

André Bracht Burmeister

**Cinemática de galáxias PSB analisadas com os dados
do MaNGA**

Monografia apresentada ao curso Bacharelado em Física com ênfase em Astrofísica do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Física.

Orientador: Allan Schnorr Müller

Porto Alegre, Rio Grande do Sul

2024

Agradecimentos

Durante a graduação e, em especial, durante a elaboração deste trabalho, tive apoio de muitas pessoas sem as quais nada disso seria possível.

Primeiramente, quero agradecer aos meus pais Simone e Fernando, que me proporcionaram uma base sólida e estável pra que eu pudesse crescer. Sempre me incentivaram, me apoiando moral e financeiramente nos estudos, na carreira e na vida. Amo vocês.

Agradeço ao meu irmão Bruno, que cresceu junto comigo e hoje me acompanha nas viagens e me ajuda trazendo a perspectiva da nossa geração nas conversas em família. Também à minha vó Irene, que sempre se preocupou com o nosso futuro e me acompanhando hoje e sempre nas idas ao shopping, ao parque ou nos almoços de dia de semana.

Agradeço ao Jonathan, por me acompanhar nos momentos bons e ruins, seja na academia, em shows, em conversas nos bares, ou ouvindo meus desabafos na frente do Eskinás.

Agradeço aos amigos que fiz durante o curso, em especial Matheus, Juliana, Érick e Natalie, pelo apoio durante as cadeiras, pelas inúmeras conversas na fila RU, e pelas noites de descontração nos fins de semana. Agradeço ainda ao Matheus pela companhia durante as refeições no RU da ESEFID, a qual foi essencial para manter a sanidade durante a realização deste trabalho.

Agradeço também aos professores que passaram seus ensinamentos durante o curso, em especial Allan e Marina, que além de serem professores excepcionais, me orientaram durante a iniciação científica durante o período difícil que foi a pandemia e que me guiaram durante boa parte da minha jornada acadêmica.

Finalmente, mas não menos importante, gostaria de agradecer mais uma vez ao professor Allan, por instigar em mim o interesse em astronomia extragalática e me orientar durante a realização deste trabalho.

Resumo

Palavras-chave: Post-Starburst; cinemática; galáxias ; quiescência.

A grande maioria das galáxias pode ser classificada em quiescente (pouca formação estelar) ou *star forming* (com alta taxa de formação estelar). Ao longo da idade do universo, a fração de galáxias *star forming* (SF) para galáxias quiescentes diminui, indicando que muitas galáxias SF cessam a sua formação estelar, tornando-se quiescentes em algum momento. Os mecanismos para esse transição ainda são muito debatidos, mas estudos recentes apontam para dois caminhos principais: *slow quenching* e *fast quenching*. No *fast quenching*, as galáxias param de formar estrelas abruptamente, gerando uma galáxia chamada de *Post-Starburst* (PSB). Elas são galáxias que tiveram um surto recente de formação estelar, que foi abruptamente cessado. Neste trabalho, foi analisada a cinemática de galáxias PSB, buscando entender melhor as causas do surto de formação estelar, assim como o cessar do mesmo. Foram criadas uma amostra de galáxias PSB (usando os mesmos métodos de seleção de [Chen et al., 2019](#)) e uma amostra controle de galáxias quiescentes pareadas por massa e dispersão de velocidades com as galáxias PSB. Usando o parâmetro λ_R , essas galáxias então foram divididas em *slow rotators* e *fast rotators* ([Cappellari, 2016](#)). Depois, usando $\frac{V}{\sigma}$ as *fast rotators* ainda foram subdivididas em discos dinamicamente frios (DDF) e sistemas intermediários (SIInt), classes criadas em [Fraser-McKelvie & Cortese, 2022](#). Foi encontrado que a grande maioria das galáxias PSB são classificadas como sistemas intermediários, o que é condizente com fusões ricas em gás e/ou com razões de massa entre as galáxias próximas ou maiores do que 2:1. Também foi encontrado que as frações de classes cinemáticas da amostra de PSB são muito semelhantes as frações da amostra de quiescentes, indicando que as galáxias quiescente podem se descendentes de PSBs.

Abstract

Keywords: Post-Starburst; kinematics; galaxies ; quenching.

The vast majority of galaxies can be classified as quiescent (low star formation) or star forming (high star formation rate). Over the age of the universe, the fraction of star forming (SF) galaxies to quiescent galaxies decreases, indicating that many SF galaxies cease their star formation and become quiescent at some point. The mechanisms for this transition are still a matter of debate, but recent studies point to two main pathways: slow and fast quenching. On the fast quenching path, galaxies abruptly stop forming stars, generating a Post-Starburst galaxy (PSB). These are galaxies that had a recent burst of star formation, which abruptly ceased. In this work, the kinematics of PSB galaxies were analyzed, seeking to better understand the causes of the burst of star formation, as well as its quenching. We created a sample of PSB galaxies (using the same selection methods as [Chen et al., 2019](#)) and a control sample of quiescent galaxies matched with the PSB galaxies by mass and velocity dispersion. Using the λ_R parameter, these galaxies were then divided into *slow rotators* and *fast rotators* ([Cappellari, 2016](#)). Then, using $\frac{V}{\sigma}$ the fast rotators were further divided into dynamically cold disks and intermediate systems, classes created in [Fraser-McKelvie & Cortese, 2022](#). It was found that the vast majority of PSB galaxies are classified as intermediate systems, which is consistent with gas-rich mergers and/or with mass ratios between galaxies close to or greater than 2:1. It was also found that the fractions of each kinematic class in the PSB sample are very similar to these fractions in the quiescent sample, indicating that quiescent galaxies may be descendants of PSBs.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	2
	1.1 <i>Redshift</i> e <i>quenching</i>	3
	1.2 Galáxias post-starburst	4
	1.3 Morfologia e <i>tidal features</i>	6
	1.4 Cinemática	8
	1.5 Objetivos	11
2	METODOLOGIA	12
	2.1 O levantamento astronômico MaNGA	12
	2.2 Seleção de galáxias <i>post-starburst</i>	13
	2.3 Seleção da amostra de controle	13
	2.4 Parâmetros cinemáticos	15
	2.4.1 Razão $\frac{V}{\sigma}$	16
	2.4.2 O catálogo DynPop	17
	2.4.3 Parâmetro λ_R	17
	2.5 Classificação cinemática	18
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
	3.1 Classificação em classes cinemáticas	20
	3.2 Qualidade dos dados de inclinação	21
	3.3 Descendentes de galáxias PSB	22
	3.4 <i>Slow</i> e <i>fast quenching</i>	23
	3.4.1 Fusões	25
	3.5 Conclusões	26
	Referências	28
A	AMOSTRAS	32
	A.1 Amostra de galáxias PSB	32
	A.2 Amostra de galáxias quiescentes	33

1 Introdução

Galáxias são sistemas gravitacionalmente ligados formados por bilhões de estrelas, gás, poeira e matéria escura. Elas podem apresentar uma variedade de formatos, tamanhos e cores. Morfológicamente, a sequência de Hubble (figura 1.1) classifica a maioria das galáxias massivas em um de dois grupos (Hubble, 1986): elípticas e lenticulares, galáxias em formato elipsoidal (também chamadas de *early-type*); ou espirais, galáxias em formato de disco fino com braços espirais e bojo (também chamadas de *late-type*).

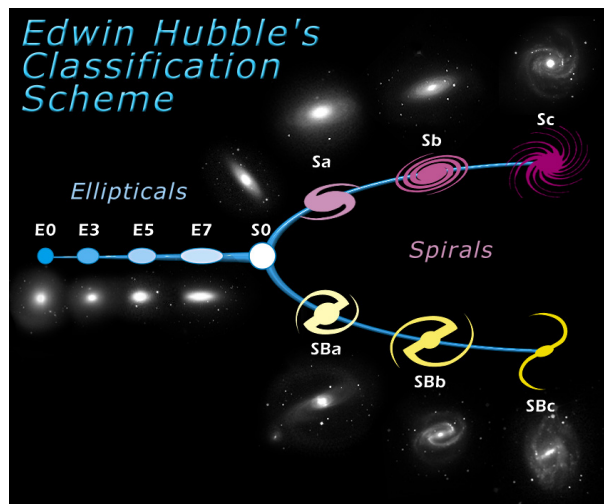


Figura 1.1 – A sequência de Hubble. Galáxias de E0 a E7 são galáxias elípticas, galáxias S0 são ditas lenticulares, Galáxias Sa, Sb e Sc são espirais não barradas e galáxias SBa, SBb e SBc são espirais barradas. Retirado de <https://esahubble.org/images/heic9902o/>

Galáxias *early-type* tendem a ter maior massa, menor fração de gás, maior dispersão de velocidades e uma menor taxa de formação estelar (por isso também são classificadas como quiescentes). Conseqüentemente, costumam ter uma população estelar mais velha e cores mais vermelhas (Schneider, 2015). Já as *late-type* normalmente possuem menor massa, maior fração de gás, maior suporte rotacional, e maior taxa de formação estelar (e por isso também são classificadas como *starforming*). Por conseqüência, têm uma população estelar mais jovem e cores mais azuis. É importante notar que, apesar de raras, existem exceções, como galáxias *early-type* azuis ou *late-type* vermelhas (Masters et al., 2010; e Schawinski et al., 2014).

1.1 *Redshift e quenching*

A fração de galáxias quiescentes tende a cair gradualmente com o aumento *redshift*. Ou seja, a fração tende a aumentar com a idade do universo. Esse fato sugere que, gradualmente, galáxias *starforming* cessam sua formação estelar, tornando-se galáxias quiescentes, processo chamado de *quenching* (Bell et al., 2004 e Brown et al., 2007). Acredita-se que essa transição está relacionada com mudanças estruturais violentas que transformam a morfologia e diminuem o suporte rotacional, características nas quais as *late-* e *early-type* diferem.

Simulações do histórico de formação estelar apontam que o processo de *quenching* pode ocorrer em escalas de tempo variando entre alguns milhões de anos até ~ 4 bilhões de anos (Tacchella et al., 2022). De maneira mais geral, esses processos são separados em dois tipos de transição: o *fast quenching*, que ocorre de maneira abrupta em um período menor que 1 bilhão de anos; e o *slow quenching*, que ocorre de maneira lenta e gradual em um período maior que 1 bilhão de anos.

No *slow quenching*, galáxias consomem o gás e param de formar estrelas de maneira lenta e gradual, sem alteração significativa de morfologia. Como há pouca alteração na morfologia, galáxias espirais *starforming* que passam pelo processo de *slow quenching* continuam com morfologia *late-type*, alterando apenas a sua cor, tornando-se mais avermelhadas a medida que estrelas O, B e A morrem. Enquanto passam pelo *slow quenching*, galáxias teriam uma cor intermediária entre azul e vermelho, assim como as galáxias dos quarto, quinto e sexto painéis inferiores da figura 1.2. Nos três painéis a direita desses, há galáxias *late-type* vermelhas, as quais acredita-se que tenham passado por esse processo.

Quanto menor o *redshift*, mais galáxias parecem se tornar quiescentes lentamente do que de maneira abrupta (Wild et al., 2020). Isso é esperado, levando em conta que o *slow quenching* precisa de tempo para acontecer. Já em alto *redshift* não houve tempo para que galáxias *starforming* passassem pelo processo de *slow quenching*, mas mesmo assim há uma alta quantidade de galáxias quiescentes (Whitaker et al., 2011). Isso indica que, no início do universo, o *fast quenching* era o principal, senão o único, processo responsável por essa transição.

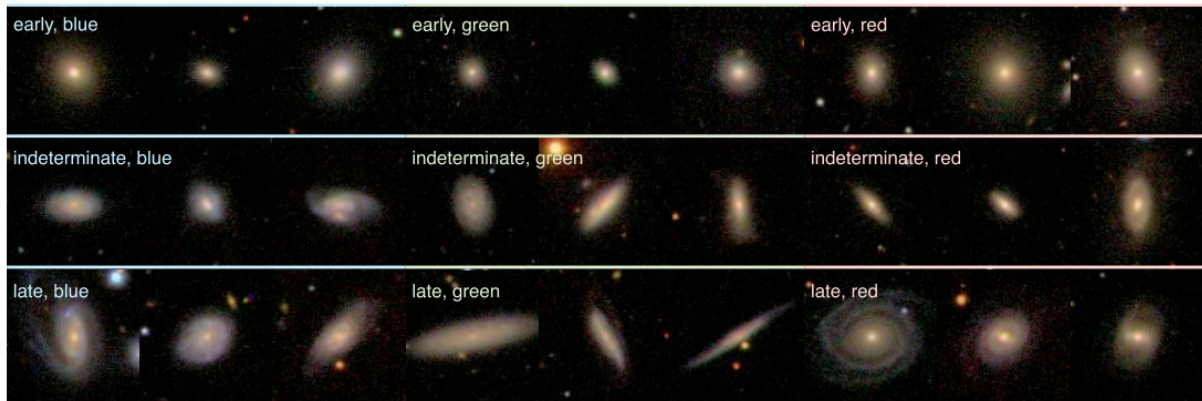


Figura 1.2 – Exemplos de imagens do *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) com $51,2 \times 51,2$, ordenadas por classificações do Galaxy Zoo (<https://www.zooniverse.org/>). As fileiras horizontais de cima, do meio e de baixo mostram respectivamente galáxias *early-type*, de tipo indeterminado e *late-type*. Em cada fileira constam, da esquerda para a direita, três galáxias azuis, três galáxias verdes (intermediárias entre as azuis e vermelhas) e três galáxias vermelhas. Imagem retirada de [Schawinski et al., 2014](#).

1.2 Galáxias post-starburst

No *fast quenching*, a parada abrupta na formação estelar gera uma fase *post-starburst*, ou PSB (do inglês “pós surto de formação estelar”, [Suess et al., 2021](#)). Galáxias PSB são galáxias que passaram por um surto de formação estelar que foi rapidamente cessado no último bilhão de anos ([French, 2021](#)). Esse tempo é muito mais do que o suficiente para que não haja mais estrelas do tipo O, as únicas estrelas capazes de ionizar grandes quantidades de hidrogênio. Portanto, esse tipo de galáxia possui pouco hidrogênio ionizado e, conseqüentemente, pouca emissão nebular.

Como o surto de formação estelar ocorreu há menos de 1 bilhão de anos, a maioria das estrelas do tipo A ainda estão na sequência principal, e acabam dominando o espectro. Estrelas do tipo A têm temperatura superficial próxima de 10000K, temperatura na qual grande parte do hidrogênio se encontra excitado no primeiro nível. Ao passar por esse hidrogênio na atmosfera da estrela, certos comprimentos de onda são absorvidos, formando fortes linhas de absorção da série de Balmer, que aparecem também no espectro das galáxias PSB (Essa é a origem de denominações alternativas, como “E+A” e “K+A”, [Dressler et al., 1999](#)).

Um exemplo típico de PSB é a galáxia representada na figura 1.3. É uma galáxia com morfologia *early-type*, quase esférica. Seu espectro (painel da direita) evidencia a

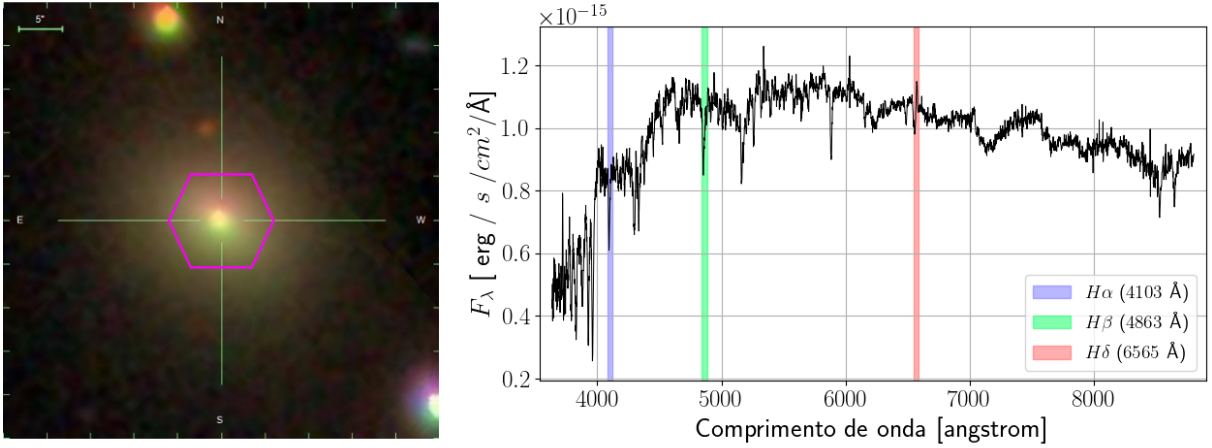


Figura 1.3 – Imagem e espectro de uma galáxia PSB (Manga-ID: 1-72913, RA: 127,49 DEC: 44,94) selecionada em [Chen et al., 2019](#). A imagem (esquerda) foi retirada da ferramenta Marvin ([Cherinka et al., 2019](#)). O espectro (direita) foi retirado do *Sloan Digital Sky Survey* (fibra) e ajustado pelo redshift ($z \approx 0,0426$). As linhas de Balmer do hidrogênio $H\alpha$, $H\beta$ e $H\delta$ estão destacadas respectivamente em azul, verde e vermelho.

presença de estrelas do tipo A, F e G, tendo em vista o fluxo alto entre 4500Å e 5000Å, mas a ausência de estrelas do tipo O e B, tendo em vista o pouco fluxo abaixo dos 4000Å. Nota-se também a ausência de emissão nebular significativa ($H\alpha$), indicando baixa taxa de formação estelar e alta absorção nas linhas de Balmer do hidrogênio ($H\beta$ e $H\delta$), indicando maior quantidade de estrelas do tipo A e F.

Como mencionado na seção §1.1, é esperado que a fração de galáxias que passam pelo *fast quenching* seja maior, quanto maior o *redshift*. Essa previsão é sustentada pela fração de PSBs entre as galáxias, que também aumenta com o *redshift* de menos de 1% em $z \sim 0$ para mais de 5% em $z \sim 2$ ([Wild et al., 2016](#)). Com *redshift* próximo 2,5, 34% das galáxias quiescentes são galáxias *post-starburst* ([Belli et al., 2019](#)). De fato, as galáxias PSB são responsáveis por uma parte maior do crescimento da população de galáxias quiescentes no universo jovem, do que no universo atual. As galáxias PSB são responsáveis por 25 a 50% do crescimento da população quiescente em $z \sim 1$ ([Wild et al., 2020](#)) e aproximadamente 50% em $z \sim 1$ ([Belli et al., 2019](#)). Em $z \sim 3$, a maioria das galáxias quiescentes apresenta sinais de *post-starburst* ([D'Eugenio et al., 2020](#)).

A massa típica das galáxias PSB também muda com o *redshift*. Para $z > 1$, a massa típica das galáxias PSB fica entre $10^{10,5}$ a 10^{11} massas solares, e sua função de massa tem formato parecido com a de galáxias quiescentes. Já em $z = 0,5$ e no universo local

a maioria das galáxias PSB tem massa menor do que $10^{10} M_{\odot}$, e sua função de massa tem formato mais parecido com a de galáxias *starforming* (Wong et al., 2012 e Wild et al., 2016). Toft et al., 2014 encontraram que galáxias PSB em alto *redshift* podem ser descendentes de galáxias submilimétricas (tipos de galáxias massivas em alto *redshift* com alta taxa de formação estelar).

O ambiente em que as galáxias estão também pode afetar a produção de surtos de formação estelar e seu cessar. Acredita-se que vários processos ambientais podem causar o *quenching*, criando galáxias PSB. Os principais deles são *ram pressure stripping* (processo que arranca gás da galáxia em ambientes densos); *galaxy harassment* (quando galáxias passam uma pelas outras); evaporação térmica (quando o meio intergaláctico quente aquece o gás no meio interestelar, fazendo com que ele escape da galáxia); e estrangulamento (quando o fornecimento externo de gás da galáxia é cortado). De fato, a fração de galáxias PSB aumenta com a densidade do ambiente. Enquanto no campo, em $z \sim 0$, a fração de galáxias PSB é próxima de 1% a fração aumenta em sistemas binários (2%), em grupos (3%) e em aglomerados (4,5%). Nos aglomerados mais massivos, a fração chega próxima de 15% (Paccagnella et al., 2019). Mesmo assim, a maioria das galáxias PSB ($\sim 75\%$) estão no campo (Zabludoff et al., 1996), e não em grupos ou aglomerados, o que indica que esses processos não podem ser responsáveis pela existência da maioria das galáxias PSB.

1.3 Morfologia e *tidal features*

Uma das maneiras mais utilizadas de quantificar a morfologia de galáxias, é modelando sua luminosidade I em função do raio R com o perfil de Sérsic, dado pela fórmula

$$I(R) = I_e \exp \left\{ -b_n \left[\left(\frac{R}{R_e} \right)^{1/n} - 1 \right] \right\} \quad (1.1)$$

onde R_e é o raio efetivo da galáxia (onde a luminosidade é metade da luminosidade central), I_e é a luminosidade efetiva da galáxia, n é o índice de Sérsic e b_n é uma constante que pode ser aproximada para $0,5 < n < 10$ como $b_n \approx 1,9992n - 0,3271$ (Graham & Driver, 2005). O índice de Sérsic n mede o quão concentrado está o perfil de luminosidade

da galáxia e o quão íngreme é o decaimento da luminosidade nas partes mais externas da galáxia. Quanto maior o índice de Sérsic, mais concentrado é o perfil de luminosidade e menos íngreme é o decaimento da luminosidade nas partes mais externas (figura 1.4).

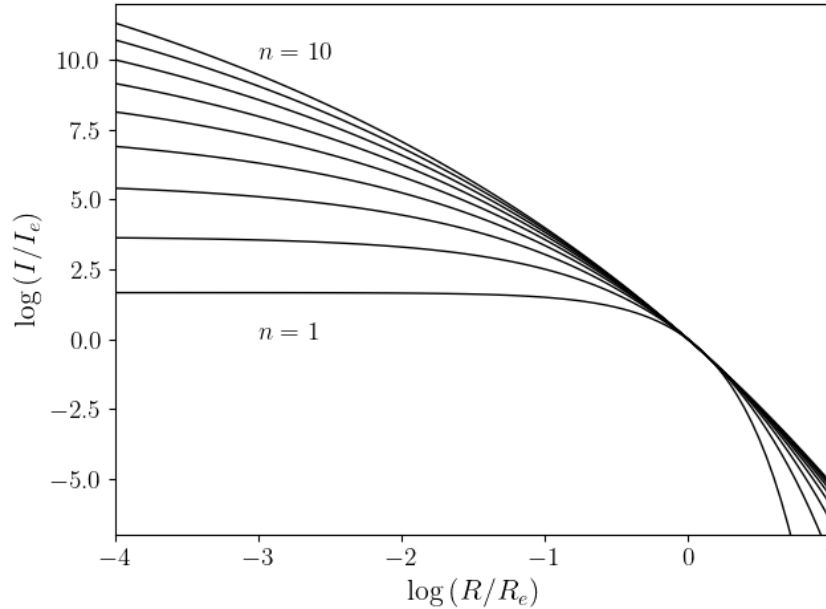


Figura 1.4 – Perfil de luminosidade de Sérsic para n variando entre 1 e 10.

Morfologicamente, galáxias PSB são tipicamente parecidas com galáxias *early-type* (que possuem em média índice de Sérsic próximo de 4; [Schneider, 2015](#)). Diferentes estudos encontram diferentes faixas para o índice de Sérsic de galáxias PSB, como em [Quintero et al., 2004](#), com índices encontrados entre 2 e 3 e em [Yang et al., 2004](#) e [Yang et al., 2008](#) que encontraram índices entre 5 e 9. Além disso, a grande maioria Galáxias PSB possuem morfologia dominada por bojo ([Quintero et al., 2004](#)), com a fração da luminosidade do bojo representando mais de 50% da luminosidade total ([Yang et al., 2004](#) e [Yang et al. \(2008\)](#)), características que as aproximam da morfologia *early-type*.

Muitas galáxias PSB ainda possuem *tidal features*, como as galáxias da figura 1.5. *Tidal features* são subestruturas com baixa luminosidade em volta das galáxias, cuja presença é atribuída a remanescentes de interações ou fusões entre galáxias. Em diferentes trabalhos, foram encontradas *tidal features* em uma fração das PSBs entre 10% ([Yang et al., 2008](#)) a 50% ([Blake et al., 2004](#)), indicando que uma parte das galáxias PSB possa ter passado por fusões. Com medidas mais avançadas, [Sazonova et al., 2021](#) encontraram que 90% das galáxias PSB possuem perturbações morfológicas. Além disso, foi encontrado que as *tidal features* diminuem com a idade do surto de formação estelar [Pawlik et al.](#)

(2016), o que condiz com o processo de fusão, tendo em vista que as estrelas e gás da galáxia remanescente entram em equilíbrio com o passar do tempo.

1.4 Cinemática

Utilizando espectroscopia fenda larga ou de campo integral, é possível analisar o movimento das estrelas e do gás na galáxia. De diversas maneiras, busca-se principalmente medir o quanto a cinemática da galáxia é dominada por rotação ou dispersão. Uma das medidas mais utilizadas é a razão da velocidade de rotação pela dispersão de velocidades ($\frac{V}{\sigma}$), uma das principais medidas do suporte rotacional. Galáxias PSB têm em sua maioria valores de $\frac{V}{\sigma}$ entre 0,1 e 1 (Norton et al., 2001 Pracy et al., 2009), valores condizentes com remanescentes de fusões (Naab & Burkert, 2003).

Outra maneira importante de quantificar a rotação das galáxias é o parâmetro λ_R , definido por (Emsellem et al., 2007) como:

$$\lambda_R \equiv \frac{\langle R|V| \rangle}{\langle R\sqrt{V^2 + \sigma^2} \rangle} \quad (1.2)$$

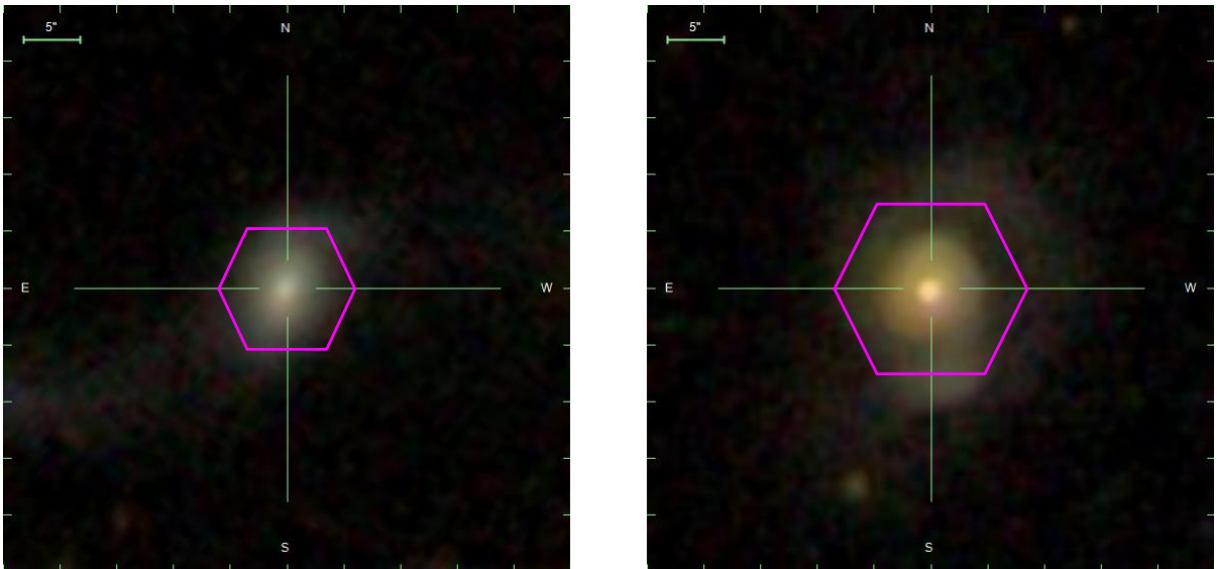


Figura 1.5 – Imagens de duas galáxias PSB com *tidal features* da amostra selecionada em Chen et al., 2019, retiradas da ferramenta Marvin (Cherinka et al., 2019). A galáxia no painel da esquerda (MaNGA-ID 1-217015) possui um rastro suave de estrelas vindo da parte esquerda inferior da foto, até a parte direita superior. A galáxia no painel da direita (MaNGA-ID 1-37862) possui uma concentração maior de estrelas na parte inferior da imagem.

onde R é a distância ao centro da galáxia. O parâmetro λ_R usa a multiplicação $R|V|$, análoga ao momento angular, para medir a rotação. Como é normalizado por $R\sqrt{V^2 + \sigma^2}$, se aproxima de 1 quando a galáxia é dominada por rotação e de zero quando é dominada por dispersão. Usando esse parâmetro, [Cappellari, 2016](#) separou galáxias em dois grupos: *slow rotators* e *fast rotators*. As galáxias *slow rotators* são definidas pelas inequações

$$\lambda_R < 0,08 + \frac{\varepsilon}{4} \quad \varepsilon < 0,4 \quad (1.3)$$

, onde ε é a elipticidade da galáxia. As galáxias que não obedecem as inequações são classificadas como *slow rotators*. Essa nomenclatura foi inicialmente introduzida por ([Emsellem et al., 2007](#)) e o critério de separação foi refinado em [Emsellem et al., 2011](#) utilizando a elipticidade (ε), e finalmente modificado por [Cappellari, 2016](#), se tornando as inequações 1.3.

Ao analisar o suporte rotacional de uma galáxia, é importante considerar a elipticidade. Galáxias disco (com elipticidade intrínseca próxima de 1) têm menos espaço para movimentos de dispersão. Ou seja, se vistas de lado, naturalmente tendem a ter dispersão de velocidades menor e λ_R próximo de 1. Já se vistas de frente (elipticidade medida próxima de zero), não é possível medir a velocidade de rotação perpendicular à linha de visada, e portanto o parâmetro λ_R também será próximo de zero. Galáxias mais esféricas ($\varepsilon \approx 0$) têm mais espaço para movimentos de dispersão, tendendo a ter λ_R próximo de zero ([Cappellari, 2016](#)). De fato, uma galáxia teórica isotrópica com ($\varepsilon = 0$) tem também ($\lambda_R = 0$), pois não possui velocidade de rotação em nenhum sentido privilegiado. Considerando os efeitos que a elipticidade aparente causa no parâmetro λ_R , obtemos uma classificação mais robusta.

Em [Fraser-McKelvie & Cortese, 2022](#), galáxias *fast rotators* ainda foram subdivididas duas subcategorias: Galáxias disco dinamicamente frias (por terem baixa dispersão de velocidades) e sistemas intermediários, que tem uma razão $\frac{V}{\sigma}$ menor (o limite entre os grupos ocorre em mais ou menos $\log\left(\frac{V}{\sigma}\right) \approx 0,10$ a $0,14$, dependendo da massa). Galáxias disco dinamicamente frias são em sua grande maioria consideradas discos puros, enquanto sistemas intermediários costumam ter um disco mais espesso, ou bojos mais massivos com suporte por dispersão. [Fraser-McKelvie & Cortese, 2022](#) também encontraram que a

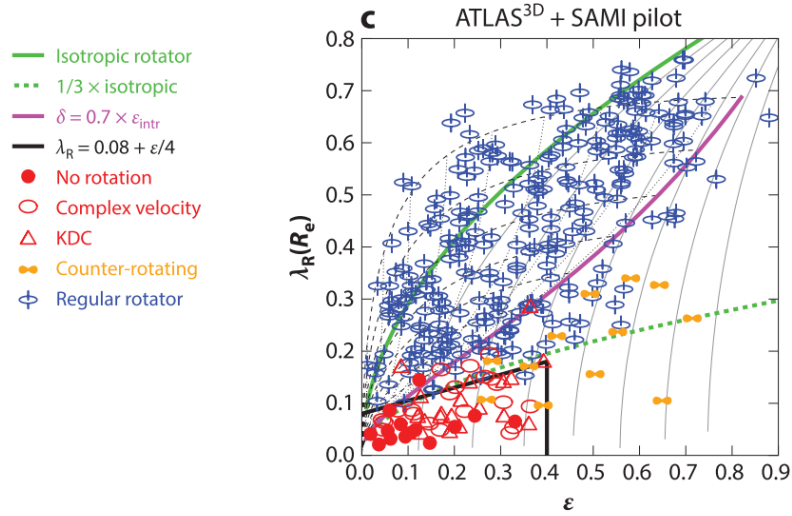


Figura 1.6 – Figura retirada do painel C, da figura 13 de Cappellari, 2016. Gráfico do parâmetro $\lambda_R(R_e)$ (medido dentro de 1 raio efetivo) em função da elipticidade observada ε , para uma amostra de 340 galáxias *early-type* retiradas de Emsellem et al., 2011 e Fogarty et al., 2015. As galáxias estão divididas em 5 classes introduzidas por Krajnović et al., 2011: galáxias sem rotação (círculos vermelhos preenchidos), galáxias com rotação clara mas irregular (elipse vermelha sem preenchimento), galáxias com centros cinematicamente distintos (triângulos vermelhos), galáxias com contra-rotação (lemniscata amarela preenchida) e galáxias com rotação regular (símbolos azuis). As linhas verdes, cinzas e magenta, representam valores teóricos previstos para diferentes tipos de galáxia vistas de lado. A linha verde sólida, para uma galáxia com rotação isotrópica. As linhas cinzas finas, para galáxias com cada vez mais anisotropia (da esquerda para direita). A linha em magenta sólida, para uma galáxia com parâmetro de anisotropia seguindo a relação $\delta = 0,7\varepsilon$ (Cappellari et al., 2007). As linhas magenta tracejadas são para a mesma galáxia da linha sólida mas com inclinações variando. A linha verde tracejada representa 1/3 da linha verde sólida. As linhas pretas sólidas são a separação empírica entre *fast* e *slow rotators* ($\lambda_R = 0,08 + \frac{\varepsilon}{4}$ e $\varepsilon = 0,4$), escolhida por Cappellari, 2016. Um delas é muito próxima da linha verde tracejada.

grande maioria das galáxias *starforming* no universo local são *fast rotators*, mais especificamente, discos dinamicamente frios (painel esquerdo da figura 1.7). Já a população de galáxias quiescentes mostra uma maior heterogeneidade em sua cinemática (painel direito da figura 1.7). Para massas menores, é dominada por sistemas intermediários, possuindo também um grande número de discos dinamicamente frios. Mas para massas maiores que $10^{11,5}M_\odot$ *slow rotators* superam os outros dois grupos.

A grande maioria das PSB são classificadas como *fast rotators* (Pracy et al., 2009 e Pracy et al., 2013), usando a classificação de Emsellem et al., 2007 ($\lambda_R > 0,1$), o que

é condizente com fusões entre galáxias ricas em gás. Resultados de fusões geram não apenas *fast rotators*, mas também *slow rotators*, dependendo da razão entre os tamanhos das galáxias, do ângulo em que elas se chocam, e da fração de gás presente nelas (Emsellem et al., 2011 e Jesseit et al., 2009). As fusões com razões de massa maiores que 2:1 tendem a gerar galáxias com maior suporte rotacional classificadas como *fast rotators*, assim como a maioria das galáxias PSB.

1.5 Objetivos

Esse trabalho tem por objetivo analisar a cinemática de galáxias PSB, buscando entender melhor as causas do surto de formação estelar, assim como o cessar do mesmo. Primeiro, classificaremos galáxias PSB observadas pelo levantamento astronômico MaNGA em *slow rotators* e *fast rotators*, separando as *fast rotators* em suas subclasses: sistemas intermediários e discos dinamicamente frios. Então, compararemos as frações totais e em diferentes massas da amostra de galáxias PSB, com as de uma amostra de controle de galáxias quiescentes pareadas por massa e dispersão de velocidades.

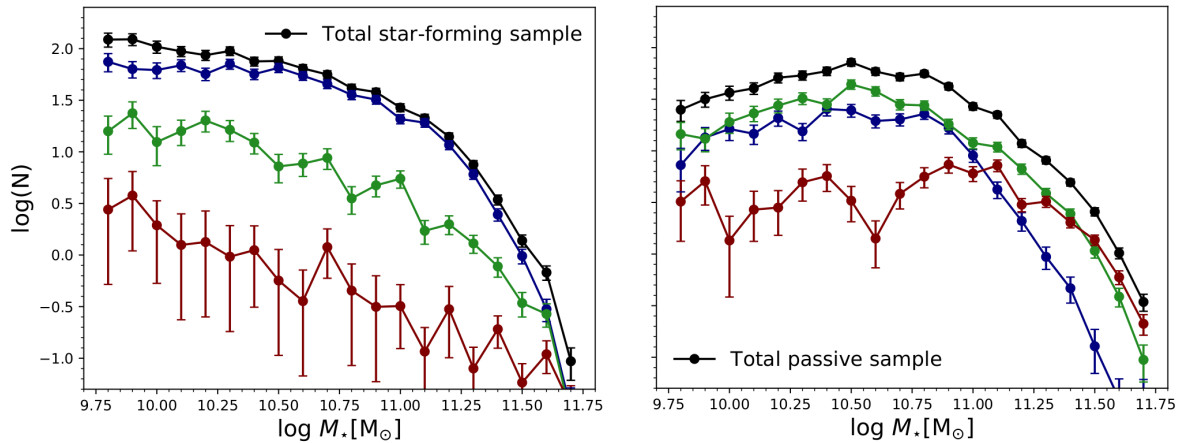


Figura 1.7 – Distribuição em massa das amostras de galáxias *starforming* (painel da esquerda) e passivas (painel da direita) retiradas do MaNGA por Fraser-McKelvie & Cortese, 2022. Em azul estão os discos dinamicamente frios. Em verde, os sistemas intermediários. E em vermelho as galáxias *slow rotators*. A soma dos três gera a amostra inteira em preto. As galáxias *starforming* são dominadas por discos dinamicamente frios. Já nas galáxias passivas, os sistemas intermediários estão em maior número, enquanto *slow rotators* só são parte significativa da amostra para galáxias mais massivas ($\log(M) > 11$). Retiradas de Fraser-McKelvie & Cortese, 2022

2 Metodologia

Neste trabalho, foi selecionada uma amostra de galáxias PSB (secção §2.2), juntamente com uma amostra de controle composta por galáxias quiescentes (secção §2.3). Então, foi feita uma análise comparativa da cinemática das galáxias PSB e quiescentes (secção §2.5), utilizando os dados do levantamento astronômico MaNGA (Bundy et al., 2015, secção §2.1).

2.1 O levantamento astronômico MaNGA

O levantamento astronômico MaNGA (*Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory*) (Bundy et al., 2015) faz parte da quarta geração do programa *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS-IV). O levantamento utiliza da espectroscopia de campo integral para mapear aproximadamente 10.000 galáxias próximas. A espectroscopia de campo integral, ou IFS (do inglês *Integral Field Spectroscopy*), nos permite obter a espectroscopia espacialmente resolvida para uma galáxia. Em um imageamento por IFS cada pixel espacial (*spaxel*) da imagem fornece um espectro. Dessa maneira, é possível entender melhor a distribuição de gás e estrelas pela galáxia, assim como a cinemática desses componentes.

Cada uma das 17 unidades de campo integral (IFU) utilizada pelo MaNGA podem ter entre 19 e 127 fibras que geram uma imagem com 12 a 32 segundos de arco de diâmetro. Cada *spaxel* tem 0,5 segundos de arco de largura. A função espalhamento de ponto (PSF) tem uma largura a meia altura (FWHM) de 2,5 segundos de arco. Os espectros de cada *spaxel* cobrem comprimentos de onda de 3600 Å até 10300 Å, com um poder de resolução próximo de $R \equiv \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \sim 2000$. O levantamento MaNGA também oferece dados onde os *spaxels* são organizados em *bins*, de tal maneira que a razão sinal-ruído se aproxime de 10. Isso é feito, pois empilhando os espectros de vários *spaxels*, o ruído aleatório tende a se cancelar, e o sinal aumenta. Os dados utilizados neste trabalho tiveram seus *spaxels* unidos em *bins* com o algoritmo *Voronoi* (Cappellari & Copin, 2003).

2.2 Seleção de galáxias *post-starburst*

Neste trabalho, primeiramente foi selecionada uma amostra de galáxias PSB retiradas do SDSS-IV. Seguindo os critérios utilizados em [Chen et al., 2019](#), foram selecionadas galáxias com absorção considerável em $H\delta$ ($H\delta_A > 3\text{\AA}$), indicando presença de estrelas do tipo A, baixa emissão em $H\alpha$ ($EW(H\alpha) < 3\text{\AA}$), indicando a ausência de estrelas do tipo O e B e ainda $\log[EW(H\alpha)] < 0,23 \cdot H\delta_A - 0,46$, evitando de alcançar galáxias em processo de *slow quenching* (veja figura 2.1). Os dados de $H\delta_A$ e $EW(H\alpha)$ foram retirados respectivamente dos catálogos `galSpecIndx` e `galSpecLine` do SDSS¹. Tendo selecionado as galáxias do SDSS, a amostra então foi reduzida para apenas as galáxias incluídas no levantamento astronômico MaNGA (veja seção §2.1), restando 78 galáxias.

Como os parâmetros λ_R e $\frac{V}{\sigma}$ serão medidos dentro da elipse de meia luz², é importante que o mapa de cada galáxias englobe toda a elipse e que haja um número suficiente de *bins* dentro dessa região. Portanto, foram retiradas da amostra as galáxias cujos mapas não englobam a elipse toda, assim como as galáxias que possuem menos de 20 *bins* dentro nesta região. A fim de remover contaminantes, foi checado se os critérios para a seleção de galáxias PSB ($H\delta_A > 3\text{\AA}$ e $EW(H\alpha) < 3\text{\AA}$) são mantidos se levados em conta apenas *spaxels* dentro da elipse. As 22 galáxias apresentaram $H\delta_A$ menor do que 3\AA foram retiradas da amostra, restando 41 galáxias (tabela do apêndice A.1).

2.3 Seleção da amostra de controle

Para fins de comparação, foi selecionada também uma amostra de controle de galáxias quiescentes semelhantes à amostra de galáxias PSB. Assim como na amostra principal, foram selecionadas galáxias do SDSS que também foram observadas pelo levantamento MaNGA. Para selecionar quiescência, foi usada a taxa de formação estelar específica, ou sSFR (do inglês, *specific Star Formation Rate*), que diz a taxa de formação estelar por unidade de massa da galáxia. Foram selecionadas as galáxias com $\log(\text{sSFR}) < -11$. Os dados de sSFR foram retirados do catálogo GSWLC-2 (GALEX-SDSS-WISE LEGACY

¹ Os catálogos `galSpecIndx` e `galSpecLine` estão descritos em https://live-sdss4org-dr16.pantheonsite.io/spectro/galaxy_mpajhu/

² A elipse de meia luz é a elipse ajustada com as curva de nível de luminosidade da galáxias, que contém metade da luz que a galáxia emite. Os dados de semi-eixo maior e menor foram retirados do catálogo `pyMorph` ([Bernardi et al., 2020](#); e [Domínguez Sánchez et al., 2022](#))

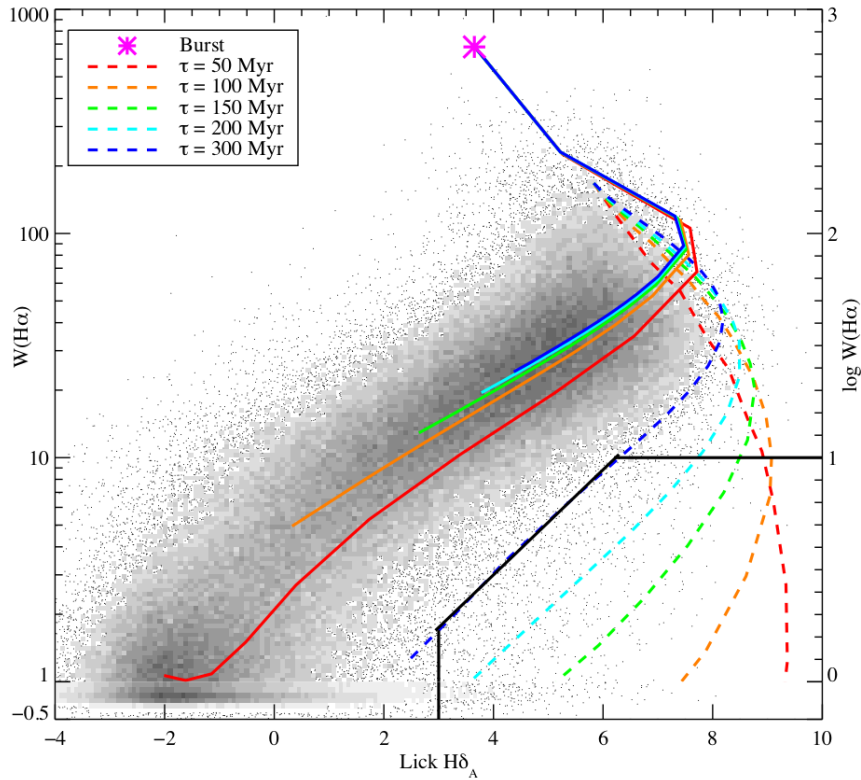


Figura 2.1 – Gráfico da da largura equivalente da linha de emissão $H\alpha$ pela linha de absorção $H\delta_A$ para 192.678 galáxias do programa SDSS DR7 (em cinza). As linhas coloridas sólidas são os caminhos traçados por modelos de galáxias com decaimento exponencial de taxa formação estelar (do tipo $e^{-\frac{t}{\tau}}$) com τ variando de meio bilhão de anos (vermelho) até 5 bilhões de anos (azul). As linhas tracejadas são o mesmo modelo, mas com um novo surto de formação estelar passados 6,5 bilhões de anos que cessa seguindo os mesmos modelos exponenciais das linhas sólidas. Os modelos todos começam no asterisco rosa. A linha preta sólida é a região definida para selecionar galáxias PSB. O eixo Y está em escala logarítmica para valores maiores que 1, e escala linear para valores menores que 1. Figura retirada de [Chen et al., 2019](#).

Catalog 2 [Salim et al., 2018](#)).

Com as galáxias quiescentes selecionadas, foi feita uma amostra de galáxias pareadas por massa ($\log(M/M_\odot)$) e dispersão de velocidades (σ) com a amostra de PSB³. Duas galáxias quiescentes foram pareadas com cada galáxia PSB, gerando uma amostra de controle com tamanho inicial de 82 galáxias. Dessa amostra, foram retiradas, assim como na amostra de galáxias PSB, as galáxias cujo mapa não contemplava toda sua elipse de meia luz ou que possuía menos de 20 *bins* na região interna à elipse. Após isso, a amostra de controle final ficou com 76 galáxias (tabela do apêndice [A.2](#)).

³ os dados de massa também foram retirados do catálogo GSWLC-2. Os dados de dispersão de velocidades foram retirados do SDSS.

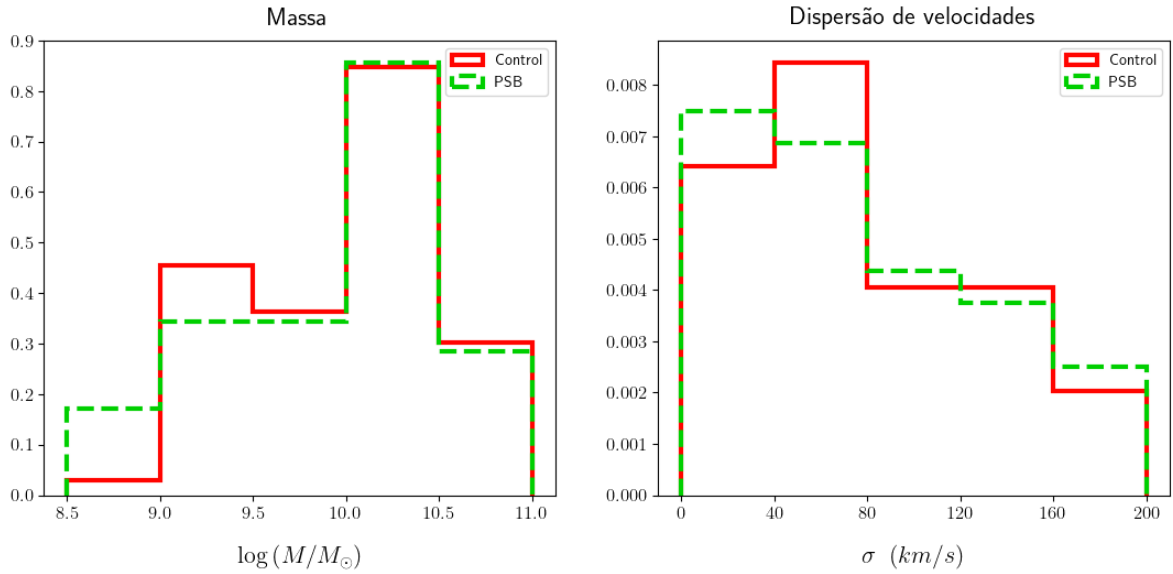


Figura 2.2 – Histogramas de densidade do logaritmo da massa ($\log(M/M_{\odot})$, a esquerda) e dispersão de velocidades (em km/s , a direita) para a amostra de galáxias PSB (em verde tracejado) e para a amostra de galáxias quiescentes (em vermelho contínuo). O teste Kolmogorov–Smirnov (teste KS) para as distribuições de massa, obteve valor p de 0,950. Já para as distribuições de dispersão de velocidades o valor p obtido foi de 0,99987

Para garantir que as amostras de galáxias PSB e de galáxias quiescentes ainda tem distribuições de massa e dispersão de velocidades parecidas, foram criados histogramas (figura 2.2) e realizados testes Kolmogorov–Smirnov (teste KS) para comparar as amostras. Os valores-p resultantes estão foram 0,950 para a distribuição de massas ($\log(M/M_{\odot})$) e 0,99987 para a distribuição de dispersão de velocidades (σ).

2.4 Parâmetros cinemáticos

Para classificar a cinemática estelar das galáxias amostradas, foram usados tanto a razão velocidade por dispersão de velocidades ($\frac{V}{\sigma}$), quanto o parâmetro λ_R (mais detalhes sobre a definição e uso desses parâmetros na seção §1.4). Para calcular os valores de $\frac{V}{\sigma}$ e λ_R para cada galáxia, usaremos os dados de fluxo, velocidade e dispersão de velocidades dos mapas do MaNGA Data Analysis Pipeline (DAP; Westfall et al., 2019), que passaram pelo processo de *Voronoi binning* (Cappellari & Copin, 2003), que une *spaxels* com pouco fluxo em *bins* de maneira que a soma dos espectros tenha uma razão sinal-ruído próxima de 10. Os dados de velocidade e dispersão de velocidades estelar, foram calculadas por Westfall et al., 2019 utilizando o pPXF (Cappellari & Emsellem, 2004 e Cappellari, 2017),

que ajusta um conjunto de espectros estelares modelo ao espectro da galáxia.

2.4.1 Razão $\frac{V}{\sigma}$

Só é possível medir a velocidade e a dispersão de velocidades na direção da linha de visada. Em uma galáxia *late-type* com a face de seu disco virada para a linha de visada, a velocidade estelar medida será próxima de zero. Portanto, a razão observada de velocidade por dispersão de velocidades é afetada fortemente pela inclinação da galáxia. Assim, é necessário diferenciar a razão $\frac{V}{\sigma}$ observada $(\frac{V}{\sigma})_{obs}$ da razão no caso do disco estar com a face virada a 90 da linha de visada $(\frac{V}{\sigma})_{90}$, quando a razão será máxima. Primeiro, foi calculada a razão $(\frac{V}{\sigma})_{obs}$, usando a relação

$$\left(\frac{V}{\sigma}\right)_{obs}^2 \equiv \frac{\langle V^2 \rangle}{\langle \sigma^2 \rangle} = \frac{\sum_{i=0}^{N_{bins}} F_i V_i^2}{\sum_{i=0}^{N_{bins}} F_i \sigma_i^2} \quad (2.1)$$

onde N_{bins} é o número total de *bins* dentro da elipse de meia luz e, para o espectro do i -ésimo *bin*, F_i é o fluxo médio na banda r (BIN MFLUX no MaNGA DAP), V_i é a velocidade radial (STELLAR VEL) e σ_i é a dispersão de velocidades estelar (STELLAR SIGMA). A velocidade e dispersão de velocidades estelar, foram calculadas por [Westfall et al., 2019](#) utilizando o pPXF ([Cappellari & Emsellem, 2004](#) e [Cappellari, 2017](#)), que ajusta um conjunto de espectros estelares modelo ao espectro da galáxia.

Já para estimar $(\frac{V}{\sigma})_{90}$, foi utilizada a relação encontrada em [Binney, 2005](#), é dada por:

$$\left(\frac{V}{\sigma}\right)_{90} = \frac{\sqrt{1 - \beta_z \cos^2 \theta}}{\sin \theta} \left(\frac{V}{\sigma}\right)_{obs} \quad (2.2)$$

onde θ é o ângulo de inclinação da galáxia (sendo $\theta = 0$ quando a face do disco está alinhada com a linha de visada) e β_z é o parâmetro de anisotropia. Os valores de θ e β_z foram retirados do catálogo DynPop ([Zhu et al., 2023](#)). Para realizar as divisões entre Sistemas Intermediários e Discos dinamicamente frios neste trabalho, foi utilizada apenas a razão $(\frac{V}{\sigma})_{90}$ (que chamaremos, de agora em diante apenas de $\frac{V}{\sigma}$).

2.4.2 O catálogo DynPop

O catálogo DynPop (Zhu et al., 2023) utiliza a Modelagem Anisotrópica de Jeans (JAM, do inglês, *Jeans Anisotropic Modeling*) para extrair propriedades dinâmicas como massas, razões massa-luminosidade, perfis de densidade e matéria escura.

Para ajustar $\frac{V}{\sigma}$ pela inclinação, utilizamos o ângulo de inclinação θ e o parâmetro de anisotropia calculados com o modelo JAM de coordenadas cilíndricas (JAMcyl), que utiliza um perfil de Navarro–Frenk–White (NFW) generalizado para a matéria escura (Wyithe et al., 2001) (gNFW). As inclinações são estimadas a partir de uma modelagem dinâmica usando os mapas de velocidade, de dispersão de velocidades e de fluxo (mais detalhes sobre essa estimativa em Zhu et al., 2023). O parâmetro de anisotropia das velocidades β_z é definido em Cappellari, 2008 como:

$$\beta_z = 1 - \frac{\overline{v_z^2}}{\overline{v_R^2}} \quad (2.3)$$

onde v_z e v_R são as velocidades medidas respectivamente nas direções z e R do sistema de coordenadas cilíndricas (R, z, ϕ) .

Em Zhu et al., 2023 ainda foi feita uma inspeção visual de qualidade, onde as medidas foram classificadas com qualidade -1, 0, 1, 2 e 3. Uma galáxia é classificada com qualidade -1 quando é altamente perturbada (irregulares, pares de galáxias muito próximas ou galáxias em fusão). Uma galáxia é classificada com qualidade 0 se possui distribuições cinemáticas razoavelmente regulares, mas que não pode ser bem modelada com a JAM. Galáxias classificadas com qualidade 1 ou maior são modeladas razoavelmente bem ou muito bem. Levando em conta as classificações de qualidade, foram feitas análises com e sem galáxias com qualidade menor ou igual a 0 (seção 3).

2.4.3 Parâmetro λ_R

O parâmetro λ_R foi calculado usando a relação

$$\lambda_R \equiv \frac{\langle R|V \rangle}{\langle R\sqrt{V^2 + \sigma^2} \rangle} = \frac{\sum_{i=0}^{N_{bins}} F_i R_i |V_i|}{\sum_{i=0}^{N_{bins}} F_i R_i \sqrt{V_i^2 + \sigma_i^2}} \quad (2.4)$$

onde F_i , V_i e σ_i são os mesmos utilizados para calcular $(\frac{V}{\sigma})_{obs}$, e R_i é a distância do centro do i -ésimo *bin* ao *spaxel* central da galáxia.

2.5 Classificação cinemática

Primeiramente, foram classificadas as galáxias das amostras entre *slow rotators* e *fast rotators*, usando o critério definido por Cappellari, 2016, onde galáxias *slow rotators* são aquelas que seguem essas duas inequações:

$$\lambda_R < 0,08 + \frac{\varepsilon}{4} \quad \varepsilon < 0,4 \quad (2.5)$$

onde ε é a elipticidade observada. Os valores de elipticidade foram retirados do catálogo pyMorph (Bernardi et al., 2020; e Domínguez Sánchez et al., 2022) As galáxias que não se encaixam nesses critérios são consideradas *fast rotators*.

Tendo separado as galáxias entre *fast* e *slow rotators*, as galáxias *fast rotators* ainda foram subdivididas em duas categorias: sistemas intermediários; e galáxias disco dinamicamente frias. Para fazer essa divisão, Fraser-McKelvie & Cortese, 2022 ajustaram duas gaussianas à população *fast rotator* no histograma de $\log(\frac{V}{\sigma})$ para quatro intervalos iguais de massa entre $\log(M) = 9,25$ e $\log(M) = 11,75$ (figura 2.3). Eles assumiram que a curva gaussiana com valores maiores de $\log(\frac{V}{\sigma})$ (a única representada na figura) fazia parte da população de discos dinamicamente frios. A sobra de galáxias a esquerda dessa gaussiana, representariam os sistemas intermediários. Para dividir essas duas populações, escolheram um corte em um desvio padrão (1σ) abaixo da média da gaussiana da figura. Em ordem crescente de intervalo de massa, a divisão ficou com valores de $\log(\frac{V}{\sigma})$ de -0,14, -0,10, -0,14 e -0,11. Nesse trabalho foi utilizado essas mesmas divisões para subdividir as galáxias *fast rotators* em cada intervalo de massa. Para as galáxias com $\log(M)$ menores que 9,25, foi utilizado $\log(\frac{V}{\sigma}) = -0,14$ como corte, o mesmo do menor intervalo de massa. O parâmetro $\frac{V}{\sigma}$ utilizado foi o corrigido pela inclinação $(\frac{V}{\sigma})_{90}$ (seção 2.4.1).

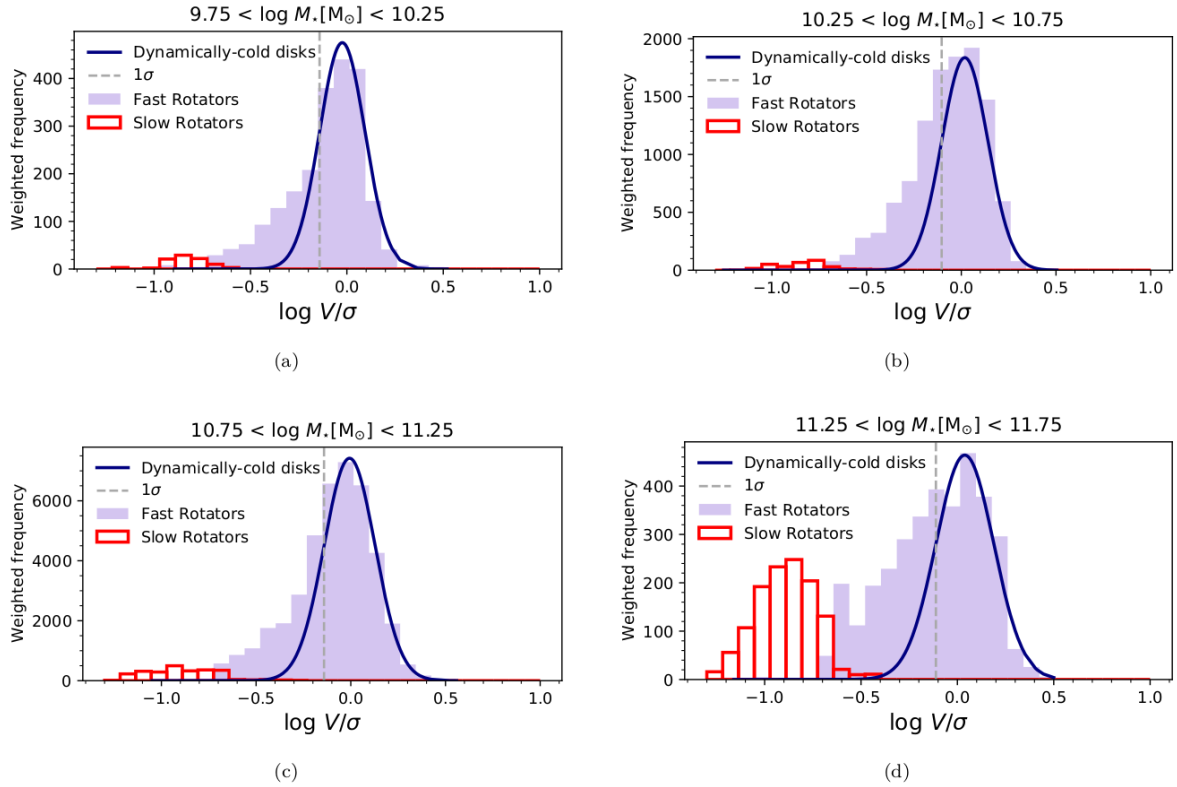


Figura 2.3 – Histogramas de $\log(\frac{V}{\sigma})$ para a amostra do MaNGA selecionada em [Fraser-McKelvie & Cortese, 2022](#) pesada em volume para quatro intervalos de massa. Em cada painel, os *fast rotators* estão em roxo, e os *slow rotators* em vermelho não preenchido. Os *fast rotators* são modelados com duas gaussianas. A mais à direita delas é mostrada na figura em azul escuro e representa a população chamada de discos dinamicamente frios. A linha cinza tracejada está um desvio padrão abaixo da média da gaussiana azul, e representa a divisão entre discos dinamicamente frios e sistemas intermediários. Figura retirada de [Fraser-McKelvie & Cortese, 2022](#).

3 Resultados e discussão

3.1 Classificação em classes cinemáticas

Ao separar as duas amostras em *slow* e *fast rotators*, encontramos que a maior parte das galáxias nas duas amostras são classificadas como *fast rotators* (82,9% da amostra de PSB e 78% da amostra de controle, figura 3.1). As duas amostras possuem frações parecidas de *fast rotators*. Realizando o teste de Barnard e teste exato de Fisher, obtemos valores p próximos de 0,6 (linhas (a) e (b) da primeira coluna da tabela 1), apontando que as diferenças entre as razões das amostras não são significativas.

Ao separar as galáxias *fast rotators* em sistemas intermediários e discos dinamicamente frios, encontramos que a grande maioria se encaixa na primeira categoria 3.1. Uma fração de 90,5% das *fast rotators* da amostra de PSBs e 84,4% das *fast rotators* da amostra de controle são classificadas como sistemas intermediários. Realizando testes de significância estatística, obtemos valores p entre 0,4 e 0,5 (linhas (c) e (d) da primeira coluna da tabela 1), novamente apontando que as diferenças entre as frações das amostras não são significativas.

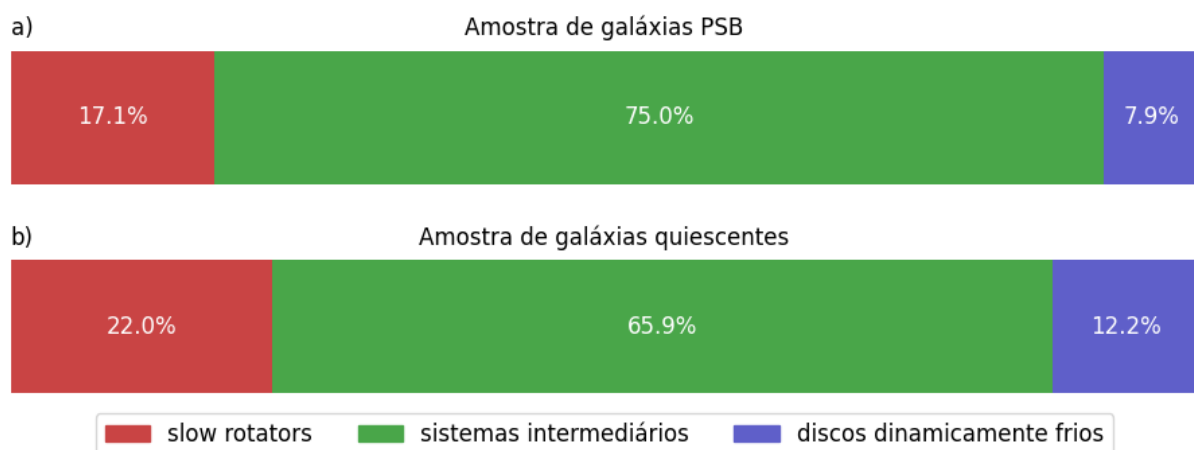


Figura 3.1 – Frações de galáxias classificadas como *slow rotators* (vermelho), sistemas intermediários (verde) e discos dinamicamente frios (azul) nas amostras de galáxias PSB com 41 galáxias (a) e na amostra controle de quiescentes com 76 galáxias (b).

Valores p do Teste de Barnard e Teste Exato de Fisher		
Teste	Amostra inteira	Qualidade acima de zero
a) Fisher 2x2 (fast, slow)	0,6212	0,5998
b) Barnard (fast, slow)	0,577958	0,605399
c) Fisher 2x2 (SInt, DDF)	0,4992	0,6739
d) Barnard (SInt, DDF)	0,416954	0,639146
e) Fisher 2x3 (slow, SInt, DDF)	0,5663	0,695

Tabela 1 – Valores p e dos testes de Barnard e testes exatos de Fisher aplicados na amostra inteira (coluna do meio); e na amostra, descrita na seção 3.2, da qual as galáxias com qualidade 0 foram retiradas (coluna da direita). Nas linhas (a) e (b) são aplicados respectivamente o teste exato de Fisher e o teste de Barnard levando em conta as frações de *slow* e *fast rotators*. Nas linhas (c) e (d) são aplicados os mesmos testes, mas levando em conta as frações de sistemas intermediários (SInt) e discos dinamicamente frios (DDF) entre as galáxias *fast rotators*. Na linha (e) é aplicado o teste exato de Fisher 3x2, levando em conta as frações de *slow rotators*, SInt e DDF.

3.2 Qualidade dos dados de inclinação

Das galáxias *fast rotators*, nenhuma foi classificada com qualidade -1 no catálogo DynPop (ver 2.4.2). Mas algumas delas foram classificadas com qualidade 0, indicando que não foi possível modelá-las bem com o modelo JAM e que as medidas de inclinação podem estar imprecisas. Portanto, a separação entre sistemas intermediários e discos dinamicamente frios foi refeita sem as galáxias *fast rotators* classificadas com qualidade 0. É importante mencionar que ao retirar uma galáxia *fast rotator* com qualidade 0 da amostra de PSBs, as galáxias de controle pareadas por ela também foram retiradas. Ao final desse processo a amostra ficou com 31 galáxias da amostra de PSB e 43 galáxias da amostra de controle de galáxias quiescentes.

Novamente, para garantir que as novas amostras de galáxias PSB e de galáxias quiescentes ainda têm distribuições de massa e dispersão de velocidades parecidas, foram criados histogramas (figura 3.2) e realizados testes KS para comparar as amostras. Os valores-p resultantes estão foram 0,686 para a distribuição de massas ($\log(M/M_{\odot})$) e 0,712 para a distribuição de dispersão de velocidades (σ). Assim, podemos dizer que não há diferenças estatisticamente significativas entre as amostras.

Com essas novas amostras, foi repetido o processo de classificação das galáxias *fast rotators* entre sistemas intermediários e discos dinamicamente frios (figura 3.3). Os resultados foram muito parecidos com os encontrados para a amostra inteira, com a grande

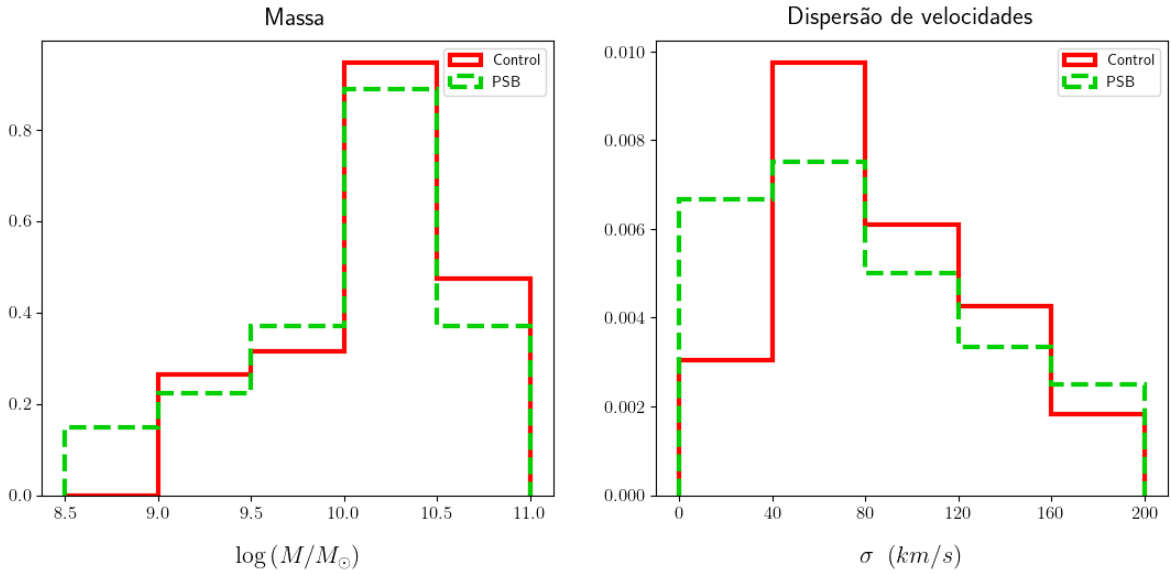


Figura 3.2 – Mesmo que a figura 3.1, mas retirando galáxias *fast rotators* cujos dados do catálogo DynPop foram classificados com qualidade -1 ou 0 em [Zhu et al., 2023](#). Ao excluir uma galáxia PSB da amostra, também são excluídas a(s) galáxia(s) controle pareada(s) por ela, sejam elas *slow* ou *fast rotators*. O teste Kolmogorov–Smirnov (teste KS) para as distribuições de massa, obteve valor p de 0,686. Já para as distribuições de dispersão de velocidades o valor p obtido foi de 0,712

maioria das *fast rotators* sendo classificadas como SInt (90,9% das *fast rotators* PSB e 86,3% das *fast rotators* quiescentes). Os testes de significância estatística realizados para a amostra inteira também foram realizados para essa nova amostra. Os valores p obtidos (coluna da direita da tabela 1) apontam novamente que as diferenças entre as frações das amostras de galáxias PSB e galáxias quiescentes não são significativas.

3.3 Descendentes de galáxias PSB

As semelhanças entre as propriedades cinemáticas de galáxias PSB e das galáxias quiescentes na amostra de controle indicam que um cenário em que galáxias PSB evoluem para galáxias quiescentes típicas é plausível. Para analisar mais a fundo essa possibilidade, é possível comparar os tipos morfológicos das galáxias de cada amostra. Isso pode ser feito usando o *T-Type* e a P_{S0} . O primeiro é um parâmetro que é negativo para galáxias *early-type*, próximo de zero para galáxias lenticulares, e positivo para galáxias *late-type*. O segundo é a probabilidade de ser uma galáxia lenticular. A figura 3.4 mostra os dois parâmetros para as amostras, que foram obtidos em [Domínguez Sánchez et al., 2022](#)

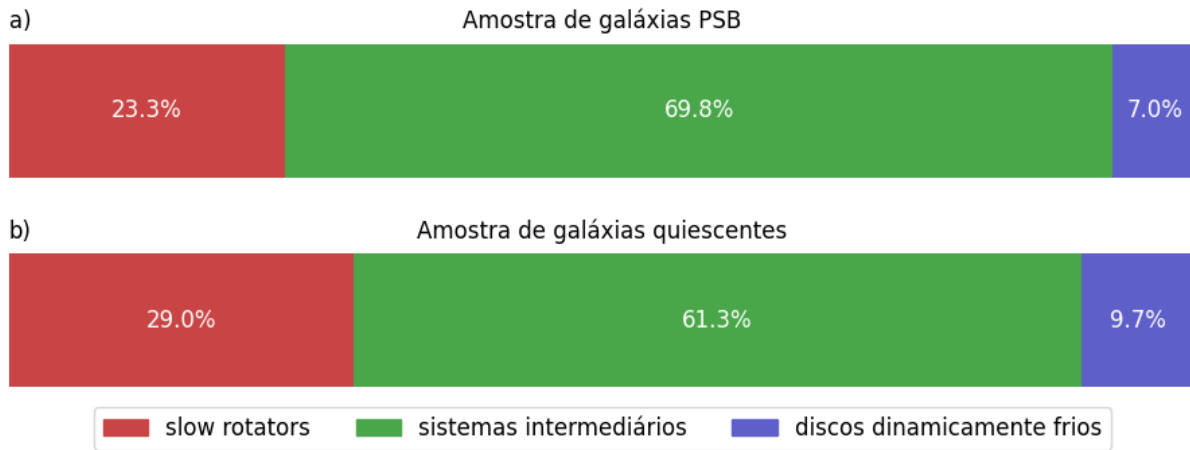


Figura 3.3 – Mesmo que a figura 3.1, mas retirando galáxias *fast rotators* cujos dados do catálogo DynPop foram classificados com qualidade -1 ou 0 em [Zhu et al., 2023](#). Ao excluir uma galáxia PSB da amostra, também são excluídas a(s) galáxia(s) controle pareada(s) por ela, sejam elas *slow* ou *fast rotators*, restando 31 galáxias da amostra de PSBs e 43 galáxias da amostra de controle.

utilizando modelos de inteligencia artificial.

No painel à esquerda, nota-se que a distribuição de *T-Types* das galáxias PSB é parecida com a das galáxias da amostra de controle, reforçando a hipótese de que galáxias PSB evoluem para galáxias quiescentes. As duas amostras possuem pouco mais de 40% de galáxias classificadas como *early-type* e uma quantidade considerável de galáxias com *T-Type* próximo de zero (típico de galáxias lenticulares). Apesar disso, no painel à direita vemos que as distribuições de probabilidade das galáxias serem lenticulares não são tão parecidas entre as duas amostras. As galáxias quiescentes têm probabilidades bem variadas de ser S0 (variando entre 0.1 e 0.9), as galáxias PSB têm P_{S0} mais concentrado, variando apenas entre 0.3 e 0.7. Como uma boa quantidade de galáxias PSB podem ter passado por fusões, podem ter morfologia ainda perturbada, que pode mudar até que se tornem galáxias quiescentes.

3.4 *Slow e fast quenching*

Levando em conta as frações de cada categoria cinemática em relação a amostra toda (figura 3.1), a grande maioria das galáxias é classificada como sistema intermediário (75,0% das PSBs e 65,9% das quiescentes). Algo parecido foi encontrado em para galáxias quiescentes em [Fraser-McKelvie & Cortese, 2022](#) (figura 1.7), onde, para massas menores

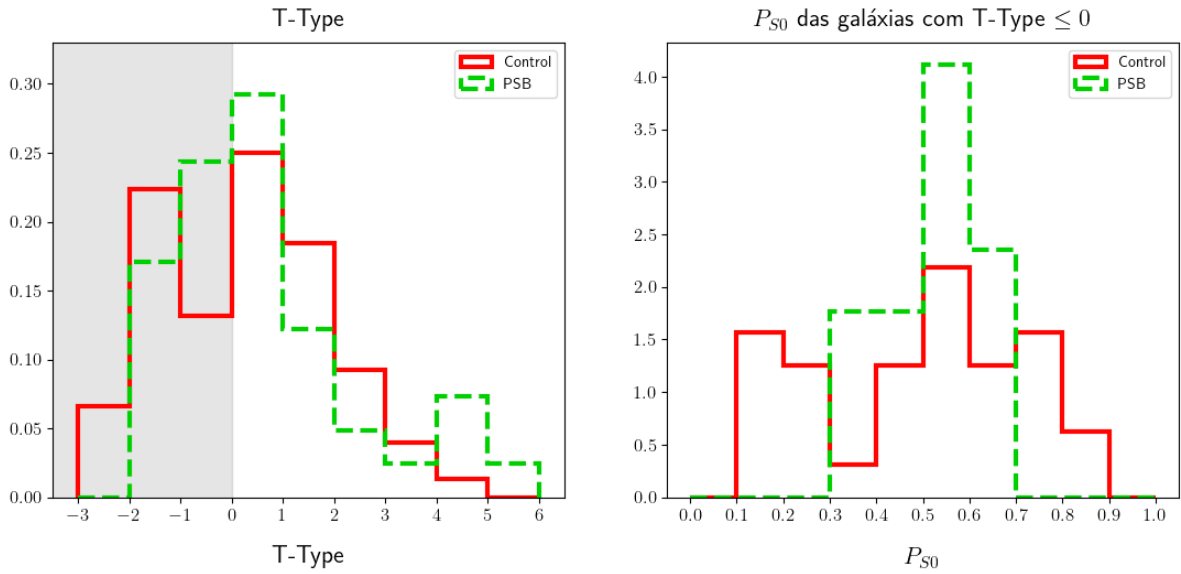


Figura 3.4 – A esquerda, os histogramas de densidade de $T\text{-Type}$ das galáxias PSB (verde tracejado) e quiescentes (vermelho sólido). A direita os histogramas de P_{S0} (a probabilidade da galáxia ser classificada como S0) para as galáxias com $T\text{-Type} \leq 0$ (região cinza do histograma de $T\text{-Type}$). 41.46% da amostra de PSBs e 42.11% da amostra de quiescentes são classificadas como *early-type* ($T\text{-Type} \leq 0$). Os dados de $T\text{-Type}$ e P_{S0} foram retiradas do catálogo *Morphology Deep Learning* (Domínguez Sánchez et al., 2022), que utiliza modelos de inteligência artificial.

que $10^{11} M_{\odot}$, a maioria das galáxias são classificadas como sistemas intermediários. Mas Fraser-McKelvie & Cortese, 2022 apontam um fração menor de galáxias *slow rotators* (entre $\sim 3\%$ e $\sim 15\%$) e uma fração bem maior de discos dinamicamente frios (entre $\sim 40\%$ e $\sim 60\%$) do que encontrado nesse trabalho, tanto para galáxias quiescentes, quanto para galáxias PSB.

Essa diferença pode ser explicada pela hipótese de que galáxias PSB não são as únicas progenitoras de galáxias quiescentes. Como já mencionado na seção 1.1, um dos caminhos para uma galáxia *starforming* cessar sua formação estelar é o *slow quenching*, que é gradual e não altera a morfologia e a cinemática da galáxia. Assim, é possível que uma grande fatia das galáxias quiescentes da amostra de Fraser-McKelvie & Cortese, 2022 sejam discos dinamicamente frios, que passaram por *slow quenching*. Já a outra parte das galáxias podem ter passado por *fast quenching* e pela fase PSB, gerando sistemas intermediários e *slow rotators*.

As frações de classes cinemáticas das galáxias quiescentes deste trabalho, porém, são

muito parecidas com as frações para as galáxias PSB, possuindo um número muito baixo de discos dinamicamente frios. Isso provavelmente se deve ao fato de que a amostra de quiescentes controle foi pareada por massa e dispersão de velocidades com as PSBs. Por isso as quiescentes selecionadas são muito similares às PSBs, tendo uma chance maior de terem sido originadas de uma.

3.4.1 Fusões

Galáxias PSB também são apontadas como possíveis remanescentes de fusões entre galáxias (([Yang et al., 2008](#)); ([Blake et al., 2004](#)); [Sazonova et al., 2021](#)), o que poderia ajudar a explicar as diferenças morfológicas vista no painel da direita da figura 3.4.

Uma das hipóteses mais aceitas para a formação de galáxias *fast rotators* é uma fusão de galáxias ricas em gás. Simulações de fusões de galáxias realizadas em [Cox et al., 2006](#) mostram que galáxias ricas em gás geram sistemas com maior suporte rotacional (painel esquerdo da figura 3.5). O gás das duas galáxias rotacionando em eixos diferentes, ao se chocarem dissipam energia, resultando em um sistema que gira em uma mesma direção. Já fusões com menor fração de gás, possuem uma maior fração da massa em estrelas, que são não-colisionais, fazendo com que a rotação não seja alinhada, aumentando a dispersão de velocidades e formando *slow rotators*.

Outro fator que influencia no suporte rotacional de remanescentes de fusões, é a razão de massas entre as galáxias. Fusões de galáxias com massas parecidas tendem a formar *slow rotators*, enquanto razões de massa próximas de ou maiores que 2:1 tendem a formar *fast rotators* ([Emsellem et al., 2011](#) e [Jesseit et al., 2009](#)).

Isso pode ajudar a explicar a maior fração de *slow rotators* entre as galáxias PSB se comparadas as galáxias quiescentes de [Fraser-McKelvie & Cortese, 2022](#). Elas podem ser remanescentes de fusões de galáxias com massas parecidas. A grande quantidade de *fast rotators* entre as galáxias PSB, então, é condizente com remanescentes de fusões com maior quantidade de gás e com razões de massa próximas ou maiores que 2:1.

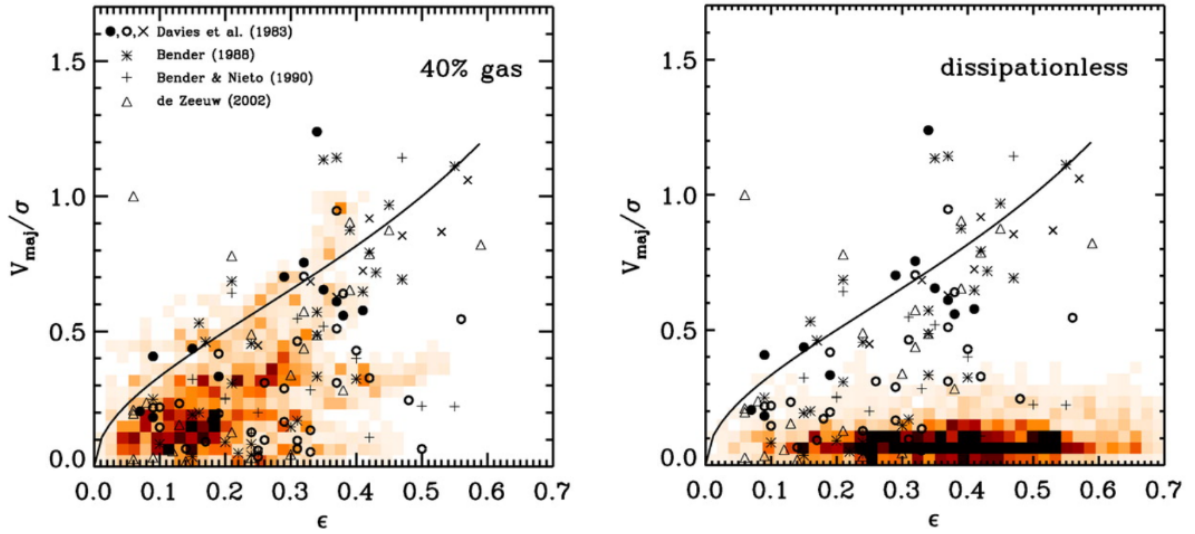


Figura 3.5 – Diagrama de V_{maj}/σ por elipticidade ϵ para os resultados de simulações (em tons de laranja) de fusões dissipativas (com 40% de gás) de não-dissipativas (sem gás). V_{maj} é a velocidade máxima de rotação medida em uma fenda ao longo do semi-eixo maior da elipse de meia luz. E σ é a média da dispersão de velocidades em um círculo com metade do raio de meia massa. A elipticidade é medida dentro da isofota de meia massa. Nos dois painéis, a linha preta sólida é a linha esperada para uma galáxia oblata e isotrópica com suporte rotacional (Binney, 1978). Também nos dois painéis constam dados de galáxias elípticas observadas em Davies et al., 1983, Bender et al., 1988, Bender & Nieto, 1990 e Tim de Zeeuw et al., 2002. Figuras retiradas de Cox et al., 2006.

3.5 Conclusões

Neste trabalho, selecionamos uma amostra de galáxias PSB imageadas pelo MaNGA usando o mesmo método de seleção de Chen et al., 2019. Então, selecionamos uma amostra controle de galáxias quiescentes (com $\log(\text{sSFR}) < -11$) também imageadas pelo MaNGA e pareadas por massa e dispersão de velocidades com as galáxias PSB. Dessas galáxias, retiramos aquelas nas quais o mapa não abrangia a elipse de meia luz, ou nas quais haviam menos de 20 bins dentro da elipse. Então, usando $(\frac{V}{\sigma})_{90}$ e λ_R , as galáxias foram classificadas em *slow rotators* e *fast rotators*. As *fast rotators* ainda foram subdivididas em sistemas intermediários e discos dinamicamente frios. Com isso, foram encontrados os seguintes resultados:

- A maioria das galáxias PSB são sistemas intermediários, com uma quantidade considerável de *slow rotators* e poucos discos dinamicamente frios, o que pode ser con-

dizente com o cenário de fusões ricas em gás e/ou com razões de massa entre as galáxias próximas ou maiores do que 2:1.

- As frações de classes cinemáticas de galáxias quiescentes é muito parecida com a fração para as PSBs, o que condiz com o cenário onde essas galáxias quiescentes evoluíram de galáxias PSB.
- A quantidade de DDFs é pequena se comparada à encontrada em [Fraser-McKelvie & Cortese, 2022](#), indicando que uma fração considerável de galáxias quiescentes não originou-se de galáxias PSB.

É importante destacar que alguns fatores podem ter afetado os resultados. Primeiramente, algumas galáxias das amostras deste trabalho possuem massas bem pequenas. Uma fração considerável de galáxias das amostras estão abaixo de $10^{9.75} M_{\odot}$ (a massa mínima na amostra de [Fraser-McKelvie & Cortese, 2022](#)). Galáxias menos massivas são, em media, menores e menos luminosas. Os mapas dessas galáxias, portanto, possuem spaxels com menor razão sinal-ruído e que precisam ser unidos para formar *bins* maiores. Isso faz com que haja uma diminuição na resolução espacial, que já é baixa em galáxias menores. Tudo isso pode acarretar na perda de qualidade dos dados e possível classificações errôneas em galáxias de baixa massa.

Referências

- Bell E. F., et al., 2004, [The Astrophysical Journal](#), 608, 752
- Belli S., Newman A. B., Ellis R. S., 2019, [The Astrophysical Journal](#), 874, 17
- Bender R., Nieto J. L., 1990, *Astronomy and Astrophysics*, 239, 97
- Bender R., Doebereiner S., Moellenhoff C., 1988, *Astronomy and Astrophysics*, 74, 385
- Bernardi M., Domínguez Sánchez H., Margalef-Bentabol B., Nikakhtar F., Sheth R. K., 2020, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 494, 5148
- Binney J., 1978, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 183, 501
- Binney J., 2005, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 363, 937
- Blake C., et al., 2004, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 355, 713
- Brown M. J. I., Dey A., Jannuzi B. T., Brand K., Benson A. J., Brodwin M., Croton D. J., Eisenhardt P. R., 2007, [The Astrophysical Journal](#), 654, 858
- Bundy K., et al., 2015, [Astrophysical Journal](#), 798
- Cappellari M., 2008, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 390, 71
- Cappellari M., 2016, [Annual Review of Astronomy and Astrophysics](#), 54, 597
- Cappellari M., 2017, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 466, 798
- Cappellari M., Copin Y., 2003, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 342, 345
- Cappellari M., Emsellem E., 2004, [Publications of the Astronomical Society of the Pacific](#), 116, 138
- Cappellari M., et al., 2007, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 379, 418
- Chen Y. M., et al., 2019, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 489, 5709
- Cherinka B., et al., 2019, , 158, 74

- Cox T. J., Dutta S. N., Di Matteo T., Hernquist L., Hopkins P. F., Robertson B., Springel V., 2006, [The Astrophysical Journal](#), 650, 791
- D'Eugenio C., et al., 2020, [The Astrophysical Journal Letters](#), 892, L2
- Davies R. L., Efstathiou G., and Garth Illingworth M. F., Schechter P. L., 1983, [Astrophysical Journal](#), 266, 41
- Domínguez Sánchez H., Margalef B., Bernardi M., Huertas-Company M., 2022, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 509, 4024
- Dressler A., Smail I., Poggianti B. M., Butcher H., Couch W. J., Ellis R. S., Oemler, Jr. A., 1999, [The Astrophysical Journal Supplement Series](#), 122, 51
- Emsellem E., et al., 2007, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 379, 401
- Emsellem E., et al., 2011, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 414, 888
- Fogarty L. M., et al., 2015, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 454, 2050
- Fraser-McKelvie A., Cortese L., 2022, [The Astrophysical Journal](#), 937, 117
- French K. D., 2021, 5195
- Graham A. W., Driver S. P., 2005, [Publications of the Astronomical Society of Australia](#), 22, 118
- Hubble E., 1986, *The Realm of the Nebulae*. Yale university Press
- Jesseit R., Cappellari M., Naab T., Emsellem E., Burkert A., 2009, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 397, 1202
- Krajnović D., et al., 2011, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 414, 2923
- Masters K. L., et al., 2010, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 405, 783
- Naab T., Burkert A., 2003, [The Astrophysical Journal](#), 597, 893
- Norton S. A., Gebhardt K., Zabludoff A. I., Zaritsky D., 2001, [The Astrophysical Journal](#), 557, 150

- Paccagnella A., Vulcani B., Poggianti B. M., Moretti A., Fritz J., Gullieuszik M., Fasano G., 2019, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 482, 881
- Pawlik M. M., Wild V., Walcher C. J., Johansson P. H., Villforth C., Rowlands K., Mendez-Abreu J., Hewlett T., 2016, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 456, 3032
- Pracy M. B., Kuntschner H., Couch W. J., Blake C., Bekki K., Briggs F., 2009, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 396, 1349
- Pracy M. B., et al., 2013, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 432, 3131
- Quintero A. D., et al., 2004, [The Astrophysical Journal](#), 602, 190
- Salim S., Boquien M., Lee J. C., 2018, [The Astrophysical Journal](#), 859, 11
- Sazonova E., et al., 2021, [The Astrophysical Journal](#), 919, 134
- Schawinski K., et al., 2014, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 440, 889
- Schneider P., 2015, *Extragalactic Astronomy and Cosmology*. Springer
- Suess K. A., Kriek M., Price S. H., Barro G., 2021, [The Astrophysical Journal](#), 915, 87
- Tacchella S., et al., 2022, [The Astrophysical Journal](#), 926, 134
- Tim de Zeeuw P., et al., 2002, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 329, 513
- Toft S., et al., 2014, [Astrophysical Journal](#), 782
- Westfall K. B., et al., 2019, [The Astronomical Journal](#), 158, 231
- Whitaker K. E., et al., 2011, [Astrophysical Journal](#), 735
- Wild V., Almaini O., Dunlop J., Simpson C., Rowlands K., Bowler R., Maltby D., McLure R., 2016, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 463, 832
- Wild V., et al., 2020, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 494, 529
- Wong O. I., et al., 2012, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 420, 1684
- Wyithe J. S. B., Turner E. L., Spergel D. N., 2001, [The Astrophysical Journal](#), 555, 504

-
- Yang Y., Zabludoff A. I., Zaritsky D., Lauer T. R., Mihos J. C., 2004, [The Astrophysical Journal](#), 607, 258
- Yang Y., Zabludoff A. I., Zaritsky D., Mihos J. C., 2008, [The Astrophysical Journal](#), 688, 945
- Zabludoff A. I., Zaritsky D., Lin H., Tucker D., Hashimoto Y., Shectman S. A., Oemler A., Kirshner R. P., 1996, [The Astrophysical Journal](#), 466, 104
- Zhu K., Lu S., Cappellari M., Li R., Mao S., Gao L., 2023, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#), 522, 6326

A Amostras

A.1 Amostra de galáxias PSB

MaNGA-ID	RA	DEC	$\log\left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)$	σ	Na segunda amostra?
1-247300	230.99603	48.792849	11.355	212.051	Sim
1-1655	152.56724	-0.074783228	11.259	185.771	Sim
1-134964	246.76067	43.476095	11.021	174.902	Não
1-116828	342.78927	14.765178	11.284	174.026	Sim
1-217859	118.34624	24.550155	10.412	163.746	Sim
1-178374	260.61132	28.309702	10.893	157.548	Sim
1-457327	198.65668	26.12397	11.138	152.495	Sim
1-78155	146.11234	4.4991198	10.598	149.05	Sim
1-37862	47.029409	0.4562189	10.931	143.837	Sim
1-78255	147.9806	3.4834363	11.011	138.388	Não
1-837	149.45645	-0.21093188	10.031	120.954	Não
1-26020	327.82533	-0.95701783	10.706	115.433	Sim
1-195233	196.35761	53.591759	10.772	107.707	Sim
1-201936	120.57664	32.535504	10.421	91.927	Não
1-38374	50.888579	-0.43854649	10.114	90.867	Sim
1-26470	332.02544	-0.90694761	10.407	89.744	Sim
1-178035	259.53275	30.129019	9.929	83.701	Sim
1-38062	49.228809	-0.041978592	10.096	82.497	Sim
1-389466	147.55031	34.698675	9.895	70.038	Não
1-635485	318.50227	0.53510725	10.259	69.777	Sim
1-456684	194.8421	26.797111	8.876	67.817	Sim
1-47429	129.95177	54.58075	10.112	65.166	Sim
1-606491	149.29789	5.201324	10.242	63.068	Sim
1-38618	52.622582	-0.48879004	9.621	57.063	Sim
1-149589	170.72339	51.341744	9.814	53.363	Sim
1-213422	129.24078	3.7074413	10.307	52.218	Sim
1-415550	198.10782	34.121339	10.005	51.282	Sim
1-250969	206.29627	42.319508	10.208	46.217	Não
1-149709	173.41284	52.674611	10.261	45.929	Sim
1-39922	16.573992	14.06506	10.018	39.723	Sim
1-456744	194.33165	27.613796	9.02	39.416	Sim
1-415883	204.01718	30.141063	9.793	38.217	Sim
1-379199	119.77966	52.747168	8.974	37.394	Sim
1-384400	126.75582	21.706779	10.207	33.121	Sim
1-29809	358.46884	-0.098715452	9.415	18.864	Sim
1-404249	194.52341	29.017371	9.294	11.677	Não
1-456287	195.00496	26.956108	8.927	10.75	Não

MaNGA-ID	RA	DEC	$\log\left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)$	σ	Na segunda amostra?
1-38166	49.946846	0.62382205	9.324	8.697	Não
1-40655	19.480815	14.62889	9.182	8.667	Sim
1-384486	127.31796	23.809014	9.141	7.736	Não
1-456564	194.61838	27.559386	9.826	6.126	Sim

Tabela 2 – Amostra de galáxias PSB com 41 galáxias (descrita na seção 2.2). Para cada galáxia, nas colunas da esquerda para a direita temos o MaNGA-ID, a ascensão reta (RA), a declinação (DEC), a massa em $\log\left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)$, a dispersão de velocidades (σ) e se a galáxia consta ou não na segunda amostra com 31 galáxias PSB (descrita em 3.2).

A.2 Amostra de galáxias quiescentes

MaNGA-ID	RA	DEC	$\log\left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)$	σ	Na segunda amostra?
1-457204	196.15375	28.250507	9.326	6.814	Não
1-42274	27.260555	12.927513	9.856	7.987	Não
1-43680	116.576126	41.701653	9.848	8.165	Não
1-261059	210.21883	38.72493	9.202	8.95	Sim
1-42308	27.323458	13.466657	9.013	8.994	Não
1-456844	193.82965	27.925062	9.3	9.985	Não
1-404160	195.8893	29.060488	9.333	10.653	Não
1-456794	193.83722	27.669144	9.221	11.267	Não
1-90176	233.3523	56.608784	9.227	14.676	Não
1-300676	139.7737	33.930058	9.423	17.524	Não
1-456587	194.82649	27.715736	9.419	20.026	Sim
1-404242	194.87547	28.700127	9.32	20.832	Não
1-456721	194.39455	27.310295	9.344	23.253	Não
1-384222	125.06237	21.060074	8.92	24.907	Não
1-159382	202.81664	-1.6439129	9.246	32.236	Não
1-83113	220.2639	4.1941276	10.201	32.395	Sim
1-456289	195.02615	27.3007	10.203	33.971	Sim
1-415871	203.9442	29.855892	9.797	35.701	Sim
1-248133	237.91159	43.6396	9.995	37.488	Não
1-28665	346.64725	-0.42159933	10.239	40.339	Sim
1-285020	197.7229	46.819195	9.825	40.679	Sim
1-386892	136.59647	29.930126	10.221	42.851	Sim
1-300925	140.53812	33.900852	10.174	43.434	Não
1-300680	139.76057	33.69519	9.13	44.84	Sim

MaNGA-ID	RA	DEC	$\log\left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)$	σ	Na segunda amostra?
1-210793	246.76659	39.433437	10.05	45.027	Não
1-457163	195.50436	27.652967	10.193	45.276	Não
1-114919	330.88126	12.626012	10.016	52.001	Não
1-404401	195.48264	29.322775	10.001	52.295	Sim
1-456746	194.37749	27.543024	9.59	53.871	Sim
1-24380	262.26547	57.76935	9.799	55.693	Não
1-256457	166.78133	42.825493	9.803	56.097	Sim
1-33876	19.017544	0.018323543	10.351	57.153	Sim
1-522189	197.46901	24.560465	10.351	57.728	Sim
1-456563	194.54044	27.549421	9.624	59.308	Sim
1-23679	263.7181	60.243958	10.238	59.867	Sim
1-458359	204.66844	26.730648	10.246	61.701	Sim
1-117984	350.7648	14.4073515	10.104	64.518	Sim
1-117936	351.17654	14.608813	10.131	66.705	Não
1-199442	234.80215	43.961662	9.17	69.714	Sim
1-248544	242.75078	39.322697	9.913	70.778	Não
1-298596	123.70917	24.002924	10.266	71.761	Sim
1-178103	257.91037	31.173552	10.291	73.075	Não
1-121992	121.08461	37.84035	9.918	73.766	Não
1-177972	259.35638	29.185528	10.074	79.587	Sim
1-148652	163.96173	49.67814	10.118	84.191	Sim
1-167555	153.75258	46.756737	9.924	84.406	Sim
1-211491	248.89351	36.54956	10.385	86.53	Sim
1-149905	172.74792	52.286674	10.392	88.818	Sim
1-115380	333.71414	13.715251	10.424	89.701	Não
1-419351	183.11337	35.88347	10.128	91.599	Sim
1-294599	250.37653	22.248898	10.126	92.009	Sim
1-22347	252.1707	63.47928	10.421	92.794	Não
1-420732	203.24637	32.320442	10.764	106.369	Sim
1-326031	253.86613	25.229845	10.756	106.884	Sim
1-78558	149.21054	3.7497356	10.691	115.012	Sim
1-301495	146.31184	35.36931	10.72	117.254	Sim
1-456320	194.00735	26.75661	10.02	120.808	Não
12-110746	205.54001	27.570375	10.043	123.176	Não
1-1038	150.10153	0.70458865	11.012	140.065	Não
1-96416	310.30786	-5.1234803	9.394	140.76	Sim
1-122094	121.24403	38.267723	11.022	140.882	Não

MaNGA-ID	RA	DEC	$\log\left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)$	σ	Na segunda amostra?
1-151429	187.17992	53.35775	10.917	141.796	Não
1-182806	154.00368	6.142382	10.914	144.699	Sim
1-42862	29.304056	14.735454	10.608	148.818	Sim
1-284349	196.36893	45.581867	10.596	150.295	Sim
1-178541	260.13342	28.10082	11.146	155.544	Sim
1-152700	116.53438	31.019938	10.89	156.306	Sim
1-167380	153.23196	46.417713	10.886	157.266	Sim
1-232536	144.07875	37.246716	10.452	165.125	Sim
1-247247	230.47128	48.62778	11.27	172.018	Sim
1-72210	121.076294	40.19573	11.027	175.136	Não
1-522231	197.01071	25.30637	11.028	176.682	Não
1-22942	254.3954	62.872585	11.247	183.629	Não
1-419301	183.52008	35.40787	11.253	185.591	Sim
1-248661	244.00214	39.49761	11.362	212.684	Sim
1-436574	227.48122	28.382189	11.357	212.99	Sim

Tabela 3 – Amostra controle de galáxias quiescentes com pareadas com 76 galáxias a amostra de PSB por massa e dispersão de velocidades (descrita na seção 2.3). Para cada galáxia, nas colunas da esquerda para a direita temos o MaNGA-ID, a ascensão reta (RA), a declinação (DEC), a massa em $\log\left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)$, a dispersão de velocidades (σ) e se a galáxia consta ou não na segunda amostra com 43 galáxias quiescentes (descrita em 3.2).