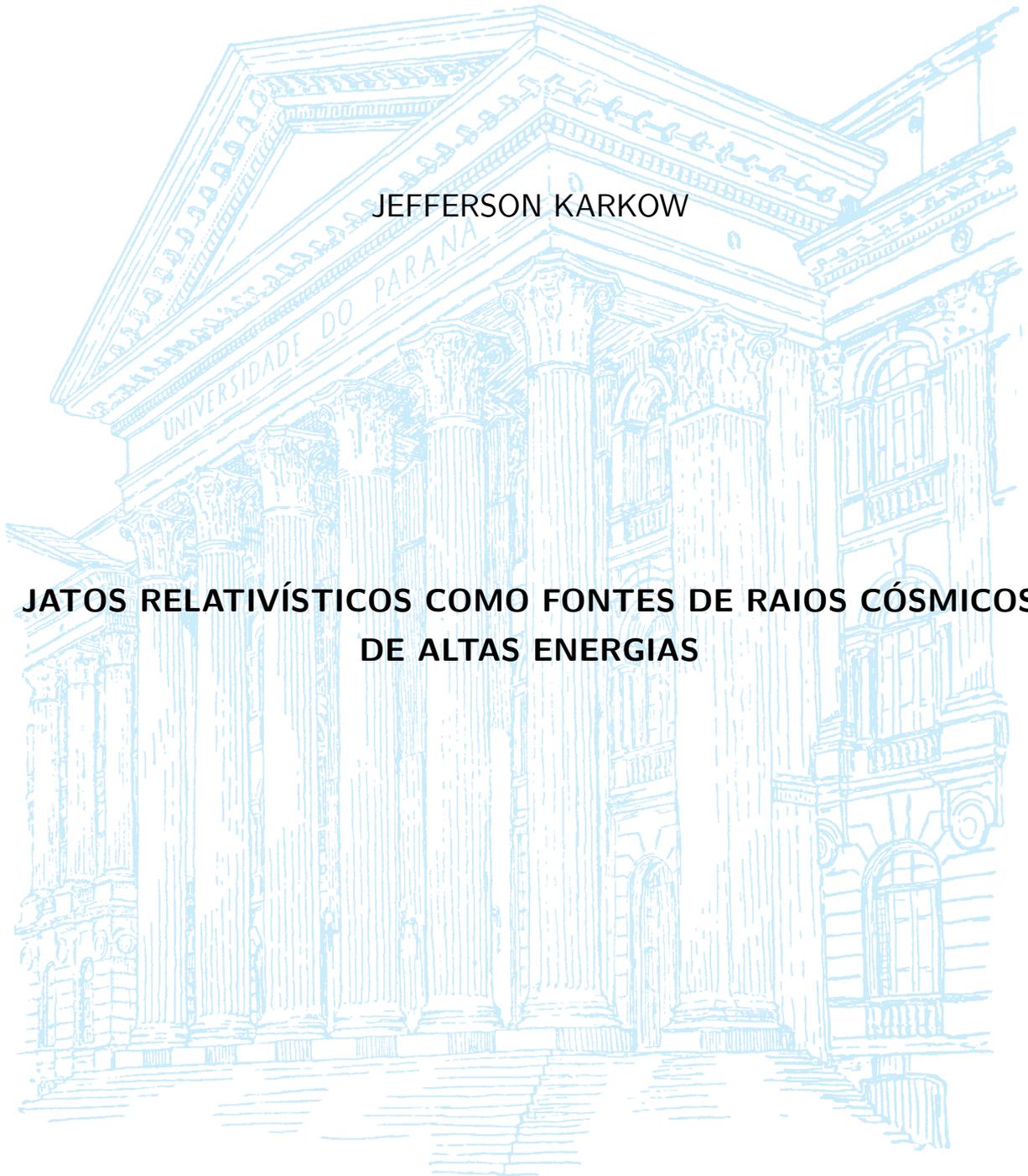


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JEFFERSON KARKOW

**JATOS RELATIVÍSTICOS COMO FONTES DE RAIOS CÓSMICOS  
DE ALTAS ENERGIAS**



PALOTINA

2022

JEFFERSON KARKOW

**JATOS RELATIVÍSTICOS COMO FONTES DE RAIOS CÓSMICOS  
DE ALTAS ENERGIAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura em Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná como requisito para a obtenção do título Licenciado em Física.

Orientador: Profa. Dra. Rita de Cássia dos Anjos

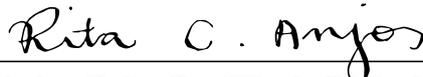
PALOTINA  
2022

# TERMO DE APROVAÇÃO

JEFFERSON KARKOW

## JATOS RELATIVÍSTICOS COMO FONTES DE RAIOS CÓSMICOS DE ALTAS ENERGIAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura em Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná como requisito à obtenção do título de Licenciado em Física, e aprovado pela seguinte banca examinadora:



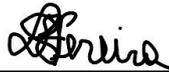
---

Orientador: Profa. Dra. Rita de Cássia dos Anjos  
Setor Palotina, UFPR



---

Dr. Carlos Henrique Coimbra Araújo  
Setor Palotina, UFPR



---

Dr. Luiz Augusto Pereira Stuani

## RESUMO

A origem dos raios cósmicos de altas energias é uma questão complexa e em aberto na área da astrofísica de partículas. Este trabalho tem como proposta apresentar um estudo acerca da astrofísica de jatos relativísticos com suas principais características e propriedades hidrodinâmicas como candidatas prováveis no processo de aceleração de partículas extragalácticas. Jatos são estruturas de altíssimas energias responsáveis por emissão de radiação varrendo todo o espectro do infravermelho ao ultravioleta, podendo ser encontrados em diferentes escalas, de jatos presentes na alta atmosfera terrestre por meio de tempestades elétricas a jatos relativísticos provenientes de sistemas binários ou Buracos Negros presentes em Núcleos de galáxias ativas (AGNs). Jatos presentes na atmosfera apresentam quilômetros de diâmetro, em comparação, os jatos relativísticos presentes em microquasares e quasares, variam com comprimentos de ano luz e milhões de anos luz, respectivamente. Com o auxílio do software PLUTO <sup>1</sup> simulamos jatos em diferentes geometrias e ambientes. Analisamos suas estruturas variando fatores físicos na hidrodinâmica e buscando por jatos com altas luminosidades, ambientes ideais para aceleração de partículas cósmicas.

Palavras-chave: Raios cósmicos; Jatos relativísticos; Núcleos de galáxias ativas; Simulações computacionais.

---

<sup>1</sup><http://plutocode.ph.unito.it/>

## ABSTRACT

The origin of high-energy cosmic rays is a complex and open question in particle astrophysics. This work aims to study the astrophysics of relativistic jets with their main characteristics and hydrodynamic properties as likely candidates for accelerating extragalactic particles. Jets are structures of very high energies responsible for the emission of radiation from the infrared to ultraviolet energy spectrum. Jets can be found at different scales, in the upper Earth's atmosphere, through electrical storms to relativistic jets from binary systems or Black Holes present in Active Galactic Nuclei. Jets present in the atmosphere are kilometers in diameter. For example, the relativistic jets present in microquasars and quasars vary with lengths of light years and millions of light years, respectively. With the help of the PLUTO <sup>2</sup> software, we simulate jets in different geometries and environments. We analyze their structures by varying physical factors in hydrodynamics and looking for jets with high luminosities, ideal environments for accelerating cosmic particles.

Keywords: Cosmic rays; Relativistic jets; Active galaxy nuclei; Computational simulations.

---

<sup>2</sup><http://plutocode.ph.unito.it/>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Galáxia elíptica M87 do aglomerado de Virgo. . . . .	10
FIGURA 2 – Representação artística do quasar J043947.08+163415.7 . . . . .	11
FIGURA 3 – Estrutura do jato relativístico. . . . .	12
FIGURA 4 – Emissão radio da radiogaláxia Hércules A (3C 348) detectada pelo Very Large Array (VLA) em falsa escala de cor, sobreposta a uma imagem obtida pelo Hubble Space Telescope. . . . .	14
FIGURA 5 – Jatos com velocidade 0,995c com densidade externa 100,0, densidade interna 1 e Pressão 0,05 para o método parabólico. . . . .	20
FIGURA 6 – Jatos com velocidade 0,995c com densidade externa 100,0, densidade interna 1 e Pressão 0,05 para a reconstrução ponderada . . . . .	20
FIGURA 7 – Jatos com densidade externa 100, densidade interna 1,0, Pressão 0,005 e velocidades 0,5c . . . . .	21
FIGURA 8 – Jatos com densidade externa 100, densidade interna 1,0, Pressão 0,005 e velocidades 0,95c. . . . .	22
FIGURA 9 – Jatos com densidade externa 100, densidade interna 1,0, Pressão 0,005 e velocidades 0,995c. . . . .	22
FIGURA 10 – Jatos com velocidades 0,95c, densidade externa 100, pressão 0,005 e densidade interna 0,1. . . . .	23
FIGURA 11 – Jatos com velocidades 0,95c, densidade externa 100, pressão 0,005 e densidade interna 10,0. . . . .	24
FIGURA 12 – Jatos com velocidades 0,95c, densidade interna 10, pressão 0,005, densidade externa 1,0. . . . .	25
FIGURA 13 – Jatos com velocidades 0,95c, densidade interna 10, pressão 0,05, densidade externa 10,0. . . . .	25
FIGURA 14 – Jatos com velocidades 0,95c, densidade interna 10, pressão 0,05, densidade externa 100,0. . . . .	26
FIGURA 15 – Jatos com velocidades 0,995c, densidade interna 1,0, densidade externa 100,0 e pressão 0,05. . . . .	27
FIGURA 16 – Jatos com velocidades 0,995c, densidade interna 1,0, densidade externa 100,0 e pressão 0,5. . . . .	27
FIGURA 17 – Jatos com velocidades 0,995c, densidade interna 1,0, densidade externa 100,0 e pressão 5. . . . .	28
FIGURA 18 – Plot representando a velocidade de propagação do jato, variando a densidade a partir da razão entre densidades de $1 \times 10^{-4}$ . . . . .	29
FIGURA 19 – Plot representando a densidade (lado esquerdo) e pressão do jato (lado direito), variando densidade a partir da razão de $1 \times 10^{-4}$ . . . . .	30

FIGURA 20 – Plot representando a velocidade de propagação do jato, variando a densidade com razão entre densidades a partir de $1 \times 10^{-3}$ . . . . .	31
FIGURA 21 – Plot representando a densidade (lado esquerdo) e pressão do jato (lado direito), variando densidade a partir da razão de $1 \times 10^{-3}$ . . . . .	32

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Tabela referente a Figura 5 e 6 - Definição 1 e 2. . . . .	21
TABELA 2 – Tabela referente as Figuras 7, 8 e 9. . . . .	23
TABELA 3 – Tabela referente as Figuras 10 e 11. . . . .	24
TABELA 4 – Tabela referente as Figuras 12, 13 e 14. . . . .	26
TABELA 5 – Tabela referente as Figuras 15, 16 e 17. . . . .	28
TABELA 6 – Tabela referente a Figura 18 e 19. . . . .	30
TABELA 7 – Tabela referente a Figura 20 e 21. . . . .	31

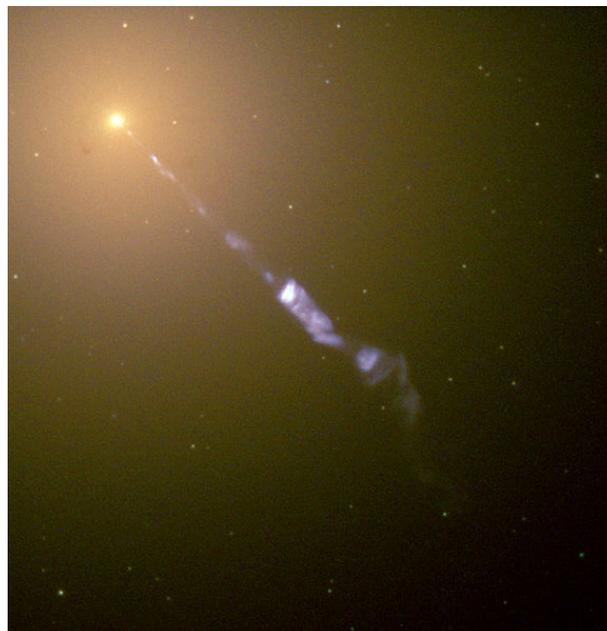
## SUMÁRIO

<b>1</b>	–	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.1		JATOS	11
1.1.1		ESTRUTURA DO JATO	12
1.1.2		JATOS OBSERVADOS NA ATMOSFERA DA TERRA	13
1.2		NÚCLEOS DE GALÁXIAS ATIVAS	13
1.3		ACELERAÇÃO DE PARTÍCULAS	15
1.3.1		PROCESSO DE ACELERAÇÃO NO INTERIOR DO JATO	15
<b>2</b>	–	<b>OBJETIVOS</b>	<b>17</b>
2.1		OBJETIVO GERAL	17
2.2		OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2.3		JUSTIFICATIVA	17
<b>3</b>	–	<b>METODOLOGIA</b>	<b>18</b>
3.1		EQUAÇÕES DA HIDRODINÂMICA RELATIVÍSTICA	18
<b>4</b>	–	<b>RESULTADOS</b>	<b>19</b>
4.1		JATOS EM RADIO-GALÁXIAS	28
<b>5</b>	–	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>33</b>
		<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>34</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os primeiros indícios de jatos foram descobertos em 1965. Arno Penzias e Robert W. Wilson continuaram o trabalho de K. Jansky detectando ondas de rádio provenientes da Via Láctea até a descoberta da Radiação Cósmica de Fundo. Essa descoberta levou ao desenvolvimento dos primeiros radiotelescópios e interferômetros e assim a detecção de fontes emissoras de radiofrequência. As primeiras evidências relacionadas a jatos emanados do núcleo de galáxias deram-se por meio da descoberta da galáxia elíptica M87, representada na Figura 1.

FIGURA 1 – Galáxia elíptica M87 do aglomerado de Virgo.



Fonte: J.A. Biretta, W.B. Sparks, F.D. Macchetto, E.S. Perlman e R. Mark Elowitz, Telescópio Espacial Hubble.

O jato é constituído de material gasoso ionizado, elétrons e outras partículas subatômicas, as quais quando em contato com o núcleo da galáxia ou objeto extremamente massivo e denso (buraco negro), são ejetadas com velocidades próximas à da luz (Motter, 2017).

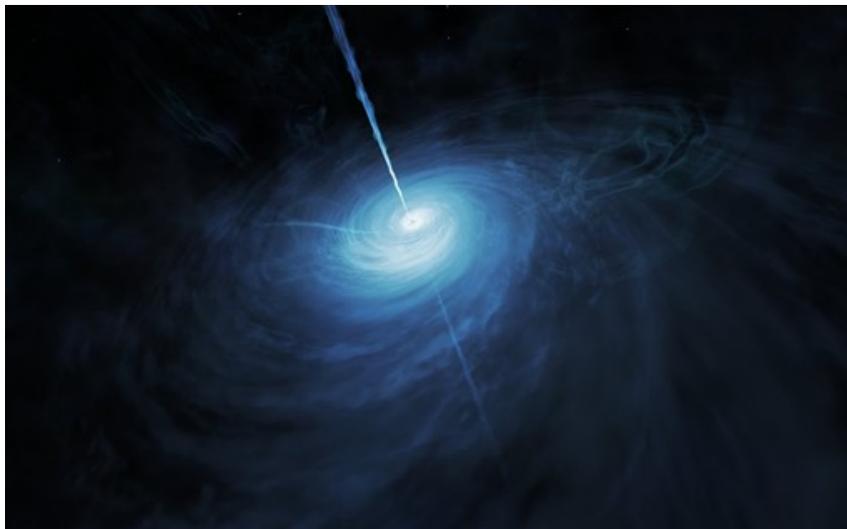
Jatos próximos à vizinhança dentro da Via Láctea, tais como objetos estelares jovens, Objetos Herbig-Haro (formados por amontoados de matéria, semelhantes a bolhas de gás que são ejetadas por Protoestrela), ou então fontes superluminais, apresentam menor velocidade, tamanho e energia, com relação às escalas extragalácticas, tais como nos quasares, galáxias ativas ou objetos blazares (subconjunto de objetos pertencentes a galáxias ativas), porém suas características ou morfologias são semelhantes (Motter, 2017).

## 1.1 JATOS

Segundo Romero (2021), a formação de jatos relativísticos de altíssimas energias está relacionada com a interação de matéria e o campo gravitacional de corpos celestes, no caso de AGNs, de núcleos ativos de galáxias com buracos negros extremamente massivos. Em escalas reduzidas esse processo ocorre na interação entre uma estrela e um buraco negro estelar, essa relação resulta em uma estrutura conhecida como microquasar ou sistemas binários. O processo na formação de jatos, nos casos de sistemas binários, geralmente envolve a implosão de estrelas por meio do campo gravitacional do buraco negro resultando na formação de um disco de acreção e em jatos sucessivamente.

Motter (2017) descreve que, quando relacionado a núcleos ativos de galáxias a maior parte da energia é gerada no centro da galáxia, por um fenômeno conhecido como AGNs, onde descreve os fenômenos energéticos de acordo com um motor central extremamente massivo, responsável por aquecer a matéria no disco de acreção por meio de queda gravitacional. A matéria quando atinge certa quantidade de energia acaba escapando em jatos colimados que se propagam com velocidades relativísticas para o meio externo, apresentam formatos cônicos, possuem alta luminosidade e alto grau de colimação como pode ser visto na Figura 2.

FIGURA 2 – Representação artística do quasar J043947.08+163415.7



Fonte: ESA/Hubble, NASA, M. Kornmesser.

De uma forma mais detalhada Romero (2021, p.3) descreve:

Uma onda Alfvén torcional é gerada pelo arrasto rotacional das linhas de campo poloidal na ergosfera do buraco negro. O campo desenvolve um componente toroidal produzindo uma perturbação de viagem. Essa onda transporta energia magnética para fora, fazendo com que a energia total do plasma próximo ao orifício cresça a valores negativos. Quando este plasma com energia negativa cruza o horizonte, a energia rotacional do buraco negro diminui. Por meio desse processo, a energia do buraco negro em rotação é

extraída pelo campo magnético. O resultado é que, enquanto o plasma é levado apenas para o orifício, a energia eletromagnética é evacuada ao longo do eixo de rotação como um fluxo de Poynting.

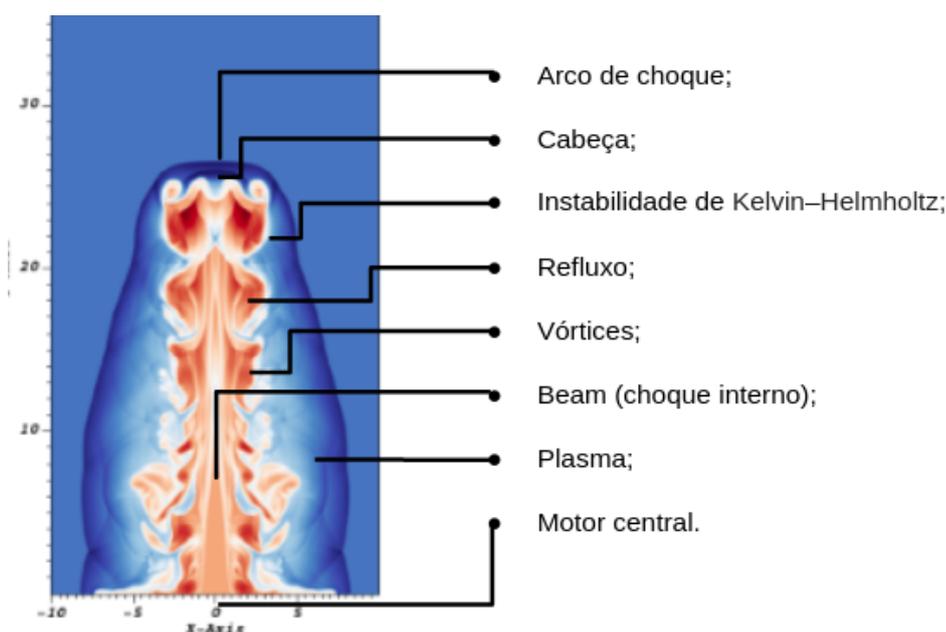
### 1.1.1 ESTRUTURA DO JATO

Marti (1997,p.156) descreve a formação do jato partindo da cabeça do mesmo, como pode ser observado na figura 3, definindo um arco de choque chamado de Mach, responsável por desacelerar o mesmo, convertendo energia cinética em energia interna. No caso das simulações utilizados por meio do PLUTO. O número Mach consiste na relação entre a velocidade do som e a velocidade da luz no meio. Marti ainda descreve a relação de Mach como um amortecedor do arco de choque, responsável por determinar a velocidade de propagação do jato, formação de perturbações e vórtices formados na superfície de trabalho do jato.

A interação entre o número de Mach sugere a formação de lóbulos e casulos de acordo com os seus valores. Para valores baixos ocorre a formação de lóbulos ao redor da estrutura geral do jato, diminuindo dessa forma a energia cinética do jato e assim dificultando a sua propagação no meio. Os vórtices são formados a partir da cabeça do jato. Nos casos onde não há formação de vórtices, a estrutura geral do jato apresenta uma formação colimada e com alta velocidade de propagação (Mignone 2007).

Os casulos formados inicialmente resultarão na formação de vórtices e estruturas turbulentas, como pode ser visto na figura 3 , levando-se em consideração sua propagação. Por outro lado, a interação entre as pressões internas e externas (ambiente), assim como distintas densidades em equilíbrio, podem resultar na ausência de choques e aumento da possibilidade de formação de jatos quentes (jatos colimados e propícios a aceleração de partícula) Marti (1997).

FIGURA 3 – Estrutura do jato relativístico.



Fonte: O autor.

### 1.1.2 JATOS OBSERVADOS NA ATMOSFERA DA TERRA

Jatos em menor escala podem ser observados na alta atmosfera terrestre em eventos transientes luminosos, Elves, tigers, pixels, trolls, gnomes, jatos azuis gigantes, jatos azuis, sprites. A seguir descrevo cada uma destas estruturas (Motter, 2017):

**Sprites:** Os Red Sprites ocorrem em altas altitudes, entre 30 a 95 km, em decorrência de tempestades elétricas. São vermelhos e duram milissegundos com velocidades próximas a  $10^7 m/s$ . Em regiões mais brilhantes eles alcançam altitudes entre 60 e 65 km.

**Halos de Sprites:** Aparentam discos luminosos, são observados antes dos sprites, tendo um formato de propagação de cima para baixo. São observados à altitudes entre 70 e 85 km, como os sprites duram milissegundos.

**Jatos azuis e azuis gigantes:** Estes jatos são observados em altitudes de aproximadamente 40km com durações de aproximadamente 200 e 400 milissegundos com velocidades próximas de 100 km/s, apresentam coloração azul e ocorrem para cima em cones estreitos.

**Elves:** São estruturas com formatos semelhantes a anel em expansão, fenômeno brilhante com duração próxima a 500 milissegundos, sendo causadas por pulso de energia decorrente na ionosfera.

**Trolls, Gnomes, Pixels e Tigers:** Trolls são estruturas semelhantes aos jatos azuis, porém apresentam uma coloração avermelhada. Gnomes são estruturas de aproximadamente 150 m com 1 km de altura apontando para cima e duram microssegundos, semelhantes a relâmpagos. Pixels tem 100 m e ocorrem em formato de domo, semelhante a flashes. Tigers são estruturas mais recentes detectadas pela primeira vez em 2004, assemelham-se a eventos transientes luminosos.

## 1.2 NÚCLEOS DE GALÁXIAS ATIVAS

De acordo com Motter (2017), em 1943, foram descritos por Carl Seyfert o espectro de galáxias com alto brilho na região central, essas galáxias viriam a ser as primeiras AGNs conhecidas como Galáxias do tipo Seyfert, porém os estudos acerca desses objetos só se deram a partir da década de 50 com estudos de quasares ou fontes de rádio quase estelares. Quasares inicialmente eram classificados como objetos estelares devido ao seu alto brilho e uma aparência pontual, apresentando espectros com linhas de emissão da série de Balmer descoberto em 1963, essa aparência se dá ao fato de serem muito luminosos e distantes.

Conforme Anjos (2014, p.59,60) existem distintas classes de AGNs baseadas em diversos fatores, como por exemplo, o espectro de emissão em diferentes comprimentos. As classes mais conhecidas são:

**Radio galáxias:** Divididas em duas classes Fanaroff-Riley I, na qual apresentam baixa emissão em rádio de acordo com a distância do centro, e Fanaroff-Riley II, na qual apresentam emissão por meio dos jatos.

**Quasares:** Apresentando alta luminosidade sendo fatores ópticos responsáveis por

suas definições. São corpos distantes e identificados devido sua forte emissão em rádio.

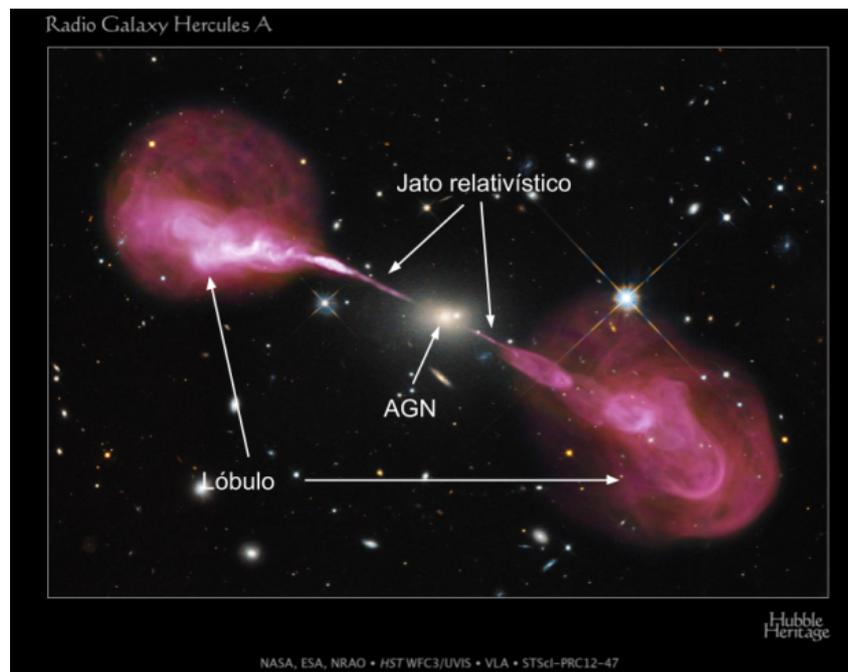
**Blazares:** São classificados como uma subclasse dos quasares de forma que os jatos estão posicionados próximos à linha de visada, sendo desta forma promissoras fontes de raios cósmicos.

**Galáxias Seyfert:** São galáxias comuns no universo local com destaque para o seu núcleo, o qual difere das galáxias normais apresentando forte intensidade de brilho no núcleo. Galáxias Seyfert são classificadas em duas subcategorias Tipo 1 e 2, as do tipo 1 podem apresentar linhas largas e estreitas enquanto o tipo 2 apresentam apenas linhas estreitas.

A estrutura formada pela emissão em rádio resultante das partículas aceleradas no interior do jato forma lóbulos quase simétricos, onde a emissão do jato é dada de forma perpendicular ao disco de acreção. Na Figura 4 é possível identificar a estrutura da AGN, o jato relativístico proveniente do núcleo e a formação dos lóbulos nos extremos, segundo Motter (2017,p.30):

A componente 'extensa' é formada por dois lóbulos de emissão em rádio em escalas de megaparsec localizados de forma aproximadamente simétrica em ambos os lados do centro da galáxia. A componente compacta é formada por um jato em escalas de parsec<sup>1</sup> e quiloparsec. A componente compacta emite na faixa do rádio e em raios-X e que pode ser detectada inclusive no ótico, como é o caso do jato da radiogaláxia M87 e do quasar 3C 273.

FIGURA 4 – Emissão radio da radiogaláxia Hércules A (3C 348) detectada pelo Very Large Array (VLA) em falsa escala de cor, sobreposta a uma imagem obtida pelo Hubble Space Telescope.



Fonte: NASA and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA).

<sup>1</sup>1 parsec =  $3,086 \times 10^{16} m$

### 1.3 ACELERAÇÃO DE PARTÍCULAS

Matthews (2020) descreve que jatos são estruturas ideais para o processo de aceleração de partículas, levando em consideração suas estruturas turbulentas com intensos campos magnéticos. A aceleração pode ocorrer tanto pela colisão quanto pelo campo magnético. Marcowith (2016) descreve a relação entre a aceleração sem colisões por mediação de forças eletromagnéticas e descreve alguns ambientes.

As ondas de choque astrofísicas estão presentes nas fontes de partículas de alta energia (supra-térmicas), como remanescentes de supernovas (SNRs), aglomerados de galáxias (GCs), núcleos galáctico ativos (AGN) ou explosões de raios gama (GRBs). (Marcowith, 2016, p.3)

Ainda descreve que é possível dividir em três cenários a "colisão" de partículas com campos magnéticos fortes: a primeira descreve uma interação de partículas ressonantes com ondas de plasma, no segundo momento a corrente de plasma nos refluxos e no terceiro cenário a colisão é produzida pelo gradiente de partículas energéticas. Nestes três mecanismos, descritos com mais detalhes a seguir, as partículas ganham energia. Marcowith (2016, p.8).

- **Aceleração de choque difuso:** Na aceleração de choque difuso, as partículas ganham energia espalhando-se (colidindo) regiões com campos magnéticos presentes nos meios. A diferença de velocidade de propagação dos centros de espalhamento induz um ganho sistemático de energia a cada cruzamento de choque.
- **Aceleração do desvio de choque:** Na aceleração de choque, as partículas ganham energia à medida que seus centros de orientação se movem ao longo do campo elétrico convectivo devido aos efeitos de desvio do gradiente do campo magnético ou da curvatura da frente de choque.
- **Aceleração de superfície de choque:** Na superfície de choque, as partículas são refletidas pelo potencial de choque e, em seguida, retornam à frente de choque devido à força de Lorentz. Durante este processo, as partículas são aprisionadas na frente de choque e aceleradas pelo campo elétrico convectivo.

Dentre os mecanismos apresentados, Matthews (2020) descreve que o mais efetivo no processo de aceleração a níveis de UHECRs (Ultra High Energy Cosmic Rays) é o aceleração de choque difuso. O problema desse mecanismo está relacionado a energia necessária para a interação entre a partícula e os meios. Para que ocorra a injeção da partícula faz-se necessário uma colisão quase perpendicular na zona de choque e este processo não é efetivo para partículas com baixas energias. Esse mecanismo é geralmente encontrado na região central do jato, ou seja, região com deslocamento intenso de matéria em um único sentido e campos magnéticos bem definidos. Nas regiões onde ocorrem os refluxos e a formação dos vórtices, como pode ser observado na Figura 3, temos os mecanismos de aceleração difusa menos eficiente, conhecido como mecanismo de Fermi de segunda ordem (Matthews, 2020, p.6).

#### 1.3.1 PROCESSO DE ACELERAÇÃO NO INTERIOR DO JATO

Dentro do jato é possível localizar diferentes regiões do jato favorável no processo de aceleração, levando em consideração o intenso fluxo de matéria formando possivelmente campos

magnéticos intensos, como discutido anteriormente, sendo esses os principais mecanismos no processo de aceleração de partículas. Matthews (2020) descreve esses processos de acelerações no interior do jato, sendo então possível encontrar o mecanismo mais propício no processo de aceleração em jatos altamente colimados, jatos esses que favorecem a formação de fluxo bem definido de matéria e com alta intensidade, sendo, condições essas que favorecem a formação de campos magnéticos bem definidos favorecendo a aceleração.

Embora jatos colimados favorecem e facilitam o processo de aceleração por meio da interação da partícula com o "Beam" do jato, como pode ser visto na figura 3, os jatos com intensos vórtices e refluxos podem também ser candidatos no processo de aceleração, porém a probabilidade da partícula escapar dessas regiões caóticas de campos magnéticos e fluxo de matéria arbitrária são muito baixas. Levando em consideração os pontos citados, a idealização de jatos colimados nos descrevem ambientes ideais na formação de jatos colimados favoráveis na aceleração de partículas e como o ambiente e o jato interferem na formação dessas estruturas colimadas.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

A pesquisa visa compreender o processo na formação de jatos relativísticos, estruturas extragalácticas geradas em buracos negros e responsáveis por descrever mecanismos de aceleração de partículas. A pesquisa objetiva analisar fatores físicos responsáveis pela formação de jatos colimados, com o intuito de compreender estruturas favoráveis ao processo de aceleração de partículas.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar propriedades físicas e a estrutura dos jatos relativísticos;
- Identificar fatores que favorecem o processo de formação de jatos relativísticos altamente colimados e com alta luminosidade.

### 2.3 JUSTIFICATIVA

Partículas relativísticas, ou seja, com velocidades muito próximas a da luz, que se propagam pelo espaço são denominadas de raios cósmicos de altas energias (UHECR, em inglês). Estas partículas são detectadas em grandes observatórios terrestres, como o Pierre Auger Observatório, maior Observatório de raios cósmicos do mundo, localizado em Malargue, na Argentina. Uma das grandes perguntas da ciência atual é a origem destas partículas. Sabemos que sua origem é extragaláctica, mas conhecemos pouco sobre suas fontes, mecanismos de aceleração e interação destas partículas com o meio durante sua propagação pelo Universo. Uma provável fonte de UHECR é o jato relativístico devido sua alta potência ( $\sim 10^{46} \text{ erg.s}^{-1}$ ) e emissão de matéria no Universo. Esta pesquisa tem como objetivo compreender as melhores condições de emissão de partículas pelo jatos, estudando com detalhes características e modelos de jatos relativísticos de AGNs.

### 3 METODOLOGIA

O estudo apresentado se fundamenta na análise de dados provenientes de um programa computacional denominado PLUTO (<http://plutocode.ph.unito.it/>), responsável por simular jatos relativísticos resolvendo as equações da hidrodinâmica relativística (RHD) com o plasma, e nos fornecendo análises bidimensionais ou tridimensionais da evolução do jato pelo tempo, considerando densidade, pressão e velocidade do mesmo.

Tendo conhecimento das características estruturais e físicas dos jatos relativísticos e dos parâmetros responsáveis pelas diferentes geometrias dos jatos, as mudanças dos valores nos parâmetros das simulações nos possibilitou identificar quais fatores físicos favorecem a formação de jatos quentes (colimados com alta potência) ou frios (com muitas perturbações e refluxos resultando em perda de potência), além de outras características. Os valores físicos foram definidos em tabelas para cada simulação.

As características analisadas nos plots descrevem choques internos do jato (vide Figura 3), o arco de choque localizado na extremidade superior do jato, os vórtices formados nas laterais próximas ao choque interno e a instabilidade de Kelvin-Helmholtz. Este último fenômeno ocorre no encontro entre fluidos em diferentes estados energéticos.

#### 3.1 EQUAÇÕES DA HIDRODINÂMICA RELATIVÍSTICA

O programa PLUTO descreve e resolve as equações da hidrodinâmica relativística e da magneto-hidrodinâmica relativística. O programa se baseia nas equações de estado, continuidade e da termodinâmica e desenvolve um conjunto conservativo de variáveis de estado descritas pelas seguintes equações (Matthews, 2018):

$$\frac{\partial D}{\partial t} = -\nabla \cdot (D\mathbf{v}), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{m}}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mathbf{m}\mathbf{v}) - \nabla P, \quad (2)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{m}. \quad (3)$$

Aqui  $v$  é a velocidade e  $P$  é a pressão. As quantidades conservadas são:  $D = \rho\gamma$ ,  $\mathbf{m} = \rho h\gamma^2\mathbf{v}$ ,  $E = \rho h\gamma^2 P$ , onde  $\rho$ ,  $\gamma$  e  $h = (e + P)/\rho$  são a densidade, fator de Lorentz e entalpia, respectivamente. A variável  $e$  é a energia interna do sistema. O fator de Lorentz é dado por:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4)$$

com  $\mathbf{v}^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$ , sendo essa a velocidade de propagação do jato e como estamos trabalhando em sistema bidimensional consideramos apenas a velocidade em  $x$  e em  $y$ . A equação de estado é a equação do gás ideal. As equações 1 - 3 relacionam todas as variáveis necessárias para a evolução do jato relativístico (Westhuizen, 2015).

## 4 RESULTADOS

Os valores apresentados e expressos estão dimensionados ao sistema de unidades do PLUTO, desta forma as unidades de medida e valores são definidos por unidades do programa. As tabelas apresentadas em cada plot contém informações importantes contendo os seguintes dados para cada simulação:

- **Fator de Lorenz:** Valor responsável em associar a relação entre a velocidade de jato e a velocidade da luz, indispensável quando trabalhado em meios relativísticos, sendo possível associar distâncias e unidade de tempo.
- **Velocidade:** Velocidade do jato fornecido ao programa.
- **Razão entre densidades:** Valor referente entre a razão de densidade interna (do jato) e externa ao jato (ambiente).
- **Densidade do Jato:** Densidade interna do jato.
- **Densidade do ambiente:** Densidade externa.
- **Mach Number:** Razão existente entre a velocidade de propagação do jato em relação a velocidade do som no meio ( $M_b = v/C_s$ ).
- **Coeficiente (índice) adiabático:**  $\gamma^{ad}$  Grandeza adimensional definida pela razão entre o calor específico molar, a pressão constante ( $c_p$ ) e o volume constante ( $c_v$ ).
- **Pressão:** Pressão inicial do jato.

Para o gás ideal, a pressão pode ser obtida pela expressão:

$$P = \frac{(\gamma^{ad} - 1)\rho C_s^2}{\gamma^{ad}(\gamma^{ad} - 1 - C_s^2)}. \quad (5)$$

- **Luminosidade:** Potência do jato em unidade erg/s, obtida através da equação 6 de luminosidade  $Q$ .

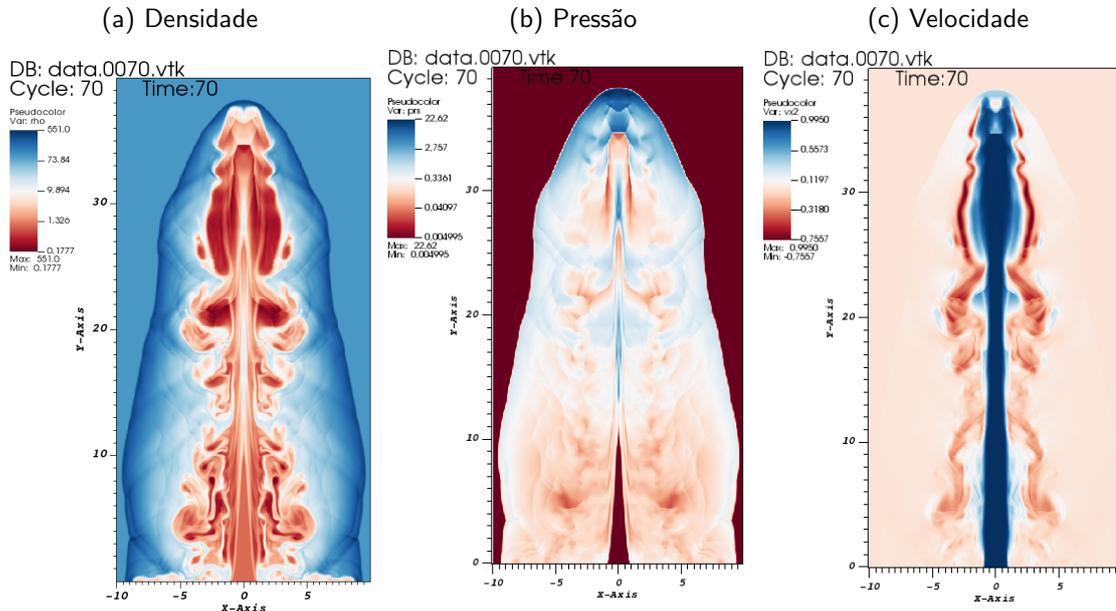
$$Q = \pi r_j^2 v_j \left[ \gamma_j (\gamma_j - 1) \rho_j c^2 + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \rho^2 P_j \right]. \quad (6)$$

O programa fornece diferentes definições quanto a cálculos computacionais e métodos para a realização da simulação. Com o intuito de optar entre a melhor definição fornecida, realizou-se a simulação do mesmo jato para duas definições, (definições 1 e 2).

A definição 1 utiliza o método parabólico para a reconstrução da simulação, a definição 2 consiste em reconstrução ponderada essencialmente não oscilatória. Os parâmetros utilizados são os mesmos, os gráficos fornecidos podem ser vistos nas Figuras 5 e 6.

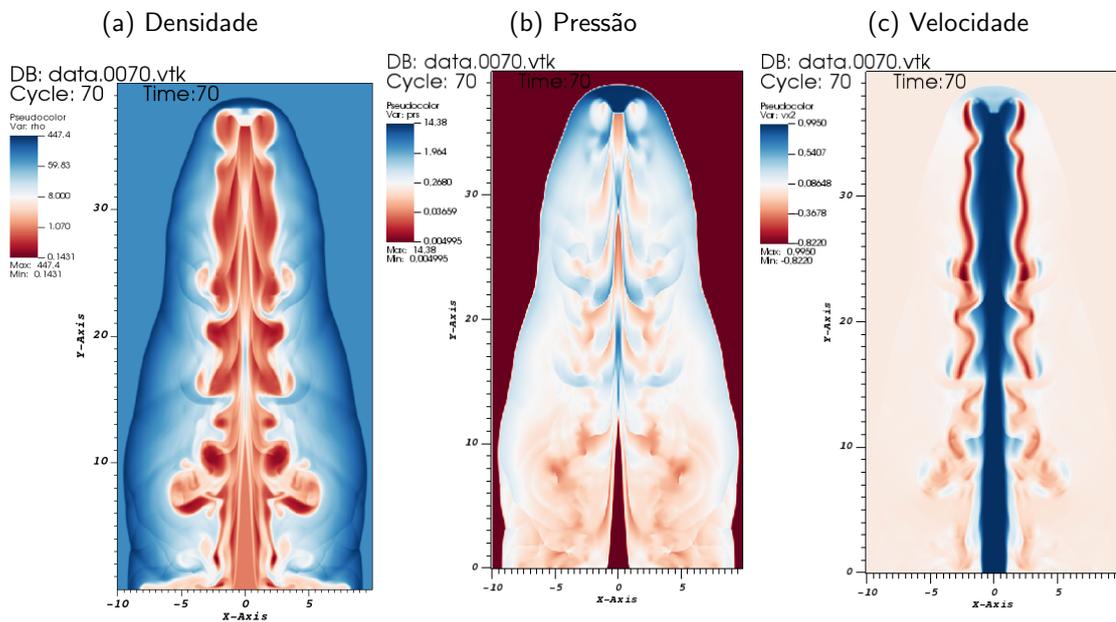
Ao analisar a tabela 1, nota-se que os valores empregados em ambos os casos são os mesmos, os formatos entre os jato das Figuras 5 e 6 são semelhantes, apresentando como por exemplo as instabilidades de Kelvin-Helmholtz, o arco de choque e o choque interno muito similares. No entanto, a maior diferença está relacionada aos vórtices apresentados no gráfico (a) da Figura 5, onde o mesmo apresenta uma maior riqueza em detalhes com relação as densidades internas no tronco do jato ao se comparar com o gráfico (a) da Figura 6. Os dados obtidos nesse primeiro resultado nos fizeram optar pelo método parabólico. Dando

FIGURA 5 – Jatos com velocidade  $0,995c$  com densidade externa  $100,0$ , densidade interna  $1$  e Pressão  $0,05$  para o método parabólico.



Fonte: O autor.

FIGURA 6 – Jatos com velocidade  $0,995c$  com densidade externa  $100,0$ , densidade interna  $1$  e Pressão  $0,05$  para a reconstrução ponderada .



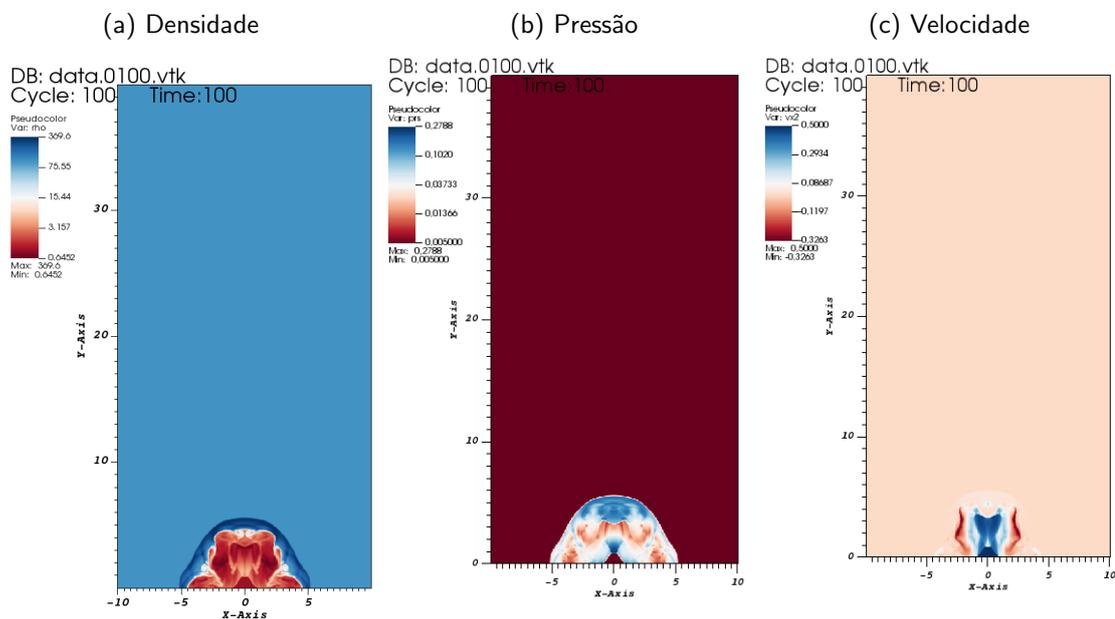
Fonte: O autor.

então continuidade nas simulações passou-se a estudar as velocidades no jato. O primeiro caso apresentado na Figura 7 considera a velocidade do jato como  $0,5c$ . Com relação ao gráfico nos sentidos  $x$  e  $y$  de todos os plots apresentam dimensões de distância resultante da evolução do jato, tanto em distancia em relação ao motor central como a evolução do raio do jato. Já coloração apresentam as respectivas intensidades de Densidade, Pressão e Velocidade para cada jato sendo possível observa las na lateral de cada plot.

Parâmetros		Valor
Fator de Lorenz	$\gamma$	10,01
Velocidade	$v$	0,995c
Razão entre as densidades	$\eta$	0,01
Densidade do jato	$\rho_b$	1,0
Densidade do ambiente	$\rho_{am}$	100,0
Mach Number	$M_b$	3,66
Índice adiabático	$\gamma^{ad}$	5/3
Pressão	$P$	0,05
Luminosidade	$Q$	$4,2 \times 10^{33}$

TABELA 1 – Tabela referente a Figura 5 e 6 - Definição 1 e 2.

FIGURA 7 – Jatos com densidade externa 100, densidade interna 1,0, Pressão 0,005 e velocidades 0,5c

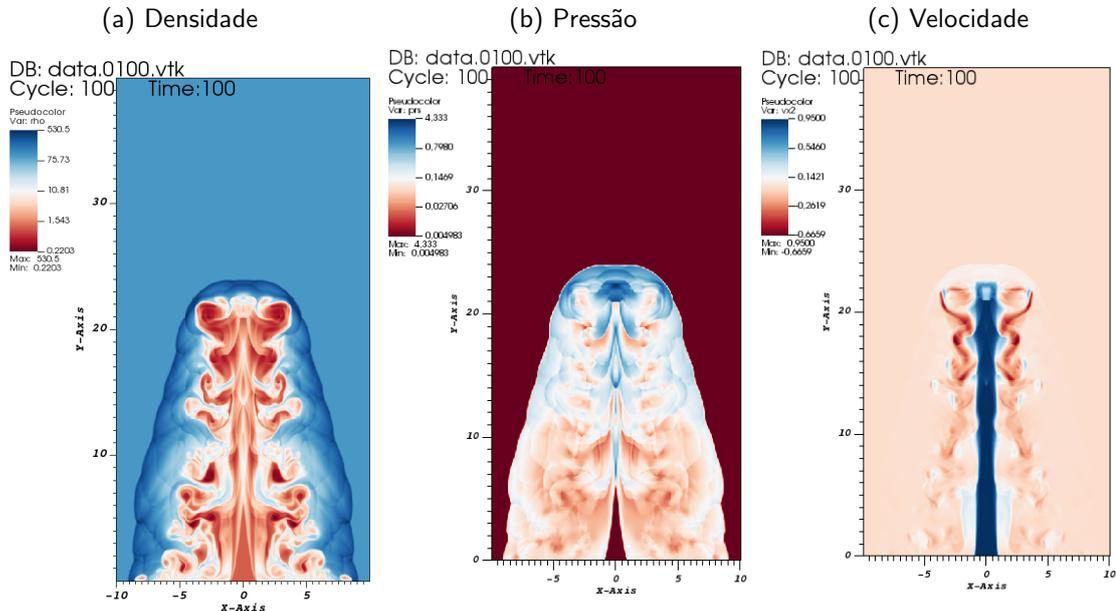


Fonte: O autor.

Como pode ser observado no gráfico (c) da Figura 7, o jato apresenta uma perda de velocidade e a divisão na ponta do jato logo após o arco de choque resulta de uma baixa velocidade na propagação do jato. A estrutura observada no gráfico 7-(a) descreve muita perturbação e formação de vórtices, desta forma, destaca-se a característica de um jato frio e lenta propagação no espaço. Na Figura 8 modificou-se a velocidade para 0,95c.

No gráfico (a) da Figura 8 é possível observar um maior avanço do jato no mesmo intervalo de tempo (sendo o intervalo de tempo correspondente ao time encontrado no topo das figuras onde no geral a comparação entre plots variando características específicas de um para o outro foram realizadas em um mesmo intervalo de tempo), porém ainda se torna possível observar muitas formações de vórtices, onde ocorre a dissipação e perda de potência do jato devido as instabilidades de Kelvin-Helmholtz. No gráfico 8-(b) nota-se um destaque na pressão na parte superior do jato logo após o arco de choque, sendo possível identificar o deslocamento

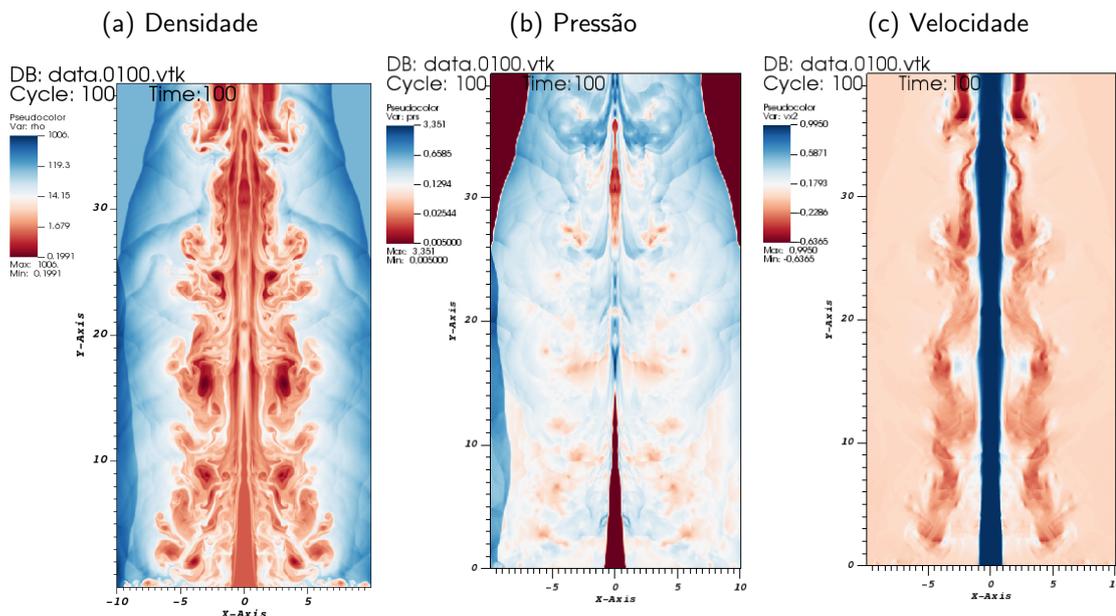
FIGURA 8 – Jatos com densidade externa 100, densidade interna 1,0, Pressão 0,005 e velocidades 0,95c.



Fonte: O autor.

da pressão da base ao topo do jato. A velocidade observada no gráfico 8-(c) apresenta não só um fluxo central, mas sim uma dissipação de velocidade nos sentidos laterais responsáveis nas formações dos vórtices. Os gráficos da figura 9 mostram jatos com velocidade de 0,995c.

FIGURA 9 – Jatos com densidade externa 100, densidade interna 1,0, Pressão 0,005 e velocidades 0,995c.



Fonte: O autor.

Nos gráficos da figura 9 destacam-se a propagação do jato evadindo os limites laterais e superiores propostos, resultado esse obtido a partir da alta velocidade do plasma. No gráfico

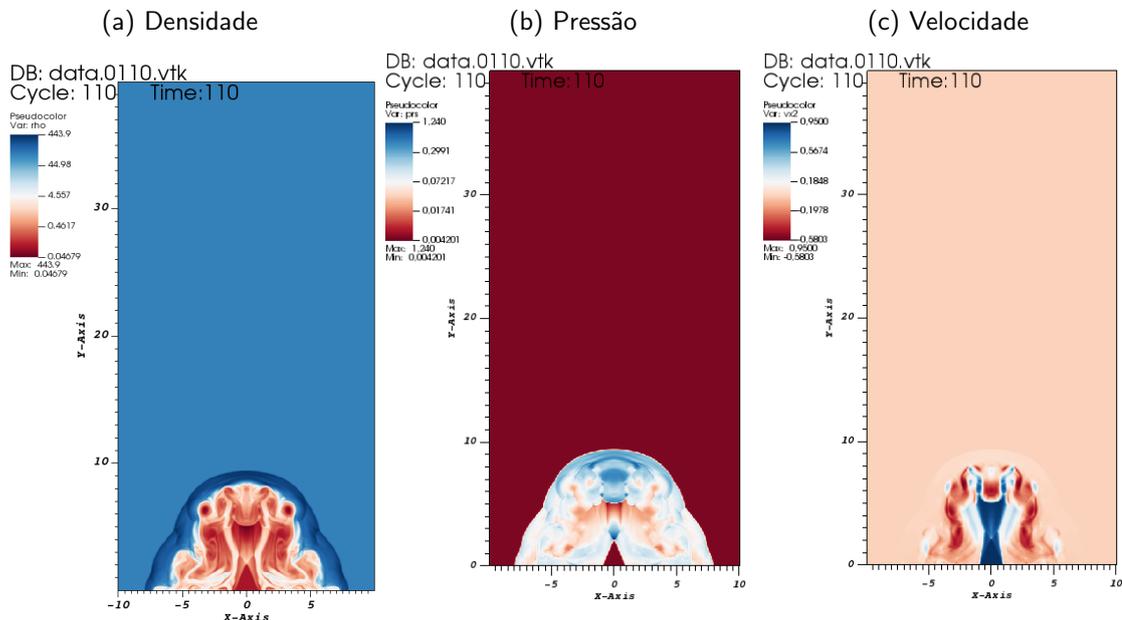
Parâmetros		Figura 7	Figura 8	Figura 9
Fator de Lorenz	$\gamma$	1,1547	3,202	10,01
Velocidade	$v$	0,5c	0,95c	0,995c
Razão entre as densidades	$\eta$	0,01	0,01	0,01
Densidade do jato	$\rho_b$	1,0	1,0	1,0
Densidade do ambiente	$\rho_{am}$	100	100	100
Mach Number	$M_b$	0,822	1,56	11,05
Índice adiabático	$\gamma^{ad}$	5/3	5/3	5/3
Pressão	$P$	0,005	0,005	0,005
Luminosidade	$Q$	$2,1 \times 10^{31}$	$2,1 \times 10^{30}$	$4,258 \times 10^{33}$

TABELA 2 – Tabela referente as Figuras 7, 8 e 9.

9-(c) é possível ver a ênfase na velocidade no centro do jato onde se localiza o choque interno. A propagação de pressão ao decorrer do jato se dá de forma quase simétrica, como pode ser observado no gráfico 9-(b). Após analisar as Figuras 7, 8 e 9, nota-se que as três apresentam formações de vórtices, sendo este um resultado obtido devido aos valores de densidade do jato e do meio escolhidos. Os três casos representam a formação de jatos frios com uma rápida evolução do jatos para velocidades acima de 0,995c.

A próxima etapa consistiu em variar a densidade interna ou densidade do jato entre 0,1 e 10.

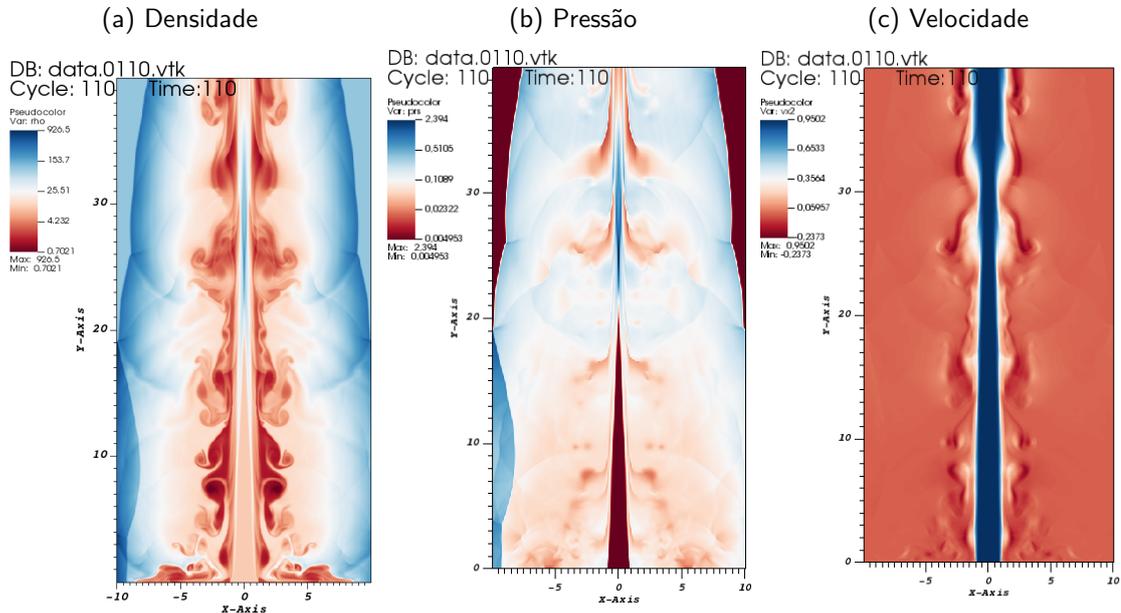
FIGURA 10 – Jatos com velocidades 0,95c, densidade externa 100, pressão 0,005 e densidade interna 0,1.



Fonte: O autor.

Os resultados obtidos nos gráficos da Figura 10 se assemelham com os obtidos na Figura 7, a baixa densidade do material do jato causa dificuldades à sua propagação, levando-o a obter características semelhantes a jatos com baixas velocidades.

FIGURA 11 – Jatos com velocidades 0,95c, densidade externa 100, pressão 0,005 e densidade interna 10,0.



Fonte: O autor.

Parâmetros		Figura 10	Figura 11
Fator de Lorenz	$\gamma$	3,202	3,202
Velocidade	$v$	0,95c	0,95c
Razão entre as densidades	$\eta$	0,001	0,1
Densidade do jato	$\rho_b$	0,1	10,0
Densidade do ambiente	$\rho_{am}$	100	100
Mach Number	$M_b$	3,5	32,76
Índice adiabático	$\gamma^{ad}$	5/3	5/3
Pressão	$P$	0,005	0,005
Luminosidade	$Q$	$4,066 \times 10^{32}$	$4,066 \times 10^{32}$

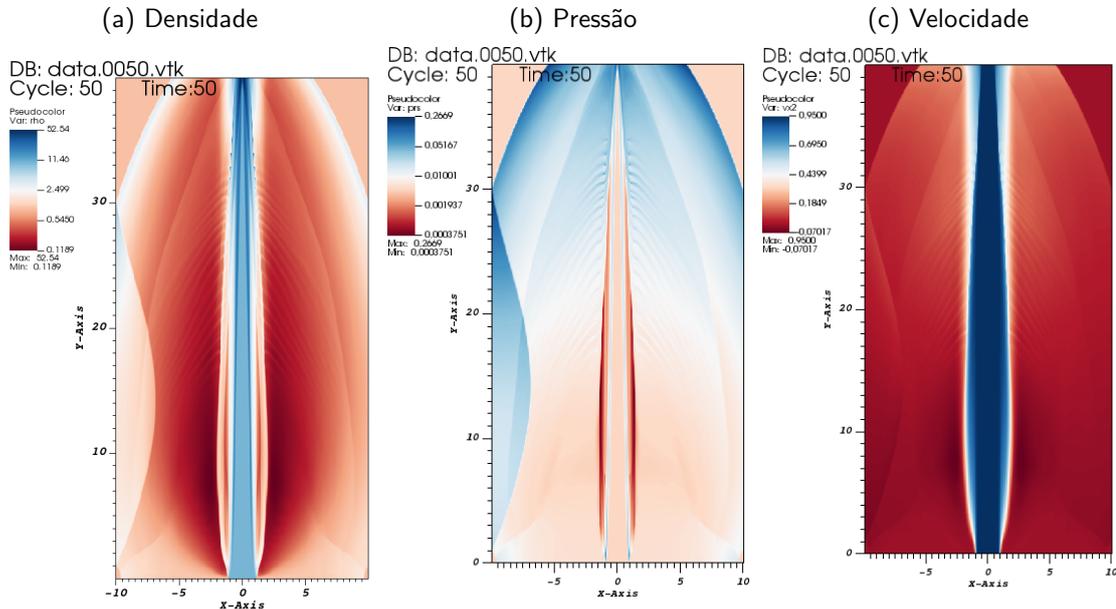
TABELA 3 – Tabela referente as Figuras 10 e 11.

Ao observar o gráfico (c) na Figura 11, observa-se que a velocidade é favorecida por conta da razão entre as densidades; de forma que o choque interno tende a aumentar a velocidade de toda a estrutura, conseqüentemente, o fluxo entre as partículas presentes no jato aumenta. O gráfico 11-(a) apresenta resultados interessantes, onde a densidade do jato diminui a formação de vórtices, a instabilidade Kelvin-Helmholtz ocorre de forma sutil, causando pouca perturbação com relação a velocidade de propagação do jato.

Dentre os jatos apresentados, o da Figura 11 apresenta as melhores características quanto a jatos quentes (sem instabilidades de Kelvin-Helmholtz e vórtice), desta forma, podemos concluir que jatos com maiores velocidades e razão alta entre densidades resultam em melhores desempenhos quanto a formação de jatos quentes. A próxima etapa consistiu em variar a densidade externa ou densidade do ambiente entre 1, 10 e 100.

Como dito anteriormente, a razão entre as densidades favorecem a formação de jatos

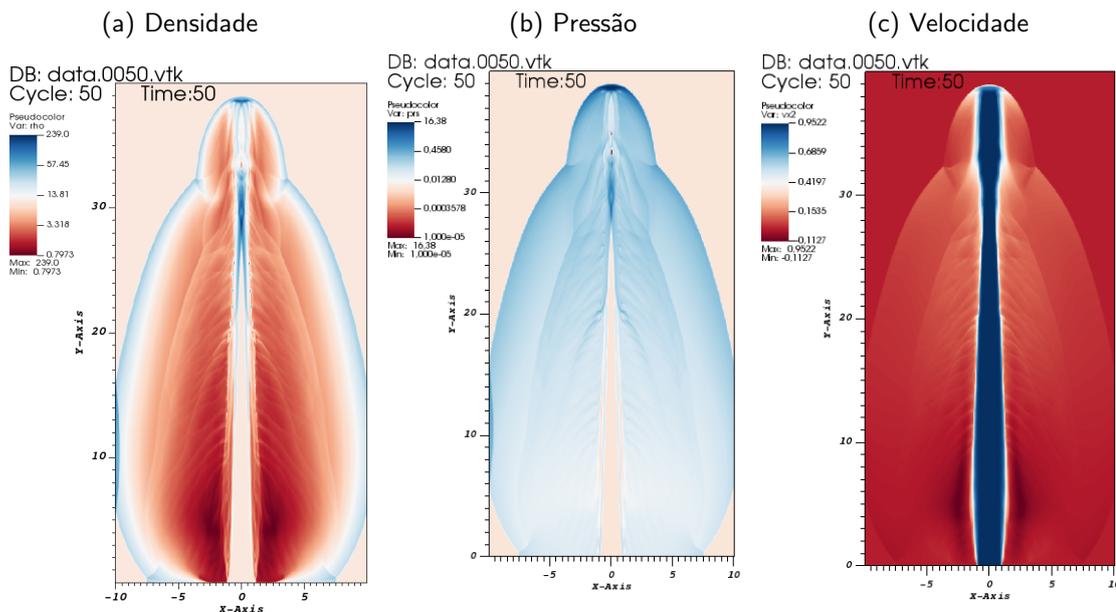
FIGURA 12 – Jatos com velocidades  $0,95c$ , densidade interna 10, pressão 0,005, densidade externa 1,0.



Fonte: O autor.

quentes, uma vez que a densidade do jato é maior que a densidade do ambiente, o mesmo tende a se propagar com pouca ou nenhuma formação de vórtices, como pode ser observado nos gráficos (a), (b) e (c) da Figura 12.

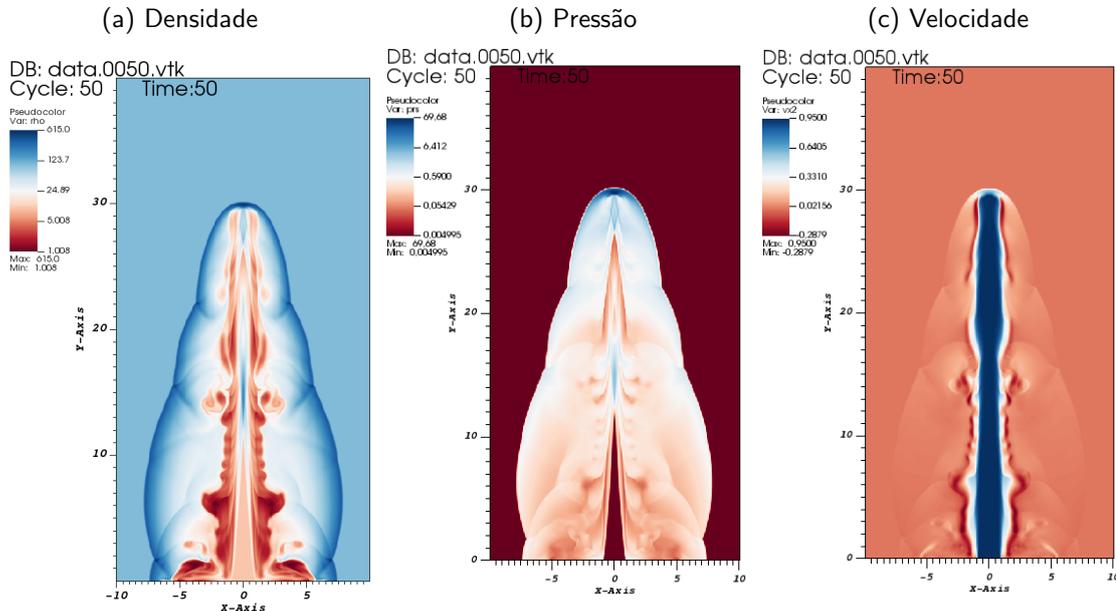
FIGURA 13 – Jatos com velocidades  $0,95c$ , densidade interna 10, pressão 0,05, densidade externa 10,0.



Fonte: O autor.

No último caso, referente a mudança de densidade, o aumento da densidade do ambiente resulta em um aumento de pressão no interior da instabilidade de Kelvin-Helmholtz

FIGURA 14 – Jatos com velocidades 0,95c, densidade interna 10, pressão 0,05, densidade externa 100,0.



Fonte: O autor.

Parâmetros		Figura 12	Figura 13	Figura 14
Fator de Lorenz	$\gamma$	3,202	3,202	3,202
Velocidade	$v$	0,95c	0,95c	0,95c
Razão entre as densidades	$\eta$	10,0	1,0	0,1
Densidade do jato	$\rho_b$	10,0	10,0	10,0
Densidade do ambiente	$\rho_{am}$	1,0	10,0	100,0
Mach Number	$M_b$	32,76	32,76	32,76
Índice adiabático	$\gamma^{ad}$	5/3	5/3	5/3
Pressão	$P$	0,005	0,005	0,005
Luminosidade	$Q$	$1,2198 \times 10^{32}$	$1,2198 \times 10^{32}$	$1,2198 \times 10^{32}$

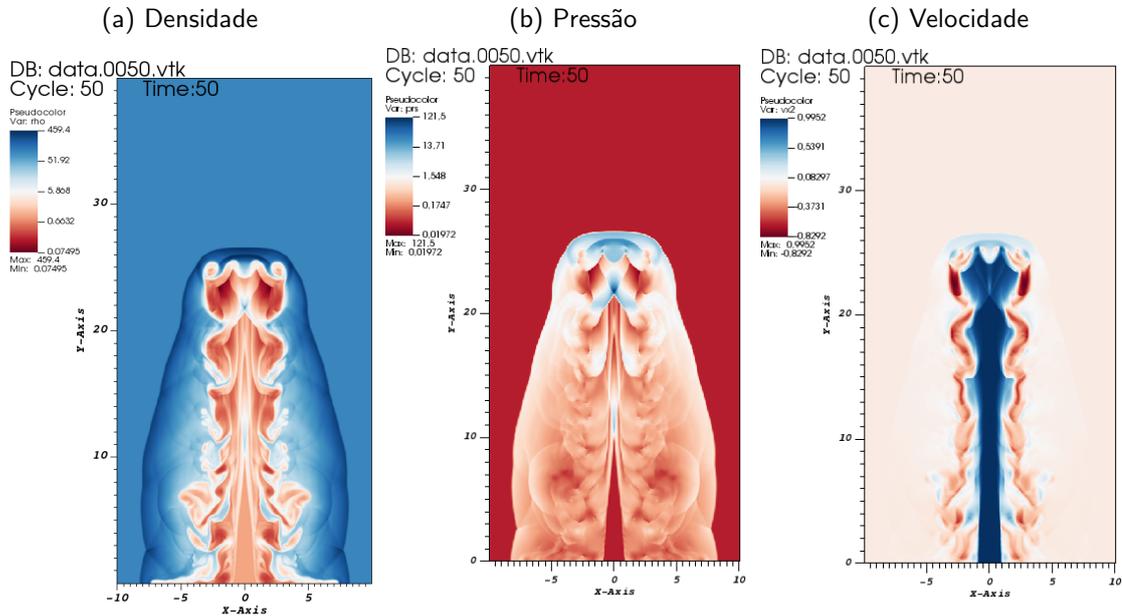
TABELA 4 – Tabela referente as Figuras 12, 13 e 14.

como pode ser visto no gráfico (b) da Figura 14, esse aumento na densidade externa resulta em uma dificuldade na propagação do jato, comprimindo-o nas laterais e dificultando a passagem através do ambiente. As últimas variáveis modificadas se referem a pressão do jato, onde estão descritas nas Figuras 15, 16 e 17.

Os gráficos obtidos na Figura 15, diferente da Figura 14, apresentam velocidades iguais a 0,995c, onde devido a diferente de densidade resultou na formação de vários vórtices e formato achatado da cabeça do jato, como visto no gráfico 15-(a). A pressão do jato, Figura 15-(b) apresenta uma certa estabilidade com destaque (como nos demais gráficos) no topo do jato onde ocorre o arco de choque.

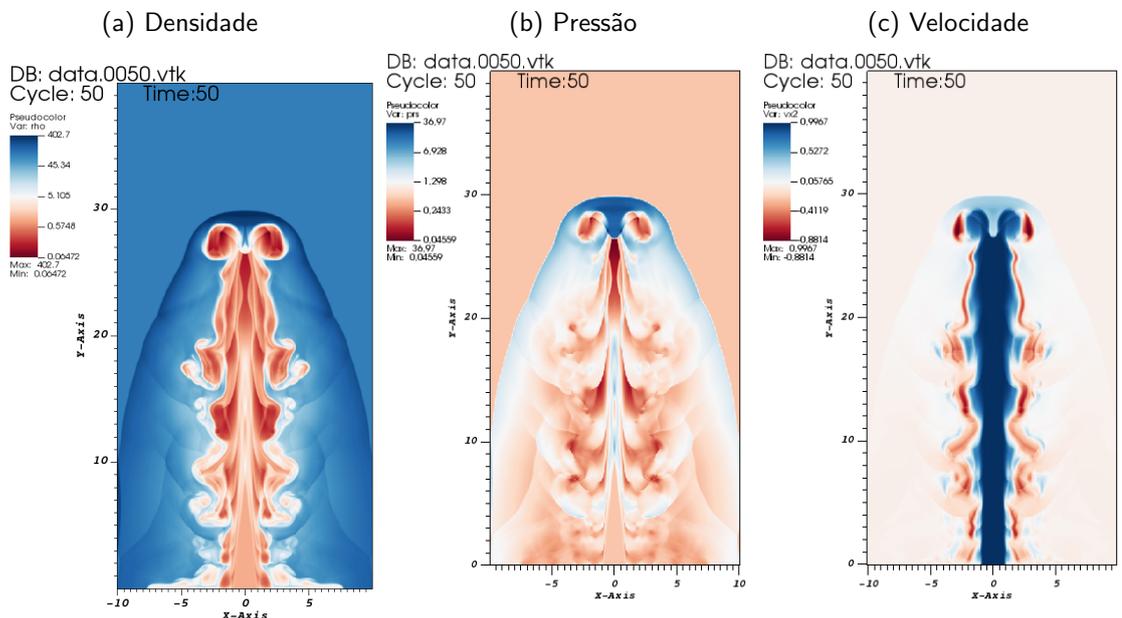
Ao comparar as Figuras 15 e 16, nota-se pouca diferença com relação ao gráfico (a). A Figura 15-(a) apresenta um maior colimação, resultado de um número de Mach maior, apesar do jato possui uma pressão menor. Quando comparados, o gráfico (b) da Figuras 16 apresenta

FIGURA 15 – Jatos com velocidades  $0,995c$ , densidade interna  $1,0$ , densidade externa  $100,0$  e pressão  $0,05$ .



Fonte: O autor.

FIGURA 16 – Jatos com velocidades  $0,995c$ , densidade interna  $1,0$ , densidade externa  $100,0$  e pressão  $0,5$ .

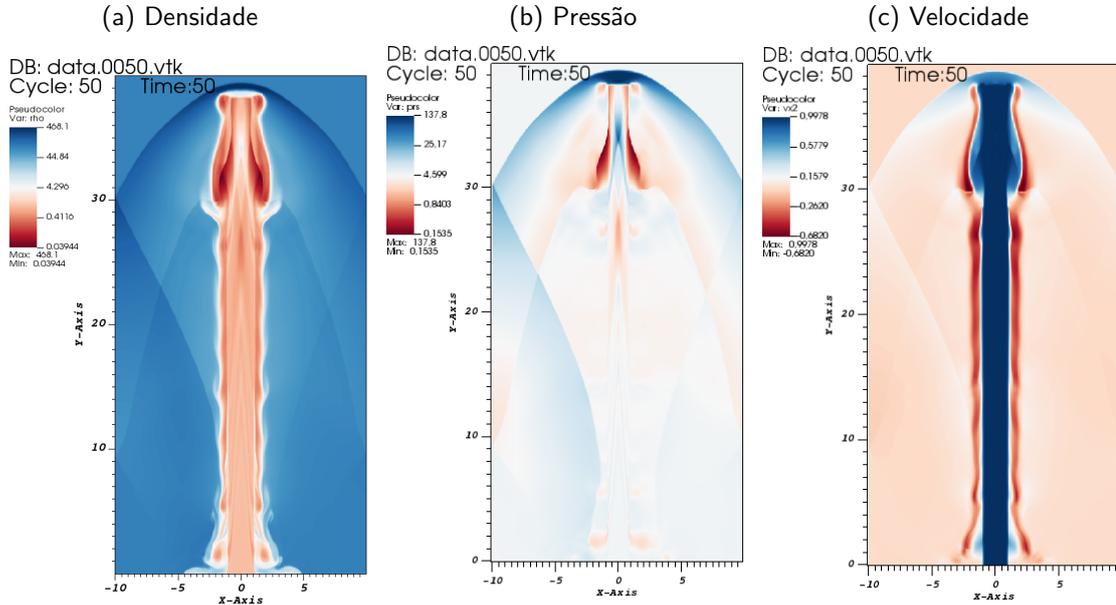


Fonte: O autor.

um aumento de pressão, porém não o suficiente para se caracterizar como um jato quente.

Obteve-se na Figura 17 o jato mais quente apresentado, no gráfico (a) é possível analisar que a pressão externa elevada favorece a pouca formação de vórtex, além de uma sutil e baixa instabilidade de Kelvin Helmholtz. O gráfico 17-(b) nos indica uma alta pressão proveniente do choque interno que se propaga até as bordas do casulo do jato, essa pressão

FIGURA 17 – Jatos com velocidades 0,995c, densidade interna 1,0, densidade externa 100,0 e pressão 5.



Fonte: O autor.

Parâmetros		Figura 15	Figura 16	Figura 17
Fator de Lorenz	$\gamma$	10,01	10,01	10,01
Velocidade	$v$	0,995c	0,995c	0,995c
Razão entre as densidades	$\eta$	0,01	0,01	0,01
Densidade do jato	$\rho_b$	1,0	1,0	1,0
Densidade do ambiente	$\rho_{am}$	100,0	100,0	100,0
Mach Number	$M_b$	4,6	1,63	1,26
Índice adiabático	$\gamma^{ad}$	5/3	5/3	5/3
Pressão	$P$	0,05	0,5	5,0
Luminosidade	$Q$	$4,25 \times 10^{33}$	$4,2586 \times 10^{33}$	$4,2586 \times 10^{33}$

TABELA 5 – Tabela referente as Figuras 15, 16 e 17.

impulsiona o deslocamento do jato. Por fim, podemos analisar a velocidade resultante no centro do jato no gráfico 15-(c) onde a dispersão de velocidade é muito baixa. A combinação de vários fatores nos levaram a sintetização de um jato extremamente quente e com alto desempenho como acelerador de partículas.

#### 4.1 JATOS EM RADIO-GALÁXIAS

Com o objetivo da simulação se aproximar de jatos relativísticos presentes em radio-galáxias, reproduzimos o modelo proposto por Matthews (2019, p.3), onde as simulações foram realizadas com parte das definições disponíveis na rede<sup>1</sup>. A relação entre a variação de densidade do jato de acordo com o raio do jato, é obtida a partir do seguintes perfil isotérmico:

<sup>1</sup><https://github.com/jhmatthews/jets-in-pluto>

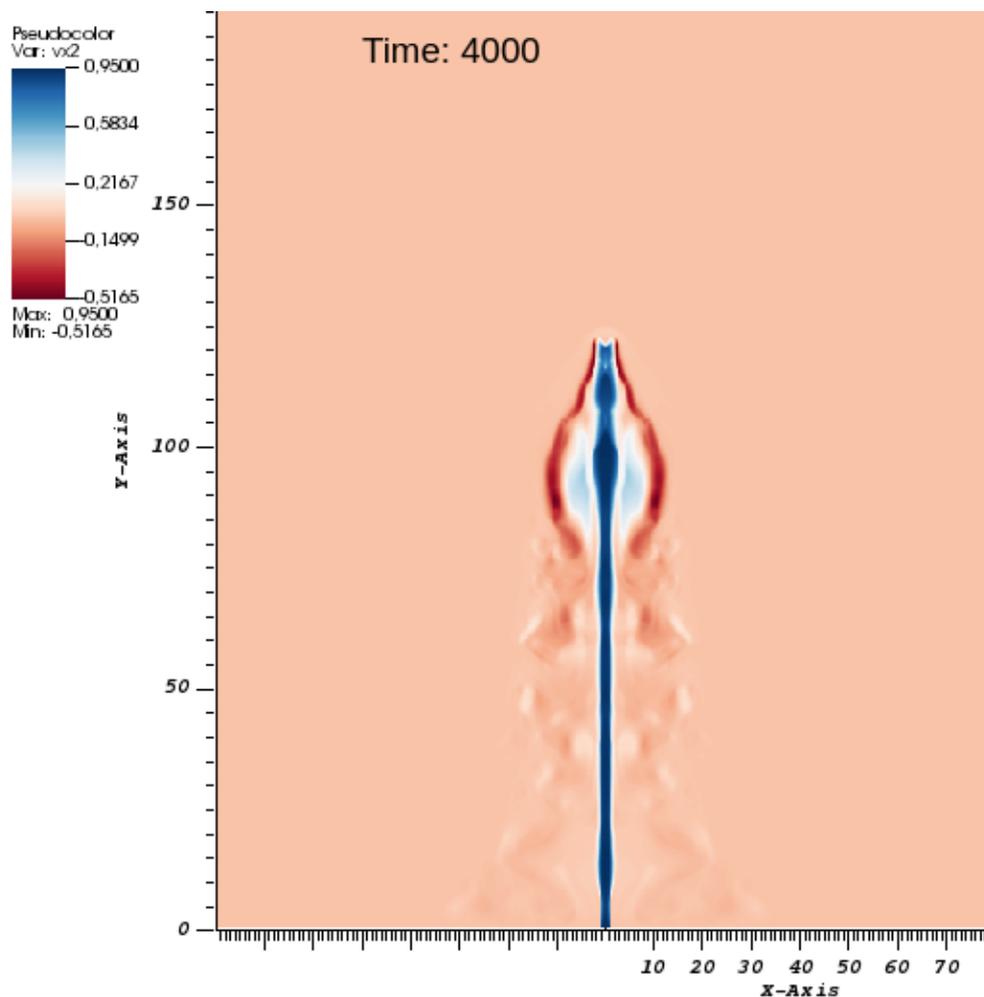
$$\rho(r) = \rho_0 \left( 1 + \frac{r^2}{r_c^2} \right)^{\frac{-3\beta}{2}}. \quad (7)$$

E a equação de estado segue a relação de Taub-Matthews (Mignone, 2005). Na equação 7,  $\rho_0 = 6 \times 10^{-27} \text{gcm}^{-3}$ ,  $r_c = 50 \text{kpc}$  (raio do jato) e  $\beta = 0.5$ . Estes valores são escolhidos para representarem os valores médios de densidade em ambientes de clusters de rádio-galáxias. Nesta relação o número de Mach é escrito da seguinte forma,

$$M_s = \sqrt{\frac{\rho v}{\gamma P}} \quad (8)$$

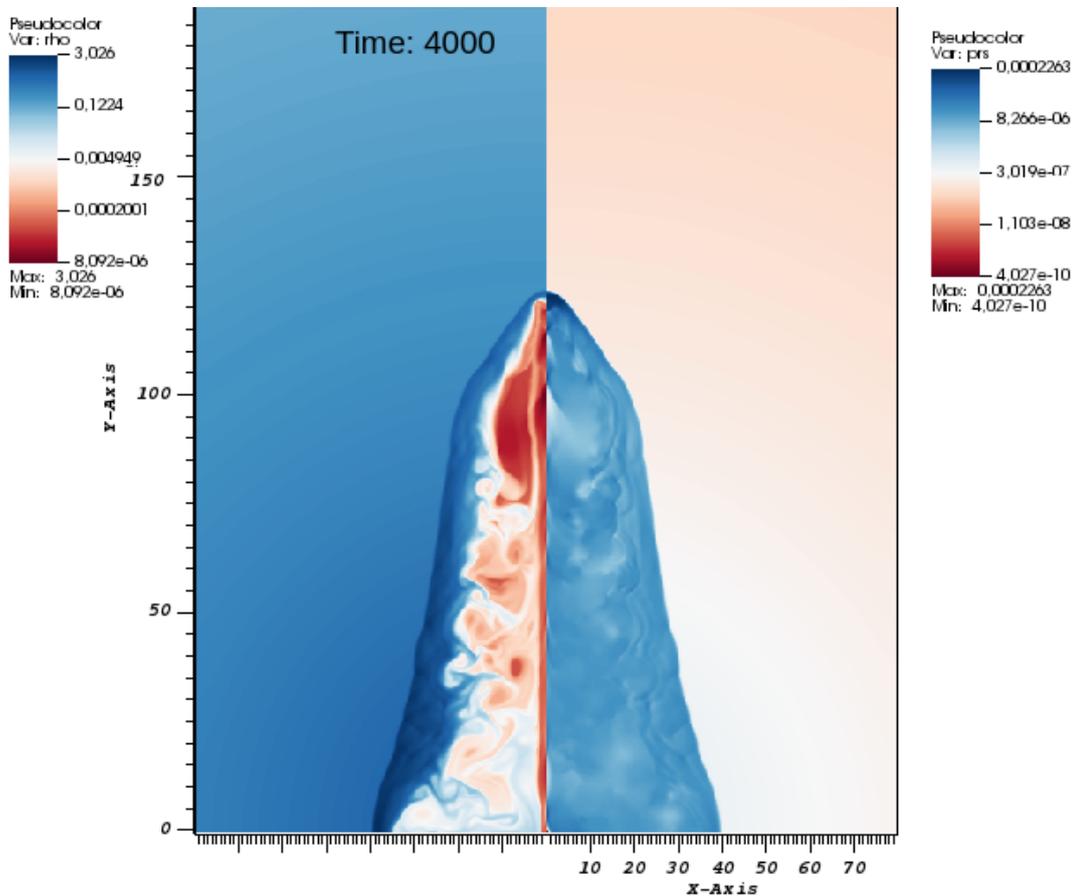
Para estas simulações, a pressão pode ser expressa em forma do número de Mach como pode ser visto na equação 8, a densidade inicial por sua vez é dada em forma de razão de densidade interna pela externa.

FIGURA 18 – Plot representando a velocidade de propagação do jato, variando a densidade a partir da razão entre densidades de  $1 \times 10^{-4}$ .



Fonte: O autor.

FIGURA 19 – Plot representando a densidade (lado esquerdo) e pressão do jato (lado direito), variando densidade a partir da razão de  $1 \times 10^{-4}$ .



Fonte: O autor.

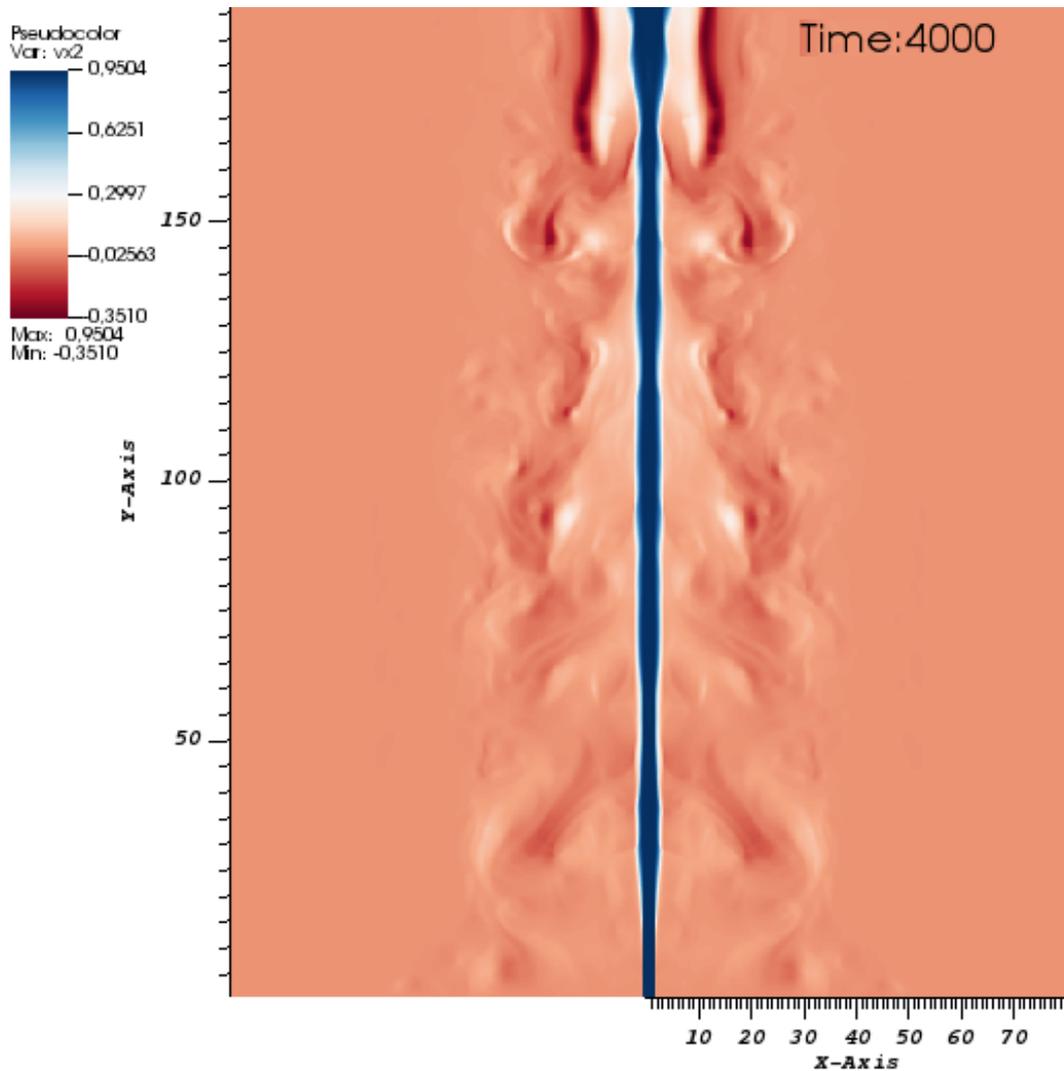
Parâmetros		Valor
Fator de Lorenz	$\gamma$	1,1547
Velocidade	$v$	0,5c
Razão entre as densidades	$\eta$	$1 \times 10^{-4}$
Mach Number	$M_b$	950
Índice adiabático	$\gamma^{ad}$	5/3
Luminosidade	$Q$	$1,21 \times 10^{44}$

TABELA 6 – Tabela referente a Figura 18 e 19.

É possível observar na Figura 18 que, como nas simulações já apresentadas, a velocidade se encontra no centro altamente colimado do jato, já a pressão e densidade como pode ser observadas nas Figuras 18 e 19, ficam claros os intensos refluxos resultantes da densidade interna menor.

Ao comparar os gráficos das Figura 18 e 19, variando a densidade com relação ao raio do jato, obteve-se uma menor propagação do jato em comparação às Figuras 20 e 21. Observou-se o efeito da densidade no processo de propagação do jato, levando em consideração que a única diferença entre eles está associada a diferentes razões de densidades. Esta nova

FIGURA 20 – Plot representando a velocidade de propagação do jato, variando a densidade com razão entre densidades a partir de  $1 \times 10^{-3}$ .



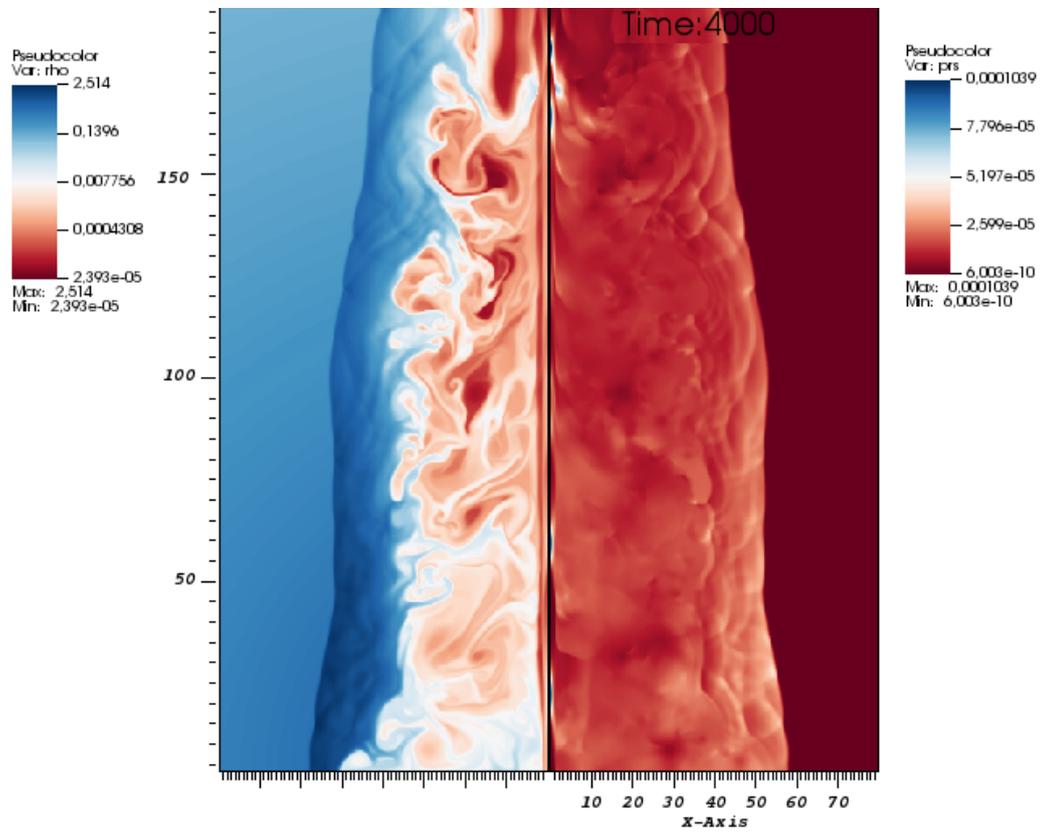
Fonte: O autor.

Parâmetros		Valor
Fator de Lorenz	$\gamma$	1,1547
Velocidade	$v$	0,5c
Razão entre as densidades	$\eta$	$1 \times 10^{-3}$
Mach Number	$M_b$	950
Índice adiabático	$\gamma^{ad}$	5/3
Luminosidade	$Q$	$1,21 \times 10^{45}$

TABELA 7 – Tabela referente a Figura 20 e 21.

abordagem de evolução da densidade resulta em altas luminosidades do jato, o que mostra ser promissor para a aceleração de partículas.

FIGURA 21 – Plot representando a densidade (lado esquerdo) e pressão do jato (lado direito), variando densidade a partir da razão de  $1 \times 10^{-3}$ .



Fonte: O autor.

## 5 CONCLUSÃO

As simulações apresentadas nos gráficos resultam em claras assimilações entre as características físicas fornecidas ao PLUTO e o conceito teórico estrutural dos jatos. Como descrito no decorrer do trabalho, é possível identificar os fatores físicos e a relação existente favorável à formação de jatos colimados, com alta luminosidade e conseqüentemente, ideais para acelerarem partículas até altas energias. Fatores como densidade interna, pressão e velocidade do jato elevados favorecem o aumento da potência do jato, fatores esses responsáveis na formação de jatos relativísticos de altíssimas energias.

Os resultados obtidos até o presente momento nos descrevem fatores necessários na formação de jatos presentes em AGNs, partindo de conceitos básicos de estruturas Galácticas favoráveis em sua formação. A continuidade do trabalho futuro visa o estudo mais aprofundado da variação da densidade do meio; bem como a inserção de partículas em estruturas internas do jato para descrição de mecanismos de aceleração por meio de campos magnéticos, tema não discutido neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- 1 MOTTER, J. C.; ABRAHAM, Z. Estudos da estrutura e evolução de jatos em núcleos ativos de galáxias usando técnicas de interferometria de longa linha de base. 2017.
- 2 ROMERO, Gustavo E. The content of astrophysical jets. **Astronomische Nachrichten**, v. 342, n. 5, p. 727-734, 2021.
- 3 MARTÍ, J. Ma et al. Morphology and dynamics of relativistic jets. **The Astrophysical Journal**, v. 479, n. 1, p. 151, 1997.
- 4 MIGNONE, A. et al. PLUTO: a numerical code for computational astrophysics. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 170, n. 1, p. 228, 2007.
- 5 ANJOS, R. C. dos. **Propagação de raios cósmicos extragaláticos**. 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- 6 MATTHEWS, J. H.; BELL, Anthony R.; BLUNDELL, Katherine M. Particle acceleration in astrophysical jets. **New Astronomy Reviews**, v. 89, p. 101543, 2020.
- 7 MARCOWITH, A. et al. The microphysics of collisionless shock waves. **Reports on Progress in Physics**, v. 79, n. 4, p. 046901, 2016.
- 8 MATTHEWS, J. H. et al. Ultrahigh energy cosmic rays from shocks in the lobes of powerful radio galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 482, n. 4, p. 4303-4321, 2019.
- 9 VAN DER WESTHUIZEN, I. P.; VAN SOELEN, B.; MEINTJES, P. J. Hydrodynamical simulations of relativistic astrophysical jets. **In: 3rd Annual Conference on High Energy Astrophysics in Southern Africa (HEASA2015)**. 2015. p. 17.
- 10 MIGNONE, A.; PLEWA, T.; BODO, G. The piecewise parabolic method for multidimensional relativistic fluid dynamics. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 160, n. 1, p. 199, 2005.