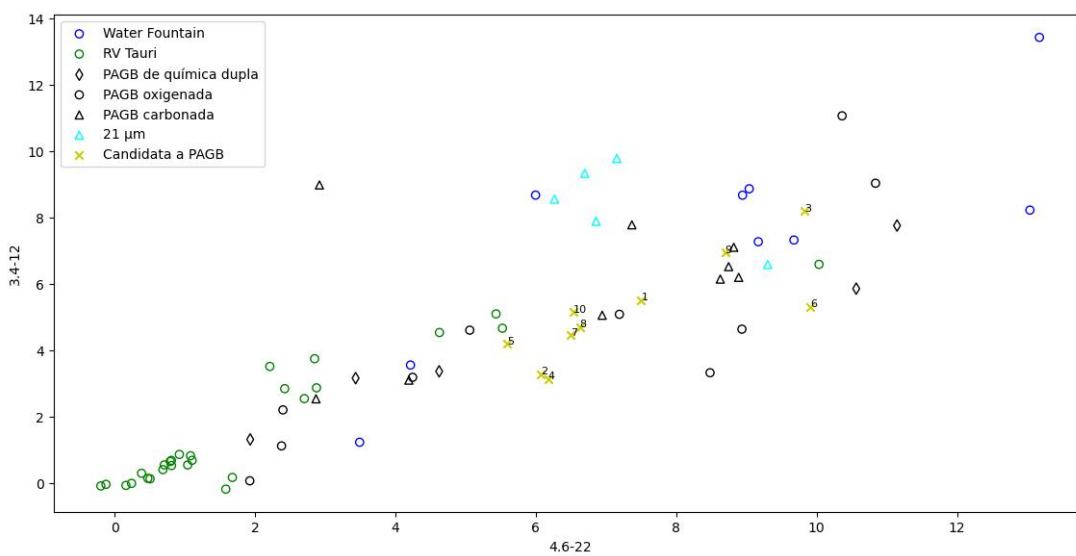


FIGURA C.18. Diagrama cor-cor para as estrelas da nossa amostra utilizando as bandas fotométricas 3.4, 4.6, 12 e 22 μm do MSX.