



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ESTUDO DA DEGENERESCÊNCIA DE MODELOS DE ACREÇÃO EM ANÃS BRANCAS MAGNÉTICAS

Alessandra de Souza Teixeira

Relatório de Iniciação Científica do
programa PIBIC, orientada pela
Dra. Cláudia Vilega Rodrigues.

URL do documento original:

<http://urlib.net/xx/yy>

INPE
São José dos Campos
2023

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ESTUDO DA DEGENERESCÊNCIA DE MODELOS DE ACREÇÃO EM ANÃS BRANCAS MAGNÉTICAS

Alessandra de Souza Teixeira

Relatório de Iniciação Científica do
programa PIBIC, orientada pela
Dra. Cláudia Vilega Rodrigues.

URL do documento original:

<http://urlib.net/xx/yy>

INPE
São José dos Campos
2023



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](#).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](#).

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Processo n° 136453/2022-8.

RESUMO

O objeto de estudo deste trabalho são as Variáveis Cataclísmicas (VCs), que são sistemas binários formados por uma anã branca e uma estrela da sequência principal de baixa massa (i.e. anã vermelha), sendo esta última a responsável pela transferência de matéria no sistema. Fazem parte da classificação das VCs as Variáveis Cataclísmicas Magnéticas (VCMs), nas quais a anã branca acreta matéria por meio de uma coluna de acreção magnética. Tais sistemas possuem forte campo magnético capaz de alterar a geometria do sistema. Na região da coluna de acreção magnética próxima à anã branca, ocorre um choque e o adensamento da matéria entre a superfície da anã branca e a frente de choque é chamado de região pós-choque (RPC). Essa região produz uma emissão que geralmente é a dominante no sistema, podendo ser maior que a das próprias estrelas que compõem o sistema binário. Os principais processos radiativos na RPC são a emissão ciclotrônica (no óptico) e *bremstrahlung* (em raios-X). Neste trabalho, propomos entender como a determinação da massa da anã branca é afetada pela degenerescência dos modelos, uma vez que entender a massa de uma estrela é uma das tarefas mais importantes em astrofísica. Para a modelagem da geometria e propriedades físicas das VCMs utilizamos o código CYCLOPS (*Cyclotron Emission of Polars*), escrito em IDL (*Interactive Data Language*) e algumas rotinas em C. O código permite calcular a emissão de uma RPC dada uma configuração física e geométrica da VCM, definida por uma série de parâmetros. Foram calculados espectros de raios-X de diferentes modelos, com diferentes parâmetros, que resultaram em uma degenerescência, isto é, diferentes parâmetros (entre eles a massa da anã branca) fornecem o mesmo espectro. Para entender o problema da degenerescência, foi feita uma busca por modelos produzidos com parâmetros diferentes, mas com espectros degenerados. A partir de um espectro de referência e usando o algoritmo genético *pikaia*, deixamos o campo magnético variar enquanto a massa da anã branca é mantida fixa, além de outros parâmetros importantes para o modelo, como por exemplo a taxa de acreção. O objetivo foi mapear a degenerescência entre a massa e o campo magnético. O aumento da massa leva a um aumento da temperatura pelo aumento da energia cinética depositada da RPC. O aumento do campo magnético, por outro lado, diminui a temperatura, pois o campo magnético atua como um mecanismo de resfriamento. Quando diminuimos a massa da anã branca (nos diferentes ajustes testados) precisamos diminuir o campo magnético para que a temperatura se mantenha similar ao modelo original., lembrando que a temperatura é o principal parâmetro da emissão de *bremstrahlung* e, portanto, do espectro de raios-X. Isto é, os espectros de raios-X são degenerados para diferentes combinações de massa da anã branca e o campo magnético, quando estas produzem uma RPC de temperatura similar.

Palavras-chave: Variáveis Cataclísmicas. Anãs Brancas. Modelos de transporte radiativo.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Ilustração de uma variável cataclísmica.	3
1.2 Uma partícula carregada negativamente sofre desvio devido a um núcleo pesado (positivo). Nesse processo, ocorre emissão de raios-X (emissão bremsstrahlung).	6
1.3 Região pós-choque de uma VC, onde há emissão bremsstrahlung e emissão ciclotrônica. A região em azul é a superfície da anã branca, definida pela área de acreção (S_b), pelo campo magnético (B_b) e a posição do choque (z) onde R_{WD} é o raio da anã branca e H_{sh} é a altura do choque em relação à superfície da anã branca.	7
1.4 Espectro ultravioleta e raios-X de uma VC. O espectro bremsstrahlung característico é compreendido entre 1 e 10^2 keV.	9
2.1 Diagrama representando a geometria de acreção: a anã branca, a coluna de acreção e a região emissora (pequena região branca próxima à superfície da anã branca). É também mostrado alguns parâmetros importantes utilizados no código.	14
2.2 Rotina xanalyse no ambiente IDL.	15
2.3 Espectro de raios-X obtido por xanalyse.	17
3.1 Espectro de raios-X do modelo 1a, não normalizado.	23
3.2 Espectro de raios-X do modelo 1a, normalizado.	24
3.3 Espectro de raios-X do modelo 1b, não normalizado.	25
3.4 Espectro de raios-X do modelo 1b, normalizado.	26

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Parâmetros de entrada do CYCLOPS	15
2.2 Dados de saída da rotina <i>xanalyse</i> . A unidade das últimas três colunas é counts/s/keV.	16
3.1 Relação entre massa e campo magnético para o modelo 1a não normalizado. .	19
3.2 Relação entre massa e campo magnético para o modelo 1a normalizado. . . .	20
3.3 Relação entre massa e campo magnético para o modelo 1b não normalizado. .	20
3.4 Relação entre massa e campo magnético para o modelo 1b normalizado. . . .	20
3.5 Relação entre demais parâmetros para o modelo 1a normalizado.	21
3.6 Relação entre demais parâmetros para o modelo 1a não normalizado.	21
3.7 Relação entre demais parâmetros para o modelo 1b não normalizado.	21
3.8 Relação entre demais parâmetros para o modelo 1b normalizado.	22

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Variáveis Cataclísmicas	2
1.2 Determinação da massa das VCMs	10
2 METODOLOGIA	13
2.1 Código CYCLOPS	13
2.1.1 Parâmetros do modelo	13
2.1.2 <i>xanalise</i>	14
2.1.3 <i>polar_pikaia</i>	15
3 RESULTADOS	19
4 CONCLUSÕES	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

1 INTRODUÇÃO

Variáveis cataclísmicas (VCs) são sistemas binários compactos formados por uma estrela de sequência principal de baixa massa (secundária) e uma anã branca (primária). A proximidade entre as estrelas faz com que ocorra transferência de massa da estrela primária para a secundária, assim ocorre o que chamamos de acreção de matéria pela anã branca. A transferência de massa de uma estrela para outra ocorre pelo Lóbulo de Roche, cujo formato depende das massas das estrelas e da distância entre elas (HELLIER, 2001). As VCs possuem também relevância no estudo da fase de envelope comum, que se espera seja uma fase evolutiva prévia a uma VC. Além disso, algumas VCs podem ser progenitoras de supernovas, o que também confere interesse a essa classe de objetos astrofísicos.

Uma classificação desses objetos é baseada na presença (ou não) de um campo magnético da anã branca, forte o suficiente para influenciar a física e a geometria da transferência de massa. Nas VCs não-magnéticas, a matéria se limita ao plano equatorial do sistema e forma um disco de acreção que se estende até muito próximo da anã branca. Já nas VCs magnéticas (VCMs), a matéria atinge a anã branca por uma estrutura definida pelo campo, a qual chamamos de coluna de acreção magnética. A coluna de acreção magnética estende-se da magnetosfera até a superfície da primária, seguindo a geometria definida pelas linhas de campo magnético. Assim, as VCs permitem o estudo dos processos de acreção, seja via disco ou via coluna.

Na região da coluna de acreção magnética próxima à anã branca, ocorre um choque e o adensamento da matéria entre a superfície da anã branca e a frente de choque é chamado de região pós-choque (RPC). Essa região produz uma emissão que geralmente é a dominante no sistema, podendo ser maior que a das próprias estrelas que compõem o sistema binário. Os principais processos radiativos na RPC são a emissão ciclotrônica (no óptico) e *bremsstrahlung* (em raios-X), sendo a primeira intrinsecamente polarizada.

Nesse projeto, propomos o estudo da degenerescência dos parâmetros do sistema envolvidos na determinação da emissão da coluna de acreção magnética. Nosso objetivo é determinar a relação quantitativa entre os parâmetros de espectros de raios-X degenerados. Para isso utilizamos o código CYCLOPS (*Cyclotron Emission of Polars*) para a modelagem da emissão óptica e em raios-X de colunas de acreção em anãs brancas magnéticas (COSTA; RODRIGUES, 2009; SILVA et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2019; BELLONI et al., 2021).

Em Belloni et al. (2021) é mostrado que a determinação de parâmetros importantes do sistema, dentre os quais a massa da anã branca, sofre de degenerescência quando baseada apenas na forma do espectro em raios-X, uma técnica bastante comum na literatura. Chamamos de degenerescência a situação na qual diferentes modelos de colunas de acreção - com diferentes valores de massa e campo magnético da anã branca, entre outros parâmetros físicos e geométricos - produzem a mesma emissão, ou seja, o mesmo espectro em raios-X ou a mesma radiação óptica.

1.1 Variáveis Cataclísmicas

O estudo das VCs surgiu em meados do século 16 com as primeiras observações de estrelas variáveis (WARNER, 1995). Com o desenvolvimento da fotometria fotoelétrica entre os anos 1940 e 1975, novas VCs foram descobertas. Com o avanço das técnicas, mais VCs foram incluídas nos catálogos nas últimas décadas. A primeira VC observada em raios-X foi EX Hydra, pelo telescópio espacial Uhuru, na década de 1970. Com o advento dos telescópios de raios-X, o número de detecções de VCs tem crescido. Esses sistemas também são observados em outras faixas de radiação eletromagnética, como em rádio, infravermelho, óptico, ultravioleta e raios gama.

Entender a evolução das VCs é um campo de estudo proeminente. Os processos físicos envolvidos incluem frenagem magnética por ventos estelares, perda de momento angular através da emissão de radiação gravitacional, perda de massa através de erupções de nova, entre outros (WARNER, 1995).

As VCs são sistemas binários de curto período orbital, tipicamente da ordem de algumas horas. O período orbital pode ser determinado a partir da Terceira Lei de Kepler (HELLIER, 2001):

$$P_{orb}^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(M + m)}, \quad (1.1)$$

onde M é a massa do sistema, m é a massa de um corpo orbitando as estrelas, e a é o raio da órbita.

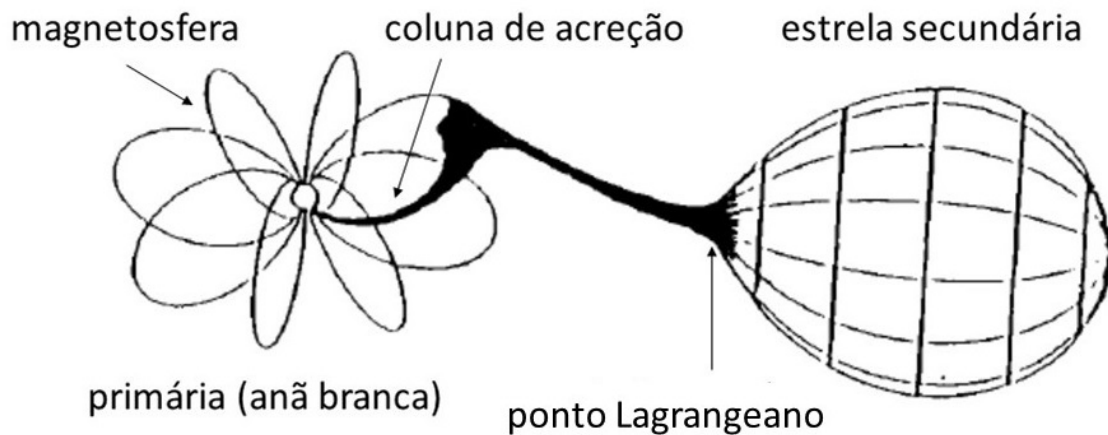
As VCs se classificam em sistemas magnéticos e não-magnéticos. Os sistemas magnéticos são denominados polares, com campos magnéticos intensos, acima de 10 MG; e as polares intermediárias possuem campos magnéticos mais fracos, entre 1 e 10 MG. Os sistemas não-magnéticos são conhecidos como novas (e suas subclasses). Nas polares, a estrela primária, cuja massa varia de 0,3 a 1,44 M_{\odot} , possui raio de

cerca de 7000 km e campo magnético na faixa de 10^7 a 10^8 G. A secundária possui massa de 0,075 a 0,5 M_{\odot} , $R = 0,15 R_{\odot}$ e campo magnético mais fraco (100 a 1000 G).

A transferência de matéria em uma variável cataclísmica ocorre pelo transbordamento do Lóbulo de Roche da estrela secundária (Figura 1.1). Quando a matéria atinge o ponto Lagrangeano (ponto L1) é realizada a transferência para a estrela primária. O formato do Lóbulo de Roche é determinado pela razão entre as massas das estrelas

$$q = \frac{M_2}{M_1}, \quad (1.2)$$

Figura 1.1 - Ilustração de uma variável cataclísmica.



Fonte: Adaptado de Warner (1995).

A matéria atinge a estrela primária formando um disco ou coluna de acreção (no caso dos sistemas magnéticos). No caso das VCMs a matéria segue o fluxo das linhas de campo magnético em direção aos polos da anã branca. A coluna de acreção magnética estende-se da magnetosfera até a superfície da primária, seguindo a geometria definida pelas linhas de campo magnético.

O momento magnético de uma polar é tipicamente $10^{24} Tm^3$ (HELLIER, 2001). O

raio da magnetosfera pode ser determinado a partir do momento magnético (Eq. 1.3) e a pressão magnética (Eq. 1.4)

$$\mu = Br^3 \quad (1.3)$$

$$P_{mag} = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (1.4)$$

isolando B na Eq. 1.3 e substituindo na Eq. 1.4 temos:

$$P_{mag} = \frac{\mu^2}{2\mu_0 r^6} \quad (1.5)$$

a pressão magnética é equivalente à pressão de arrasto do fluido (ρv^2), considerando um volume $V = zt = vAt$, onde z é a vazão, e a massa $m = \rho V = \rho vAt$, o momento linear fica

$$p = mv = \rho v^2 At \quad (1.6)$$

e a pressão se torna

$$P = \frac{F}{A} = \frac{p}{tA} = \frac{\rho v^2 At}{At} = \rho v^2 \quad (1.7)$$

igualando as duas pressões:

$$P_{mag} = \rho v^2 \Rightarrow \frac{\mu^2}{2\mu_0 r^6} = \rho v^2 \quad (1.8)$$

se o fluxo de acreção \dot{M} ocorre numa seção transversal A, temos

$$\rho = \frac{\dot{M}}{Av} \quad (1.9)$$

e a velocidade do fluxo é determinada pela conservação da energia mecânica:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{r} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2GM}{r}} \quad (1.10)$$

substituindo as equações 1.9 e 1.10 na equação 1.8 e elevando ao quadrado:

$$\frac{\mu^4}{4\mu_0^2 r^{12}} = \frac{\dot{M}^2}{A^2 v^2} \frac{4G^2 M^2}{r^2} \quad (1.11)$$

onde $v^2 = \frac{2GM}{r}$ temos:

$$\frac{\mu^4}{4\mu_0^2 r^{12}} = \frac{\dot{M}^2 r}{A^2 2GM} \frac{4G^2 M^2}{r^2} \quad (1.12)$$

isolando r e fazendo $A = 4\pi r^2$ temos que

$$r^7 = \frac{2\pi^2 \mu^4}{\mu_0^2 G M \dot{M}^2} \quad (1.13)$$

é o raio da magnetosfera, que também pode ser escrito como

$$r_{mag} = 5,5 \times 10^8 \frac{M_1^{1/7}}{M_\odot} R_g^{-2/7} L_{33}^{-2/7} \mu_{30}^{4/7} (cm) \quad (1.14)$$

onde:

R_g = raio da anã branca (10^9 cm)

M_1 = massa da anã branca

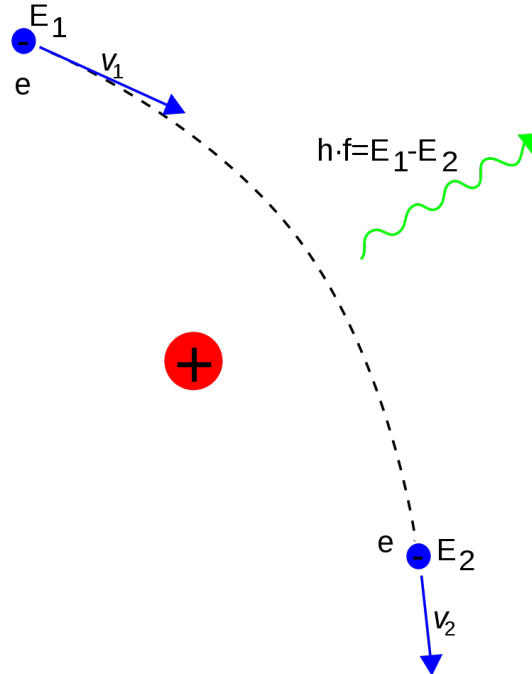
L_{33} = luminosidade do sistema (10^{33} erg/s)

μ_{30} = momento magnético da anã branca (10^{30} Gcm³)

O campo magnético faz com que os elétrons tenham uma trajetória circular, produzindo emissão ciclotrônica polarizada, dominante no infravermelho e óptico. Quando o campo elétrico, por sua vez, causa uma aceleração nos elétrons, temos a emissão *bremsstrahlung* (Figura 1.2).

Durante a transferência de massa, em queda livre, há transferência de energia po-

Figura 1.2 - Uma partícula carregada negativamente sofre desvio devido a um núcleo pesado (positivo). Nesse processo, ocorre emissão de raios-X (emissão bremsstrahlung).



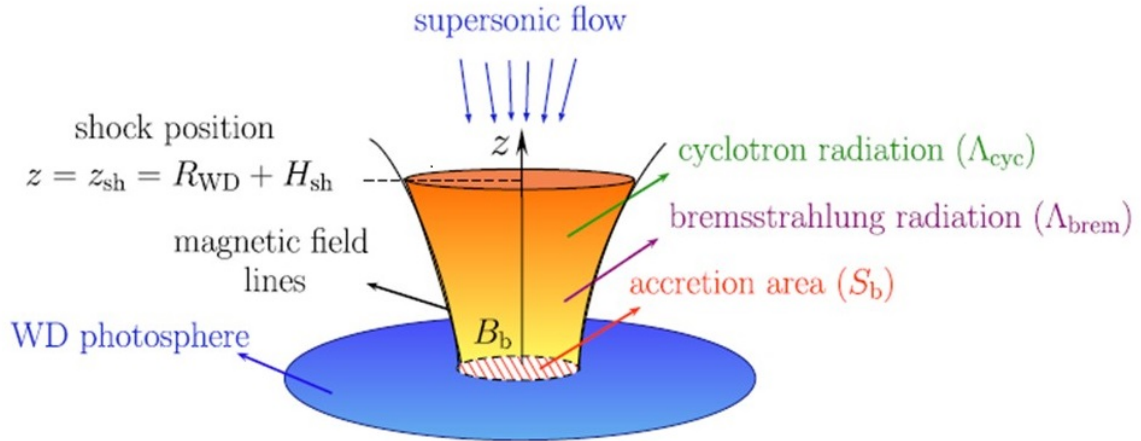
Fonte: WIKIPEDIA, THE FREE ENCYCLOPEDIA (2023)

tencial em energia cinética, e de energia cinética em raios-X, o que caracteriza as VCMs como fontes de raios-X. Os processos radiativos de uma VC são ilustrados na Figura 1.3.

A região pós-choque é a parte mais densa do fluxo de acreção de uma VCM, de forma que a emissão bremsstrahlung mais acentuada ocorre nesta região. Uma VCM emite raios-X via emissão térmica opticamente fina ($\tau < 1$) (SHAW et al., 2020). Muitas VCs podem apresentar regiões de profundidade óptica intermediária ($\tau \sim 1$) (MUKAI, 2017).

O mecanismo ocorre da seguinte maneira: um plasma quente de átomos ionizados emite radiação através das colisões entre elétrons e íons. Os elétrons experimentam grandes acelerações nas colisões e, portanto, irradiam eficientemente fótons, que escapam do plasma se ele for opticamente fino. A emissividade do plasma j_ν , potência emitida em função da frequência, é dada por

Figura 1.3 - Região pós-choque de uma VC, onde há emissão bremsstrahlung e emissão ciclotrônica. A região em azul é a superfície da anã branca, definida pela área de acreção (S_b), pelo campo magnético (B_b) e a posição do choque (z) onde R_{WD} é o raio da anã branca e H_{sh} é a altura do choque em relação à superfície da anã branca.



Fonte: Belloni et al. (2021).

$$J_\nu(\nu, T) \propto g(\nu, T) n_e^2 T^{-1/2} e^{-\frac{h\nu}{kT}} \quad (1.15)$$

onde:

n_e é a densidade eletrônica

T é a temperatura

ν é a frequência

g é o fator de Gaunt para o caso não-relativístico, que determina a forma do espectro.

O fator de Gaunt depende da temperatura e da frequência do plasma, dado pela Eq. 1.16, o espectro aumenta lentamente em direção às frequências mais baixas (BRADT, 2008).

$$g(\nu, T) = \frac{\sqrt{3}}{\pi \ln\left(\frac{2.25kT}{h\nu}\right)} \quad (1.16)$$

A emissão bremsstrahlung de uma VC domina entre os intervalos 1 a 100 keV (raios-X duros) (Figura 1.4). A densidade na região pós-choque é o principal parâmetro responsável pelo resfriamento (BELLONI et al., 2021). Quanto maior a densidade, maior é a emissão bremsstrahlung. O código CYCLOPS é responsável pelo cálculo da emissividade do bremsstrahlung e do transporte radiativo (SILVA, 2013). A emissão é representada por uma matriz de fluxos bidimensional, sendo cada fluxo em uma linha de visada. O espectro de raios-X é calculado combinando os fluxos em todas as fases da rotação (BELLONI et al., 2021).

O fluxo de acreção inicialmente “frio” e a velocidades supersônicas, possui uma velocidade de queda livre de

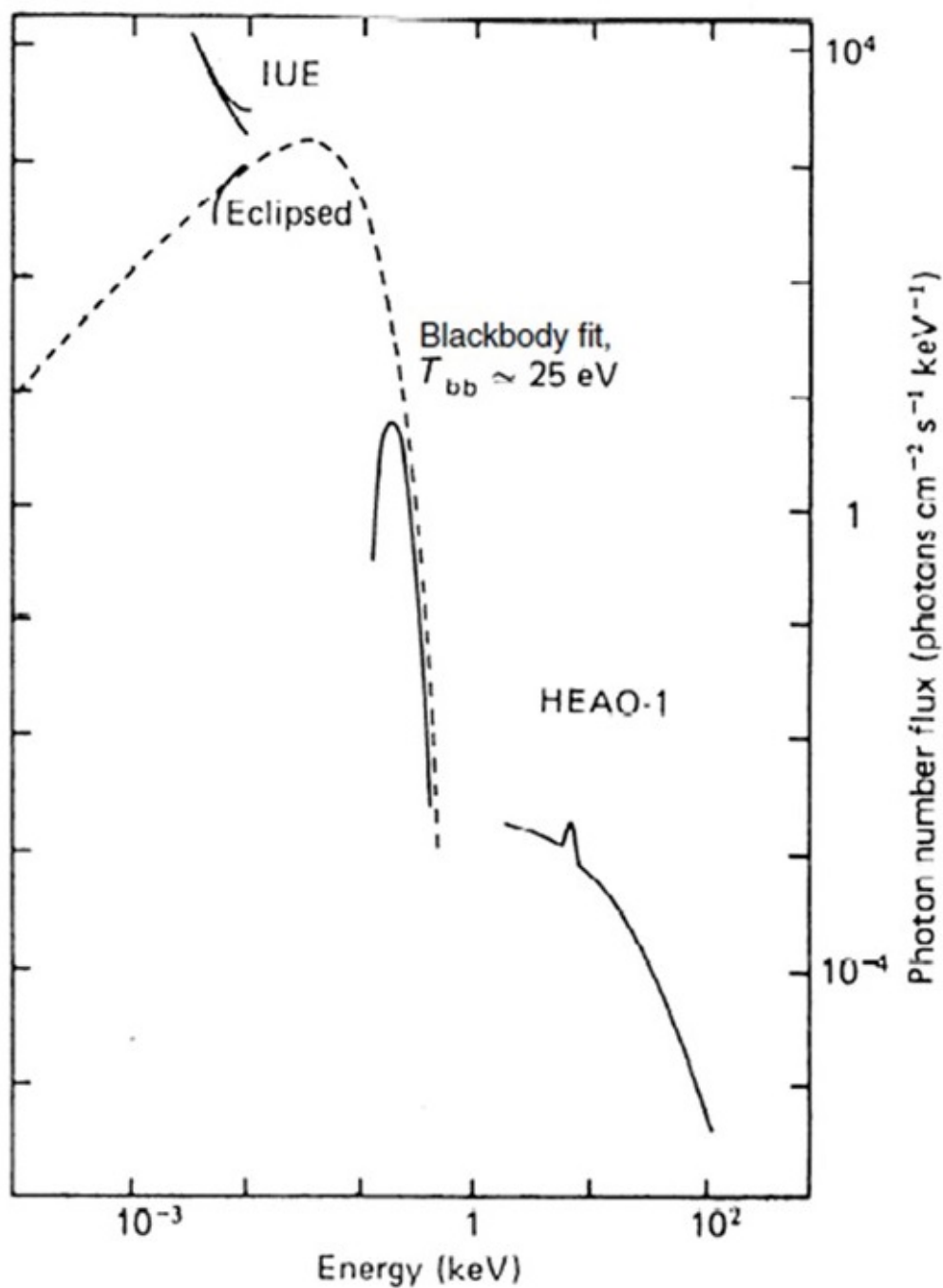
$$v_{ff} = \sqrt{\frac{2GM_{WD}}{R_{WD}}} \quad (1.17)$$

a velocidade da matéria acretada, v_{ff} , determina a dureza do espectro de raios-X e a temperatura da região pós-choque dada por:

$$kT = \frac{3}{8} \frac{GM_{WD}\mu m_H}{R_{WD}} \quad (1.18)$$

onde k é a constante de Boltzmann, m_H é a massa do próton e μ é o peso molecular médio do gás (MUKAI, 2017).

Figura 1.4 - Espectro ultravioleta e raios-X de uma VC. O espectro bremsstrahlung característico é compreendido entre 1 e 10^2 keV.



Fonte: Frank et al. (2002).

1.2 Determinação da massa das VCMs

A massa de uma VCM pode ser obtida pelo seu espectro de raios-X, que indica a temperatura na RPC, definida pela razão entre a massa da anã branca e seu raio (LUTOVINOV et al., 2020). Ao longo deste projeto buscamos entender o quão confiável é a determinação da massa a partir de espectros de raios-X.

O trabalho de Aizu (1973) apresenta um modelo de emissão de raios-X da região de acreção de uma VC, demonstrando que a temperatura do plasma é determinada apenas pela massa da estrela, enquanto que a densidade e a espessura do plasma dependem da taxa de acreção de matéria. A transformação da energia potencial gravitacional em energia térmica durante o choque revela que a temperatura do choque depende da massa. Como o espectro de *bremstrahlung* depende da temperatura, é possível estimar a massa da anã branca a partir dele.

Um exemplo de aplicação recente dessa técnica pode ser encontrada em Suleimanov et al. (2019). O modelo utilizado calcula a massa baseada na temperatura do choque, que depende da taxa de queda da matéria em direção à estrela primária, da massa e do raio da anã branca. O método requer a estimativa do tamanho (finito) da magnetosfera, ou seja, é necessário determinar o raio da magnetosfera (r_m) que pode ser obtido pela determinação da frequência de quebra no espectro de potência de raios-X ou das curvas de luz ou ainda assumindo corrotação (Rc), onde $Rc = r_m$. A frequência de quebra corresponde à frequência kepleriana na borda interna do disco de acreção. Nos casos em que nenhuma quebra foi detectada, devido a dados insuficientes, os autores assumiram que o raio interno do disco de acreção é igual ao raio da magnetosfera em uma situação de corrotação da fonte, isto é, a frequência kepleriana do raio interno do disco de acreção é igual à frequência de rotação da anã branca.

Uma das características do método é utilizar geometria de quase-dipolo da região pós-choque, além de considerar a taxa de acreção de massa local (a), definida pela taxa de acreção dividida pela área. Os autores utilizaram diferentes propriedades de região pós-choque (altas e baixas) que permitem resultados mais significativos para anãs brancas de maior massa. Alguns dos resultados obtidos foram que muitas polares intermediárias possuem baixa taxa de acreção de massa em comparação com valores previstos e a taxa de acreção diminui quando o período orbital aumenta.

O trabalho também investigou o tamanho da magnetosfera na nova anã GK Per nos estados eruptivo e de quiescência (estado de baixa emissão). Pela primeira vez

detectaram uma quebra no espectro de potência durante a quiescência, e a mudança na frequência de quebra com o fluxo, o que permite restringir a dependência de r_m com a taxa de acreção.

Shaw et al. (2020) utilizaram esse método para determinar a massa de 19 VCMs. Uma curva massa-raio da magnetosfera e uma curva do espectro de potência da curva de luz são construídas. A intersecção das duas curvas permite determinar a massa.

Podemos sintetizar algumas diferenças entre os trabalhos e o nosso projeto. No modelo dos autores, a massa da anã branca e o raio da magnetosfera são os parâmetros livres, enquanto nós utilizamos a massa e o campo magnético como parâmetros livres. Também não consideramos a área (S_b) da região pós-choque constante^{1.3}, como é o caso dos trabalhos. Ambos levam em conta a taxa de acreção específica, a taxa de transferência de matéria e o raio da magnetosfera. Nesse contexto, a taxa de transferência de matéria é a quantidade de massa pelo tempo sendo transferida para a estrela primária, enquanto que a taxa de acreção específica é massa por tempo por área, ou seja, a taxa com que a matéria é acretada em uma dada área específica. Em Suleimanov et al. (2019) é utilizada sempre uma mesma área, uma dada taxa de transferência corresponde a uma única taxa de acreção. Já no CYCLOPS, a área também é uma variável, assim uma dada taxa de transferência pode corresponder a diferentes taxas de acreção a depender do valor da área. No nosso trabalho, não utilizamos a frequência de quebra como os autores. Outra diferença é que o CYCLOPS fornece uma emissão de uma região tridimensional, tendo como resultado o espectro em raios-X, as curvas de luz no óptico e em raios-X e as imagens por fase.

2 METODOLOGIA

2.1 Código CYCLOPS

O código CYCLOPS¹ (*Cyclotron Emission of Polars*) é escrito em IDL² (*Interactive Data Language*). Algumas rotinas são escritas em C. O CYCLOPS calcula o transporte radiativo das VCs: a emissão ciclotrônica e a emissão *bremsstrahlung*. O cálculo é feito em uma região tridimensional composta por elétrons térmicos imersos em um campo magnético (COSTA; RODRIGUES, 2009). Com o CYCLOPS é possível (1) fazer a modelagem de curvas de luz e polarização no óptico considerando a emissão ciclotrônica e uma componente não polarizada; (2) fazer a modelagem do contínuo de espectros da emissão ciclotrônica; (3) modelar o contínuo de espectros de raios-X; (4) modelar as curvas de luz em raios-X a partir de espectros de raios-X; (5) realizar um ajuste simultâneo de dados no óptico, infravermelho e raios-X (SILVA, 2013). No presente projeto, utilizamos o CYCLOPS para modelar a emissão em raios-X.

As rotinas utilizadas no projeto foram *xanalyse* e *polar_pikaia*, as quais requerem um arquivo de parâmetros físicos e geométricos, que necessita de um arquivo de dados para determinar os modelos. A rotina *xanalyse* calcula o qui-quadrado, a curva de luz no óptico e em raios-X e o espectro em raios-X. A saída é um arquivo de dados contendo a energia em keV, o modelo e o erro. A rotina *polar_pikaia* busca modelos com o menor qui-quadrado a partir dos dados obtidos em *xanalyse*. Utilizamos a *polar_pikaia* para buscar modelos degenerados de anãs brancas, deixando a massa fixa e o campo magnético variando. O procedimento foi executado para modelos normalizados e não normalizados.

2.1.1 Parâmetros do modelo

Uma representação dos parâmetros do sistema é mostrada na Figura 2.1. O arquivo de parâmetros físicos e geométricos é composto pelos seguintes itens:

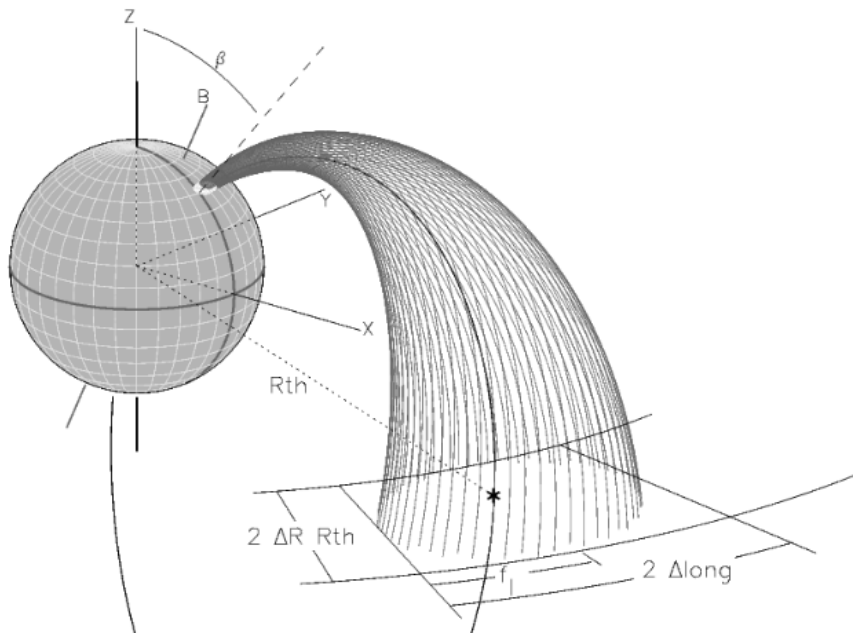
- inclinação do sistema (i);
- ângulo entre o polo da anã branca e o centro da região pós-choque (β);
- semi-amplitude da extensão azimutal da região de acoplamento em graus (Δlong);
- semi-amplitude da extensão radial da região de acoplamento (ΔR);

¹<<https://github.com/claudiavr/Cyclops>>

²<<https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/IDL>>

- latitude do eixo do campo magnético em graus (B_{lat});
- longitude do eixo do campo magnético em graus (B_{long});
- massa da anã branca em unidades de massas solares (M_{WD});
- campo magnético no polo magnético da anã branca em Gauss (B_p);
- logaritmo da taxa de transferência de massa da secundária para a primária em unidades de massas solares/ano (\dot{M}_{WD}).

Figura 2.1 - Diagrama representando a geometria de acreção: a anã branca, a coluna de acreção e a região emissora (pequena região branca próxima à superfície da anã branca). É também mostrado alguns parâmetros importantes utilizados no código.



Fonte: Costa e Rodrigues (2009).

A Tabela 2.1 apresenta os valores dos parâmetros utilizados nos modelos. Alguns parâmetros são iguais para todos os modelos, como a inclinação (45°) e o eixo do campo magnético (latitude e longitude), em que os valores são 90° e 0° , respectivamente.

2.1.2 *xanalyse*

No ambiente IDL é executada a rotina *xanalyse* (Figura 2.2) com o arquivo de entrada no formato *.inp* com os parâmetros físicos e geométricos. A *xanalyse* retorna um

Tabela 2.1 - Parâmetros de entrada do CYCLOPS

Modelo	M_{WD} (M_{\odot})	B_p (MG)	\dot{M}_{WD} ($10^{-10} M_{\odot} yr^{-1}$)	$\Delta long$ ($^{\circ}$)	ΔR	β ($^{\circ}$)
1a	1.35	29	0.50	63.2	0.156	48.1
1b	1.18	21	0.39	10.1	0.330	45.1

arquivo de dados com o modelo calculado e o erro (Tabela 2.2) e o espectro em raios-X (Figura 2.3). O modelo calculado é da emissão de uma região pós-choque dada uma configuração física e geométrica da VCM, definida por uma série de parâmetros.

Figura 2.2 - Rotina xanalyse no ambiente IDL.

```
Total chi-square - considering peso_ch.....: 3.6970321e-14
Optical flux chi-square .....: -NaN
Optical circular polarization chi-square ..: -NaN
Optical linear polarization chi-square ....: -NaN
Optical position angle chi-square .....: -NaN
X-ray spectrum chi-square .....: 3.6970321e-14
X-ray light-curve chi-square .....: 0.0000000
% Program caused arithmetic error: Integer divide by 0
% Program caused arithmetic error: Floating illegal operand
IDL>
```

2.1.3 *polar_pikaia*

A rotina *polar_pikaia* procura o melhor modelo de um conjunto de modelos. O melhor modelo será aquele com menor qui-quadrado. Fixamos valores para a massa da anã branca (M_{WD}) e deixando o campo magnético (B) variar de modo a encontrar modelos degenerados nesses dois parâmetros. Isso é feito para diferentes conjuntos dos demais parâmetros de modo a mapear o quanto a degenerescência entre M_{WD} e B depende dos demais parâmetros do problema. Cada ajuste realizado fornece um ponto no gráfico que mapeia a degenerescência entre M_{WD} e B .

Depois, para cada valor de massa da anã branca, criamos 9 modelos degenerados de massa 0.45 a 1.25 M_{\odot} , com o mesmo valor do campo magnético resultante. A *polar_pikaia* possui 3 arquivos de saída:

- .log: apresenta o detalhamento do cálculo do modelo;
- .ini: registra os parâmetros de entrada;

Tabela 2.2 - Dados de saída da rotina *xanalise*. A unidade das últimas três colunas é counts/s/keV.

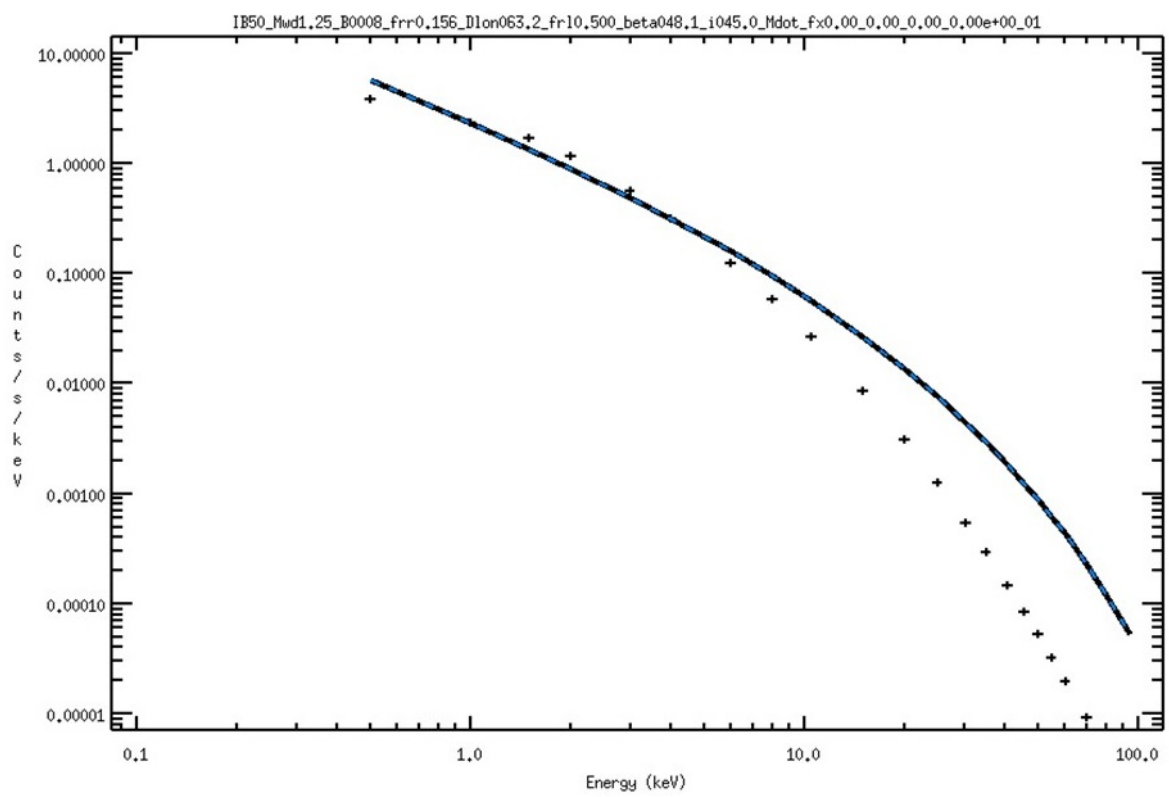
E(keV)	Modelo	Dados	Erro dos dados	Modelo não absorvido
0.5000001	12.413825	12.4591	2.13011e-23	12.413825
1.0000000	4.3358748	4.35554	8.91613e-24	4.3358748
1.5000000	2.1937772	2.20788	5.27651e-24	2.1937772
2.0000000	1.3019364	1.31378	3.60444e-24	1.3019364
3.0000000	0.58467969	0.594054	2.07301e-24	0.58467969
4.0000001	0.31380703	0.321449	1.38005e-24	0.31380703
6.0000000	0.11891593	0.124082	7.57175e-25	0.11891593
8.0000002	0.055076434	0.0586526	4.82576e-25	0.055076434
10.500000	0.024635158	0.0269708	3.07740e-25	0.024635158
15.000000	0.0074579678	0.00862719	1.63061e-25	0.0074579678
20.000000	0.0024734034	0.00306169	9.32216e-26	0.0024734034
25.000001	0.00094976129	0.00126567	5.83173e-26	0.00094976129
30.500000	0.00037238978	0.000541888	3.72410e-26	0.00037238978
35.000000	0.00018535635	0.000291459	2.67925e-26	0.00018535635
40.500002	8.4372183e-05	0.000146886	1.85469e-26	8.4372183e-05
45.500001	4.3424454e-05	8.35078e-05	1.36279e-26	4.3424454e-05
50.000001	2.4731543e-05	5.23134e-05	1.05079e-26	2.4731543e-05
55.000000	1.3675225e-05	3.23571e-05	7.99991e-27	1.3675225e-05
60.500001	7.3758702e-06	1.98863e-05	6.02647e-27	7.3758702e-06
70.000001	2.7231721e-06	9.35343e-06	3.82198e-27	2.7231721e-06
80.500001	9.8246377e-07	4.50520e-06	2.40472e-27	9.8246377e-07
94.500001	2.7890090e-07	1.93397e-06	1.36333e-27	2.7890090e-07

- .par: apresenta um modelo em cada linha, com os valores dos parâmetros, o qui-quadrado e a convergência do campo magnético (parâmetro livre).

A polar_pikaia foi executada em dois procedimentos. O primeiro não considerou os erros dos dados observacionais, enquanto que o novo procedimento adotou o qui-quadrado considerando os erros dos dados observacionais como peso. Como resultado, obteve-se um peso maior para as maiores energias, indicado pela contribuição do qui-quadrado que foi maior para as maiores energias.

O valor ajustado para B é utilizado no arquivo de entrada da xanalise, e executado novamente para gerar o espectro. Os resultados fornecidos pelo algoritmo e os espectros dos modelos são apresentados no capítulo 3.

Figura 2.3 - Espectro de raios-X obtido por xanalise.



3 RESULTADOS

Com o objetivo de mapear a degenerescência entre a massa e o campo magnético da anã branca, apresentamos a seguir os resultados do CYCLOPS. Foram executados modelos normalizados e não normalizados. Modelos normalizados são forçados em 1 keV e os modelos não normalizados são dados em unidades físicas.

As tabelas 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 apresentam o resultado ao executar `polar_pikaia`. Foram executados 9 ajustes com massas diferentes, de $0.45 M_{\odot}$ a $1.25 M_{\odot}$. O intervalo de massa foi o mesmo para os modelos 1a e 1b. Para cada massa, é buscado o valor de campo magnético que produz um espectro o mais próximo possível no modelo base (modelo original usado como referência).

Os resultados indicam que conforme a massa diminui, o valor do campo magnético diminui, exceto para as massas mais baixas (0.45 e $0.55 M_{\odot}$) no modelo 1a. O melhor modelo calculado foi o de massa $0.95 M_{\odot}$ para o não normalizado, e $1.25 M_{\odot}$ para o modelo normalizado, no caso do modelo 1a. Para o modelo 1b, o melhor modelo resultou em $1.25 M_{\odot}$ para o não normalizado, e $0.95 M_{\odot}$ com normalização.

A partir dos valores de campo magnético obtidos, a rotina `xanalyse` foi executada para calcular os espectros em raios-X. As tabelas 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8 apresentam para cada modelo a relação com o raio da anã branca, a temperatura do choque, a área da base da coluna e a altura total da coluna do choque. A fins de comparação, percebemos que quanto menor a massa, menor a temperatura do choque, como esperado, e maior é a área da base da coluna e a altura total.

Tabela 3.1 - Relação entre massa e campo magnético para o modelo 1a não normalizado.

Modelo	M_{WD} (M_{\odot})	B_{WD} (MG)	Qui-quadrado
1a - original	1.35	28.7	0.0
1	1.25	16.7	1.847e-02
2	1.15	11.3	4.832e-01
3	1.05	8.8	1.355e-02
4	0.95	7.3	2.966e-03
5	0.85	6.3	3.095e-01
6	0.75	4.2	2.069e-02
7	0.65	1.9	8.719e-03
8	0.55	2.3	2.364e+00
9	0.45	2.5	8.904e+00

Tabela 3.2 - Relação entre massa e campo magnético para o modelo 1a normalizado.

Modelo	M_{WD} (M_{\odot})	B_{WD} (MG)	Qui-quadrado
1a - original	1.35	28.7	7.246e-14
1	1.25	18.1	7.995e-05
2	1.15	13.1	2.124e-04
3	1.05	9.7	9.955e-05
4	0.95	7.3	2.977e-04
5	0.85	5.0	7.222e-04
6	0.75	3.9	2.772e-04
7	0.65	1.9	1.280e-02
8	0.55	0.8	3.893e-01
9	0.45	0.9	2.038e+00

Tabela 3.3 - Relação entre massa e campo magnético para o modelo 1b não normalizado.

Modelo	M_{WD} (M_{\odot})	B_{WD} (MG)	Qui-quadrado
1b - original	1.18	39.5	1.270e-01
1	1.25	49.5	1.221e-01
2	1.15	37.4	1.950e-01
3	1.05	30.7	2.082e-01
4	0.95	22.6	1.547e-01
5	0.85	19.3	1.591e-01
6	0.75	15.6	1.409e-01
7	0.65	13.4	1.969e-01
8	0.55	10.1	2.075e-01
9	0.45	7.3	2.343e-01

Tabela 3.4 - Relação entre massa e campo magnético para o modelo 1b normalizado.

Modelo	M_{WD} (M_{\odot})	B_{WD} (MG)	Qui-quadrado
1b - original	1.18	23.4	1.103e-06
1	1.25	29.0	3.806e-05
2	1.15	21.1	3.386e-05
3	1.05	16.3	1.238e-04
4	0.95	13.6	1.153e-05
5	0.85	10.3	5.229e-05
6	0.75	7.9	3.801e-05
7	0.65	5.0	1.109e-04
8	0.55	0.6	1.435e-02
9	0.45	3.1	4.610e-01

Tabela 3.5 - Relação entre demais parâmetros para o modelo 1a normalizado.

$M_{WD} (M_{\odot})$	B (MG)	$R_{WD} (10^{-4} R_{\odot})$	T (keV)	$S_b (10^{16} cm^2)$	$H (R_{WD})$
1.25	18.1	49	50	3.47	0.0276
1.15	13.1	62	35	5.53	0.0437
1.05	9.7	73	26	7.80	0.0664
0.95	7.3	84	19	10.33	0.0957
0.85	5	95	13	13.19	0.1423
0.75	3.9	106	10	16.50	0.1687
0.65	1.9	119	7	20.43	0.2048
0.55	0.8	132	6	25.26	0.1942
0.45	0.9	148	4	31.48	0.1709

M_{WD} é a massa da anã branca, B é o campo magnético, R_{WD} é o raio da anã branca, T é a temperatura do choque, S_b é a área da base da coluna e H é a altura total da coluna.

Tabela 3.6 - Relação entre demais parâmetros para o modelo 1a não normalizado.

$M_{WD} (M_{\odot})$	B (MG)	$R_{WD} (10^{-4} R_{\odot})$	T (keV)	$S_b (10^{16} cm^2)$	$H (R_{WD})$
1.25	16.7	49	50	3.47	0.0314
1.15	11.3	62	35	5.53	0.0437
1.05	8.8	73	25	7.80	0.0759
0.95	7.3	84	19	10.33	0.0957
0.85	6.3	95	14	13.19	0.1128
0.75	4.2	106	10	16.50	0.1605
0.65	1.9	119	7	20.43	0.2048
0.55	2.3	132	6	25.26	0.1830
0.45	2.5	148	4	31.48	0.1619

Tabela 3.7 - Relação entre demais parâmetros para o modelo 1b não normalizado.

$M_{WD} (M_{\odot})$	B (MG)	$R_{WD} (10^{-4} R_{\odot})$	T (keV)	$S_b (10^{16} cm^2)$	$H (R_{WD})$
1.25	49.5	49	59	1.17	0.0054
1.15	37.4	62	43	1.87	0.0083
1.05	30.7	73	32	2.64	0.0114
0.95	22.6	84	25	3.50	0.0189
0.85	19.3	95	20	4.47	0.0244
0.75	15.6	106	15	5.59	0.0342
0.65	13.4	119	12	6.91	0.0430
0.55	10.1	132	9	8.55	0.0624
0.45	7.3	148	6	10.65	0.0821

Tabela 3.8 - Relação entre demais parâmetros para o modelo 1b normalizado.

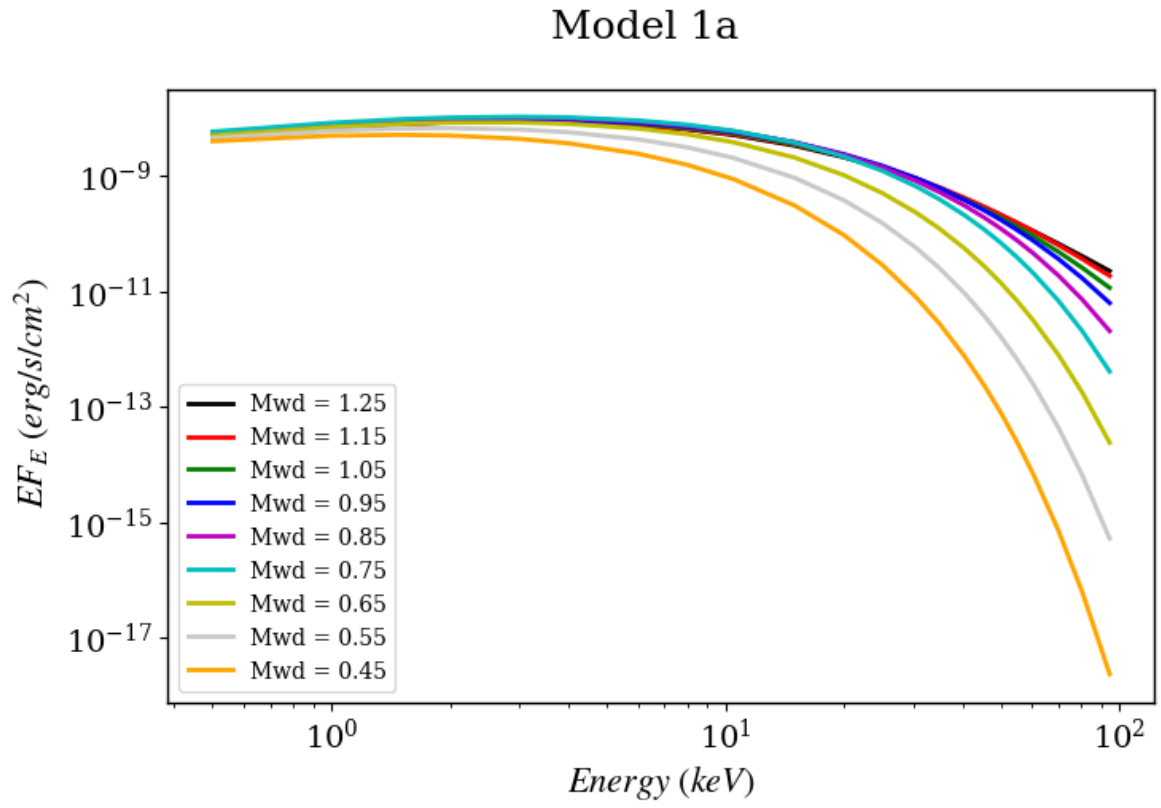
$M_{WD} (M_{\odot})$	B (MG)	$R_{WD} (10^{-4} R_{\odot})$	T (keV)	$S_b (10^{16} \text{ cm}^2)$	$H (R_{WD})$
1.25	29	49	58	1.17	0.0138
1.15	21.1	62	41	1.87	0.0223
1.05	16.3	73	31	2.64	0.0329
0.95	13.6	84	24	3.50	0.0429
0.85	10.3	95	18	4.47	0.0638
0.75	7.9	106	14	5.59	0.0878
0.65	5	119	10	6.91	0.1257
0.55	0.6	132	7	8.55	0.1442
0.45	3.1	148	6	10.65	0.1152

Os espectros dos modelos são apresentados a seguir. Analisando os espectros, para uma maior energia, quanto menor a massa menor é a energia vezes o fluxo, o que está de acordo, pois para termos um fluxo maior, uma maior taxa de perda, maior deve ser a massa da VCM. Quanto maior a massa, mais quente é o gás, logo emite mais e o espectro cai mais lentamente conforme o fluxo diminui. Agora, de acordo com as tabelas, quanto menor a massa menor é o campo magnético, exceto para as massas mais baixas, nas quais temos uma pequena oscilação, o campo aumenta, depois diminui. A pequena diferença entre os níveis dos espectros se dá pelo fato de nem todos os modelos possuírem o mesmo nível de emissão.

Em modelos com alta taxa de acreção por área e baixa massa o bremsstrahlung domina em toda a RPC, até para altos valores de campo magnético. Para modelos com alta massa ($M_{WD} \geq 0,8 M_{\odot}$) a emissão ciclotrônica contribui para a metade da RPC e bremsstrahlung para a outra metade, mais próxima à superfície da anã branca onde a densidade é maior. Já modelos com baixa taxa de acreção por área a emissão bremsstrahlung domina toda a RPC somente para pequenos campos magnéticos (BELLONI et al., 2021).

O aumento da massa leva a um aumento da temperatura pelo aumento da energia cinética depositada da região pós-choque. O aumento do campo magnético, por outro lado, diminui a temperatura, pois em raios-X o campo magnético atua apenas como um mecanismo de resfriamento. O modelo 1a original possui grande massa, assim, quando diminuimos a massa da anã branca (nos diferentes ajustes testados) precisamos diminuir B para que a temperatura se mantenha similar ao modelo original. Mas, aparentemente, mesmo com B muito baixo (e resfriamento por emissão ciclotrônica desprezível) não conseguimos manter a região pós-choque tão quente

Figura 3.1 - Espectro de raios-X do modelo 1a, não normalizado.



quanto no modelo original.

Figura 3.2 - Espectro de raios-X do modelo 1a, normalizado.

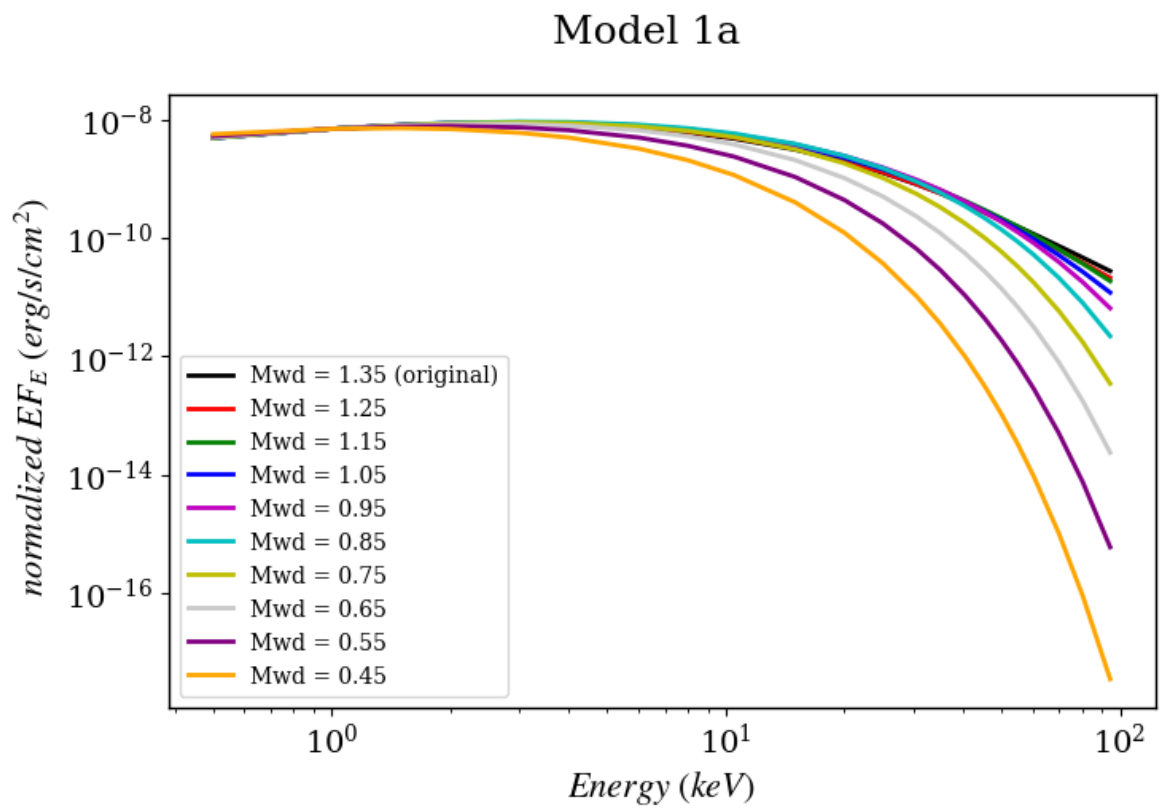


Figura 3.3 - Espectro de raios-X do modelo 1b, não normalizado.

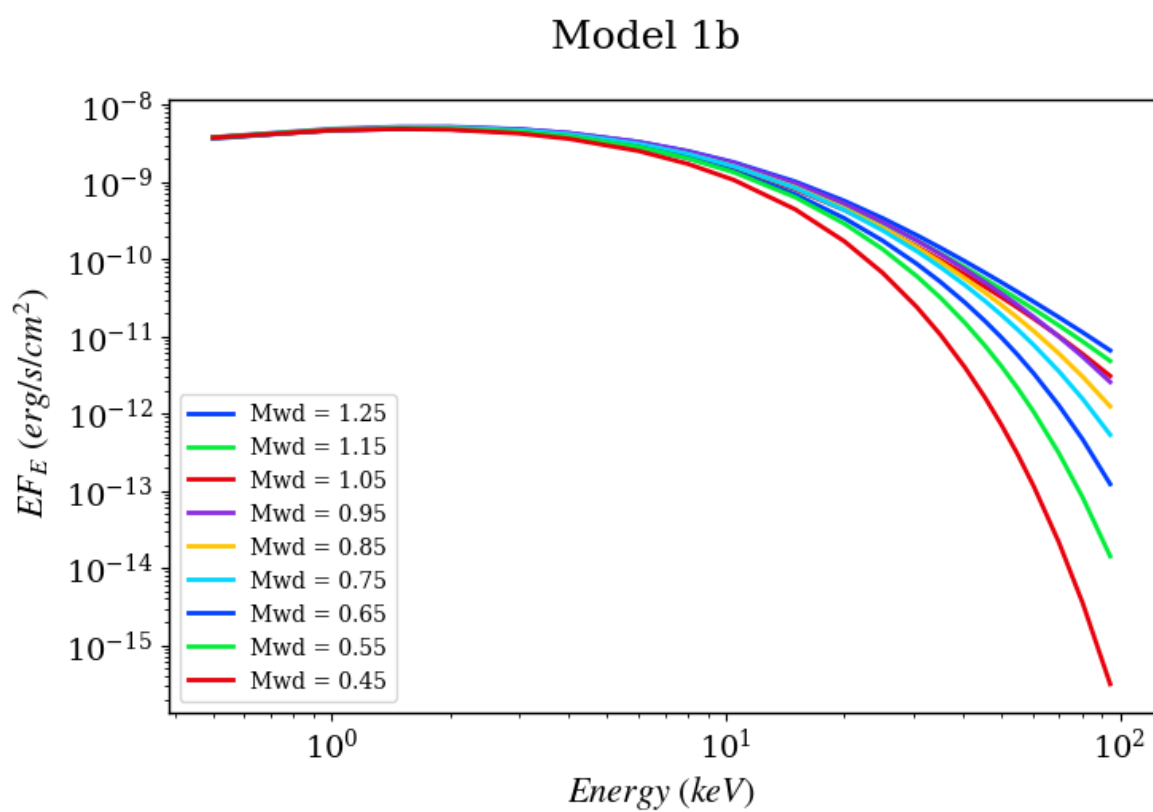
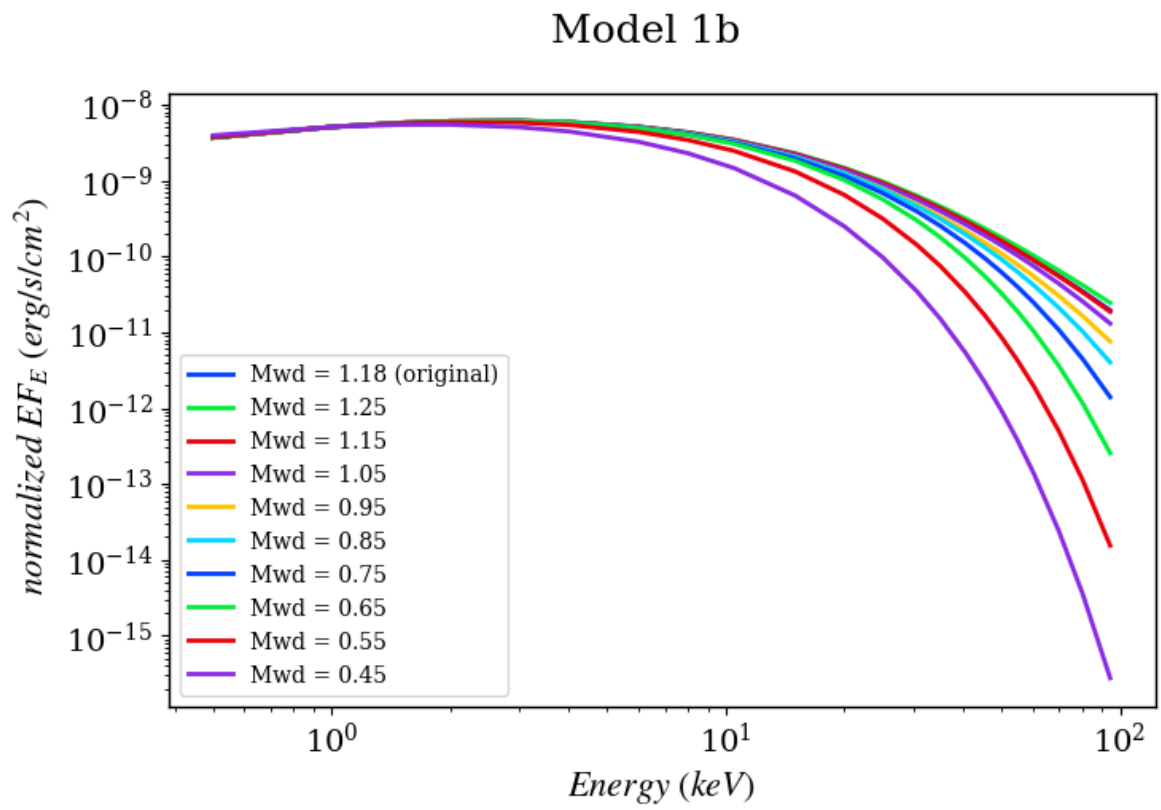


Figura 3.4 - Espectro de raios-X do modelo 1b, normalizado.



4 CONCLUSÕES

Neste trabalho desenvolvemos uma análise dos espectros de raios-X de diferentes modelos de colunas de acreção de variáveis cataclísmicas magnéticas utilizando o código CYCLOPS. Essa emissão é definida principalmente pela temperatura que, por sua vez, é função da massa da anã branca. Assim, a modelagem do espectro de raios-X permite determinar a massa da anã branca. Porém, o espectro depende também de outras propriedades físicas do sistema.

Nosso objetivo foi modelar a emissão em raios-X para obter espectros e analisar como eles dependem de parâmetros do sistema, como a massa e o campo magnético da anã branca, bem como a taxa de transferência de massa entre as duas estrelas. Utilizamos as rotinas *xanalyse* e *polar_pikaia* a fim de mapear a relação entre a massa e o campo magnético da anã branca em espectros degenerados. Isso foi feito buscando modelos que possuísem o menor valor de qui-quadrado com referência a um espectro padrão. Os resultados demonstraram que os parâmetros afetam a forma do espectro. Pode existir uma degenerescência entre os espectros, principalmente nas regiões de menor energia. Porém, essa degenerescência não é completa no sentido que a depender do espectro padrão alguns valores de massa não conseguem produzir espectros degenerados para nenhum valor de campo magnético.

Uma perspectiva de continuação desse trabalho é identificar a região de massa e campo magnético onde ocorre a degenerescência e o quanto ela depende dos outros parâmetros do problema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIZU, K. X-Ray Emission Region of a White Dwarf with Accretion. **Progress of Theoretical Physics**, v. 50, n. 1, p. 344–344, jul. 1973. 10

BELLONI, D.; RODRIGUES, C. V.; SCHREIBER, M. R.; CASTRO, M.; COSTA, J. E. R.; HAYASHI, T.; LIMA, I. J.; LUNA, G. J. M.; MARTINS, M.; OLIVEIRA, A. S.; PARSONS, S. G.; SILVA, K. M. G.; STECCHINI, P. E.; STUCHI, T. J.; ZOROTOVIC, M. Breaking the degeneracy in magnetic cataclysmic variable x-ray spectral modeling using x-ray light curves. **ApJS**, v. 256, n. 2, p. 45, out. 2021. 1, 2, 7, 8, 22

BRADT, H. **Astrophysics Processes**. [S.l.: s.n.], 2008. 7

COSTA, J. E. R.; RODRIGUES, C. V. Stokes imaging of am her systems using 3d inhomogeneous models - i. description of the code and an application to v834 cen. **MNRAS**, v. 398, n. 1, p. 240–248, set. 2009. 1, 13, 14

FRANK, J.; KING, A.; RAINE, D. J. **Accretion Power in Astrophysics: Third Edition**. [S.l.: s.n.], 2002. 9

HELLIER, C. **Cataclysmic Variable Stars**. [S.l.: s.n.], 2001. 1, 2, 3

LUTOVINOV, A.; SULEIMANOV, V.; LUNA, G. J. M.; SAZONOV, S.; MARTINO, D. de; DUCCI, L.; DOROSHENKO, V.; FALANGA, M. INTEGRAL View on cataclysmic variables and symbiotic binaries. **New Astronomy Reviews**, v. 91, p. 101547, dez. 2020. 10

MUKAI, K. X-Ray Emissions from Accreting White Dwarfs: A Review. **PASP**, v. 129, n. 976, p. 062001, jun. 2017. 6, 8

OLIVEIRA, A. S.; RODRIGUES, C. V.; PALHARES, M. S.; DIAZ, M. P.; BELLONI, D.; SILVA, K. M. G. Optical observations and cyclops post-shock region modelling of the polar v348 pav. **MNRAS**, v. 489, n. 3, p. 4032–4042, nov. 2019. 1

SHAW, A. W.; HEINKE, C. O.; MUKAI, K.; TOMSICK, J. A.; DOROSHENKO, V.; SULEIMANOV, V. F.; BUISSON, D. J. K.; GANDHI, P.; GREFENSTETTE, B. W.; HARE, J.; JIANG, J.; LUDLAM, R. M.; RANA, V.; SIVAKOFF, G. R. Measuring the masses of magnetic white dwarfs: a nustar legacy survey. **MNRAS**, v. 498, n. 3, p. 3457–3469, nov. 2020. 6, 11

SILVA, K. M. G.; RODRIGUES, C. V.; COSTA, J. E. R.; SOUZA, C. A. de; CIESLINSKI, D.; HICKEL, G. R. Stokes imaging of am her systems using 3d inhomogeneous models - ii. modelling x-ray and optical data of cp tucaenae. **MNRAS**, v. 432, n. 2, p. 1587–1599, jun. 2013. 1

SILVA, K. M. G. da. **Modelagem Multiespectral da Região de Acréscimo de Polares**. 2013. 73 p. Tese (Doutorado em Astrofísica) — Instituto Nacional de

Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2013.
(sid.inpe.br/mtc-m19/2013/03.14.14.13-TDI). Disponível em: <<http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2013/03.14.14.13/doc/publicacao.pdf>>.
Acesso em: 21 jun. 2023. 8, 13

SULEIMANOV, V. F.; DOROSHENKO, V.; WERNER, K. Hard X-ray view on intermediate polars in the Gaia era. **MNRAS**, v. 482, n. 3, p. 3622–3635, jan. 2019. 10, 11

WARNER, B. **Cataclysmic variable stars**. [S.l.: s.n.], 1995. v. 28. 2, 3

WIKIPEDIA, THE FREE ENCYCLOPEDIA. **Bremsstrahlung**. 2023.
Disponível em: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Bremsstrahlung>>. Acesso em: 23 junho 2023. 6

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.