

autor: Roberto C.M. Navacchia
email: *olibano.incensos@gmail.com*

Resumo

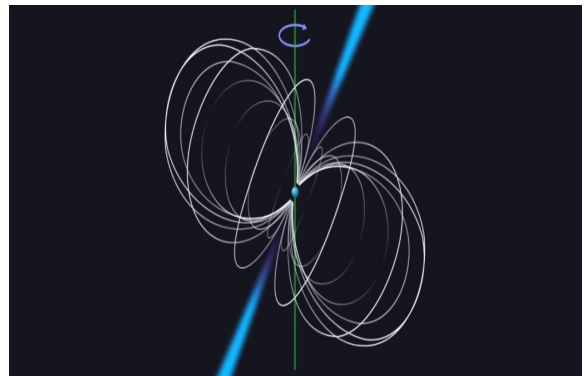
Neste trabalho se expõe um método alternativo de análise para a identificação de pulsares usando dados do catálogo das estrelas de nêutrons do 'High Time Resolution Universe Survey' e a construção de curvas radiais derivadas de parâmetros estatísticos dos sinais de rádio observados, onde através de uma abordagem geométrica, evidencia-se sua assinatura única e distinta para cada pulsar que difere sensivelmente das curvas produzidas por sinais de ruído. O método busca oferecer a comunidade científica um meio complementar de classificação, abrindo possibilidades para a criação de um '*Atlas Geométrico de Pulsares*' com utilidade em Astrofísica, Ciência de Dados, Mecânica Quântica e principalmente na Geometria Analítica.

1. Introdução

Pulsares são estrelas de nêutrons que giram rapidamente e emitem feixes de radiação, como um farol cósmico emitindo sinais periódicos de rádio que podem ser detectados por radiotelescópios na Terra, quando alinhados com o observador. São oriundos do colapso do núcleo de estrelas supermassivas durante uma supernova tornando-se objetos extremamente densos e magnetizados.

Sua rotação e emissão são tão precisas que servem como relógios cósmicos para medir o tempo com exatidão impressionante. Os levantamentos de dados astronômicos, como o do High Time Resolution Universe Survey (HTRU) e o Merkatt, identificam os pulsares através de análise estatística. Neste trabalho se demonstra uma abordagem geométrica capaz de mapear os atributos estatísticos do *Dataset* do HTRU II [7] gerando curvas radiais que revelam assinaturas únicas para cada pulsar do banco de dados(.csv) facilitando sua identificação através da periodicidade da métrica radial do candidato a pulsar.

Figura 1: Os pulsares são objetos astrofísicos que emitem sinais periódicos de rádio, sendo detectados em grandes levantamentos como o High Time Resolution Universe Survey, estes objetos celestes pequenos e com magnitudes relativamente fracas onde os radiotelescópios são fundamentais para o seu estudo. Foram descobertos em 1965 por Jocelyn Bell Burnell[1][2] que após monitorar os pulsos verificou vários padrões regulares de ondas de rádio e assim pôde determinar que tais ondas emanavam de estrelas de nêutrons girando rapidamente, o que mais tarde foram chamados de 'Pulsares' pela imprensa.



2. Metodologia

Ao observar um pulsar constata-se uma periodicidade em sua rotação e pulso, e sabe-se que funções trigonométricas são usadas para modelar o movimento de ondas e outros fenômenos periódicos, como os padrões sazonais.- atrelei a questão ao escopo deste estudo pois estas formam a base para análises avançadas em engenharia elétrica, processamento digital de imagem, radiografia, termodinâmica, telecomunicações e muitos outros campos da ciência e da tecnologia.

O Dataset usado como referência é o do HTRU Fase II[7] que contém atributos numéricos relacionados ao perfil integrado à curva DM-SNR e tomando uma função radial, ajusta-se os parâmetros com as devidas entradas do arquivo fornecido à equação radial, onde a linha de atributos dos sinais detectados dos candidatos estão divididos em colunas como segue abaixo:

Mean_Integrated:	SD_Integrated:	Kurtosis_Integrated:	Skewness_Integrated:	Mean_DMSNR:	SD_DMSNR:	Kurtosis_DMSNR:	Skewness_DMSNR:	Class:
------------------	----------------	----------------------	----------------------	-------------	-----------	-----------------	-----------------	--------

E as equações usadas para a análise dos candidatos :

$$r(\theta) = \text{tg}^{-1}(a) + \frac{1}{(\sqrt{b} + \frac{1}{4})} \cdot \text{sen}((\log(1+c) + \frac{1}{2}) \cdot \theta) + \theta; \theta, \theta, n\pi$$

Cada linha do Dataset do candidato a Pulsar é projetada em coordenadas polares, gerando uma curva única que chamei de 'assinatura geométrica do candidato'. As variáveis correspondem a colunas do 'HTRU.csv' onde na parametrização da equação :

(a) é baseado na média do perfil integrado (mean_IP),

(κ) é derivado da curtose absoluta do perfil integrado (kurtosis_IP),

(ω) é derivado da assimetria absoluta do perfil integrado (skew_IP) mais um deslocamento,

(θ) é o deslocamento relativo ao eixo de rotação ,

(n) é o número de loops que a espiral deve ter para se observar a periodicidade dos pulsos ao

longo da rotação do pulsar, $r(\theta) = \text{tg}^{-1} a + (\frac{1}{\sqrt{\kappa}}) \cdot \text{sen}(\omega \cdot \theta) + \theta; \theta, \theta, n\pi$

ou

$$r(\theta) = a \cdot \cos^{-1} \cdot (\frac{1}{\sqrt{\kappa}})^{-1} \cdot \cos(\omega \cdot \theta) + \theta; \theta, \theta, n\pi \quad .$$

Resultam gráficos distintos para ruídos e pulsares como demonstra as imagens dos gráficos obtidos usando a calculadora gráfica do Geogebra que seguem abaixo;

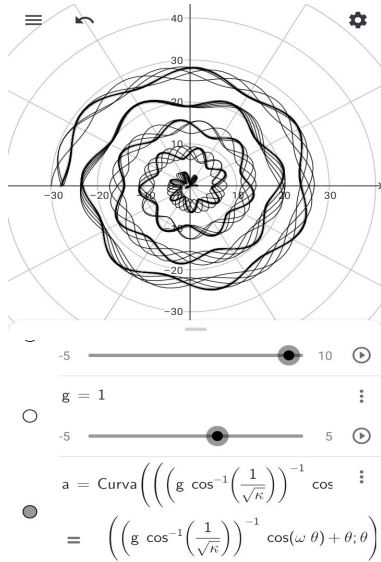


Figura 2: Assinatura Radial de um **Pulsar** no Geogebra criado por Navacchia, R.C.M..

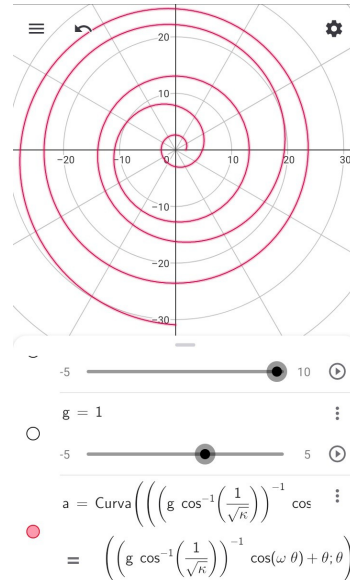


Figura 3: Assinatura Radial de um **Ruído** no Geogebra criado por Navacchia, R.C.M..

Estas funções gera padrões espirais distintos para pulsares e não-pulsares mapeiam com sucesso as propriedades estatísticas em assinaturas geométricas, fornecidos pelo Dataset do HTRU, como visualizado nos gráficos polares acima onde, os pulsares confirmados exibem padrões cáusticos bem definidos[Fig.2], enquanto o ruído geram gráficos espirais com pouca modulação[Fig.3].

São estas diferenças, em suas estruturas espirais gráficas, que apoiam a necessidade de uma classificação dos pulsares baseada em suas assinaturas geométricas únicas; e portanto o passo seguinte da pesquisa foi criar ferramentas que permitissem esta classificação[ver apêndice I e II] onde os candidatos à pulsares podem ser imediatamente reconhecidos e analisados de maneira universal ou individual em sua periodicidade e modulação através de Datasets como o 'HTRU'[7].

Os períodos, onde o pulso ocorre, podem variar de alguns milissegundos até alguns segundos sendo os pulsares da faixa de milissegundos os de alta precisão, sendo estes superiores ao uso dos relógios atômicos utilizados na cronometragem ultraprecisa na detecção OGS [3].

Os códigos python fornecidos no apêndice podem ser carregados localmente ou através de ambientes python on-line(p. ex., Google Colab) onde o arquivo HTRU II deve ser integrado à seção através de *upload*, e seu *caminho* copiado na área específica do código para a correta identificação dos pulsares. O Dataset contém cerca de 16.000 candidatos dos quais 1680 são

pulsares confirmados; e para reduzir o esforço computacional podemos escolher o intervalo a ser analisado(p. ex., entre 100 e 110) que exibirá 10 assinaturas gráficas, sendo o candidato a pulsar identificado em azul, conforme segue abaixo.

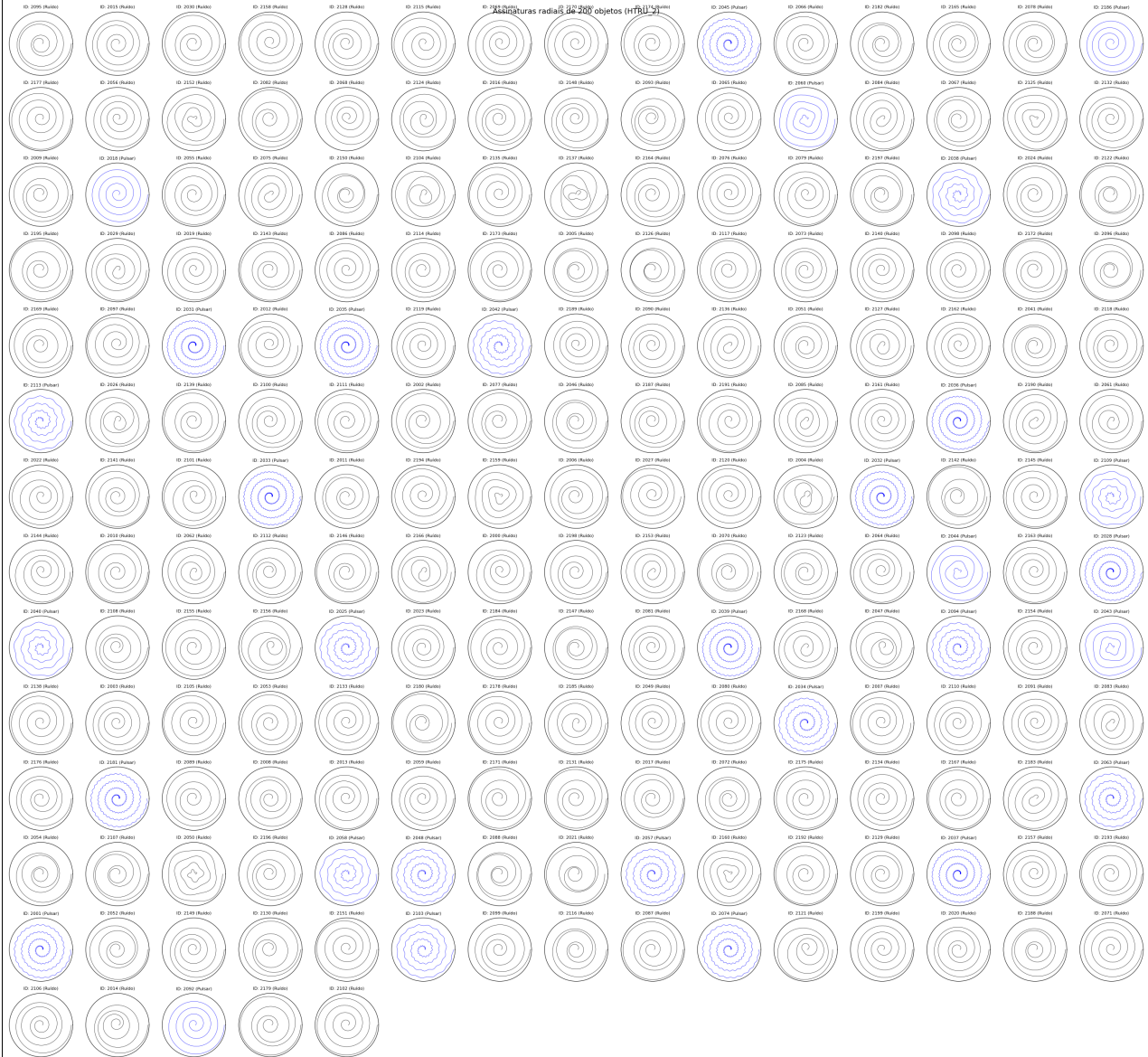


Figura 4: Resultado obtido pelo uso do código python onde os candidatos a pulsares (em azul) se evidenciam na curva caustica com modulações que diferem drasticamente das curvas produzidas pelos ruídos. Código python de autoria de Navacchia, R.C.M disponível no apêndice deste artigo.

3- Conclusão e Resultados

O produto obtido pela parametrização das equações radiais foi o que permitiu a criação deste gráfico obtido pelos códigos python, onde nota-se além da diferença entre o ruído e o pulsar as propriedades individuais de cada estrelas de nêutron onde a assinatura radial única de cada uma revela suas métricas complexas e rápidas, logo a diferença entre os pulsares e ruídos surge das

suas propriedades físicas e geométricas codificadas nas variáveis do Dataset, o que afeta sua modulação radial, onde concluo que:

* **'Mean_IP' parametrizado como ' a '**: O **Mean_IP** representa a intensidade média do perfil integrado do sinal. Pulsares com **Mean_IP** alto possuem a variável " a " negativa, aumentando a amplitude da curva radial devido a uma massa ou brilho maior e com desvios bem pronunciados.

* **'Kurtosis_IP' parametrizado para ' κ '**: O **Kurtosis_IP** é a estrutura do pulsar que define a sua curvatura; sendo a variável que reflete a forma do pulso ligado a rotação do pulsar.

* **'Skew_IP' parametrizado como ' ω '**: O **Skew_IP** é a frequência, onde um Skew_IP alto indica pulsos assimétricos, típico de campos magnéticos fortes.

* **'A Singularidade Central'**: O ponto de origem representa a estrela de nêutrons, sendo a projeção da curvatura espacial do pulsar, onde as causticas podem refletir a curvatura do espaço-tempo que se alinha ao movimento rotacional do pulsar; sugere que estes objetos celestes densos, apesar de modestos, possuem uma massa colossal capaz de distorcerem o espaço-tempo à sua volta criando uma zona de arrasto parecida com a dos BH(buracos negros).

Referências:

[1] **Bell Burnell, J., & Hewish, A. (1968)**. "Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source." *Nature*, 217, 709–713.

[2] **Burnell, Dame. (2025)**. Pulsars and prizes: The life and work of Dame Jocelyn Bell Burnell. Research Features. 10.26904/RF-156-8800814241.

[3] **Keith, M. J., et al.** "The High Time Resolution Universe Survey." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2010.

[4] **Hobbs, G., et al. (2020)**. "The Parkes Pulsar Timing Array: A Decade of Observations." *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 37, e012.

[5] **Lima, R. C. R., & Moraes, P. H. R. S. (2025)**. "Novas Perspectivas sobre a Estabilidade e Estrutura dos Pulsares." *Simple Science*.

[6] **Lorimer, D. R., & Kramer, M. (2012)**. *Handbook of Pulsar Astronomy*. Cambridge University Press.

[7] **Lyon, R. (2015)**. HTRU2 [Conjunto de dados]. Repositório de Aprendizado de Máquina da UCI. <https://doi.org/10.24432/C5DK6R>. <<https://archive.ics.uci.edu/static/public/372/htru2.zip>>

[8] **Hohenwarter, M. (2002)**. **GeoGebra**: Uma aplicação computacional livre de matemática dinâmica.

Apêndice - Códigos Python e Gráficos [1]

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Carregar dataset
df = pd.read_csv("/content/HTRU_2.csv", sep=';', quotechar='"')

# Renomear colunas
df.columns = [
    "mean_IP", "std_IP", "kurtosis_IP", "skew_IP",
    "mean_DMSNR", "std_DMSNR", "kurtosis_DMSNR", "skew_DMSNR",
    "class"
]

print("Number of pulsars:", df[df["class"] == 1].shape[0])
print("Number of non-pulsars:", df[df["class"] == 0].shape[0])

# Função radial baseada na sua fórmula
def curva_radial(theta, atg, kappa, omega):
    r = np.arctan(atg) + (1/np.sqrt(kappa)) * np.sin(omega * theta) + theta
    return r

# Selecionar alguns exemplos (um pulsar e um não pulsar)
pulsar = df[df["class"] == 1].sample(1, random_state=42)
nao_pulsar = df[df["class"] == 0].sample(1, random_state=42)

candidatos = [("Pulsar", pulsar), ("Ruído", nao_pulsar)]

# Plotar
theta = np.linspace(0, 8*np.pi, 2000)

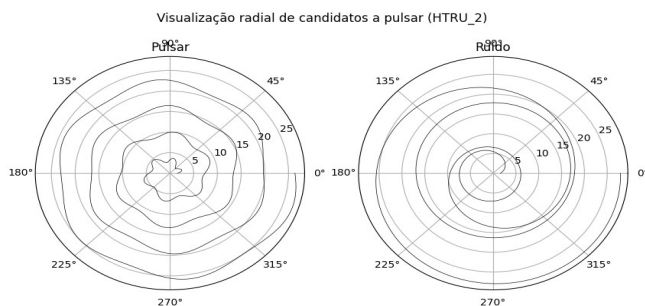
plt.figure(figsize=(10,5))

for i, (nome, data) in enumerate(candidatos, 1):
    atg = float(data["mean_IP"].values[0])
    kappa = float(abs(data["kurtosis_IP"].values[0]) + 0.1)
    omega = float(abs(data["skew_IP"].values[0]) + 0.5)

    r = curva_radial(theta, atg, kappa, omega)

    ax = plt.subplot(1, 2, i, projection='polar')
    ax.plot(theta, r, color="black", linewidth=0.5)
    ax.set_title(nome)

plt.suptitle("Visualização radial de candidatos a pulsar (HTRU_2)")
plt.show()
```



/2/

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import math

# Carregar dataset
df = pd.read_csv("/content/HTRU_2.csv", sep=';', quotechar='"')

# Renomear colunas
df.columns = [
    "mean_IP", "std_IP", "kurtosis_IP", "skew_IP",
    "mean_DMSNR", "std_DMSNR", "kurtosis_DMSNR", "skew_DMSNR",
    "class"
]

# Convert 'mean_IP' to numeric, coercing errors to NaN
df['mean_IP'] = pd.to_numeric(df['mean_IP'], errors='coerce')

# Drop rows where 'mean_IP' is NaN
df.dropna(subset=['mean_IP'], inplace=True)

# Função radial baseada na sua fórmula
def curva_radial(theta, atg, kappa, omega):
    return np.arctan(atg) + (1/np.sqrt(kappa)) * np.sin(omega * theta) + theta

# Definir o intervalo de linhas a serem selecionadas
inicio_intervalo = 2000
fim_intervalo = 2200

# Selecionar o subconjunto de dados com base no intervalo
data_subset = df.iloc[inicio_intervalo:fim_intervalo].sample(frac=1, random_state=42) # Use
.iloc for integer-location based indexing and sample(frac=1) to shuffle

num_objects = data_subset.shape[0]

theta = np.linspace(0, 8*np.pi, 2000)

# Calcular o número de linhas e colunas para a grade de subplots
n_cols = int(math.ceil(math.sqrt(num_objects)))
n_rows = int(math.ceil(num_objects / n_cols))

# Criar figura (ajustado o layout para o número de exemplos)
fig, axes = plt.subplots(n_rows, n_cols, figsize=(n_cols * 2, n_rows * 2),
subplot_kw={'projection': 'polar'})
axes = axes.flatten()

# Desativar e ocultar eixos não utilizados se houver
for i in range(num_objects, len(axes)):
    fig.delaxes(axes[i])

# Plotar objetos
```

"Assinaturas Radiais e Pulsares"

```
for i, (_, row) in enumerate(data_subset.iterrows()):
    atg = float(row["mean_IP"]) # Convert to float
    kappa = abs(row["kurtosis_IP"]) + 0.1
    omega = abs(row["skew_IP"]) + 0.5
    class_label = row["class"]

    r = curva_radial(theta, atg, kappa, omega)

    color = "blue" if class_label == 1 else "black"

    axes[i].plot(theta, r, color=color, linewidth=0.5)
    axes[i].set_title(f"ID: {row.name} ({'Pulsar' if class_label == 1 else 'Ruído'})", fontsize=8)
    axes[i].set_xticks([])
    axes[i].set_yticks([])

plt.suptitle(f"Assinaturas radiais de {num_objects} objetos (HTRU_2)", fontsize=14)
plt.tight_layout()

# Salvar em arquivo
plt.savefig("galeria_objetos.png", dpi=300)
plt.show()
```

