



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Observatório do Valongo



Distribuição de massa estelar em galáxias barradas no universo local

Yasmin Cavalcante Ferreira Coelho

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2023

Distribuição de massa estelar em galáxias barradas no universo local

Yasmin Cavalcante Ferreira Coelho

Trabalho de conclusão de curso/Projeto final submetido ao Curso de Graduação em Astronomia, Observatório do Valongo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Astrônoma.

Orientador: Karín Menéndez-Delmestre

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2023

CIP - Catalogação na Publicação

C672d Coelho, Yasmin Cavalcante Ferreira
Distribuição de massa estelar em galáxias
barradas no universo local / Yasmin Cavalcante
Ferreira Coelho. -- Rio de Janeiro, 2023.
79 f.

Orientadora: Karín Menéndez-Delmestre.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Observatório
do Valongo, Bacharel em Astronomia, 2023.

1. Galáxias barradas. 2. Universo local. 3.
Distribuição de massa. 4. Infravermelho médio. I.
Menéndez-Delmestre, Karín, orient. II. Título.



PROJETO FINAL

RELATÓRIO DA COMISSÃO JULGADORA

ALUNA: Yasmin Cavalcante Ferreira Coelho (DRE 114125677)

TÍTULO DO TRABALHO: “DISTRIBUIÇÃO DE MASSA ESTELAR EM GALÁXIAS BARRADAS NO UNIVERSO LOCAL”

DATA DA DEFESA: 28 de fevereiro de 2023 às 10:30h

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA:

Prof.^a Karín Menéndez-Delmestre – (Orientadora/Presidenta - OV/UFRJ)

Msc. Camila de Sá Freitas – (European Southern Observatory -ESO)

Prof. Marco Grossi – (OV/UFRJ)

CANDIDATA:

Yasmin Cavalcante Ferreira Coelho

Rio de Janeiro, 28 de fevereiro de 2023.

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

Agradecimentos

Foi uma longa jornada até aqui e eu jamais teria conseguido chegar a escrever esse trabalho se eu não tivesse tido apoio. Sou o tipo de pessoa que desanima fácil das coisas e então desiste, por isso eu jamais teria chegado até o final desse curso sem o apoio dos meus pais Elba e Mauro, que sempre me ajudaram como podiam e nunca falaram que eu deveria desistir.

Definitivamente, eu jamais conseguiria chegar até aqui se não fosse por toda a ajuda e apoio que recebi da minha orientadora Karín ao longo da graduação. Ela acreditou que podia fazer isso quando eu já não acreditava mais, e isso fez toda a diferença para eu acreditar que conseguiria continuar.

Sou muito grata ao que pude aprender graças aos excelentes professores e pesquisadores Arianna Cortesi e Bruno Morgado. Arianna me ensinou sobre decomposição de galáxias, algo que eu tinha muita vontade de aprender mas que realmente achei que não conseguiria entender. Bruno me ensinou muito sobre Python (o que me fez melhorar muito e ganhar confiança), e sempre estava disponível para me tirar diversas dúvidas que muitas das vezes nem cabiam na aula.

Agradeço ao suporte mental (que muitas das vezes não reconhecemos como importante) que recebi dos poucos amigos que tenho. Afinal, se você não está bem, nada vai bem (e a solidão é o que mais me afeta). Aos amigos que tenho desde o ensino médio (Stephanie, Viviane, Yuri e Filipe), e aos poucos que me ajudaram a me sentir um pouco menos sozinha no final dessa graduação (Paola e Natanael).

Por fim, agradeço ao meu companheiro Pedro e ao meu filho Oliver, pelo apoio diário, pela companhia e por terem aprendido a lidar com alguém tão instável quanto eu.

Resumo

Distribuição de massa estelar em galáxias barradas no universo local

Yasmin Cavalcante Ferreira Coelho

Orientador: Karín Menéndez-Delmestre

Resumo do trabalho de conclusão de curso/Projeto final submetido ao Curso de Graduação em Astronomia, Observatório do Valongo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Astrônoma.

Observando galáxias no universo local, frequentemente identificamos uma estrutura central alongada composta por estrelas e gás, chamada barra. Barras são estruturas comuns em galáxias, com $\sim 65\%$ das espirais no universo local sendo classificadas como “barradas”. Essa estrutura causa uma intensa movimentação de gás e estrelas na galáxia, afetando a dinâmica do disco e influenciando a evolução da galáxia hospedeira. Visamos estudar a quantidade de massa contida na estrutura barra, e como a presença desta estrutura está relacionada com outras características globais das galáxias hospedeiras (i.e., massa estelar total, tipo morfológico, presença de outras estruturas estelares). Com o objetivo de focar nas estrelas de menor massa (que dominam a massa estelar por serem maioria e durarem mais), escolhemos utilizar o infravermelho médio. Desta forma também evitamos o obscurecimento causado por poeira presente no meio interestelar das galáxias. Definimos uma amostra de 430 galáxias barradas a partir do levantamento “The Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies” (S^4G). Este consiste no imageamento nas bandas de 3.6 e $4.5\mu\text{m}$ para mais de 2300 galáxias próximas, grandes e brilhantes obtidas a partir do telescópio espacial Spitzer. Além dos dados do S^4G , está disponível publicamente a decomposição (baseada em GALFIT) destas galáxias na banda de $3.6\mu\text{m}$. A decomposição faz um modelo para cada galáxia com 1 até 4 componentes que podem incluir: disco, bojo, barra, núcleo e disco secundário. Este modelo é uma representação bi-dimensional da luz de uma galáxia e inclui um ou múltiplos componentes de maneira que melhor represente a distribuição de fluxo observado. Com a decomposição, verificamos a complexidade de modelos em diferentes cortes de massa. Analisamos a massa relativa (i.e., massa da componente em relação a massa do modelo) contida em diferentes estruturas para as galáxias da nossa amostra. Verificamos uma tendência para barras com maior massa relativa em galáxias de maior massa, assim como em galáxias com componente bojo. Nosso resultado é consistente com estudos de fração de barra em alto e baixo redshift, que indicam que em baixo redshift galáxias de menor massa ainda estão adquirindo condições para possuírem uma barra, o que sugeriria que

as barras já estabelecidas nestas galáxias estão ainda se tornando mais fortes, e subsequentemente, adquirindo mais massa. Este trabalho focou em barras, mas ele apresenta uma oportunidade para estender uma análise de massa para outras estruturas estelares.

palavras chave: *galáxias barradas, universo local, distribuição de massa, infravermelho médio*

Abstract

Distribution of stellar mass in barred galaxies in the local universe

Yasmin Cavalcante Ferreira Coelho

Advisor: Karín Menéndez-Delmestre

Abstract do Trabalho de conclusão de curso/Projeto final submetido ao Curso de Graduação em Astronomia, Observatório do Valongo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Astrônoma.

Looking at galaxies in the local universe, we often identify an elongated central structure composed of stars and gas, called bar. Bars are common structures in galaxies, with $\sim 65\%$ of spirals in the local universe being classified as “barred”. This structure causes intense movement of gas and stars in the galaxy, affecting the disk dynamics and influencing the evolution of the host galaxy. We aim to study the amount of mass contained in the bar structure, and how the presence of this structure is related to other global characteristics of the host galaxies (i.e., total stellar mass, morphological type, presence of other stellar structures). In order to focus on lower mass stars (which dominate the stellar mass because they are the majority and last longer), we chose to use the mid-infrared. In this way we also avoid obscuration caused by dust present in the interstellar medium of galaxies. We defined a sample of 430 barred galaxies from the survey “The Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies” (S^4G). This consists of imaging in the 3.6 and 4.5 μm bands of more than 2300 nearby, large and bright galaxies obtained from the Spitzer Space Telescope. In addition to the S^4G data, the decomposition (based on GALFIT) of these galaxies in the 3.6 μm band is publicly available. The decomposition makes a model for each galaxy with 1 to 4 components that can include: disk, bulge, bar, nucleus and secondary disk. This model is a two-dimensional representation of the light from a galaxy and includes one or multiple components in a way that best represents the observed flux complexity of models in different mass cuts. We analyzed the relative mass (i.e., mass of the component in relation to the model mass) contained in different structures for the galaxies in our sample. We verified a tendency for bars with greater relative mass in galaxies with greater mass, as well as in galaxies with a bulge component. Our result is consistent with bar fraction studies at high and low redshift, which indicate that at low redshift galaxies of lower mass are still acquiring conditions to have a bar, which would suggest that the bars already established in these galaxies are still becoming more stronger, and subsequently, gaining more mass. This work has focused on bars, but it presents an opportunity to extend a mass analysis to other stellar structures.

keywords: *barred galaxies, local universe, mass distribution, mid infrared*

Rio de Janeiro
February 2023

Lista de Figuras

1.1	“The Sequence of Nebulae Types”	17
1.2	Exemplos de galáxias classificadas por Hubble e suas respectivas classificações.	18
1.3	Representação 3-dimensional da revisão do esquema de classificação e sistema de notação.	20
2.1	Galáxia NGC 1097 em 3.6 μm , seu modelo e seu resíduo	30
2.2	Galáxias IC 4901 e NGC 936 e seus modelos de decomposição.	33
2.3	Exemplos de modelos finais de decomposição.	36
2.4	Galáxia NGC 3380 na banda 3.6 μm e seu modelo final de decomposição.	37
2.5	Decomposição multibanda (3.6 e 4.5 μm) preliminar feita para a galáxia NGC 3380.	38
2.6	Histogramas da classificação morfológica presente no S^4G e na nossa amostra.	44
4.1	Histogramas de massa relativa das componentes para o modelo disco +barra (para diferentes cortes de massa).	55
4.2	Histogramas de massa relativa das componentes do modelo disco +barra +núcleo.	56
4.3	Histogramas de massa relativa das componentes do modelo disco +barra +bojo.	57
4.4	Histogramas de massa relativa das componentes do modelo disco +barra +bojo +núcleo.	58
4.5	Histogramas de massa relativa da componente barra – comparação entre amostras de massas diferentes	61
4.6	Histogramas de massa relativa da componente barra – comparação entre amostra com bojo e sem bojo.	62
4.7	Histogramas da amostra S^4G , inclinação menor que 65 graus, destacando as barras.	64
4.8	Histogramas das galáxias anãs ($M_* < 10^9 M_\odot$) presentes no S^4G com inclinação menor que 65 graus, destacando as barras.	65
4.9	Histogramas de galáxias com massa $10^9 M_\odot \leq M_* < 10^{10} M_\odot$ presentes no S^4G , inclinação menor que 65 graus, destacando as barras.	66
4.10	Histogramas com galáxias de massa $M_* \geq 10^{10} M_\odot$ presentes no S^4G com inclinação menor que 65 graus, destacando as barras	67
4.11	Histogramas com os falsos negativos – Não possuem componente barra, mas possuem barra em sua classificação morfológica.	68
4.12	Histogramas com os falsos positivos – possuem componente barra, não possuem barra no seu tipo morfológico.	69

4.13 Fluxo extra no modelo de decomposição.	70
---	----

Lista de Tabelas

1.1	Frequência dos subtipos em 994 galáxias espirais – dados retirados de de Vaucouleurs (1963).	20
1.2	Tempo de vida de estrelas na sequência principal em função da massa . . .	24
2.1	Amostra final para a análise de distribuição de massa em galáxias barradas.	41
2.2	Tamanhos das subamostras com diferentes cortes de massa.	43
2.3	Estágio em que se encontra a galáxia, considerando seu tipo morfológico. .	43
4.1	Número de galáxias com diferentes quantidades de componentes em seu modelo final de decomposição	52
4.2	Fração das componentes (barra, bojo e núcleo) em diferentes cortes de massa.	53
4.3	Massa relativa das componentes dos modelos de decomposição – galáxias que possuem classificação morfológica com barra segundo Buta et al. (2015).	59
4.4	Massa relativa da componente barra em galáxias massivas – galáxias que possuem classificação morfológica com barra segundo Buta et al. (2015). .	60
4.5	Amostra de galáxias barradas segundo a classificação morfológica, com inclinação menor que 65 graus, destacando presença de barras.	67

Abreviações

<i>S⁴G</i>	The Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies
IRAC	Infrared Array Camera
2MASS	Two Micron All Sky Survey
COSMOS	Cosmic Evolution Survey
HST	Hubble Space Telescope
IPAC	Infrared Processing & Analysis Center
NED	NASA/IPAC Extragalactic Database
JWST	James Webb Space Telescope
SA	Espiral comum
SAB	Espiral com barra intermediária
SB	Espiral com barra forte

Constantes Físicas

Parsec	pc	=	3.086×10^{18}	cm
Megaparsec	Mpc	=	3.086×10^{24}	cm
Massa Solar	M_{\odot}	=	1.989×10^{33}	g
Micrômetro	μm	=	1×10^{-4}	cm
Angstrom	\AA	=	1×10^{-8}	cm
Jansky	Jy	=	1×10^{-23}	$\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{Hz}^{-1}$

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Galáxias locais – riqueza morfológica, produto da evolução cosmológica	17
1.2	Barras em galáxias – estruturas estelares frequentes no universo local, importantes para entender a evolução de galáxias	21
1.3	Distribuição de massa estelar em galáxias – estrelas de baixa massa duram mais tempo e são maioria	23
1.4	Motivação e Objetivos	25
2	Levantamento S^4G e Decomposição de Galáxias	27
2.1	O levantamento S^4G	27
2.2	Bandas 3.6 e 4.5 μm para rastrear massa estelar	28
2.3	Decomposição na banda 3.6 μm	29
2.3.1	GALFIT – Ferramenta para fazer decomposições	30
2.3.2	As Equações para os Perfis de Brilho	31
2.3.3	Preparações importantes antes da decomposição	33
2.3.4	Qualidade da decomposição	34
2.3.5	Decomposição final e suas possíveis componentes	35
2.3.6	Galáxia com barra em seu tipo morfológico, sem barra na decomposição	36
2.4	Decomposição Multibanda – Um primeiro passo de um projeto futuro	36
2.4.1	NGC 3380 – galáxia exemplo	37
2.5	Nossa amostra	39
2.5.1	Critérios para a seleção	39
2.5.2	Comparação entre subamostras – diferentes cortes de massa	41
2.5.3	Diferentes tipos morfológicos em nossa amostra	43
3	Metodologia	45
3.1	Componentes presentes na decomposição 3.6 μm – como as decomposições variam olhando para diferentes cortes de massa	45
3.2	Distribuição de massa em galáxias com componentes barra	46
3.2.1	Fluxo presente nas componentes da decomposição em 3.6 μm	46
3.2.2	Estimando o fluxo relativo das componentes em 4.5 μm	47
3.2.3	Convertendo o fluxo para massa	49
3.2.4	Massa relativa das componentes	49
3.2.5	Diferentes modelos de decomposição, diferentes funções criadas	50
4	Resultados e Discussão	51
4.1	Decomposição na banda 3.6 μm – O que temos na amostra S^4G ?	51
4.1.1	Distinção entre classificação visual morfológica e presença de estruturas no modelo de decomposição	52

4.2	Distribuição de massa	53
4.2.1	Modelos mais simples – com disco e barra	54
4.2.2	Modelos com bojo – aparente aumento na massa contida nas barras	56
4.2.3	Modelos com classificação morfológica com barra	59
4.2.3.1	Massa relativa da barra em galáxias barradas massivas – olhando para dois cortes de massa	60
4.2.3.2	Mas a componente bojo pode ser o diferencial para ver- mos essa tendência?	62
4.3	Limitações da nossa abordagem	63
4.3.1	Análise da fração de barras – quão representativas são as barras de nossa amostra?	63
4.3.1.1	Galáxias Anãs, as mais irregulares	64
4.3.1.2	Galáxias massivas – se muito massivas, movidas para tipo anterior	65
4.3.1.3	Comparação da frequência de barras entre decomposição e classificação morfológica	66
4.3.1.4	Falsos negativos – Não possuem componente barra, mas possuem barra em seu tipo morfológico	67
4.3.1.5	Falsos positivos – possuem componente barra, não pos- suem barra no seu tipo morfológico	68
4.3.2	Limitações da decomposição – necessidade de definir um corte ra- dial aos perfis de brilho ajustados	69
5	Conclusões	71
	Referências Bibliográficas	74
A	Códigos em Python usados na Análise	77
A.1	Ferramenta para as Análises – Códigos em Python	77
A.2	Análise na decomposição – complexidade dos modelos	77
A.3	Massa Relativa da Componente	78
A.4	Classificação Morfológica – Presença de barras	79

Capítulo 1

Introdução

Ao olhar para as galáxias mais próximas da nossa Galáxia, vemos o resultado da evolução das estruturas estelares destes objetos após bilhões de anos. Diversos eventos influenciaram sua distribuição de matéria até chegar ao que observamos. Olhando para objetos bem mais distantes, vemos diferenças na sua aparência global. Vemos que algumas estruturas estelares são menos presentes em galáxias num universo mais distante. Isto provavelmente é devido ao fato que como estas galáxias são mais novas, várias delas ainda não tiveram condições de formar algumas estruturas que vemos com maior frequência em galáxias mais próximas. Isto nos reforça a importância de estudar as estruturas estelares das galáxias no universo local, pois melhor compreendê-las é fundamental para o estudo da formação e evolução de galáxias.

Este capítulo tem como objetivo introduzir conceitos fundamentais deste trabalho, incluindo a classificação morfológica de galáxias e a presença de diferentes componentes estelares. Falamos como galáxias barradas se destacam no universo local e a influência da barra na evolução de uma galáxia. Também comentamos sobre as populações estelares e o que elas nos dizem sobre a galáxia, e a importância do infravermelho para este estudo. Terminamos o capítulo falando um pouco sobre nossa motivação e nossos objetivos.

1.1 Galáxias locais – riqueza morfológica, produto da evolução cosmológica

As galáxias são compostas por uma mistura de estrelas, gás, poeira e matéria escura. A dinâmica gravitacional presente nas galáxias formam estruturas estelares em larga escala. Quando olhamos para diversas galáxias conseguimos verificar padrões nesta distribuição da matéria (e.g., disco, bojo, barra, braços espirais, halo).

A classificação morfológica definida por Hubble (1926) é uma das mais conhecidas e utilizadas. Na época, galáxias eram chamadas frequentemente de nebulosas extragalácticas. Hubble classificou 400 galáxias no óptico, se baseando em seu formato. Estas foram classificadas como regulares (elípticas, espirais normais e espirais barradas) e irregulares. Um breve resumo dessa classificação (das galáxias regulares) pode ser visto na Figura 1.1.

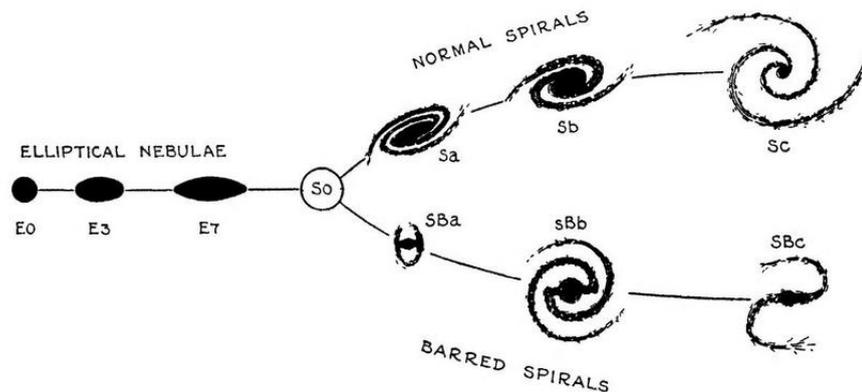


FIGURA 1.1. “The Sequence of Nebulae Types”, mostra as galáxias regulares. As irregulares ficariam após as espirais Sc e SBc. Imagem retirada de “The Realm of the Nebulae” (Hubble, 1936).

As galáxias Elípticas foram classificadas como E_n , onde n é um índice de elipticidade que varia de 1 a 7, sendo 1 a galáxia com aparência circular e 7 a galáxia mais elíptica possível.

As galáxias Espirais foram classificadas como normais e barradas. As espirais normais possuem braços que emergem de dois pontos opostos, na periferia da região nuclear. As espirais barradas possuem uma região alongada que se estende diametralmente através da região central. Nestas espirais, os braços começam abruptamente a partir da extremidade dessa barra.

Dentro da classificação das galáxias Espirais, tanto as normais quanto as barradas foram separadas em: anteriores (*Early*), intermediárias e tardias (*Late*). No artigo, ele comenta que apesar do conotação temporal (e hoje, de fato sabemos que não é uma evolução temporal de *early* para *late*), esses teriam sido os adjetivos mais convenientes para descrever sua posição na sequência. Também menciona que de *early* para *late* expressaria uma progressão de formas mais simples para formas mais complexas.

Por último, classificou como Irregulares galáxias sem um formato bem definido.

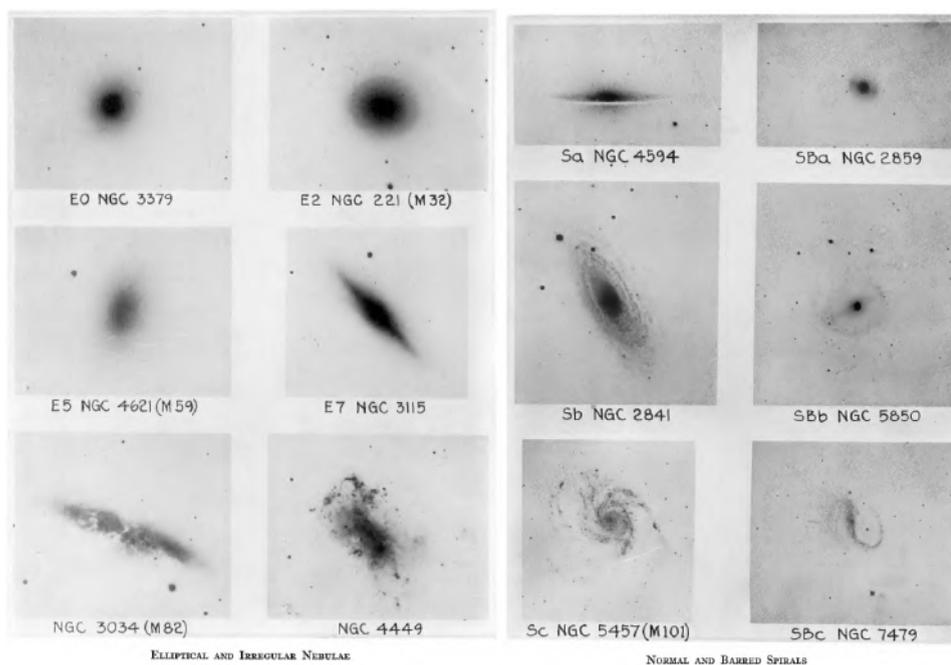


FIGURA 1.2. Exemplos de galáxias classificadas por Hubble e suas respectivas classificações. Imagens retiradas de Hubble (1926).

Uma década depois, no livro *The Realm of the Nebulae* (Hubble, 1936), foi apresentado o diagrama de formatos para galáxias regulares (Figura 1.1). Neste livro, Hubble menciona que alguns objetos poderiam ser classificados com índices combinados como “ab” e “bc”. Também menciona sobre “nebulosas” intermediárias entre E_7 e S, falando que estas ocasionalmente são chamadas de S0 (galáxias lenticulares).

Nesse livro, Hubble também menciona galáxias peculiares. Ele não as classifica como irregulares, mas como regulares com características incomuns, cujas classificações na sequência seriam incertas.

Após Hubble, houveram outros autores fazendo revisões nas classificações morfológicas (e.g., Holmberg 1950; Morgan 1958, 1959; van den Bergh 1960a,b; de Vaucouleurs 1959, 1963).

Em de Vaucouleurs (1959) foi feita uma revisão na classificação e no sistema de notação considerando a classificação de Hubble. A apresentação inclui: quatro classes (elípticas E, lenticulares S0, espirais S e irregulares I), duas famílias de espirais e lenticulares (ordinárias SA, SA0; barradas SB, SB0; e barras intermediárias SAB, SAB0), duas variedades principais de espirais e lenticulares – “aneladas”(r), “formato-S”(s) e tipo de transição (rs).

Com isso, a sequência de espirais seria: SA(r), SA(s), SB(r), SB(s) indicando também os índices a,b,c,d de tipo “anterior” para “tardio”, com estágios intermediários ab, bc, cd. Nisso, foi estendida a classificação que era “a,b,c” para “a,b,c,d”. Também haveriam subdivisões para indicar se a galáxia seria anterior, intermediária ou tardia fora dos tipos espirais (que essas subdivisões são indicadas com as letras a,b,c). Para elípticas e lenticulares seria utilizados os sinais -, ° e + para indicar se estas são anteriores, intermediárias ou tardias, respectivamente. Uma ilustração 3-dimensional pode ser vista na Figura 1.3.

O estágio de transição em direção às irregulares “magellanic” Im (que teriam seu diâmetro pequeno e sua luminosidade baixa, o que as marcariam como galáxias anãs) sendo barrada ou não, recebeu a notação de Sm.

Anos depois, de Vaucouleurs (1963) desenvolveu um trabalho que foi um marco por ser extremamente detalhado e representativo. Neste foi feita a revisão da classificação de 1500 galáxias brilhantes, utilizando a classificação morfológica revisada em de Vaucouleurs (1959).

Assim como no em seu trabalho anterior, o autor verificou a frequência das classes de diferentes tipos morfológicos, mas neste trabalho a amostra era bem maior e mais representativa. Das 1528 galáxias classificadas nesse estudo, 994 são espirais. O detalhamento em quantidade e porcentagem dos subtipos de espirais desse estudo pode ser visto na Tabela 1.1.

Um importante resultado desse trabalho foi a análise dessas 994 galáxias espirais. As espirais foram divididas nas famílias A, AB e B. Até então, espirais tipo A eram

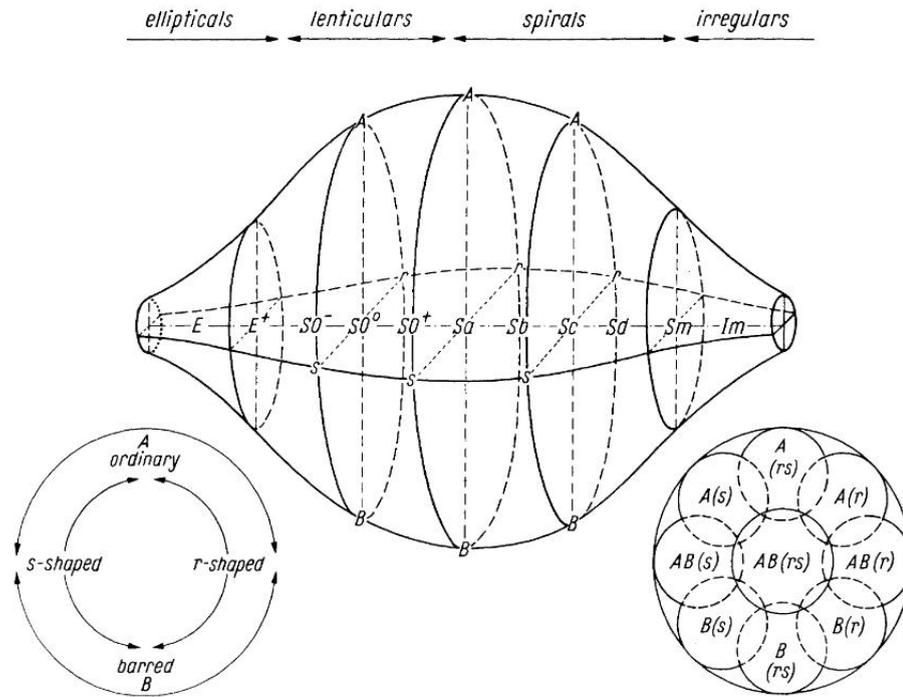


FIGURA 1.3. Representação 3-dimensional da revisão do esquema de classificação e sistema de notação. Da esquerda para direita estão as quatro classes principais: elípticas E, lenticulares SO, espirais S e irregulares I. Acima tem a letra A, indicando as famílias comuns SA. Abaixo tem a letra B, indicando as famílias de barradas SB. Projetado para frente das principais classes, temos a letra “s”, que indica a variedade formato-S (s). Projetado para trás das principais classes, temos a letra “r”, que indica a variedade de aneladas. Abaixo do esquema principal, temos a representação de uma “fatia” do esquema. Imagem retirada de de Vaucouleurs (1959).

chamadas de “normal” pois em trabalhos anteriores (e.g., o próprio trabalho de Hubble 1926) elas eram a maior parte da amostra de espirais. No trabalho de Hubble (1926), a análise foi feita em 400 galáxias brilhantes do hemisfério norte, onde 20% das espirais eram barradas. Esse foi um motivo para Hubble ter chamado na época as espirais que não possuíam barras como “normal spiral”. Com a revisão do tipo morfológico de várias galáxias, e com a melhoria dos equipamentos utilizados para observá-las, foi possível notar que galáxias espirais barradas eram muito mais frequentes do que se sabia antes.

TABELA 1.1. Frequência dos subtipos em 994 galáxias espirais – dados retirados de de Vaucouleurs (1963).

Subtipo	0/a	a	ab	b	bc	c	cd	d	dm	m	?	Total	f(%)
SA	17	25	25	57	57	82	30	9	3	4	2	311	31.3
SAB	13	15	23	45	50	71	35	11	3	7	1	274	27.6
SB	26	43	33	83	27	55	27	28	9	30	10	366	36.8
S	4	1	—	6	1	13	1	10	—	—	7	43	4.3
Total	60	84	81	186	135	221	93	58	15	41	20	994	
f(%)	6.05	8.45	8.15	18.7	13.6	22.2	9.35	5.85	1.5	4.15	2.0		100.0

Com o trabalho de de Vaucouleurs (1963) foi possível verificar que espirais barradas

são na verdade as espirais mais comuns. Um fator que pode ter ajudado a verificar isso foi a classificação mais detalhada dos subtipos. Agora também haviam as barras intermediárias, os tipos SAB. Com isso, galáxias que possuíam um indicativo de uma barra fraca, mas não classificadas como barradas, poderiam ser classificadas como SAB.

Como pode ser visto na Tabela 1.1, 27.6% das espirais possuem uma barra intermediária (SAB) e 36.8% das espirais possui uma barra forte (SB). Com isso, 64.4% das espirais são barradas. Com esse resultado, de Vaucouleurs abandonou o termo “normal” e começou a utilizar o termo “comum” para as espirais tipo SA.

1.2 Barras em galáxias – estruturas estelares frequentes no universo local, importantes para entender a evolução de galáxias

Ao olharmos para as galáxias no universo local frequentemente veremos uma estrutura central alongada composta por estrelas e gás. Barras são estruturas comuns em galáxias espirais (64.4% das espirais possuem barra; e.g., de Vaucouleurs 1963). Estudos mais recentes também comprovam que espirais barradas são de fato representativas no universo local (e.g., Eskridge et al. 2000; Menéndez-Delmestre et al. 2007; Marinova & Jogee 2007).

Em Menéndez-Delmestre et al. (2007), foi medida a fração de barras em galáxias espirais próximas usando imagens nas bandas J($1.235 \mu\text{m}$), H($1.662 \mu\text{m}$) e K_s($2.159 \mu\text{m}$) do infravermelho próximo de 151 galáxias espirais do levantamento 2MASS (Two Micron All Sky Survey). Utilizando uma técnica de ajuste de elipses, foi feita a identificação de barras e a caracterização de seus tamanhos e elipticidade para a distribuição de luz bidimensional das espirais da amostra. Primeiramente, encontraram um limite inferior onde 89 (59%) das galáxias da amostra eram espirais barradas. Nestas galáxias há claramente a assinatura de uma barra. Após isso, foi feita a complementação do método automatizado de detecção de barras com inspeção visual. Com isso, a fração total de barras aumentou para 101 (67%) das galáxias espirais da amostra. Isso sugere que a fração de barras observadas no infravermelho próximo não é significativamente diferente da fração observada no óptico (i.e., 64.4% sendo SB + SAB, de Vaucouleurs 1963). No entanto, em estudos mais recentes como em Guo et al. 2023, mostra que detectar barras

no infravermelho é mais eficiente que no óptico, especialmente quando olhamos para redshifts maiores.

Outro estudo foi feito por Sheth et al. (2008). Neste estudo foi analisada a fração de barras com o redshift cosmológico ($0.2 < z < 0.84$), usando 2157 galáxias espirais luminosas do 2 deg² Cosmic Evolution Survey (COSMOS), com o filtro F814W (“banda I”, 8073Å) do HST (Hubble Space Telescope). Neste estudo, foi encontrado que a fração de barras cai de por volta de 65% no universo local para cerca de 20% no $z=0.84$. Nesse intervalo de redshift, a fração de barras fortes (SBs) cai de 30% para abaixo de 10%. Ou seja, cerca de um quinto das galáxias espirais (num tempo retrospectivo de 7 Gyr) seriam “maduras” o suficiente (dinamicamente frias, massivas e com suporte rotacional) para hospedar estruturas galácticas como vemos hoje. Outro importante resultado deste estudo foi a verificação que em maiores redshift, a fração de barra é maior em sistemas mais massivos, luminosos e vermelhos. Então, haveriam indícios que barras são estruturas que precisam de uma galáxia mais “madura” (mais velha, massiva e luminosa) para poderem existir.

As barras são estruturas estelares importantes em suas galáxias hospedeiras. Sua presença vai muito além de sua notável aparência que lhe rendeu uma classificação que a destaca. As barras causam uma intensa movimentação de gás e estrelas na galáxia, afetando a dinâmica do disco e influenciando a evolução da galáxia hospedeira.

Como discutido em Athanassoula (2013), as barras desempenham um importante papel na condução da evolução de galáxias disco e na formação de suas propriedades atuais. A autora utiliza simulações de N-corpos para recriar eventos que resultaram no que observamos hoje. Neste trabalho específico, ela discute como barras acabam influenciando na evolução de galáxias disco. Segundo a autora, a barra faria com que o momento angular fosse redistribuído dentro da galáxia. Este seria emitido por estrelas (quase) ressonantes da região da barra e absorvido por material (quase) ressonante no esferoide (i.e., o halo, e quando relevante, o bojo) ou no disco externo. E nisso, também redistribuiria o material dentro dela. Os esferoides atrasariam e desacelerariam o crescimento inicial da barra que hospedam, mas em estágios de evolução posteriores, eles fortaleceriam a barra absorvendo o momento angular. Assim que as barras se formam, elas seriam verticalmente finas, mas logo suas partes internas inchariam, formando o

que é comumente conhecido como “boxy/peanut bulge” (protuberância quadrada/amen-doim). A medida que evoluem, as barras ficam mais fortes e giram mais devagar. As barras também redistribuem a matéria dentro da galáxia, criam discos nucleares, aumentam o comprimento e a extensão da escala do disco, conduzem subestruturas como espirais e anéis e afetam o formato da parte interna do bojo. Sendo assim, compreender melhor barras e galáxias barradas é fundamental para entender processos de formação e evolução de galáxias.

1.3 Distribuição de massa estelar em galáxias – estrelas de baixa massa duram mais tempo e são maioria

Quando olhamos para a luz de uma galáxia, observamos a luz combinada de suas populações estelares. A literatura que foca na evolução estelar é bem extensa, mas de forma simplificada podemos dizer que o espectro de radiação de estrelas pode ser calculado a partir da teoria de atmosferas estelares. Entendendo a evolução estelar de forma individual, podemos analisar uma população estelar e verificar características desta (e.g., se é dominada por estrelas de alta ou baixa massa, se as estrelas são novas ou velhas, sua composição química).

Estrelas são formadas em nuvens moleculares densas e massudas. Quando uma nuvem adquire a massa de Jeans (massa típica em torno de $10^5 M_{\odot}$), a nuvem começa a colapsar e formar estrelas. A turbulência dentro da nuvem leva ela a condensar e fragmentar. Pequenas zonas dentro da nuvem chegam na condição necessária para colapsar, e assim formam estrelas menores. Os pedaços menores colapsam mais rápido. Assim uma nuvem acaba formando um número maior de estrelas menores. Após o colapso de uma nuvem molecular e a formação de diversos objetos, o que determina se aquele objeto será uma estrela é a temperatura em seu interior ser alta o suficiente para conseguir fundir hidrogênio em hélio no seu núcleo. Após uma estrela iniciar esse processo de fusão de hidrogênio, ela vai permanecer assim pela maior parte da sua vida. Enquanto a estrela está fazendo esse processo, dizemos que ela está na sequência principal. Estrelas de menor massa possuem uma menor temperatura em seu centro. Quanto menor a temperatura no interior da estrela, mais tempo ela leva para fundir hidrogênio em hélio. Com isso, estrelas muito massudas fazem essa fusão muito mais rapidamente, são muito

mais luminosas na sequência principal e também evoluem mais rapidamente. Estrelas mais massadas duram menos tempo. Na Tabela 1.2 podemos verificar o tempo de vida para estrelas de diferentes massas (Maeder, 2009).

TABELA 1.2. Tempo de vida de estrelas na sequência principal (T_H) em função da massa para $X=0.68$ (abundância de hidrogênio) e $Z=0.02$ (abundância de elementos mais pesados que H e He). Dados retirados de Maeder (2009).

Massa (M_\odot)	T_H (anos)	Massa (M_\odot)	T_H (anos)
0.80	2.503×10^{10}	5.00	9.446×10^7
0.90	1.550×10^{10}	9.00	2.639×10^7
1.00	9.845×10^9	15.00	1.158×10^7
1.50	2.695×10^9	20.00	8.141×10^6
2.00	1.116×10^9	40.00	4.303×10^6
3.00	3.525×10^8	60.00	3.447×10^6
4.00	1.647×10^8	120.00	2.561×10^6

Estudos mostram que estrelas de baixa massa (similar à massa do Sol, $1 M_\odot$) são maioria (e.g., Salpeter 1955). Neste trabalho o autor menciona que o número total e massa de estrelas que saíram da sequência principal é comparável com o número total de anãs brancas e com a massa total de todas as estrelas mais fracas da sequência principal, respectivamente. Outros trabalhos sobre a função inicial de massa também apontam que a maior parte das estrelas geradas por um evento de formação estelar são de baixa massa (Kroupa 2001; Chabrier 2003). Então a maior parte da massa estelar presente em galáxias é devido a estrelas de baixa massa.

Kennicutt (1998) verifica que há uma maior taxa de formação estelar em galáxias de tipo tardio. Além disso, também temos o indicativo de que galáxias de tipo anterior possuem em média uma maior massa total ao serem comparadas com as galáxias de tipo tardio (Mannucci et al., 2005; Nair & Abraham, 2010). Com isso, vemos estrelas mais jovens e azuis em galáxias de tipo tardio e, galáxias de tipo anterior com populações estelares mais antigas (estrelas de menor massa) e uma massa total maior em geral. No entanto, é importante pontuar que isso não é uma regra e pode variar com fatores do ambiente, como interações entre galáxias, que podem apressar o "quenching" ou fazer uma galáxia ganhar gás e formar estrelas. Em Coenda et al. (2018), os autores falam sobre o "Green Valley" (região de transição entre a formação estelar e o "quenching") e como ambientes densos ou de campo podem influenciar nesses eventos e na evolução de galáxias.

Estrelas de baixa massa são mais frias, levam mais tempo nos processos de fusão em seu interior e com isso levam mais tempo para sair da sequência principal. Então estrelas

de menor massa duram mais. Por possuírem menores temperaturas, estrelas de baixa massa possuem seu pico de radiação em comprimentos de ondas maiores. Com isso, estas estrelas são mais brilhantes em bandas como o infravermelho. Usando o infravermelho médio conseguimos evitar a contaminação pela poeira e focar nas estrelas de baixa massa. Vários estudos nas últimas décadas estabeleceram que a maior parte das estrelas geradas num evento de formação estelar são aquelas de baixa massa (similar à massa do Sol, $1 M_{\odot}$; Salpeter 1955; Kroupa 2001; Chabrier 2003). Estrelas de alta massa, além serem minoria, possuem uma evolução estelar mais rápida e dessa forma contribuem pouco para a massa estelar global de galáxias. Desta forma, a contribuição de estrelas de baixa massa é mais relevante para a caracterização da massa estelar de galáxias. Considerando que galáxias podem ser pensadas como um conjunto de populações estelares e a emissão de estrelas de baixa massa domina o fluxo em bandas do infravermelho médio, a utilização destas bandas para a caracterização da massa estelar global da galáxia e sua distribuição em diferentes estruturas estelares se torna uma importante escolha.

1.4 Motivação e Objetivos

As barras causam uma intensa movimentação de gás e estrelas na galáxia, influenciando a evolução da galáxia hospedeira. Sua presença afeta toda a galáxia, sendo assim, compreender melhor sobre esta estrutura estelar é fundamental para entender processos que levam a formação e evolução de galáxias.

Conduzimos uma pesquisa para estudar a massa estelar contida em diferentes estruturas estelares frequentemente identificadas em galáxias próximas, com um foco na componente barra. Usando uma amostra de galáxias barradas, imageadas nas bandas 3.6 e 4.5 μm do infravermelho médio (que como discutido, são ótimas bandas para observar massa estelar), nosso trabalho se divide nos seguintes focos:

1. Análise da frequência de estruturas estelares (e.g., bojo, barra, fonte pontual nuclear) presentes em galáxias, considerando diferentes cortes de massa: galáxias anãs ($M_* < 10^9 M_{\odot}$); galáxias massivas ($M_* \geq 10^9 M_{\odot}$), que dividimos também entre massivas intermediárias ($10^9 M_{\odot} \leq M_* < 10^{10} M_{\odot}$) e muito massivas ($M_* \geq 10^{10} M_{\odot}$).

2. Quantificação da massa estelar contida nas diferentes estruturas estelares, com particular atenção à massa estelar da barra, relativo à massa estelar total da galáxia.
3. Estudo comparativo das massas estelares nas barras nas diferentes populações estudadas, com intuito de identificar tendências associadas a propriedades globais das galáxias hospedeiras em termos de massa, tipo morfológico e riqueza de estruturas (e.g., presença de bojo).

Nos capítulos a seguir apresento a pesquisa que desenvolvi ao longo de minha graduação. No capítulo 2 apresento nossos dados, de onde foram obtidos, como trabalhamos com eles, como definimos nossa amostra e detalhes desta. No capítulo 3, descrevo nossa metodologia. No capítulo 4, apresento os nossos resultados principais, assim como uma breve discussão destes. Dedico o capítulo 5 a um resumo do trabalho feito e nossas conclusões.

Capítulo 2

Levantamento S^4G e Decomposição de Galáxias

Com o intuito de traçar a massa estelar em galáxias próximas, utilizamos os dados do levantamento S^4G . Este representa o levantamento mais completo, profundo e ambicioso para galáxias locais nas bandas do infravermelho – ideal para este trabalho. Neste capítulo apresentamos brevemente as características gerais deste levantamento. Descrevemos com maior detalhamento como foi feita a decomposição pela equipe S^4G . Mostramos também a decomposição multibanda, que é um projeto que ainda está no início e com o qual visamos prover a comunidade com uma decomposição simultânea nas bandas 3.6 e 4.5 μm . Por fim, apresentamos nossa amostra junto com critérios para sua definição.

2.1 O levantamento S^4G

O levantamento “The Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies” (S^4G) é o maior e mais profundo levantamento no infravermelho médio, se tornando então um importante censo de estruturas estelares em galáxias do volume local (Sheth et al., 2010). O S^4G é composto por mais de 2300 galáxias do Universo Local ($d < 40Mpc$), afastadas do plano Galáctico ($|b| > 30^\circ$), imageadas até uma superfície de brilho ($S^* \ll 1M_\odot/pc^2$), grandes ($D_{25} > 1'$) e brilhantes ($m_{Bcorr} < 15.5$ – brilho aparente na banda-B, corrigido para inclinação, extinção galáctica e correção K). Para este levantamento,

as galáxias foram imageadas nas bandas 3.6 e $4.5\mu\text{m}$ pelo instrumento “Infrared Array Camera” (IRAC; Fazio et al., 2004) durante a fase pós-criogênica do telescópio espacial Spitzer (SSC; Werner et al., 2004).

Algumas importantes características deste levantamento são: (1) ser uma amostra completa de galáxias locais onde todos os tipos morfológicos (espirais, lenticulares, elípticas e anãs) estão representados de forma estatisticamente significativa; (2) ser um mapeamento profundo para traçar regiões de baixa massa como as regiões periféricas dos discos galácticos; e (3) ter homogeneidade na profundidade e tratamento de dados para todas as galáxias da amostra.

Além das imagens em si, a equipe do S^4G trabalhou em diferentes “pipelines” onde um dos objetivos foi produzir e distribuir um catálogo de parâmetros úteis que estão publicamente disponíveis via o IPAC Infrared Science Archive (IRSA) da NASA (<http://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/S4G/>). Desse catálogo utilizamos os dados: magnitude nas bandas 3.6 e $4.5\mu\text{m}$; valor de distância média para parte das galáxias; valor da massa total da galáxia para comparações; inclinação da galáxia.

2.2 Bandas 3.6 e $4.5\mu\text{m}$ para rastrear massa estelar

O infravermelho é uma importante escolha para um trabalho que visa estudar distribuição de massa. O infravermelho-médio consegue focar na luz estelar, evitando os efeitos da extinção por poeira. A cores das fotosferas estelares variam muito pouco com a idade da população ou massa estelar, sendo assim a emissão estelar se mostra um traçador direto para massa estelar, sendo as bandas de 3.6 e $4.5\mu\text{m}$ IRAC as mais eficientes (Pahre et al., 2004).

Jun & Im (2008) apresentam uma análise da inclinação do plano fundamental para galáxias elípticas com as bandas IRAC. Chegaram a conclusão que numa relação massa-luminosidade, a dependência com a luminosidade diminui em direção às bandas 3.6-5.8 μm , o que sugere a luz no infravermelho médio é a melhor para representar massa do que comprimentos maiores. O *Spitzer* é sensível nessas bandas, por isso consegue gerar imagens de densidade de superfície de massa estelar extremamente baixa ($\sim 1 M_{\odot}\text{pc}^{-2}$).

A contaminação por poeira nas bandas 3.6 e 4.5 μm é mínima. A banda 3.6 μm é afetada por um traço muito fraco de PAH (3.3 μm), que acaba contribuindo de forma insignificante para a emissão (Tokunaga et al., 1991). Alguma contaminação por poeira quente (em ambas bandas, maior em 4.5 μm) pode acontecer, no entanto, nessas condições ocorre apenas perto de núcleos ativos ou episódios extremos de formação estelar. Olhar para as duas bandas se torna importante para remover os efeitos do PAH ou a possível emissão da poeira quente (Sheth et al., 2010).

2.3 Decomposição na banda 3.6 μm

A equipe do S^4G trabalhou na decomposição bi-dimensional das imagens na banda de 3.6 μm (Salo et al., 2015) utilizando o código GALFIT (Peng et al., 2002, 2010). Este ajusta funções (i.e., modelos) à distribuição de brilho (em 2D) das galáxias em diferentes estruturas (e.g., bojo, disco, barra e fonte nuclear). A equipe adaptou GALFIT utilizando ferramentas baseadas em IDL (“GALFIDL”). Detalhes do “pipeline” são apresentados em Salo et al. (2015).

Decomposições bi-dimensionais são críticas para determinar como cada estrutura contribui à emissão global da galáxia e podem também ser aproveitadas para identificar subestruturas nas imagens residuais, uma vez os modelos simplificados de bojo e disco são subtraídos das imagens reais.

Os parâmetros finais das decomposições na banda de 3.6 μm foram catalogados na Tabela 7 de Salo et al. (2015). Nessa tabela há dados de *output* de cada componente para todas as galáxias que possuem um modelo de decomposição. Alguns dos dados presentes na tabela são: quanto a componente representa em termos de luz para o modelo da galáxia (em porcentagem); magnitude daquela componente e parâmetros específicos de ajuste (i.e., valores de parâmetros das equações apresentadas na Seção 2.3.2, que variam dependendo da componente). Além disso, a Tabela 7 (Salo et al., 2015) também informa o modelo final de cada galáxia, a função utilizada para cada componente, a qualidade de cada galáxia. A Tabela 7 (Salo et al., 2015) está disponível publicamente e pode ser encontrada em: https://www.oulu.fi/astronomy/S4G_PIPELINES4/MAIN/. Esta mesma tabela também possui um formato para ser lido por códigos (Tabela 8; Salo et al. 2015). Dessa tabela, utilizamos colunas como modelo de decomposição final, valor

da qualidade de decomposição, função utilizada, porcentagem da componente para o modelo, magnitude da componente.

2.3.1 GALFIT – Ferramenta para fazer decomposições

GALFIT é uma ferramenta matemática que nos permite gerar uma decomposição bi-dimensional da distribuição de brilho em 2D de uma galáxia, considerando modelos matemáticos que representam os perfis de brilho associados com estruturas estelares (e.g., perfil de Sérsic). Um exemplo direto do resultado dessa decomposição na Figura 2.1.

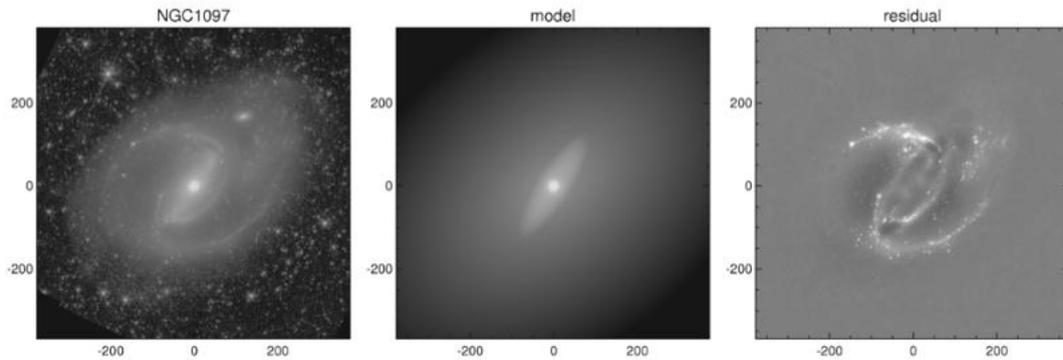


FIGURA 2.1. Galáxia NGC 1097 em $3.6 \mu\text{m}$ (esquerda), a imagem do modelo gerado por GALFIT (centro), e a imagem residual normalizada (i.e., $[\text{observado} - \text{modelo}]/\text{modelo}$; direita). Esse exemplo de decomposição foi feito antes das decomposições em massa de todas as galáxias do S^4G , e foi usado para ilustrar como seria a decomposição de uma galáxia da amostra de forma mais detalhada. Nesse caso, o modelo foram adicionadas cinco componentes (bojo, disco, barra, fonte pontual central e anel nuclear). Imagem retirada de Sheth et al. (2010).

O ajuste mais simples é feito com apenas uma componente bojo (perfil de Sérsic; Sérsic 1963). Dependendo da galáxia, podemos ajustar mais uma componente disco (perfil exponencial). A intenção do ajuste é minimizar os valores na imagem residual. Porém, a quantidade de componentes incluídos no modelo da galáxia pode depender de quantas componentes são identificadas via inspeção visual.

Várias das galáxias possuem modelos de decomposição mais simples. Estas possuem decomposições apenas contendo bojo e\ou disco. Apesar de serem modelos simples, são úteis por oferecer a possibilidade de fazer comparações diretas com o tipo de análise feito em amostras de galáxias distantes. As componentes de bojo e disco são ajustadas baseadas no modelo de perfil de brilho de Sérsic (Sérsic, 1963), onde um bojo clássico é representado por um perfil de brilho com índice de Sérsic $n=4$ (tipo de Vaucouleurs),

um disco por $n=1$ (tipo exponencial) e um pseudo-bojo por um índice entre $n=1$ e $n=4$ (e.g., Kormendy & Kennicutt 2004).

A decomposição da distribuição bidimensional de brilho de cada galáxia foi feita com a versão 3 do código GALFIT (Peng et al., 2002, 2010). Este é um algoritmo de ajuste paramétrico que oferece uma grande flexibilidade nos modelos ajustados. A solução ideal para os parâmetros do modelo é encontrada com o algoritmo de Levenberg-Marquardt, realizando minimização não-linear de chi-quadrado da diferença entre imagens observadas e modelo.

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_x \sum_y \frac{[OBS(x, y) - MODEL(x, y)]^2}{\sigma(x, y)^2} \quad (2.1)$$

Onde a soma é feita com os pixels da imagem observada e $\sigma(x, y)$ representa a incerteza estatística de cada pixel (*sigma image*).

2.3.2 As Equações para os Perfis de Brilho

No caso da decomposição feita em Salo et al. (2015), foram utilizadas cinco equações para descrever cinco possíveis componentes para o modelo de uma galáxia.

1. Componente Bojo (BULGE)– função perfil de Sérsic (“sersic”)

$$\Sigma_e(r) = \Sigma_e \exp\left(-\kappa \left[(r/R_e)^{1/n} - 1\right]\right), \quad (2.2)$$

Onde Σ_e é o perfil de brilho até um raio efetivo R_e (isofota com raio abrangendo metade do fluxo total do componente). O índice Sérsic n descreve o formato do perfil radial, se tornando mais íngreme com o aumento de n ($n=1$ corresponde a um perfil exponencial e $n=4$ a um perfil de Vaucouleurs). O fator κ é uma constante de normalização determinada por n .

2. Componente Disco (DISK)– função disco exponencial (“expdisk”)

$$\Sigma(r) = \Sigma_0 q^{-1} \exp(-r/h_r), \quad (2.3)$$

Em casos de inclinação baixa ou moderada (i.e., $b/a \geq 0.2$, correspondente a inclinação menor que 80 graus), o componente disco é descrito com uma espessura infinitesimal, onde \sum_0 é o brilho superficial central do disco observado na direção perpendicular. O parâmetro h_r denota o comprimento da escala exponencial (*exponential scale length*). Neste caso, $q = \cos(i)$, onde i é a inclinação do disco. Assumindo que não há extinção, $\sum_0 q^{-1}$ seria o brilho superficial central projetado no plano do céu.

Em alguns casos, o modelo recebe uma segunda componente disco. Isso vai depender muito da galáxia e de como as funções se ajustaram ao seu perfil de brilho. Nesse caso, a galáxia recebe uma componente disco interno que pode ser ajustado com uma função *sersic* ou *ferrer2*, permitindo que o perfil de brilho caia mais rapidamente que uma função *expdisk*.

3. Componente Disco *edge-on* (ZDISK) – função disco edge-on (“edgedisk”)

$$\sum(r_x, r_z) = \sum_0 \frac{r_x}{h_r} K_1 \left(\frac{r_x}{h_r} \right) \operatorname{sech}^2(r_z/h_z), \quad (2.4)$$

Onde r_x e r_z são as distâncias (positivas) ao longo e perpendicular ao eixo maior aparente do disco. K_1 representa uma função de Bessel modificada. Essa equação corresponde a linha de visão (ao longo do plano do disco) integrada ao brilho da superfície de uma distribuição de densidade de luminosidade 3D (van der Kruit & Searle, 1981).

4. Componente Barra (BAR) – função perfil Ferrer modificado (“ferrer2”)

$$\sum(r) = \begin{cases} \sum_0 \left[1 - (r/r_{out})^{2-\beta} \right]^\alpha, & r < r_{out} \\ 0 & r \geq r_{out} \end{cases} \quad (2.5)$$

Onde r_{out} define o corte externo do perfil. α define a nitidez desse corte. O parâmetro β define a inclinação central do perfil. Por fim, \sum_0 é o brilho superficial central (no plano do céu).

5. Componente Núcleo (NUCLEUS) – fonte pontual (“psf”)

Ajustada quando a galáxia possui uma componente central não resolvida. O parâmetro livre é a magnitude total m_{psf} . Esta componente pode representar

a presença de um núcleo ativo ou um *starburst* que não pode ser resolvido nas imagens do S^4G .

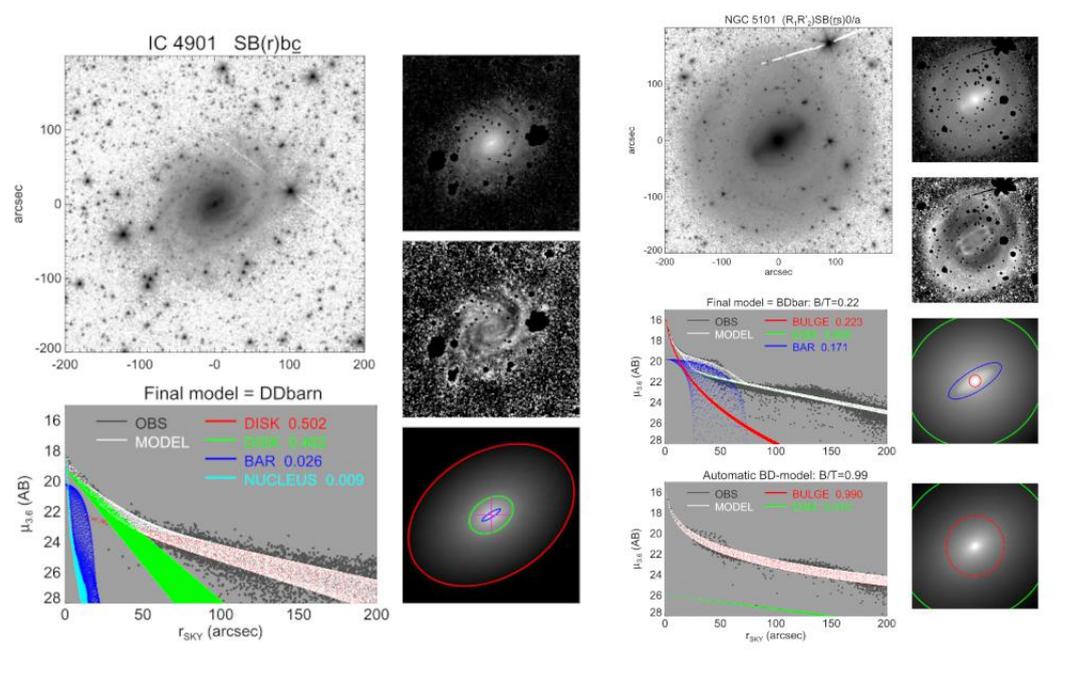


FIGURA 2.2. No conjunto de imagens na esquerda, temos: a galáxia IC 4901 (em escala logarítmica invertida), abaixo seu ajuste com quatro componentes (disco, disco secundário, barra e núcleo), no canto direito superior a imagem original da galáxia com a máscara, no meio à direita temos o residual (Observado - Modelo), embaixo à direita temos o modelo final. No conjunto de imagens na direita, temos: a galáxia NGC 936 em escala logarítmica invertida (esquerda superior), o modelo final com três componentes, bojo, disco e barra (esquerda meio), o modelo automático gerado com duas componentes bojo e disco (esquerda embaixo), a imagem original da galáxia com a máscara (direita superior), o residual Observado - Modelo (direita meio superior), o modelo final com três componentes (direita meio inferior), modelo automático com duas componentes (direita inferior). Imagens retiradas de Salo et al. (2015).

Na Figura 2.2 temos dois exemplos de ajustes de funções que foram feitos em duas galáxias. As funções são adicionadas uma a uma até chegar no modelo final. A primeira função a ser ajustada é a “Sersic”. Após ajustar a primeira componente, é gerado um output com vários dados do ajuste e junto com ele um valor para o índice de Sérsic. Com o valor desse índice, junto com o tipo morfológico da galáxia, é escolhida a próxima componente a ser ajustada. O número total de componentes vai depender da galáxia e do quanto se pretende reduzir o resíduo.

2.3.3 Preparações importantes antes da decomposição

Antes de gerar o modelo de decomposição para uma galáxia, é necessário ter todas as imagens prontas para usar no GALFIT. Um primeiro passo foi a determinação do

centro da galáxia, que pode ser estimado considerando os valores dos pixels. Salo et al. (2015) estimou o limite da galáxia (a partir de elipses concêntricas). A partir de uma análise nos valores dessas elipses, é possível aproximar onde seria o limite da galáxia.

Outro importante preparativo é medir o valor do fundo do céu e sua incerteza para que ele seja considerado e subtraído da imagem da galáxia. Dessa forma é desconsiderado um valor extra do pixel (uma contribuição extra de luz devido a diversos fatores, como ruído instrumental) e conseguimos olhar apenas para o fluxo da galáxia. Salo et al. (2015) obteve valores de áreas diferentes do céu, longe da galáxia, para estimar esse valor.

Além disso, outros requisitos importantes para gerar a decomposição são mais três imagens, além da imagem da galáxia: máscara para a imagem da galáxia (que remove os objetos que estão na imagem da galáxia, mas não pertencem a ela), *sigma image* (imagem que indica a incerteza estatística do pixel) e a PSF (uma mesma imagem PSF é usada para todas as galáxias observadas naquela banda, ajuda na calibração).

2.3.4 Qualidade da decomposição

Nosso foco é olhar para as componentes mais frequentemente presentes em galáxias locais. Por mais que o levantamento S^4G possua 2352 galáxias, nem todas foram de fato aproveitadas com a decomposição. A decomposição feita em Salo et al. (2015) utiliza um critério de qualidade de decomposição onde cada galáxia recebe um número de 1 a 5. As imagens das galáxias que receberam qualidade 1 (31 casos) e 2 (44 casos) não receberam modelo – devido a qualidade da imagem original ser ruim, o que impossibilita o ajuste de um modelo que de fato faça sentido para aquela galáxia.

Algumas características que geraram essa classificação de qualidade:

- Qualidade = 1 (31 casos) – estrelas muito brilhantes na frente, fundo de céu variando muito, defeitos na imagem
- Qualidade = 2 (44 casos) – imagem um pouco melhor, mas não é possível estimar o céu de forma confiável. Galáxias com sua forma distorcida, o que faz com que o ajuste da primeira componente não seja confiável.

- Qualidade = 3 (61 casos) – os dados originais estão bons, mas as galáxias possuem estruturas muito complexas que precisariam de multicomponentes detalhados, e isto foge da proposta do trabalho feito, que era ter no máximo quatro componentes.
- Qualidade = 4 (406 casos) – dados de boa qualidade, mas algumas galáxias são muito inclinadas (333 casos, e estes receberam componente “edge-disk”). As outras possuem estruturas complicadas que geram uma degeneração entre as componentes do modelo.
- Qualidade = 5 (1810 casos) – os dados originais e a decomposição são de boa qualidade.

Após a retirada dessas galáxias sem modelo da amostra total, foram de 2352 para 2277 galáxias que realmente puderam ter um modelo de decomposição que faça sentido.

2.3.5 Decomposição final e suas possíveis componentes

A decomposição feita pelo Salo et al. (2015) gerou um modelo para cada galáxia da amostra S^4G (as que puderam ter um modelo, 2277 galáxias), onde este pode ter de 1-4 componentes (i.e., bojo, disco, barra, fonte pontual nuclear, disco secundário, edge-disk). Os produtos da decomposição, incluindo as imagens, arquivos e tabelas geradas estão disponíveis publicamente em https://www.oulu.fi/astronomy/S4G_PIPELINE4/MAIN/. Além de acesso às imagens usadas na decomposição e o resultado dela, também temos disponíveis a Tabela 7 de Salo et al. (2015) onde estão explícitos os valores de *output* dos modelos finais das decomposições das galáxias do S^4G .

Na Figura 2.3 temos do modelo de decomposição final para algumas galáxias. Para as funções *sersic*, *expdisk*, *edgedisk*, *ferrers2* e *psf* temos as letras que as indicam no modelo final, *b*, *d*, *z*, *bar* e *n*, respectivamente. Sendo assim, se a galáxia possui em seu modelo final bojo e disco, seu modelo será indicado por “bd”. Se a galáxia possui em seu modelo final bojo, disco e barra, seu modelo será indicado por “bdbar”.

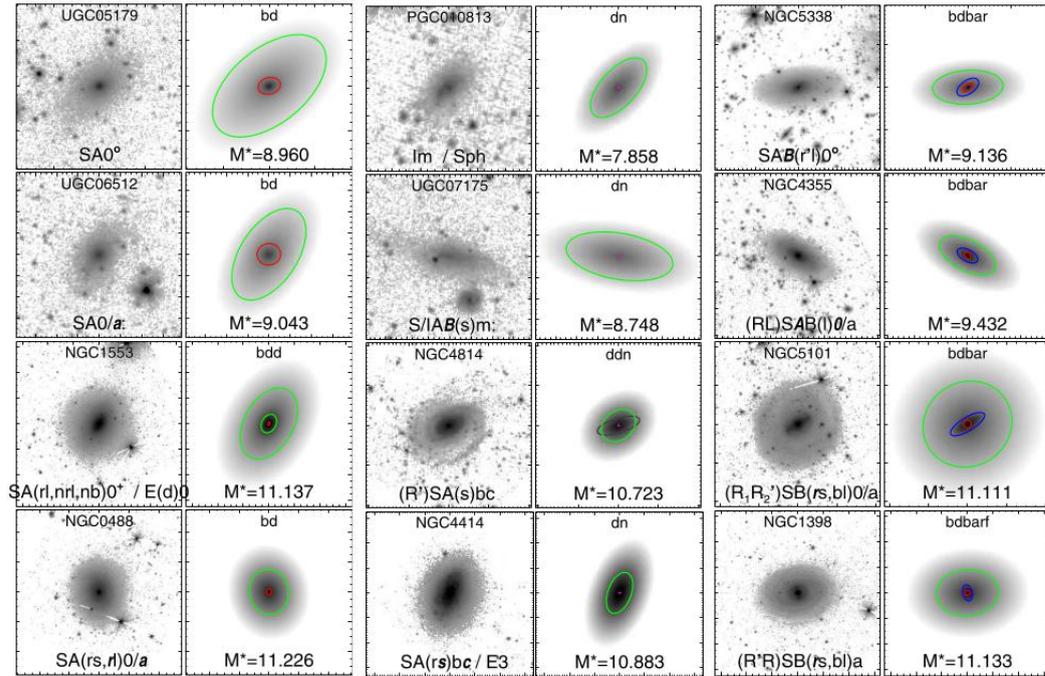


FIGURA 2.3. Exemplos de modelos finais de decomposição. Para cada galáxia, duas imagens: a imagem da galáxia com seu nome (acima da galáxia) e sua classificação morfológica no infravermelho médio retirada de Buta 2014 (embaixo da galáxia); a imagem de seu modelo de decomposição final, com seu modelo (acima da imagem) e sua massa estelar em $\log_{10} (M_{\odot})$ retirada de Muñoz-Mateos et al. 2015 (embaixo da imagem). As elipses coloridas indicam diferentes funções: *expdisk* (verde), *sersic* (vermelho), *ferrer2* (azul). Imagem retirada de Salo et al. (2015).

2.3.6 Galáxia com barra em seu tipo morfológico, sem barra na decomposição

Em alguns casos, galáxias com tipo morfológico que indica barra (classificadas como SAB ou SB pelo Buta et al. 2015) não tiveram uma componente barra adicionada pelo Salo et al. (2015) em seu modelo de decomposição final. Também há casos em que galáxias sem barra em tipo morfológico, receberam uma componente barra em seu modelo de decomposição final. Foi feita uma análise nesses casos e voltaremos a comentar sobre eles no capítulo de análise (Seção 4.3.1.4).

2.4 Decomposição Multibanda – Um primeiro passo de um projeto futuro

Com o objetivo de refinar nossa análise de distribuição de massa, começamos a trabalhar num projeto de decomposição multibanda.

Como resultado do pipeline de decomposição na banda $3.6 \mu\text{m}$, a colaboração S^4G disponibiliza publicamente os arquivos de *input* para a decomposição, baseado no modelo mais adequado para a galáxia em questão (número de componentes — dependendo do tipo morfológico, parâmetros de entrada para cada componente, etc.). Desta forma, se torna possível rodar do zero a decomposição, caso seja necessário. A colaboração S^4G também disponibiliza os arquivos necessários para rodar o GALFIT (veja Seção 2.3), incluindo as imagens e a máscara da banda $4.5 \mu\text{m}$. Notamos que Salo et al. (2015) não estendeu a decomposição para a banda $4.5 \mu\text{m}$. Para fazer a decomposição multibanda, utilizamos a ferramenta GALFITM (i.e., ferramenta baseada GALFIT, com o diferencial de poder considerar várias bandas ao mesmo tempo). Está ferramenta, assim como seu manual e exemplos estão disponíveis publicamente em <https://www.nottingham.ac.uk/astronomy/megamorph/>.

2.4.1 NGC 3380 – galáxia exemplo

Visando começar a decomposição multibanda e aprender a utilizar a ferramenta GALFITM, foi escolhida uma galáxia exemplo com quatro componentes em seu modelo final de decomposição na banda de $3.6 \mu\text{m}$. A galáxia foi NGC 3380 e suas componentes finais são disco, bojo, barra e núcleo. A imagem da galáxia e sua decomposição final na banda de $3.6 \mu\text{m}$ pode ser vista na Figura 2.4.

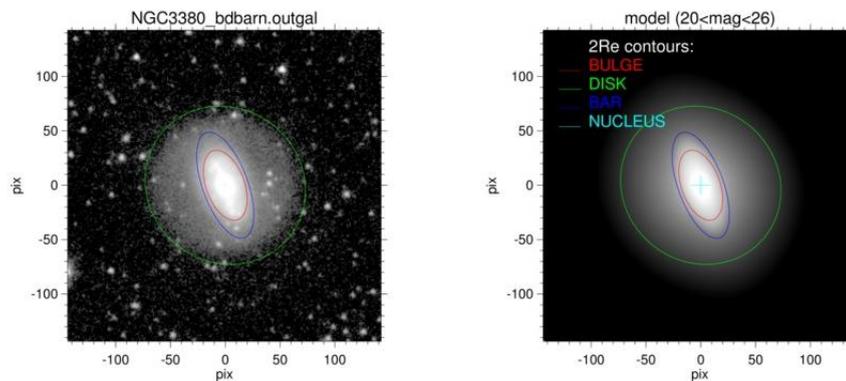


FIGURA 2.4. Galáxia NGC 3380 na banda $3.6 \mu\text{m}$ (esquerda), e o modelo final para esta (direita) sendo o resultado da soma de 4 componentes: bojo, disco, barra e núcleo (fonte pontual central). A imagem apresentada pode ser obtida diretamente a partir de https://www oulu.fi/astronomy/S4G_PIPELINE4/P4STORE/NGC3380/FINAL_NS/NGC3380_bdbarn.outgal_components.jpg; (Salo et al., 2015).

Assim como foi feito na decomposição da banda $3.6 \mu\text{m}$ (Salo et al., 2015), são necessários alguns preparativos. Para a decomposição em uma banda são necessárias quatro imagens: a imagem da galáxia, sua máscara, sua *sigma image* e a psf para aquela

banda. Destas, tínhamos todas prontas para a banda de $3.6 \mu\text{m}$, porém para a banda de $4.5 \mu\text{m}$ só tínhamos a imagem original da galáxia e sua máscara.

Desta forma, começamos a trabalhar em tratar as imagens; e.g., subtrair o céu da imagem original, gerar uma *sigma image* conforme a metodologia utilizada na *sigma image* da banda $3.6 \mu\text{m}$. A decomposição multibanda que resultou a partir da nossa abordagem pode ser vista na Figura 2.5. Ainda estamos num momento de refinar a nossa metodologia para essa decomposição. Estamos trabalhando para que a decomposição multibanda da galáxia exemplo NGC 3380 fique a melhor possível para que futuramente possamos reproduzir essa metodologia para o restante da galáxias da amostra S^4G .

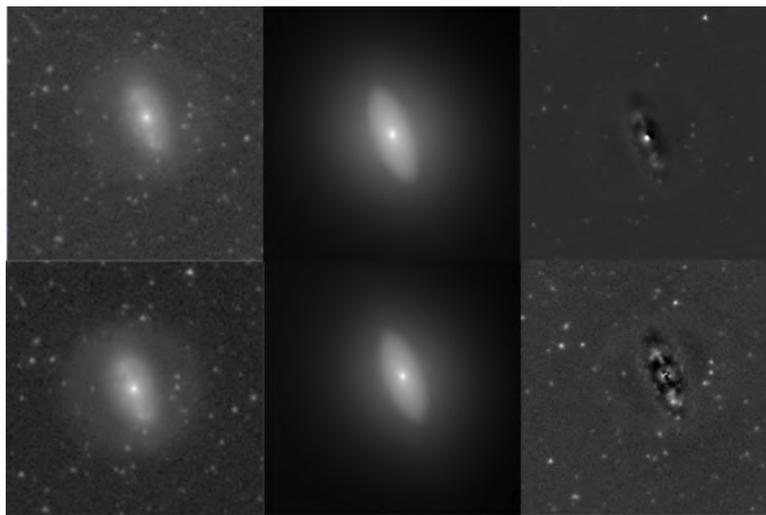


FIGURA 2.5. Decomposição multibanda (3.6 e $4.5 \mu\text{m}$) preliminar feita para a galáxia NGC 3380. A decomposição foi feita utilizando GAFITM e foram adicionadas quatro componentes ao modelo: bojo, disco, barra e núcleo. Nas três imagens de cima temos a imagem observada da galáxia na banda $3.6 \mu\text{m}$ (esquerda), seu modelo de decomposição (meio) e seu residual observado - modelo (direita). Nas três imagens de baixo temos a imagem observada da galáxia na banda de $4.5 \mu\text{m}$ (esquerda), seu modelo de decomposição (meio) e seu residual observado - modelo (direita).

Nosso objetivo é seguir os passos da metodologia utilizada para a decomposição na banda de $3.6 \mu\text{m}$ e assim reproduzir a decomposição em ambas as bandas (3.6 e $4.5 \mu\text{m}$) de forma simultânea. Estas ambas bandas se tornam uma importante escolha para o estudo de massa estelar (veja Seção 3.2). Com a decomposição na banda de $3.6 \mu\text{m}$ conseguimos fazer análises de distribuição de massa, porém de forma mais preliminar. Com a decomposição multibanda poderemos seguir com a análise de forma meticulosa, visando um estudo ainda mais robusto da distribuição de massa em galáxias

2.5 Nossa amostra

Os dados que utilizamos em nossa análise foram retirados de catálogos de diferentes trabalhos. Visando um estudo com parâmetros atualizados, optamos por pegar diferentes parâmetros em diferentes catálogos para as mesmas galáxias do S^4G . Os catálogos fundamentais da nossa análise foram o do levantamento S^4G (Seção 2.1) e os produtos da decomposição do Salo et al. (2015) para a banda $3.6 \mu\text{m}$ (Seção 2.3).

Utilizamos também um catálogo com valores atualizados de distância para diversas galáxias do S^4G (Bouquin et al., 2018). Este possui valores atualizados de distância para cerca de 1900 galáxias da amostra S^4G . Os valores são de distância média independente do redshift com incerteza de 1σ , obtidos pelo NED quando disponíveis. A tabela também está disponível publicamente em: <https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/ApJS/234/18>.

Por último, utilizamos o catálogo com o tipo morfológico no infravermelho médio (Buta et al., 2015) que provê a classificação morfológica de todas as galáxias da amostra S^4G . O diferencial do trabalho é que essa classificação foi feita com base nas imagens no infravermelho (diferente da classificação morfológica tabelada no catálogo principal do S^4G , onde a classificação é baseada no óptico – HyperLeda). Os dados que utilizamos deste catálogo na nossa análise foram: tipo morfológico T, que indica a classificação do estágio em que a galáxia se encontra, variando de -4 (elíptica) à 11 (irregular); pertença às ditas “famílias F” (com valores $F= 0-1$), que indicam a presença da barra quando $F \leq 0.5$. O catálogo encontra-se disponível publicamente em: <https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/ApJS/217/32>.

2.5.1 Critérios para a seleção

Visamos estudar a distribuição de massa em galáxias barradas. Por isso, estabelecemos alguns critérios para a determinação da nossa amostra.

- Critério 1: possuir decomposição na banda de $3.6 \mu\text{m}$, seguindo a análise de Salo et al. (2015)

Para estudar a distribuição de massa em galáxias barradas, utilizamos a decomposição das galáxias na banda de $3.6 \mu\text{m}$. Desta forma, conseguimos isolar a luz

contida apenas em determinada componente (uma estrutura estelar da galáxia) da galáxia como um todo. Sendo assim, o primeiro critério para determinar a nossa amostra de estudo é que a galáxia possua um modelo de decomposição.

Com esse critério, a amostra mãe S^4G , com **2352** galáxias, é reduzida para **2277** galáxias que possuem um modelo de decomposição.

- Critério 2: possuir barra em sua decomposição

Como nosso foco são galáxias barradas, o segundo critério para a determinação da nossa amostra é que haja a presença da componente barra no modelo de decomposição da galáxia. Desta forma, podemos olhar para a luz contida em barras (ajustadas pela função *ferrer2*) de forma direta.

Com esse critério, a amostra foi de **2277** galáxias com modelo de decomposição para **872** galáxias com barra em seu modelo de decomposição.

- Critério 3: inclinação da galáxia menor que 65 graus

Este é um critério importante e muito utilizado quando o foco do trabalho são barras. A motivação desse critério é escolher galáxias que possuam uma barra melhor definida. Galáxias com inclinação muito grande impossibilitam uma determinação confiável de uma barra.

Com esse critério, a amostra foi de **872** galáxias com componente barra em sua decomposição para **479** galáxias com componente barra em sua decomposição e inclinação menor que 65 graus.

- Critério 4: melhor qualidade de decomposição possível

Como foi discutido na seção 2.3.4, apenas galáxias com qualidade superior a 2 receberam um modelo de decomposição. Nosso objetivo é olhar para galáxias com componentes barra de melhor qualidade possível, por isso utilizamos o critério de qualidade de decomposição igual a 5.

Com esse critério, a amostra foi de **479** galáxias com barra em sua decomposição e inclinação menor que 65 graus para **463** galáxias com barra em sua decomposição, inclinação menor que 65 graus e qualidade de decomposição igual a 5.

- Critério 5: possui valor de distância no catálogo S^4G

O motivo desse critério ser importante ficará mais claro quando for apresentada a metodologia para quantificar massa estelar nas componentes de decomposição

(Seção 3.2.3). Para utilizar a função para a conversão, é necessário conhecer o valor de distância da galáxia. Com isso, consideramos as galáxias que possuem valor de distância no catálogo de Bouquin et al. (2018), caso a galáxia não possua distância neste, verificamos se ela possui este valor no Catálogo IRSA (Sheth et al., 2010). Retiramos as galáxias que não possuem valor de distância em nenhum dos dois.

Com esse critério, a amostra foi de **463** galáxias com barra em sua decomposição, inclinação menor que 65 graus, qualidade de decomposição igual a 5 para **444** galáxias com barra em sua decomposição, inclinação menor que 65 graus, qualidade de decomposição igual a 5 e com valor de distância em um dos catálogos utilizados.

- Amostra final para a análise – 430 galáxias

Um critério adicional que adotamos, foi excluir modelos que possuísem um disco secundário. Estes representam apenas 14 galáxias, fazendo com que nossa amostra final para análise de massa contida nas componentes barra seja em **430** galáxias. Escolhemos fazer isso porque as componentes dos modelos variavam muito entre as galáxias com disco secundário, então optamos por não trabalhar com estas galáxias.

Um resumo geral de como os critérios afetaram a nossa amostra final pode ser visto na Tabela 2.1.

TABELA 2.1. Amostra final para a análise de distribuição de massa em galáxias barradas.

Critério	Número de galáxias
Amostra completa	2352
Critério 1	2277
Critério 2	872
Critério 3	479
Critério 4	463
Critério 5	444
Critério adicional	430

2.5.2 Comparação entre subamostras – diferentes cortes de massa

Pensando em verificar a frequência da barra e a complexidade dos modelos (i.e., quantidade de componentes e quais componentes foram associadas àquele modelo), escolhemos olhar para diferentes cortes de massa.

Nessa análise, olhamos para cortes de massa considerando a amostra completa (i.e., 2277 galáxias da amostra S^4G que possuem modelo de decomposição) e também comparamos com a nossa amostra de 430 galáxias (que foi pensada para estudar distribuição de massa em galáxias barradas). Destas amostras, olhamos para os seguintes cortes de massa:

- Subamostra de galáxias anãs ($M_* < 10^9 M_\odot$)

As galáxias anãs são menores, menos luminosas e de menor massa. Nesse trabalho, definimos como galáxia anã aquela que possui $M_* < 10^9 M_\odot$. Trabalhos apontam que estas galáxias são numerosas no universo local (Ferguson & Sandage, 1991; Phillipps et al., 1998; Mateo, 1998). Devido ao fato de serem menos luminosas, acabamos tendo um viés observacional que faz com que elas sejam menos detectadas (por isso, sua quantidade é pequena em nossa análise).

Ao separar uma subamostra de galáxias de baixa massa, temos como objetivo analisar como os parâmetros que estamos estudando nesse trabalho variam olhando para galáxias de baixa massa.

- Subamostra de galáxias massivas ($M_* \geq 10^9 M_\odot$)

Definimos como massivas as galáxias que não consideramos anãs. Elas são maioria na amostra S^4G , e muito disso se dá por um dos critérios de seleção de galáxias para este levantamento, que era $m_{Bcorr} < 15.5$ (o levantamento focou em galáxias brilhantes para observar).

- Subamostra de galáxias massivas intermediárias ($10^9 M_\odot \leq M_* < 10^{10} M_\odot$)

Esse corte de massa apenas foi criado para haver uma comparação entre subamostras de massas diferentes com tamanhos mais significativos e parecidos.

Fizemos comparações entre anãs e massivas, mas devido a diferença de tamanho discrepante entre as duas amostras (i.e., 13 galáxias vs 417 galáxias), optamos em dividir a amostra de galáxias massivas em dois cortes de massa. Com isso, alguns resultados ficaram mais confiáveis, sem a tendência que uma amostra pequena pode mostrar sem necessariamente indicar uma realidade.

- Subamostra de galáxias muito massivas ($M \geq 10^{10} M_\odot$)

Esse corte é complementar as galáxias massivas intermediárias, olhando para as galáxias com maior massa na amostra.

O resumo dos cortes de massa que assumimos nesse trabalho, assim como a quantidade de galáxias em cada subamostra pode ser visto na Tabela 2.2.

TABELA 2.2. Tamanhos das subamostras com diferentes cortes de massa.

Cortes de Massa	Amostra Completa (S^4G)	Nossa amostra ideal
Sem Corte	2277	430
$M_* < 10^9 M_\odot$	435	13
$M_* \geq 10^9 M_\odot$	1834	417
$10^9 M_\odot \leq M_* < 10^{10} M_\odot$	965	208
$M \geq 10^{10} M_\odot$	869	209

2.5.3 Diferentes tipos morfológicos em nossa amostra

A partir da classificação morfológica presente no catálogo gerado em Buta et al. (2015) (Seção 2.5), verificamos os diferentes tipos morfológicos presentes na amostra S^4G , assim como na nossa amostra. Podemos ver na Tabela 2.3 relação Tipo T com os tipos morfológicos. Estes foram os símbolos e índice numérico utilizados na classificação morfológica no catálogo que utilizamos nesse trabalho.

TABELA 2.3. Estágio em que se encontra a galáxia, considerando seu tipo morfológico e o índice numérico (T) atribuído a esse estágio. Códigos numéricos retirados de Buta et al. (2015).

Morfologia	T	Morfologia	T
cE	-6	Sb	3
E	-5	Sbc	4
E ⁺	-4	Sc	5
S0 ⁻	-3	Scd	6
S0 ^o	-2	Sd	7
S0 ⁺	-1	Sdm	8
S0/a	0	Sm	9
Sa	1	Im	10
Sab	2	dE,dS0,Sph	11

Considerando todas as galáxias do levantamento, fizemos um cross-match das galáxias de nossa amostra (usando as coordenadas em Sheth et al. 2010) com o catálogo de classificação morfológica de Buta et al. (2015); para isso usamos um raio de $10''$. Com isso, o panorama geral dos tipos morfológicos das galáxias do S^4G foi feito em 2206 galáxias (de 2277). Após o mesmo *match*, nossa amostra (selecionada para estudar a distribuição de massa nas componentes) ficou com 426 galáxias (de 430).

Na Figura 2.6 podemos ver um panorama geral dos tipos morfológicos das galáxias do S^4G (em 2206 galáxias), assim como todos os tipos morfológicos presentes da nossa amostra (em 426 galáxias). Vemos que apesar dos critérios de corte terem diminuído o tamanho da amostra, de forma geral a nossa amostra (426 galáxias) é abrangente em

tipos morfológicos. No entanto, devido ao critério de possuir uma componente barra, podemos ver que isso influenciou em não ter galáxias elípticas (pela classificação de Buta et al. 2015, seriam -4 ou menor) e poucas galáxias muito irregulares dentro da nossa amostra.

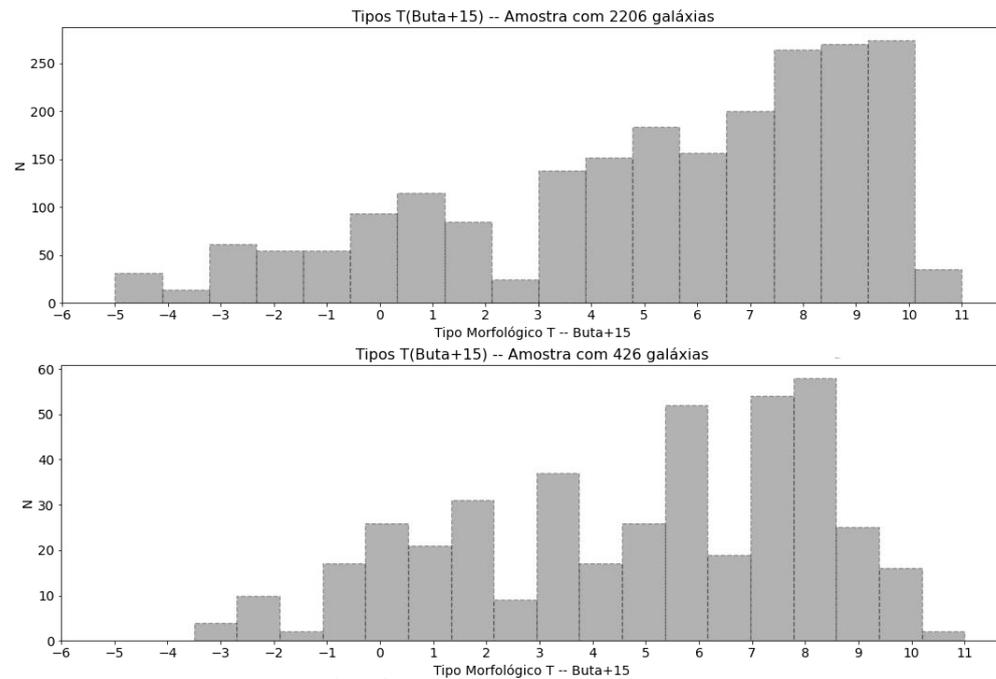


FIGURA 2.6. Histogramas da classificação morfológica presente na amostra do S^4G (2206 galáxias, em cima) e na nossa amostra (426 galáxias, embaixo).

Capítulo 3

Metodologia

Com o objetivo de estudar a distribuição de massa em galáxias barradas no universo local, utilizamos a decomposição na banda $3.6 \mu\text{m}$. A partir desta, sabemos o fluxo de cada componente (que somados são o fluxo do modelo daquela galáxia). Neste capítulo, discutiremos qual foi a metodologia utilizada para quantificar a massa estelar presente nas diferentes componentes das galáxias da nossa amostra.

3.1 Componentes presentes na decomposição $3.6 \mu\text{m}$ – como as decomposições variam olhando para diferentes cortes de massa

Visando uma análise geral sobre a presença de estruturas estelares em uma grande amostra de galáxias próximas, consideramos a subamostra de todas as galáxias do levantamento S^4G que foram efetivamente decompostas via GALFIT pelo trabalho de Salo et al. (2015). Também olhamos para a nossa amostra de 430 galáxias de forma específica. Fizemos isso considerando também diferentes cortes de massa. Verificamos em quais cortes de massa as componentes mais aparecem, e se galáxias mais massivas de fato possuem modelos de decomposição mais complexos.

Para isso desenvolvemos uma função em Python que faz uma análise nas tabelas que identificam os produtos resultantes das decomposições, disponibilizadas no IRSA. Esta função analisa a presença das componentes barra, bojo, disco e núcleo. Esta verifica:

quantas vezes aparece cada componente; quantas vezes aparece cada modelo; e devolve um histograma com a contribuição de cada componente para o modelo.

3.2 Distribuição de massa em galáxias com componentes barra

As linhas gerais da nossa metodologia são as seguintes: calculamos o fluxo das componentes em $3.6 \mu\text{m}$ convertendo a magnitude tabelada; estimamos o fluxo das componentes na banda $4.5 \mu\text{m}$; convertemos os fluxos das componentes em massa estelar; e calculamos a massa relativa de cada componente. A seguir apresentamos detalhes sobre essa nossa metodologia.

3.2.1 Fluxo presente nas componentes da decomposição em $3.6 \mu\text{m}$

A decomposição na banda de $3.6 \mu\text{m}$ apresentada pelo Salo et al. (2015) nos provê uma combinação de modelos matemáticos que nos permitem estimar a luz contida em diferentes estrutura estelares da galáxia (i.e., bojo, disco, barra, fonte pontual nuclear).

A tabela com os dados das decomposições (i.e., Tabela 7; Salo et al. 2015) nos informam os valores das magnitudes das componentes (magnitude AB). Junto a esse valor de magnitude, também temos o valor de contribuição relativa da componente para o fluxo total do modelo. Precisamos trabalhar com os fluxos (em Jansky; Jy) das componentes. Para isto, utilizamos a seguinte equação:

$$F = 10^{(mag[-0.4])} * 3630.78 \quad (3.1)$$

Onde *mag* está em magnitude AB. O fluxo resultante está em Jansky (Jy). Esta equação veio da adaptação da equação utilizada em Sheth et al. (2010) (equação 1), que converte fluxo para magnitude e serve para ambas as bandas (Oke, 1974).

Para que as explicações seguintes fiquem mais claras, vamos utilizar um exemplo, uma galáxia com modelo de decomposição de três componentes: NGC 2750; modelo composto por bojo, disco e barra.

Segundo os produtos da decomposição (Salo et al., 2015), na galáxia NGC 2750, as componentes barra, bojo e disco representam 5.5%, 14.8% e 79.7% do fluxo total do modelo de decomposição, respectivamente. Dessa forma, o modelo de decomposição como um todo representa 100% do fluxo. O fluxo do modelo não está tabelado de forma explícita. Devido a isso, calculamos o fluxo do modelo como:

$$FMod_{3.6} = FDisco_{3.6} / \% (FDisco/FMod) \quad (3.2)$$

Onde $FMod_{3.6}$ é o fluxo calculado para o modelo, $FDisco_{3.6}$ é o fluxo presente na componente disco e $\% (FDisco/FMod)$ é o valor de contribuição relativa da componente disco para o fluxo total do modelo. Optamos por fazer essa conta com a componente disco pois esta está presente em todos os modelos de decomposição das galáxias da nossa amostra.

Das componentes que trabalhamos nessa análise (i.e., disco, bojo, barra e fonte pontual) todas possuem os valores da magnitude (magAB) na banda de 3.6 μm , menos a componente barra, cuja contribuição é apresentada em termos de brilho superficial (magAB/arcsec²) nesta tabela. Devido a isso, optamos por considerar o fluxo da componente barra como:

$$FBar_{3.6} = FMod_{3.6} - \sum FComps_{3.6} \quad (3.3)$$

Onde $FBar_{3.6}$ é o fluxo da barra, $FMod_{3.6}$ é o fluxo total do modelo e $FComps_{3.6}$ são os fluxos das componentes para uma determinada galáxia (podendo ser: apenas disco; disco e bojo; disco e núcleo; e disco, bojo e núcleo). Ou seja, no caso exemplo o fluxo da barra seria igual ao fluxo total do modelo menos o fluxo do disco somado ao fluxo do bojo.

3.2.2 Estimando o fluxo relativo das componentes em 4.5 μm

Temos apenas a decomposição da banda de 3.6 μm pronta e disponível publicamente, mas para fazer a conversão de fluxo para massa, precisamos saber o valor do fluxo das componentes tanto na banda 3.6 μm como na banda 4.5 μm (veja Equação 3.6, na próxima subseção).

A partir do trabalho de Salo et al. (2015) conhecemos o valor da contribuição relativa para o fluxo total do modelo na banda de $3.6 \mu\text{m}$ para todas as componentes, e conseguimos calcular o fluxo total do modelo nesta banda. Além disso, temos os dados de fluxo observado para todas as galáxias do S^4G para ambas as bandas (Sheth et al., 2010). Dessa forma, conseguimos estimar em uma primeira aproximação o fluxo total para um modelo na banda de $4.5 \mu\text{m}$ considerando,

$$FMod_{4.5} = (FObs_{4.5} * FMod_{3.6}) / FObs_{3.6} \quad (3.4)$$

Onde $FObs_{4.5}$ é o fluxo observado para a galáxia na banda de $4.5 \mu\text{m}$, $FMod_{3.6}$ é o fluxo total do modelo na banda de $3.6 \mu\text{m}$ e $FObs_{3.6}$ é o fluxo observado para a galáxia na banda de $3.6 \mu\text{m}$. Todos os fluxos estão em Jansky.

Com esse fluxo estimado para o modelo na banda de $4.5 \mu\text{m}$, consideramos que as decomposições em ambas as bandas seriam equivalentes para uma primeira aproximação (i.e., a contribuição relativa de uma componente na banda de $4.5 \mu\text{m}$ seria equivalente a contribuição relativa desta componente na banda $3.6 \mu\text{m}$). Ou seja,

$$FComp_{4.5} = \%(FComp/FMod) * FMod_{4.5} \quad (3.5)$$

Onde $\%(FComp/FMod)$ é a contribuição relativa de uma componente na banda de $3.6 \mu\text{m}$ (que consideramos equivalente em $4.5 \mu\text{m}$) e $FMod_{4.5}$ é o fluxo total estimado para o modelo na banda de $4.5 \mu\text{m}$.

Pensando na galáxia exemplo NGC 2750, a componente disco representa 79.7% do fluxo total do modelo na banda de $3.6 \mu\text{m}$. Com essa metodologia, consideramos que em uma primeira aproximação a componente disco representa também 79.7% do fluxo total do modelo na banda de $4.5 \mu\text{m}$. Desta forma, conseguimos ter uma aproximação para o fluxo total do modelo e de suas componentes para toda a nossa amostra de 430 galáxias.

3.2.3 Convertendo o fluxo para massa

A medição da massa presente em populações estelares é indireta. Uma técnica utilizada para quantificar a massa presente em populações estelares é a partir da luz emitida pelas estrelas da região, ou seja o fluxo de radiação. Considerando o fluxo e a distância estimada daquela população estelar, é possível medir sua massa.

Em Eskew et al. (2012) foi feita a conversão dos fluxos nas bandas de 3.6 e 4.5 μm para massa estelar. Neste trabalho, os autores utilizaram mapas de massa de alta resolução espacial e fluxos no infravermelho médio da Grande Nuvem de Magalhães para calibrar uma conversão entre fluxos de 3.6 e 4.5 μm em massa estelar. Com isso, chegaram a uma equação que possibilita uma simples conversão de fluxos para massa estelar, conhecendo também o valor de distância da galáxia que se deseja converter. Eles verificaram regiões de contaminação por estrelas jovens e poeira quente nas medições. Utilizaram dados que qualidade superior, com o objetivo de diminuir *outliers* e visando conseguir o melhor ajuste possível. Concluíram por fim que conseguiram chegar em uma conversão simples e muito precisa com a equação,

$$M_* = 10^{5.65} F_{3.6}^{2.85} F_{4.5}^{-1.85} \left(\frac{D}{0.05} \right)^2 \quad (3.6)$$

onde M_* está em massas solares, os F s estão em Jy e D está em Mpc. Com isso, fica claro o motivo do critério 5 (as galáxias precisam possuir valor de distância em um dos catálogos utilizados) na determinação da nossa amostra.

Com isso, conseguimos calcular a massa estelar contida nas componentes de toda a nossa amostra, assim como para o modelo como um todo e massa da galáxia (a partir dos fluxos observados), que utilizamos para comparar com massa catalogada em Sheth et al. (2010).

3.2.4 Massa relativa das componentes

Considerando a massa relativa das componentes, conseguimos de forma direta visualizar o quanto a massa estelar daquela componente representa para o modelo como um todo. Desta forma, consideramos

$$M_{Rel} = (M_{Comp} * 100) / M_{Mod} \quad (3.7)$$

onde M_{Rel} é a massa relativa da componente (%), M_{Comp} é a massa contida na componente e M_{Mod} é a massa total do modelo. Ambas as massas estão em unidades de massas solares. Isso ajuda a interpretação de quais componentes são mais representativas numa questão de massa para sua galáxia hospedeira.

3.2.5 Diferentes modelos de decomposição, diferentes funções criadas

A análise resulta em quatro modelos de decomposição diferentes: disco + barra; disco + barra + núcleo; disco + barra + bojo; e disco + barra + bojo + núcleo.

Devido a isso, criamos quatro funções que geram histogramas da massa relativa em cada componente, e dois gráficos que ilustram: massa calculada (fluxos observados) vs massa do modelo; e massa calculada (fluxos observados) vs massa presente no catálogo S^4G . Nosso intuito é examinar a presença de estruturas (assim como a frequência destas) nas galáxias da nossa amostra. Avaliamos nossos resultados em função de diferentes cortes de massa estelar total na galáxia hospedeira para examinar a frequência em que são identificadas as estruturas estelares mais típicas do universo local (com particular foco na massa contida na barra) para galáxias anãs e massivas. Discutimos nossos resultados no próximo capítulo.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

Dividimos nosso trabalho numa primeira análise focada na caracterização das diferentes estruturas estelares presentes em galáxias de baixa massa (galáxias anãs; $M_* < 10^9 M_\odot$) e numa segunda análise com foco nas galáxias massivas ($M_* \geq 10^9 M_\odot$). No caso das galáxias anãs, estudamos a frequência em que a decomposição feita em Salo et al. (2015) identifica as diferentes estruturas tipicamente encontradas em galáxias (disco, bojo núcleo, barra, fonte pontual nuclear); complementamos esse trabalho com uma análise da fração de barras nesta subpopulação de galáxias e uma quantificação da massa estelar contida nas barras. Repetimos uma abordagem semelhante com a população de galáxias massivas, com um maior foco no estudo específico da massa contida nas barras presentes, assim como uma exploração de tendências presentes quando consideramos propriedades mais globais das galáxias hospedeiras (e.g., massa estelar total, presença de bojo). Neste capítulo apresentamos e discutimos brevemente os principais resultados do nosso trabalho.

4.1 Decomposição na banda $3.6 \mu\text{m}$ – O que temos na amostra S^4G ?

Das 2352 galáxias que entraram no *pipeline* da decomposição (Salo et al., 2015), 2277 (96% da amostra mãe) receberam modelo de decomposição com pelo menos uma componente (discutido no Capítulo 2). Das 2277 galáxias, 871 (38%) possuem uma componente barra, 611 (27%) possuem uma componente bojo e 491 (22%) possuem

uma componente núcleo. Na sua maioria (53%), as galáxias possuem duas componentes em seu modelo de decomposição (1205, de 2277).

Adicionando o critério de corte de massa de $M_* < 10^9 M_\odot$, verificamos que **435** (19%) galáxias (de 2277) são “**galáxias anãs**”. Destas, 16% (71, de 435) possuem barra, 3% (15, de 435) possuem bojo e 6% (28, de 435) possuem núcleo em seu modelo final de decomposição. Das 435 galáxias anãs que possuem modelo de decomposição, verificamos que 277 (63.7%) possuem apenas uma componente disco – i.e., modelo igual a “d”(expdisk) ou “z”(edgedisk) – em seu modelo de decomposição. Uma galáxia é apenas ajustada por uma componente bojo.

Com o critério de $M_* \geq 10^9 M_\odot$ definimos a nossa subamostra de **1834** (81%) “**galáxias massivas**” (de 2277), onde 44% (799, de 1834) possuem componente barra, 32% (595, de 1834) possuem componente bojo e 25% (462, de 1834) possuem componente núcleo em seu modelo de decomposição final. Assim como na amostra sem corte de massa, em geral vemos modelos de decomposição com duas componentes. Também é possível ver que todas as galáxias que receberam modelo de decomposição com 4 componentes são galáxias massivas.

Apresentamos um resumo das quantidades de componentes no modelo decomposição final e número de galáxias com essas decomposições na Tabela 4.1.

TABELA 4.1. Número de galáxias com diferentes quantidades de componentes em seu modelo final de decomposição – complexidade dos modelos olhando para a amostra completa que possui decomposição (2277 galáxias), a subamostra de galáxias anãs (435 galáxias) e a subamostra de galáxias massivas (1834 galáxias). Apenas corte de massa aplicado. Sem critério extras.

	amostra completa	galáxias anãs	galáxias massivas
N componentes	N galáxias	N galáxias	N galáxias
1	515	278	233
2	1205	146	1055
3	524	11	513
4	33	-	33
Total	2277	435	1834

4.1.1 Distinção entre classificação visual morfológica e presença de estruturas no modelo de decomposição

Adicionando o critério de inclinação menor que 65 graus e qualidade de decomposição igual a 5 (melhor qualidade de decomposição possível), ficamos com 953 galáxias (de 2277 que receberam decomposição). Na Tabela 4.2 mostramos a fração das galáxias

que apresentam nas suas respectivas decomposições as componentes de barra, bojo e núcleo.

Alertamos à distinção entre uma classificação morfológica baseada na inspeção visual de imagens (e.g., RC3 no óptico) e a identificação de estruturas estelares segundo as componentes inseridas num modelo de decomposição com GALFIT (i.e., Salo et al. 2015). Neste projeto trabalhamos principalmente com a decomposição das imagens das galáxias, onde as componentes estão relacionadas ao ajuste de um modelo (que utiliza funções de perfil de brilho para distribuir a luz observada). Com isso, a presença de uma componente barra não implica necessariamente na galáxia ter uma classificação morfológica com barra. Usamos como referência o trabalho de Buta et al. (2015) que classifica visualmente as galáxias de S^4G utilizando as imagens em $3.6 \mu\text{m}$.

TABELA 4.2. Fração das componentes (barra, bojo e núcleo) em diferentes cortes de massa. Galáxias com critério de inclinação menor que 65 graus e qualidade de decomposição igual a 5 (melhor qualidade possível).

Massa (M_{\odot})	N (galáxias)	Barra	Fração (%)	Bojo	Fração (%)	Núcleo	Fração (%)
Todas	953	463	48.59	326	34.21	236	24.76
$M_* < 10^9$	125	15	12.00	5	4.00	9	7.20
$M_* \geq 10^9$	826	447	54.12	321	38.86	227	27.48
$10^9 \leq M_* < 10^{10}$	393	225	57.25	71	18.07	88	22.39
$M_* \geq 10^{10}$	433	222	51.27	250	57.74	139	32.10

Os valores na literatura variam, mas de forma geral apontam para uma fração de 2/3 de espirais barradas no universo local (e.g., de Vaucouleurs 1963; Eskridge et al. 2000; Menéndez-Delmestre et al. 2007; Marinova & Jogee 2007). Nosso trabalho, baseado numa análise de decomposição de Salo et al. (2015) aponta a uma fração menor de galáxias “barradas” (49%, Tabela 4.2) ao considerar as galáxias com um modelo de decomposição que inclui a componente barra. Se consideramos apenas as galáxias anãs ($M_* < 10^9 M_{\odot}$), essa diferença é ainda mais marcante, como discutiremos mas adiante (Seção 4.3.1.3).

4.2 Distribuição de massa

Para esta análise utilizaremos a nossa amostra de 430 galáxias com uma componente barra no modelo de decomposição. Os modelos de decomposição são: disco + barra; disco + barra + núcleo; disco + barra + bojo; e disco + barra + bojo + núcleo.

Criamos um código em Python composto por 4 funções que trabalham com cada um desses modelos (veja o Apêndice A).

Das 430 galáxias, 199 (46%) possuem modelo disco+barra (dbar), 102 (24%) possuem modelo disco+barra+núcleo (dbarn), 110 (26%) possuem modelo disco+barra+bojo (bdbar) e 19 (4%) possuem modelo disco+barra+bojo+núcleo. Olhando para os cortes de massa, temos: 13 galáxias anãs ($M_* < 10^9 M_\odot$); 208 galáxias massivas intermediárias ($10^9 M_\odot \leq M_* < 10^{10} M_\odot$); e 209 galáxias muito massivas ($M_* \geq 10^{10} M_\odot$).

4.2.1 Modelos mais simples – com disco e barra

Dos modelos que trabalhamos, temos dois que são dominados pela presença das componentes disco, e uma parte menor pela barra: modelo “dbar” (disco e barra); modelo “dbarn (disco, barra e núcleo). Olhando para as barras, temos que a média de sua massa relativa é $7.6 \pm 6.4 \%$ (mediana: 6.2%), para modelos disco e barra. Os histogramas das componentes deste modelo de decomposição podem ser vistos na Figura 4.1.

Considerando as galáxias anãs ($M_* < 10^9 M_\odot$) da amostra, quase todas possuem modelo disco+barra (“dbar”). Apenas uma recebeu um modelo com disco, barra e bojo. De 199 galáxias com modelo disco + barra, 13 (7%) são anãs. A média da massa relativa da barra $9.4 \pm 6.3\%$ (mediana: 7.5%). A quantidade de galáxias com modelo que inclui barra na amostra de anãs é significativamente menor. Devido a isso, os valores de massa relativa contida pela barra nestas poucas galáxias anãs podem não mostrar uma tendência real, se tornando necessário a comparação entre amostras mais significativas.

Olhando para galáxias massivas, temos 187 (de 199, 93%) galáxias com modelo de decomposição “dbar”. Destas, 139 são massivas intermediárias e 48 são muito massivas¹. A pesar das amostras terem tamanho muito parecido, a quantidade de galáxias nos quatro modelos de decomposição que trabalhamos varia bastante. Neste caso, vemos expressivamente mais galáxias massivas intermediárias (mais da metade destas possuem este modelo de decomposição).

Das 430 galáxias da nossa amostra, 102 possuem modelo de decomposição com disco, barra e núcleo. Destas, todas são galáxias massivas. A média da massa relativa da componente barra é $7.6 \pm 8.0\%$ (mediana: 5.5%), da componente disco é $89.7 \pm 10.4\%$

¹das 430 galáxias barradas da nossa amostra, 208 são massivas intermediárias e 209 são muito massivas

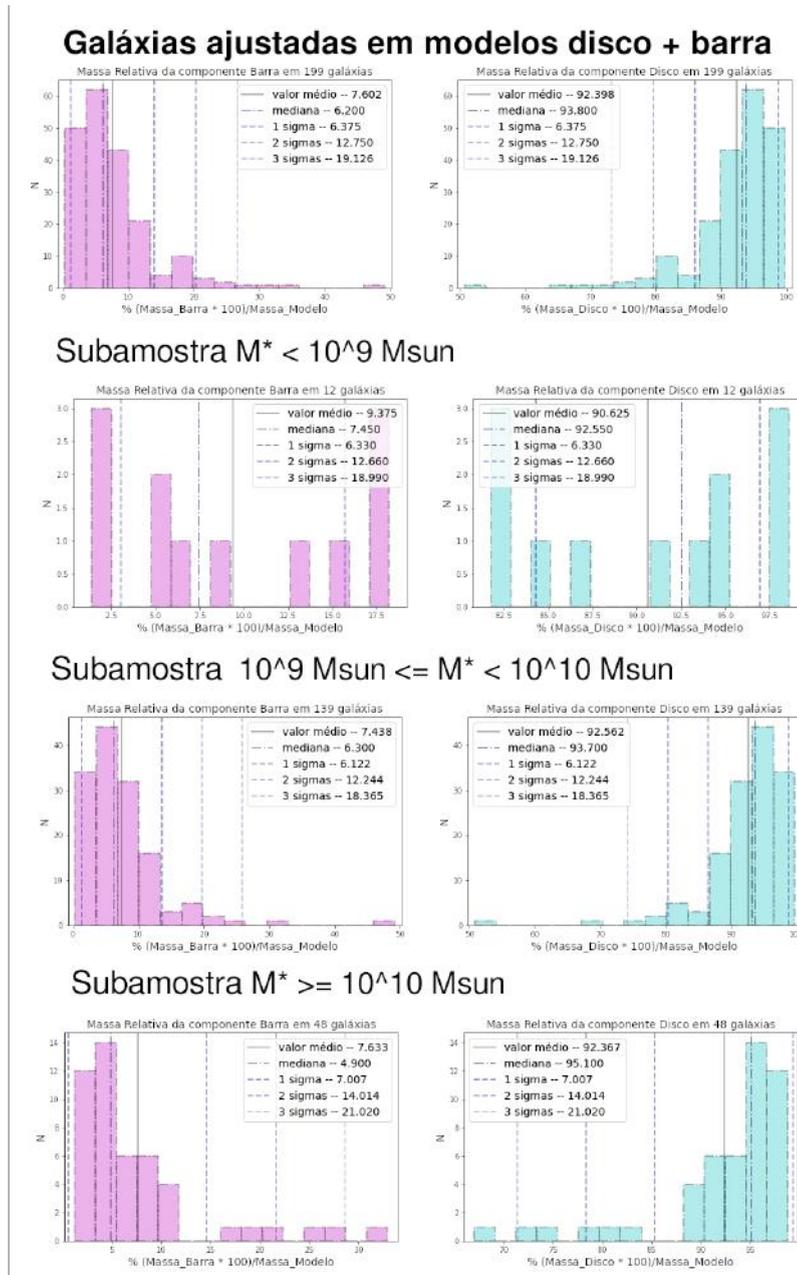


FIGURA 4.1. Histogramas de massa relativa das componentes barra e disco para o modelo “dbar” (para diferentes cortes de massa). Histograma da massa relativa da componente barra para seu modelo de decomposição, ou seja, o quanto a massa da barra representa para o modelo como um todo (esquerda). Histograma da massa relativa do disco para o modelo de decomposição (direita).

(mediana: 93.2%) e da componente núcleo é $2.7 \pm 4.5\%$ (mediana: 0.8%). Olhando para as galáxias com modelo “dbar”, 53 (de 102, 52%) são massivas intermediárias e 49 (de 102, 48%) são galáxias muito massivas. Os histogramas das duas distribuições, assim como as informações estatísticas das distribuições podem ser vistos na Figura 4.2.

Com esse modelo de decomposição temos amostras aproximadamente iguais em tamanho. Na Figura 4.2 conseguimos ver que as galáxias mais massivas ($M_* \geq 10^{10} M_{\odot}$)

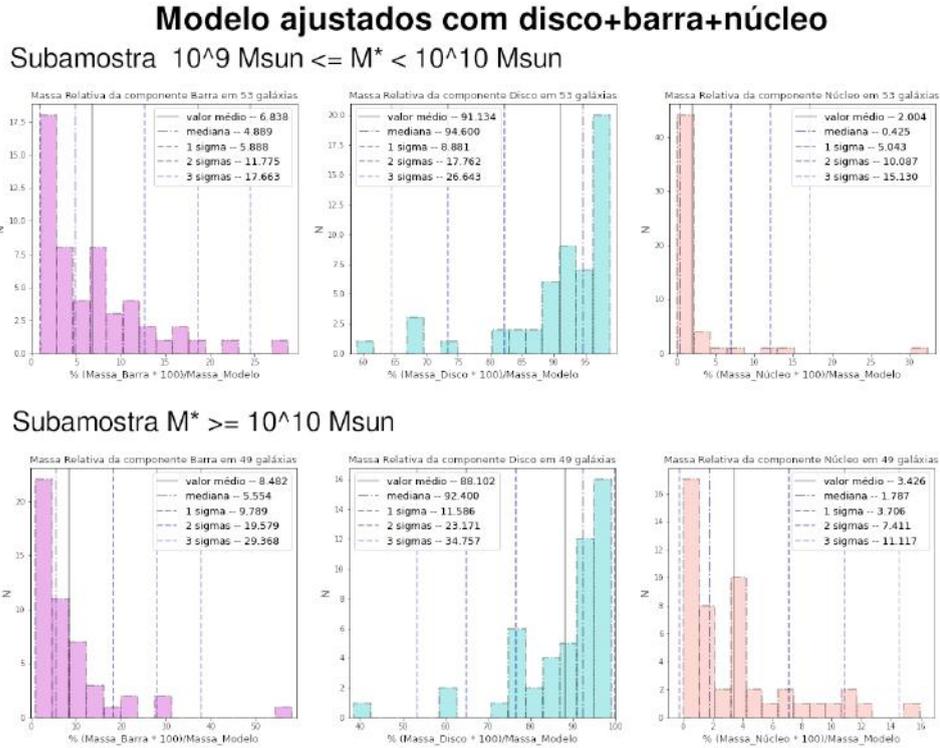


FIGURA 4.2. Histogramas de massa relativa das componentes do modelo disco+barra+núcleo. Galáxias massivas em dois cortes de massa: 53 galáxias massivas intermediárias (em cima); 49 galáxias muito massivas (embaixo). Histogramas de massa relativa das componentes barra, disco e núcleo para o modelo “dbarn”. Histograma da massa relativa da componente barra para seu modelo de decomposição, ou seja, o quanto a massa da barra representa para o modelo como um todo (esquerda). Histograma da massa relativa do disco para o modelo de decomposição (meio). Histograma da massa relativa do núcleo para o modelo de decomposição (direita).

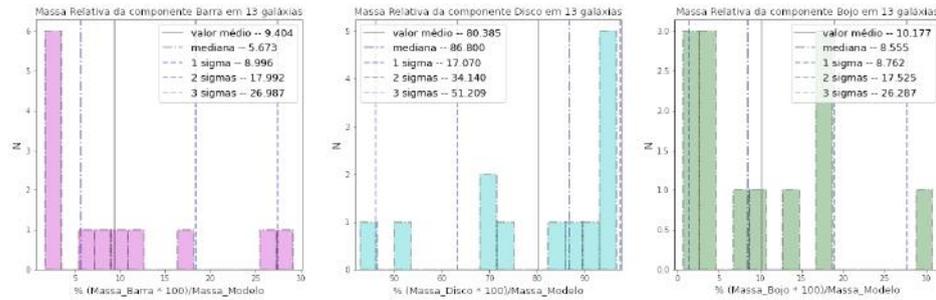
apresentam uma “cauda” de massas relativas da barra que se estende para valores maiores. Também é possível notar que no caso das galáxias muito massivas, há uma maior quantidade de componentes núcleo com valores maiores de massa relativa.

4.2.2 Modelos com bojo – aparente aumento na massa contida nas barras

Das 430 galáxias barradas da nossa amostra, temos 110 (26%) galáxias com modelo de decomposição igual a disco + barra + bojo. Destas, apenas uma é anã, onde sua barra tem massa relativa de 6.4% e seu bojo massa relativa de 4.0%. Das outras 109 galáxias, temos 13 galáxias massivas intermediárias e 96 galáxias muito massivas. Isso mostra uma forte tendência do ajuste da componente bojo em galáxias de maior massa. Os histogramas das duas distribuições, assim como as informações estatísticas das distribuições podem ser vistos na Figura 4.3.

Modelo ajustado com disco+barra+bojo

Subamostra $10^9 \text{ Msun} \leq M^* < 10^{10} \text{ Msun}$



Subamostra $M^* \geq 10^{10} \text{ Msun}$

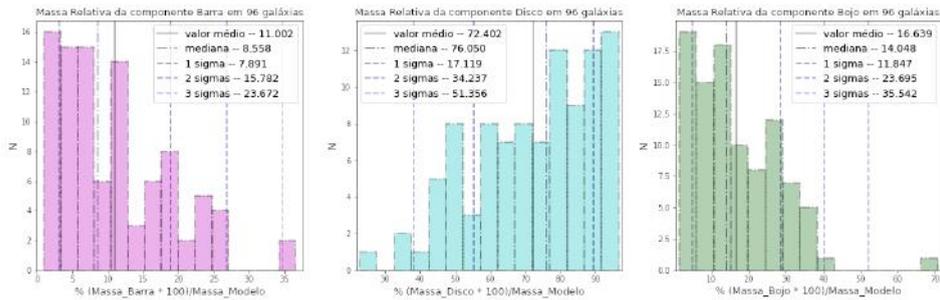


FIGURA 4.3. Histogramas de massa relativa das componentes do modelo disco+barra+bojo. Galáxias massivas em dois cortes de massa: 13 galáxias massivas intermediárias (em cima); 96 galáxias muito massivas (embaixo). Histogramas de massa relativa das componentes barra, disco e bojo para o modelo “bdkbar”. Histograma da massa relativa da componente barra para seu modelo de decomposição, ou seja, o quanto a massa da barra representa para o modelo como um todo (esquerda). Histograma da massa relativa do disco para o modelo de decomposição (meio). Histograma da massa relativa do bojo para o modelo de decomposição (direita).

Como as amostras tem tamanhos muito diferentes, uma comparação direta se torna pouco robusta. Podemos ver componentes bojo nas galáxias muito massivas com valores de mediana altos se comparados com as componentes barra e núcleo. Apesar disso, o valor da massa relativa da barra não diminui se comparado diretamente com valores visto nas medianas até então, pelo contrário, o valor é maior se comparado diretamente com os outros.

Das 430 galáxias da nossa amostra, apenas 19 (4%) possuem modelo de decomposição disco + barra + bojo + núcleo, onde todas são galáxias massivas. Destas, apenas 3 são massivas intermediárias e 16 são muito massivas. Isso reforça a ideia que componentes bojo são mais frequentemente identificados na decomposição de galáxias de maior massa. Os histogramas das duas distribuições, assim como as informações estatísticas das distribuições podem ser vistos na Figura 4.4.

Como as amostras são bem pequenas, não podemos dizer que há uma tendência

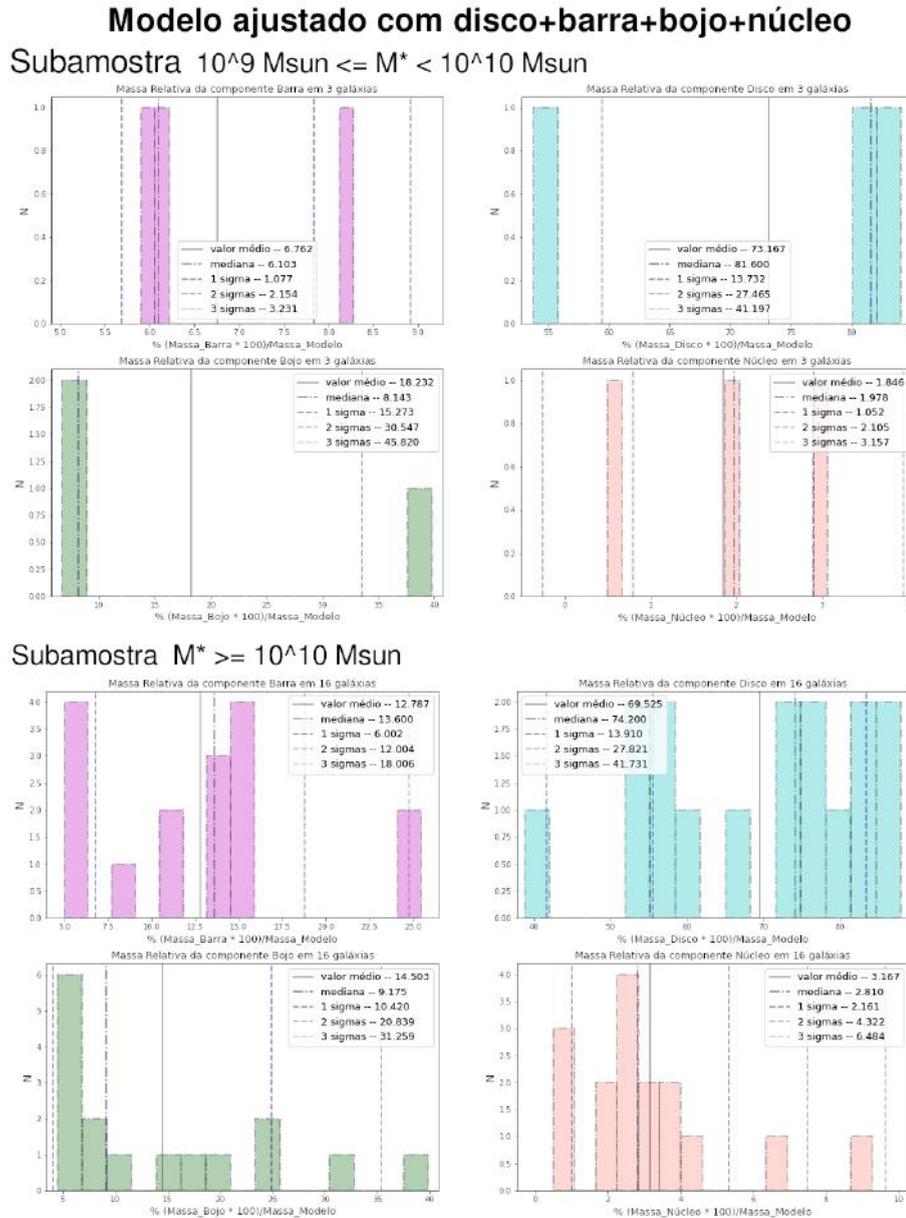


FIGURA 4.4. Histogramas de massa relativa das componentes do modelo disco+barra+bojo+núcleo. Galáxias massivas em dois cortes de massa: 3 galáxias massivas intermediárias (em cima); 16 galáxias muito massivas (embaixo). Histogramas de massa relativa das componentes barra, disco, bojo e núcleo para o modelo “bdbarn”. Histograma da massa relativa da componente barra para seu modelo de decomposição, ou seja, o quanto a massa da barra representa para o modelo como um todo (esquerda, em cima). Histograma da massa relativa do disco para o modelo de decomposição (direita, em cima). Histograma da massa relativa do bojo para o modelo de decomposição (esquerda, embaixo). Histograma da massa relativa do núcleo para o modelo de decomposição (direita, embaixo).

no que vemos. Comparando com as amostras maiores, podemos seguir o que foi visto e considerar o bojo realmente é uma componente mais predominante quando presente no modelo de decomposição. Também podemos ver que, apesar da amostra pequena, tanto a média quanto a mediana da componente barra se mantêm mais alta neste caso, onde há a presença do bojo.

Considerando uma comparação direta entre as massas relativas nas componentes barra e bojo, o histograma de massa da barra ainda apresenta uma distribuição com um desvio padrão menor que o bojo neste caso (olhando para as 16 galáxias muito massivas de modelo “bdbarn” é possível ver isso). No caso anterior, onde a amostra possui 96 galáxias, também podemos ver isso num comparativo direto entre o sigma da componente bojo e da barra. No entanto, comparando com os valores de desvio padrão das barras de forma geral, o valor visto nos casos onde o modelo possui componente bojo é próximo do que é visto nos outros casos.

4.2.3 Modelos com classificação morfológica com barra

Mencionamos brevemente na Seção 4.1.1 que nem todas as galáxias classificadas por Buta et al. (2015) como barradas resultam em modelos de decomposição que incluem barras segundo Salo et al. (2015). Também encontramos casos em que galáxias cujo modelo de decomposição inclui uma barra, não são classificadas como barradas pelo Buta et al. (2015): apenas 371 (87%) são classificadas morfológicamente como barradas (mais detalhes a seguir, na Seção 4.3.1.5). Como forma de sermos mais rigorosos, iremos olhar para estas galáxias de forma restrita para concluir a nossa análise. Um resumo geral da massa relativa contida nas componentes nos diferentes modelos de decomposição, para as 371 galáxias barradas com componente barra pode ser visto na Tabela 4.3.

TABELA 4.3. Massa relativa das componentes dos modelos de decomposição de 371 galáxias que possuem classificação morfológica com barra segundo Buta et al. (2015).

Todas Componentes	N	dbar 175	dbarn 81	bdbar 99	bdbarn 16
Barra	média	7.6 ± 6.2	6.7 ± 5.9	10.5 ± 8.0	12.8 ± 6.0
	mediana	6.4	4.9	7.6	13.6
Disco	média	92.4 ± 6.2	90.5 ± 9.0	74.2 ± 17.2	69.5 ± 13.9
	mediana	93.6	93.6	78.0	74.2
Bojo	média	-	-	15.3 ± 11.8	14.5 ± 10.4
	mediana	-	-	12.9	9.2
Núcleo	média	-	2.8 ± 4.9	-	3.2 ± 2.2
	mediana	-	0.8	-	2.8

Visando analisar se a massa relativa contida na componente barra tem a tendência a ser maior em galáxias de maior massa, focamos na comparação desse valor em amostras de cortes de massa diferente e tamanhos similares. Por esse motivo, não olharemos para as galáxias anãs nesta análise (são apenas 9 em 371 galáxias). Desta forma, comparamos

amostras de 180 galáxias de massa intermediárias ($10^9 M_\odot \leq M_* < 10^{10} M_\odot$) e 182 galáxias muito massivas ($M_* \geq 10^{10} M_\odot$).

4.2.3.1 Massa relativa da barra em galáxias barradas massivas – olhando para dois cortes de massa

Nosso foco aqui será olhar apenas para a massa relativa da componente barra nesses dois casos: 180 galáxias massivas intermediárias ($10^9 M_\odot \leq M_* < 10^{10} M_\odot$); 182 galáxias muito massivas ($M_* \geq 10^{10} M_\odot$). Na Tabela 4.4 podemos ver a massa relativa da barra para esses dois cortes de massa. Com isso vemos que de fato, a mediana da massa relativa da componente barra em galáxias muito massivas (i.e., 7.3%) se mantém maior do que para galáxias massivas intermediárias (i.e., 6.1%).

TABELA 4.4. Massa relativa da componente barra em 362 galáxias: 180 galáxias massivas intermediárias; 182 galáxias muito massivas. Galáxias que possuem classificação morfológica com barra segundo Buta et al. (2015).

		Intermediárias		Muito massivas	
		Massa relativa barra (%)	N	Massa relativa barra (%)	N
dbar	média	7.7 ± 6.3	125	6.9 ± 5.6	42
	mediana	6.5		4.9	
dbarn	média	5.8 ± 4.3	42	7.7 ± 7.1	39
	mediana	4.1		5.8	
bdbar	média	8.1 ± 7.6	10	10.8 ± 8.0	88
	mediana	4.3		8.2	
bdbarn	média	16.7 ± 6.2	3	11.9 ± 5.6	13
	mediana	14.5		13.6	
total	média	7.4 ± 6.1	180	9.3 ± 7.4	182
	mediana	6.1		7.3	

No entanto, a nossa barra de erro ainda assim é grande. Este valor que encontramos mostra uma tendência ou na verdade as amostras são parecidas demais para podermos afirmar qualquer coisa? Visando verificar se as amostras são significativamente diferentes, aplicamos o teste de hipótese Wilcoxon-Mann-Whitney (Teste U).

O Teste U é um teste de hipótese não paramétrico (ou seja, funciona bem em amostras que não possuem visivelmente uma distribuição normal) que verifica se duas amostras (que não precisam ter o mesmo tamanho) vem de uma mesma distribuição ou não, ou seja, se são significativamente diferentes uma da outra. No Teste U, nossa hipótese nula é que as duas distribuições possuem uma mesma origem. Nossa hipótese alternativa (quando rejeitamos a hipótese nula) é que uma distribuição é significativamente diferente da outra. Desta forma, verificamos se o valor que vemos vêm de amostras

realmente diferentes ou se são por um acaso diferentes, e no fim estamos comparando duas amostras de mesma origem.

Consideramos um grau de confiança de 5%. Isso quer dizer que no caso de ficarmos com a hipótese nula (as duas amostras terem a mesma origem), a segunda distribuição está dentro de um intervalo onde 95% (2σ) dos valores da primeira distribuição estão. Rejeitando a hipótese nula, a segunda distribuição está fora desse intervalo, se mostrando significativamente diferente da primeira.

Após o teste, nosso *p-value* foi de 0.027. Este valor é menor que 0.05 (nosso grau de confiança). Por isso, rejeitamos a hipótese nula e temos que as duas amostras são significativamente diferentes. De forma ilustrativa, temos os histogramas das duas distribuições na Figura 4.5.

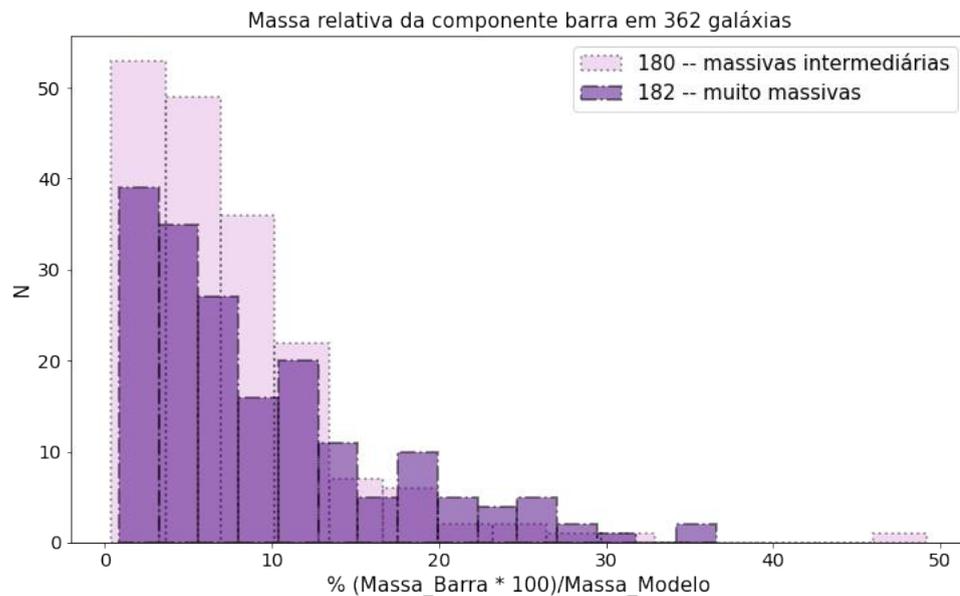


FIGURA 4.5. Histogramas de massa relativa da componente barra para 362 galáxias massivas, onde 180 são massivas intermediárias e 182 são galáxias muito massivas. Em cada cor estamos considerando a massa relativa da barra dos quatro modelos de decomposição apresentados.

Com isso, podemos dizer que de fato parece haver uma tendência para barras com massa relativa maior em galáxias de maior massa.

4.2.3.2 Mas a componente bojo pode ser o diferencial para vermos essa tendência?

Vimos até então que as barras pareciam ter uma maior massa relativa em galáxias que possuem componente bojo em seu modelo de decomposição. Com última análise, foi feita uma comparação entre duas amostras de galáxias massivas (sem considerar corte de massa): 248 galáxias sem bojo e 114 galáxias com bojo. Os histogramas destas duas distribuições pode ser visto na Figura 4.6.

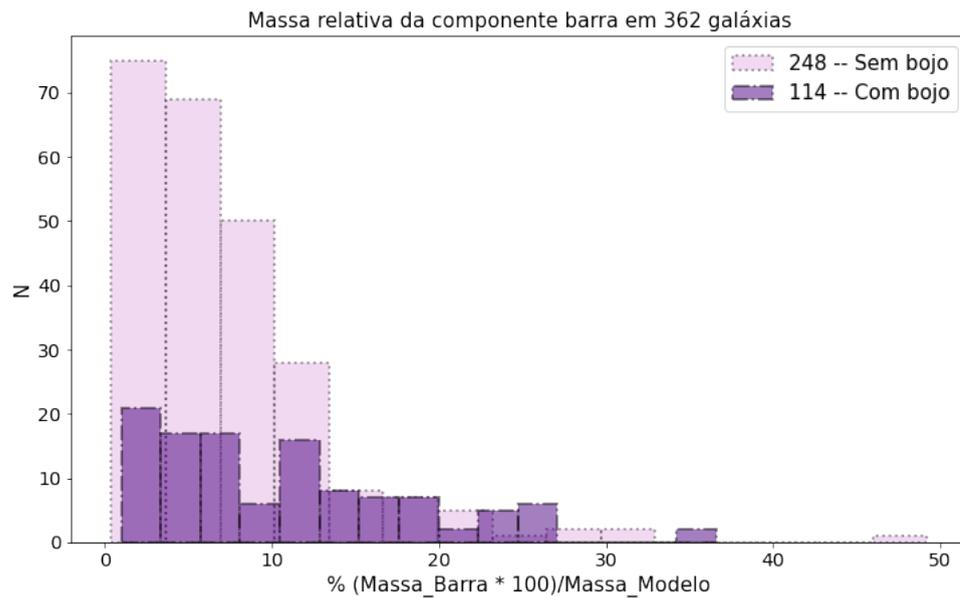


FIGURA 4.6. Histogramas de massa relativa da componente barra para 362 galáxias massivas, onde 248 são galáxias que não possuem componente bojo em seu modelo de decomposição e 114 são galáxias que possuem componente bojo em seu modelo de decomposição. Na cor mais clara (248 galáxias) temos os modelos “dbar” e “dbarn”. Na cor mais escura temos os modelos “bbar” e “bdbarn”.

Para as galáxias sem componente bojo em seu modelo de decomposição, temos que a massa relativa da componente barra possui a média de $7.2 \pm 6.1\%$ e mediana de 5.9% . Para as galáxias com componente bojo em seu modelo de decomposição, temos que a massa relativa da componente barra possui a média de $10.9 \pm 7.8\%$ e mediana de 8.6% . De uma forma geral, vemos massas relativas da barra maiores em galáxias que possuem componente bojo. Mais uma vez, foi aplicado o teste de hipótese para verificar se as distribuições são significativamente diferentes. Após o teste U, nosso p -value foi de 1.25×10^{-5} . Este valor é menor que 0.05 (nosso grau de confiança). Por isso, rejeitamos a hipótese nula e temos que as duas amostras são significativamente diferentes. Com

isso, podemos dizer que parece sim haver uma tendência em barras com massa relativa maior em galáxias que possuem uma componente bojo em seu modelo de decomposição.

Como vimos até então, de qualquer jeito as componentes bojo estão mais presentes em galáxias mais massivas. No entanto, vimos também que as barras pareciam ter uma maior massa relativa em galáxias com componente bojo mesmo em galáxias massivas intermediárias. Nestes casos, por mais que parecia haver um indicativo para isto, as amostras eram pequenas o que pode mostrar uma tendência não verdadeira. Com a análise que foi feita aqui, podemos dizer que de fato parece haver esta tendência de barras com maior massa relativa em galáxias com componente bojo, mesmo para galáxias não tão massivas assim.

4.3 Limitações da nossa abordagem

Nossa metodologia ainda possui algumas limitações. Dedicamos as seguintes seções para discutir a dificuldade em caracterizar adequadamente com nossa metodologia as barras menos fortes, em particular em galáxias anãs (Seção 4.3.1.3) e limitações do modelo que visamos abordar em trabalho futuro (Seção 4.3.2). A primeira discussão é baseada numa análise mais ampla da fração de barra em diferentes cortes usando o trabalho de Buta et al. (2015). A segunda foca em um excesso de fluxo que atrelamos aos modelos de decomposição.

4.3.1 Análise da fração de barras – quão representativas são as barras de nossa amostra?

A classificação morfológica de Buta et al. (2015) utiliza uma classificação F para as famílias de barras (SA, SAB, SB). Temos que $F \geq 0.5$ indica a presença de uma barra, onde SA é $F=0.0$, SAB é $F=0.5$ e SB é $F=1.0$. Com isso, verificamos a frequência de barras num contexto de: **classificação morfológica (Buta et al., 2015)**, com uma subamostra de **997** (de 2206 – Seção 2.5.3) galáxias **com inclinação menor que 65 graus**; possuir barra no modelo de decomposição (Salo et al., 2015), com uma subamostra de 953 galáxias (Tabela 4.2) com inclinação menor que 65 graus e qualidade de decomposição igual a 5. Verificamos também a frequência de barras nestes dois casos considerando diferentes cortes de massa.

Considerando a subamostra de 997 galáxias (com critério de inclinação menor que 65 graus) temos que 521 possuem barra (52.3%). Na Figura 4.7 podemos ver que temos mais barras fortes (SB).

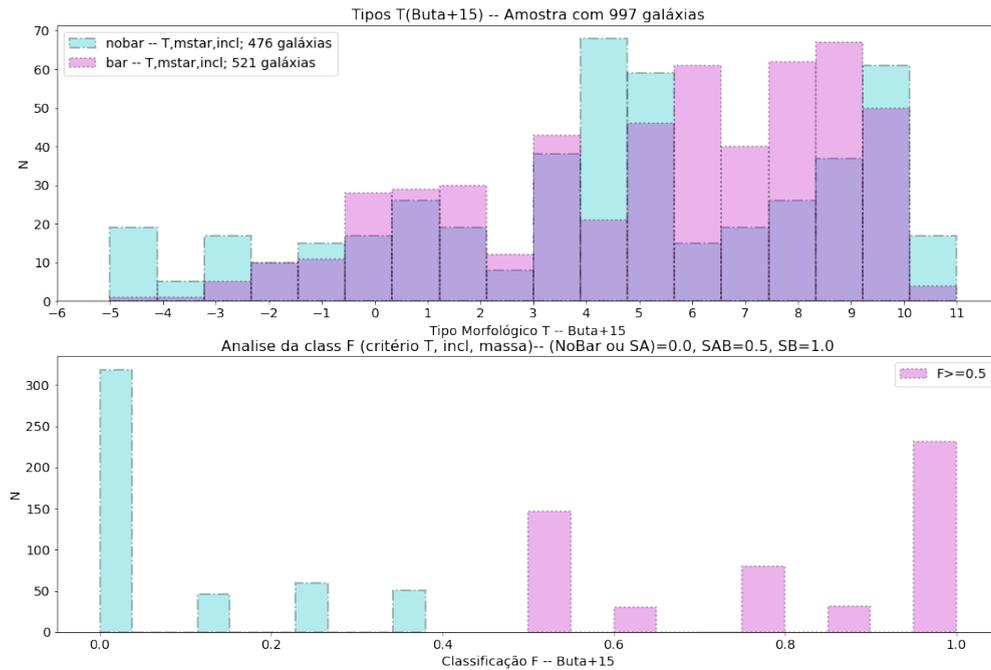


FIGURA 4.7. Histogramas da amostra S^4G (997 galáxias) com inclinação menor que 65 graus e sem corte de massa. Nas imagens, temos: histograma de tipo morfológico (em cima); histograma da classe F, que possui um valor entre 0 e 1, onde $F \geq 0.5$ indica a presença de uma barra. Em ambos os histogramas, o rosa indica galáxia barrada e o azul indica galáxia sem barra. Com valor igual a zero temos tanto galáxias SA como galáxias que não receberam valor em F.

4.3.1.1 Galáxias Anãs, as mais irregulares

Temos 131 galáxias anãs com inclinação menor que 65 graus (de 997 galáxias – Seção 4.3.1). Destas 131 galáxias, 50 possuem barra (38.2%). Com a Figura 4.8, podemos ver que das galáxias anãs possuem tipicamente uma classificação morfológica de $T=8-10$, que indica morfologias mais irregulares (Buta et al., 2015). A média dos valores de T é $T=9.0$, com mediana de $T=9.5$ e desvio padrão de 2.3. Olhando apenas para as galáxias com barra, esses valores são $T=9.1$, $T=9.5$ e $\sigma=1.6$, respectivamente. Também é possível observar que em anãs as barras mais comuns são do tipo SAB ($F = 0.5$), ou seja, barras fracas. Isso é o contrário do que vemos quando olhamos para a amostra sem corte de massa (Figura 4.7).

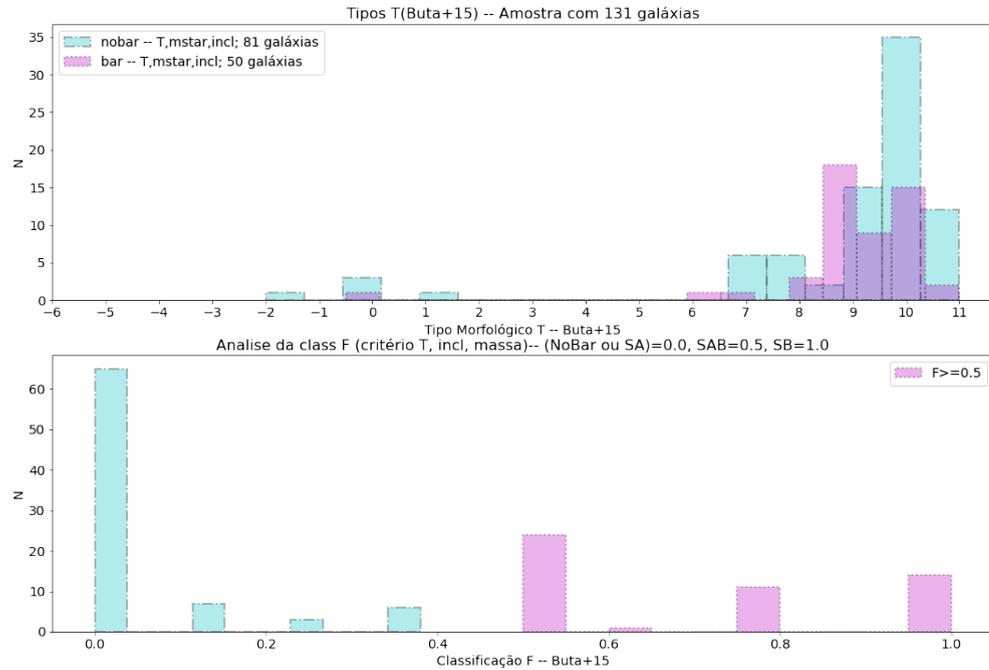


FIGURA 4.8. Histogramas das galáxias anãs ($M_* < 10^9 M_\odot$) com inclinação menor que 65 graus. Nas imagens, temos: histograma de tipo morfológico (em cima); histograma da classe F, que possui um valor entre 0 e 1, onde $F \geq 0.5$ indica a presença de uma barra. Em ambos os histogramas, o rosa indica galáxia barrada e o azul indica galáxia sem barra. Com valor igual a zero temos tanto galáxias SA como galáxias que não receberam valor em F.

4.3.1.2 Galáxias massivas – se muito massivas, movidas para tipo anterior

Temos 866 galáxias massivas (de 997 galáxias – Seção 4.3.1) onde 471 galáxias são barradas (54.4%). Destas, 404 (de 866, 46.7%) são “massivas intermediárias” ($10^9 M_\odot \leq M_* < 10^{10} M_\odot$) e 462 (de 866, 53.3%) são ‘muito massivas’ ($M_* \geq 10^{10} M_\odot$)

Considerando as galáxias massivas intermediárias ($10^9 M_\odot \leq M_* < 10^{10} M_\odot$), temos 404 galáxias onde 240 possuem barra (59.4%). Com o histograma de tipos morfológicos (Figura 4.9), podemos verificar que as galáxias deste corte de massa são mais de tipo tardio, com valores maiores de T, porém são menos irregulares do que galáxias anãs. A média dos valores de T é $T=6.3$, com mediana de $T=7.0$ e desvio padrão de 3.3. Olhando apenas para as galáxias com barra, esses valores vão para $T=6.8$, $T=7.5$ e $\sigma=2.7$, respectivamente. Também podemos ver que as barras mais presentes são barras fortes (SB).

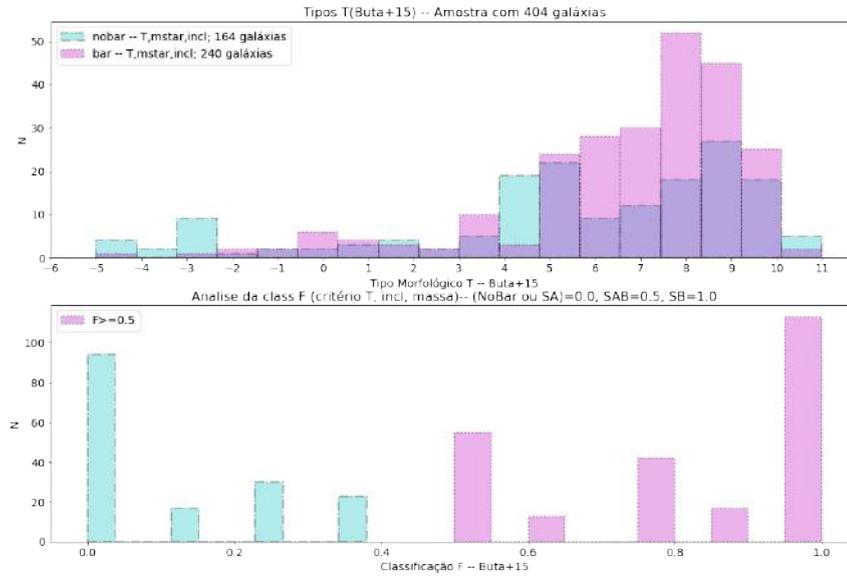


FIGURA 4.9. Histogramas de galáxias com massa $10^9 M_{\odot} \leq M_* < 10^{10} M_{\odot}$ e inclinação menor que 65 graus. Nas imagens, temos: histograma de tipo morfológico (em cima); histograma da classe F, que possui um valor entre 0 e 1, onde $F \geq 0.5$ indica a presença de uma barra. Em ambos os histogramas, o rosa indica galáxia barrada e o azul indica galáxia sem barra. Com valor igual a zero temos tanto galáxias SA como galáxias que não receberam valor em F.

Considerando galáxias muito massivas ($M_* \geq 10^{10} M_{\odot}$), temos 462 galáxias, onde 231 (50.0%) possuem barra. Esta fração é menor se comparada com o corte de massa intermediário, mas maior se comparado com as galáxias anãs. Observando a Figura 4.10 e comparando os histogramas de tipo morfológico entre os diferentes cortes de massa, podemos verificar que as galáxias de maior massa são mais de tipo anterior. O valor da média de T para essas galáxias é de $T=2.6$, mediana é de $T=3.0$ e desvio padrão de 3.0. Olhando apenas para as galáxias com barra, esses valores vão para $T=3.0$, $T=3.0$ e $\sigma=2.8$, respectivamente. Barras fortes (SB) também são as mais presentes.

4.3.1.3 Comparação da frequência de barras entre decomposição e classificação morfológica

Na Tabela 4.5 temos as frações de barras em diferentes cortes de massa segundo a classificação morfológica de Buta et al. (2015). Fazendo uma comparação direta com as barras segundo a decomposição (Salo et al., 2015) – Tabela 4.2 – podemos verificar que a fração de barras em galáxias anãs é menor segundo decomposição (i.e., 12%). Este valor é consideravelmente maior (38%) segundo a fração de barras pela classificação morfológica.

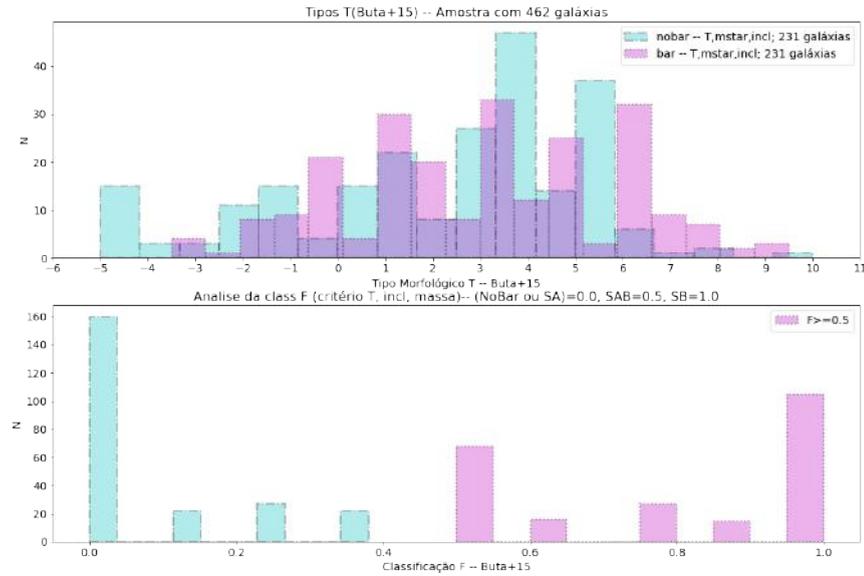


FIGURA 4.10. Histogramas de galáxias com massa $M_* \geq 10^{10} M_\odot$ e com inclinação menor que 65 graus. Nas imagens, temos: histograma de tipo morfológico (em cima); histograma da classe F, que possui um valor entre 0 e 1, onde $F \geq 0.5$ indica a presença de uma barra. Em ambos os histogramas, o rosa indica galáxia barrada e o azul indica galáxia sem barra. Com valor igual a zero temos tanto galáxias SA como galáxias que não receberam valor em F.

Com a Figura 4.8 vemos que galáxias anãs possuem mais barras tipo SAB. Isso mostra que o ajuste na decomposição de barras mais fracas não é muito eficiente. Considerando as galáxias de maior massa (que possuem mais barras fortes – SB), podemos ver que as frações de barra são próximas nas duas tabelas, o que sugere que conseguimos recuperar a maioria das barras fortes.

TABELA 4.5. Amostra *S4G* (997 galáxias), considerando todos os tipos morfológicos presentes (Buta et al., 2015), galáxias com inclinação menor que 65 graus e destacando a presença de barras ($F \geq 0.5$)

Massa (M_\odot)	Galáxias (N)	Mediana (T)	com Barras (N)	Fração (%)	Mediana (T)
Todas	997	$5.0^{+3.8}_{-3.9}$	521	52.26	$6.0^{+2.8}_{-4.1}$
$M_* < 10^9$	131	$9.5^{+1.8}_{-2.8}$	50	38.17	$9.5^{+1.2}_{-2.0}$
$M_* \geq 10^9$	866	$5.0^{+3.0}_{-4.3}$	471	54.39	$5.5^{+2.8}_{-3.9}$
$10^9 \leq M_* < 10^{10}$	404	$7.0^{+2.6}_{-4.0}$	240	59.41	$7.5^{+2.0}_{-3.4}$
$M_* \geq 10^{10}$	462	$3.0^{+2.6}_{-3.4}$	231	50.00	$3.0^{+2.8}_{-2.7}$

4.3.1.4 Falsos negativos – Não possuem componente barra, mas possuem barra em seu tipo morfológico

Das 997 (Seção 4.3.1) galáxias com inclinação menor que 65 graus e com barras segundo a classificação morfológica (Buta et al., 2015), temos que 107 (de 997, 11%)

não possuem componente barra em seu modelo de decomposição (Salo et al., 2015). Na Figura 4.11 podemos ver que a maior parte destas destas galáxias são de tipo SAB. Isso mostra que o ajuste de barras mais fracas é menos eficiente. Em Salo et al. (2015) é comentado que em alguns casos onde as barras não são incluídas no ajuste, acontece do fluxo da barra ser misturado erroneamente com o fluxo do bojo.

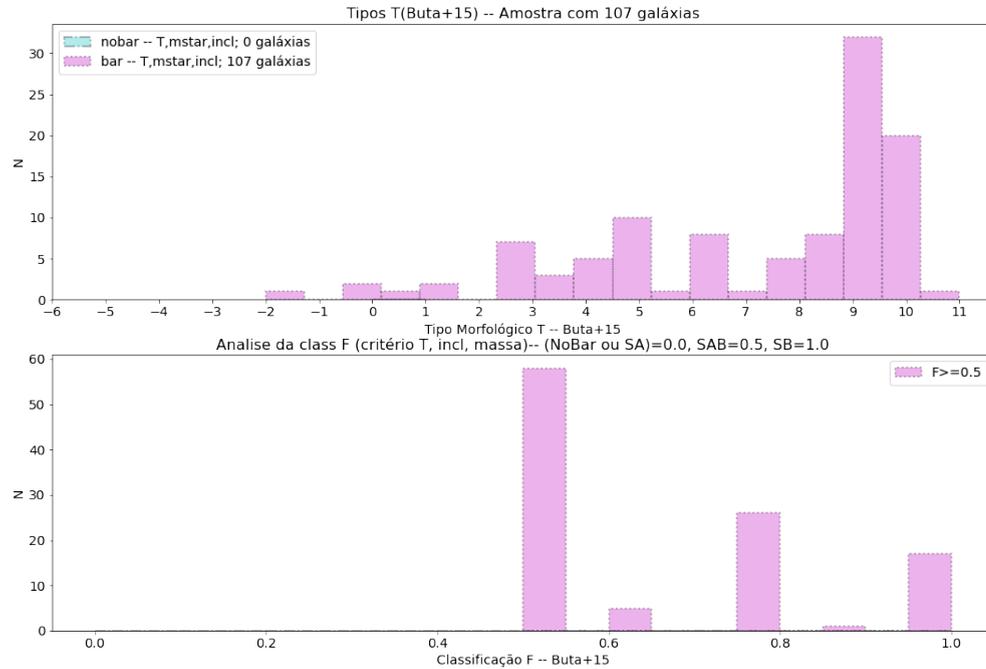


FIGURA 4.11. Histogramas com os falsos negativos – Não possuem componente barra, mas possuem barra em sua classificação morfológica. Inclinação menor que 65 graus e sem corte de massa. Todas as galáxias são classificadas como barradas, mas não possuem componente barra em seu modelo de decomposição. Nas imagens, temos: histograma de tipo morfológico (em cima); histograma da classe F, que possui um valor entre 0 e 1, onde $F \geq 0.5$ indica a presença de uma barra. Em ambos os histogramas, o rosa indica galáxia barrada e o azul indica galáxia sem barra. Com valor igual a zero temos tanto galáxias SA como galáxias que não receberam valor em F.

4.3.1.5 Falsos positivos – possuem componente barra, não possuem barra no seu tipo morfológico

Em Salo et al. (2015) é mencionado que possuir uma componente de decomposição barra não indica necessariamente que aquela galáxia é barrada, no entanto não fica claro o motivo de haver o ajuste nestes casos. Das 426 (Seção 2.5.3) galáxias da nossa amostra, verificamos que 371 (87%) possuem barra tanto em sua decomposição (Salo et al., 2015) quanto em sua classificação morfológica (Buta et al., 2015). Com isso temos 55 (de 426,

13%) galáxias que possuem barra em sua decomposição (Salo et al., 2015) mas não são classificadas como galáxias barradas segundo a classificação morfológica de Buta et al. (2015). Na Figura 4.12 podemos ver os tipos morfológicos destas galáxias.

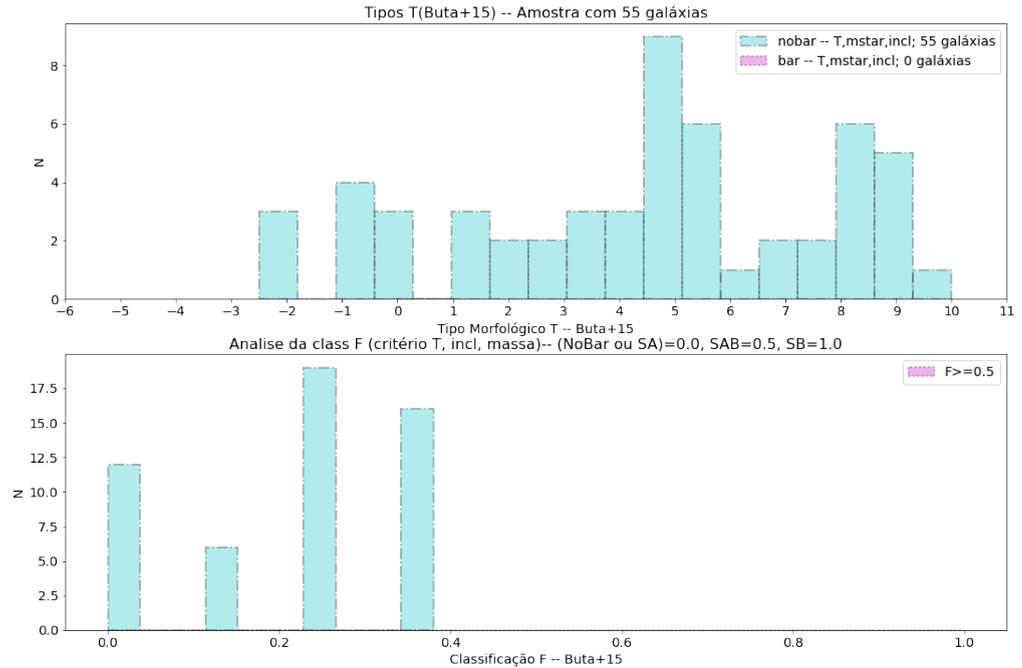


FIGURA 4.12. Histogramas com os falsos positivos – possuem componente barra, não possuem barra no seu tipo morfológico. Inclinação menor que 65 graus e sem corte de massa. Todas as galáxias não possuem barra em sua classificação morfológica, mas receberam uma componente barra em seu modelo de decomposição. Nas imagens, temos: histograma de tipo morfológico (em cima); histograma da classe F, que possui um valor entre 0 e 1, onde $F \geq 0.5$ indica a presença de uma barra. Em ambos os histogramas, o rosa indica galáxia barrada e o azul indica galáxia sem barra. Com valor igual a zero temos tanto galáxias SA como galáxias que não receberam valor em F.

4.3.2 Limitações da decomposição – necessidade de definir um corte radial aos perfis de brilho ajustados

Em uma comparação direta da massa do modelo (a partir dos fluxos calculados para o modelo e o valor de distância da galáxia) e a massa da galáxias (a partir dos fluxos tabelados daquela galáxia e seu valor de distância), verificamos que sistematicamente a massa do modelo é maior que a massa da galáxia (Figura 4.13). Isso pode ser explicado considerando a forma que é ajustado o perfil de brilho à galáxia, por meio das funções. O ajuste da galáxia é feito considerando um limite do raio efetivo desta indo para o infinito. Com isso, algum fluxo extra acaba sendo adicionado ao modelo. Uma forma de

não termos esse fluxo extra seria determinando um limite de integração para a função de perfil de brilho da galáxia.

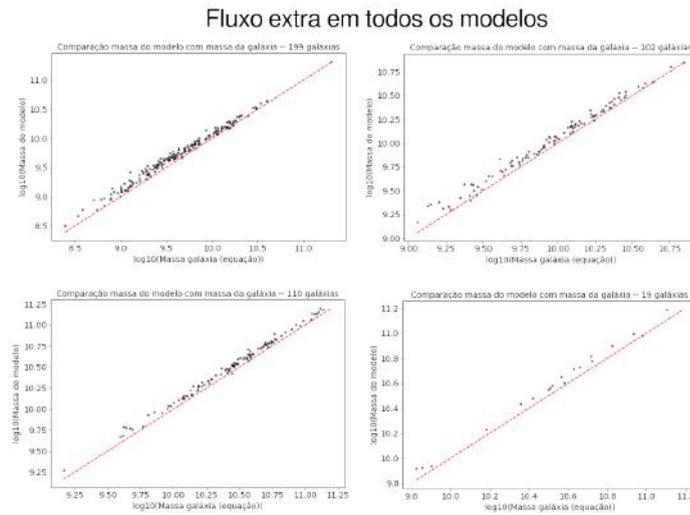


FIGURA 4.13. Comparação entre massa total calculada para o modelo e a massa calculada para a galáxia, a partir dos fluxos observados. Para todos os modelos de decomposição, vemos um fluxo extra no modelo.

Atrelando um limite radial aos perfis dos diferentes modelos que representam as estruturas, visamos recuperar os fluxos totais observados. Muñoz-Mateos (que faz parte da equipe S^4G) nos encaminhou (em comunicação privada) as tabelas com tamanhos (raios efetivos) das galáxias S^4G . Visamos utilizar esses tamanhos como uma primeira referência para definir o limite até onde considerar os fluxos contidos por cada perfil inserido nos modelos de decomposição. Deixamos esse trabalho para um projeto futuro.

Capítulo 5

Conclusões

A presença de uma barra afeta a movimentação no disco de gás e estrelas, impactando fortemente a evolução da galáxia hospedeira. Estudar a distribuição de massa em galáxias barradas pode trazer informações que nos ajudem a entender como a presença de tal estrutura afeta o sistema global. Para este estudo, a escolha do infravermelho médio se mostra eficiente por focar em estrelas de baixa massa, que descrevem a maior parte da massa estelar em galáxias. O levantamento S^4G (Sheth et al., 2010) nos fornece um profundo mapeamento de galáxias do universo local, abrangendo todos os tipos morfológicos. Desenvolvemos um estudo de distribuição de massa em galáxias barradas considerando nossa amostra de 430 galáxias com barras segundo a decomposição (Salo et al., 2015). Nossos resultados foram os seguintes:

- Comparando a massa relativa contida nas barras em galáxias massivas (dois cortes de massa: $10^9 M_{\odot} \leq M_{*} < 10^{10} M_{\odot}$; e $M_{*} \geq 10^{10} M_{\odot}$), verificamos que as galáxias mais massivas parecem ter uma tendência a ter barras com maior massa relativa (massa relativa da barra com mediana de 7.3%; mediana da amostra de menor massa, 6.1% – Tabela 4.4). Ao fazer o teste de hipótese, verificamos que as amostras não vêm de uma mesma distribuição, sendo significativamente diferentes. Desta forma, por mais que valor da amostra de maior massa não seja expressivamente maior do valor da amostra de menor massa, como as amostras são diferentes, este valor indica uma tendência. Este resultado é consistente com o cenário em que barras estão ainda se estabelecendo nos intervalos de massa menores.

- Na comparação entre galáxias massivas com bojo e sem bojo, vimos tendência em galáxias com componente bojo possuírem barras com uma maior massa relativa (massa relativa da barra com mediana de 8.6%; mediana da amostra sem bojo, 5.9%). Com o teste hipótese também verificamos que estas amostras são significativamente diferentes. Verificamos que as galáxias que mais possuem componente bojo são as mais massivas ($M_* \geq 10^{10} M_\odot$, Tabela 4.4). Isso pode sugerir que galáxias mais maduras (i.e., de maior massa e com componente bojo) possuem também barras mais maduras (i.e., com uma maior massa relativa).
- A identificação de barras em galáxias baseadas na decomposição com a ferramenta GALFIT apresenta limitações, em particular uma tendência a perder as barras menos fortes. Esse resultado se torna evidente ao considerar que a fração de galáxias anãs classificadas como barradas via inspeção visual pelo Buta et al. (2015) é de 38% (com uma maioria destas classificadas como SAB para barras intermediárias), enquanto a fração de galáxias anãs com uma componente barra incluída na decomposição (Salo et al., 2015) é de 12%. Isso indica que por mais que GALFIT sirva para detectar barras, esta não é a ferramenta mais eficiente para isso.
- Ainda considerando as limitações que apresenta o uso da decomposição com GALFIT como identificador da presença de barras, uma análise da fração de barras em função da massa estelar total da galáxia hospedeira mostra uma clara queda para as galáxias de menor massa. Vemos uma fração menor em galáxias anãs ($M_* < 10^9 M_\odot$), quando comparamos à fração de barras em galáxias massivas. Esse resultado é observado seja usando a classificação visual de Buta et al. (2015) – com 38.2% das galáxias anãs sendo classificadas como barradas e 54.4% no caso das galáxias massivas – ou usando a decomposição de Salo et al. (2015) – com apenas 12% das galáxias anãs apresentando uma componente barra na decomposição com GALFIT e 54.1% no caso das massivas. Essa queda de frequência de barras nas galáxias de menor massa é consistente com o estudo feito pelo Sheth et al. (2008) onde os autores estudam a fração de barras em função de redshift até $z \sim 0.8$. Os resultados do nosso trabalho indicam que galáxias de menor massa ainda estão adquirindo condições necessárias para abrigar uma barra, consistente com os nossos resultados.

- Em termos da análise na decomposição, verificamos que galáxias anãs ($M_* < 10^9 M_\odot$) possuem modelos mais simples. Mais da metade das galáxias anãs possui apenas uma componente disco (63.7%). Ao mesmo tempo, vimos que as galáxias massivas ($M_* \geq 10^9 M_\odot$) possuem modelos de decomposição mais complexos, em geral com duas componentes (Tabela 4.1). Todas as galáxias que possuem modelo com quatro componentes (o modelo mais complexo feito em Salo et al. 2015) são massivas. Além disso, galáxias muito massivas ($M_* \geq 10^{10} M_\odot$) são as que mais possuem componente bojo (57.7% – Tabela 4.2) . Isso provavelmente está associado ao fato de serem mais de tipo anterior.

O nosso trabalho foi focado em galáxias com barras, mas pode ser estendido para uma análise mais aprofundada nas outras estruturas estelares. A decomposição da luz no infravermelho médio é uma ferramenta importante para permitir a caracterização das estruturas estelares individuais das galáxias. Com o lançamento do “James Webb Space Telescope” (JWST), maior telescópio espacial jamais construído, esse tipo de estudo poderá ser estendido para galáxias distantes, nos permitindo não apenas detectar o surgimento de muitas das estruturas estelares aqui mencionadas, mas também abrindo a possibilidade de implementar as análises aqui apresentadas para acompanhar o crescimento em massa estelar nas diferentes estruturas.

Referências Bibliográficas

- Athanassoula, E. 2013, in *Secular Evolution of Galaxies*, ed. J. Falcón-Barroso & J. H. Knapen, 305
- Bouquin, A. Y. K., Gil de Paz, A., Muñoz-Mateos, J. C., et al. 2018, *ApJS*, 234, 18, doi: 10.3847/1538-4365/aaa38410.48550/arXiv.1710.00955
- Buta, R. J. 2014, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 480, *Structure and Dynamics of Disk Galaxies*, ed. M. S. Seigar & P. Treuthardt, 53
- Buta, R. J., Sheth, K., Athanassoula, E., et al. 2015, *ApJS*, 217, 32, doi: 10.1088/0067-0049/217/2/3210.48550/arXiv.1501.00454
- Chabrier, G. 2003, *PASP*, 115, 763, doi: 10.1086/376392
- Coenda, V., Martínez, H. J., & Muriel, H. 2018, *MNRAS*, 473, 5617, doi: 10.1093/mnras/stx2707
- de Vaucouleurs, G. 1959, *Handbuch der Physik*, 53, 275, doi: 10.1007/978-3-642-45932-0_7
- de Vaucouleurs, G. 1963, *ApJS*, 8, 31, doi: 10.1086/190084
- Eskew, M., Zaritsky, D., & Meidt, S. 2012, *AJ*, 143, 139, doi: 10.1088/0004-6256/143/6/139
- Eskridge, P. B., Frogel, J. A., Pogge, R. W., et al. 2000, *AJ*, 119, 536, doi: 10.1086/301203
- Fazio, G. G., Hora, J. L., Allen, L. E., et al. 2004, *ApJS*, 154, 10, doi: 10.1086/422843
- Ferguson, H. C., & Sandage, A. 1991, *AJ*, 101, 765, doi: 10.1086/115721

- Guo, Y., Jogee, S., Finkelstein, S. L., et al. 2023, *ApJ*, 945, L10, doi: 10.3847/2041-8213/acacfb
- Holmberg, E. 1950, *Meddelanden fran Lunds Astronomiska Observatorium Serie II*, 128, 5
- Hubble, E. P. 1926, *ApJ*, 64, 321, doi: 10.1086/143018
- Hubble, E. P. 1936, *Realm of the Nebulae*
- Jun, H. D., & Im, M. 2008, *ApJ*, 678, L97, doi: 10.1086/588552
- Kennicutt, Robert C., J. 1998, *ARA&A*, 36, 189, doi: 10.1146/annurev.astro.36.1.189
- Kormendy, J., & Kennicutt, Robert C., J. 2004, *ARA&A*, 42, 603, doi: 10.1146/annurev.astro.42.053102.134024
- Kroupa, P. 2001, *MNRAS*, 322, 231, doi: 10.1046/j.1365-8711.2001.04022.x
- Maeder, A. 2009, *Physics, Formation and Evolution of Rotating Stars*, doi: 10.1007/978-3-540-76949-1
- Mannucci, F., Della Valle, M., Panagia, N., et al. 2005, *A&A*, 433, 807, doi: 10.1051/0004-6361:20041411
- Marinova, I., & Jogee, S. 2007, *ApJ*, 659, 1176, doi: 10.1086/512355
- Mateo, M. L. 1998, *ARA&A*, 36, 435, doi: 10.1146/annurev.astro.36.1.435
- Menéndez-Delmestre, K., Sheth, K., Schinnerer, E., Jarrett, T. H., & Scoville, N. Z. 2007, *ApJ*, 657, 790, doi: 10.1086/511025
- Morgan, W. W. 1958, *PASP*, 70, 364, doi: 10.1086/127243
- Morgan, W. W. 1959, *PASP*, 71, 394, doi: 10.1086/127415
- Muñoz-Mateos, J. C., Sheth, K., Regan, M., et al. 2015, *ApJS*, 219, 3, doi: 10.1088/0067-0049/219/1/3
- Nair, P. B., & Abraham, R. G. 2010, *ApJS*, 186, 427, doi: 10.1088/0067-0049/186/2/427
- Oke, J. B. 1974, *ApJS*, 27, 21, doi: 10.1086/190287

- Pahre, M. A., Ashby, M. L. N., Fazio, G. G., & Willner, S. P. 2004, *ApJS*, 154, 235, doi: 10.1086/422914
- Peng, C. Y., Ho, L. C., Impey, C. D., & Rix, H.-W. 2002, *AJ*, 124, 266, doi: 10.1086/340952
- Peng, C. Y., Ho, L. C., Impey, C. D., & Rix, H.-W. 2010, *AJ*, 139, 2097, doi: 10.1088/0004-6256/139/6/2097
- Phillipps, S., Parker, Q. A., Schwartzberg, J. M., & Jones, J. B. 1998, *ApJ*, 493, L59, doi: 10.1086/311144
- Salo, H., Laurikainen, E., Laine, J., et al. 2015, *VizieR Online Data Catalog*, J/ApJS/219/4
- Salpeter, E. E. 1955, *ApJ*, 121, 161, doi: 10.1086/145971
- Sérsic, J. L. 1963, *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina*, 6, 41
- Sheth, K., Elmegreen, D. M., Elmegreen, B. G., et al. 2008, *ApJ*, 675, 1141, doi: 10.1086/524980
- Sheth, K., Regan, M., Hinz, J. L., et al. 2010, *PASP*, 122, 1397, doi: 10.1086/657638
- Tokunaga, A. T., Sellgren, K., Smith, R. G., et al. 1991, *ApJ*, 380, 452, doi: 10.1086/170603
- van den Bergh, S. 1960a, *ApJ*, 131, 215, doi: 10.1086/146821
- van den Bergh, S. 1960b, *ApJ*, 131, 558, doi: 10.1086/146869
- van der Kruit, P. C., & Searle, L. 1981, *A&A*, 95, 105
- Werner, M. W., Roellig, T. L., Low, F. J., et al. 2004, *ApJS*, 154, 1, doi: 10.1086/422992

Apêndice A

Códigos em Python usados na Análise

A.1 Ferramenta para as Análises – Códigos em Python

Utilizamos a linguagem de programação Python para chegar nos resultados das análises feitas nesse trabalho. Desde a seleção da amostra e subamostras, até as análises se serão apresentadas no capítulo 4, utilizamos códigos em Python.

Foram criadas diversas funções para realizar as análises feitas. Devido a isso, e visando uma melhor ilustração completa da metodologia e análise feita nesse trabalho, os passos da metodologia e das análises estarão disponíveis em jupyter notebooks.

Tanto os códigos em Python, quando os jupyter notebooks e as tabelas utilizadas nesse trabalho estão disponíveis em https://github.com/NimUsagi/TCC_Distribuicao_de_massa_em_galaxias_barradas_no_universo_local. As bibliotecas mais utilizadas nesse trabalho foram: Numpy, Pandas e Matplotlib. A seguir, apresentamos uma breve explicação do funcionamento de cada uma destas funções.

A.2 Análise na decomposição – complexidade dos modelos

Usando como *input* a tabela com os dados referentes aos modelos de decomposição do Salo et al. (2015), disponibilizada em <https://www.oulu.fi/astronomy/>

S4G_PIPELINE4/MAIN/, a função “`analise_decomp`” (jupyter notebook: `Analise_Decomposicao.ipynb`) verifica quantas vezes aparece cada componente e cada modelo, listando-os se o `input` for verdadeiro.

A função plota histogramas da contribuição relativa, considerando o fluxo contido na componente, relativo ao fluxo do modelo completo da galáxia. Isto é feito para as componentes barra, bojo, disco e núcleo. No caso da componente disco, o valor em geral não é confiável pois pode contabilizar um disco secundário. Além disso, no título de cada histograma é descrito a componente que ele está relacionado e quantas vezes ela aparece para aquela amostra determinada na entrada.

Por fim, a função menciona o tamanho total da amostra e descreve a frequência em que cada componente aparece; i.e., $100 \times (\text{Número galáxias com determinada componente}) / (\text{Número total de galáxias daquela amostra})$.

A.3 Massa Relativa da Componente

Nesta análise foram desenvolvidas quatro funções (“`gals_dbar`”- modelo: disco + barra; “`gals_dbarn`”- modelo: disco + barra + núcleo; “`gals_bdbar`”- modelo: disco + barra + bojo; “`gals_bdbarn`”- modelo: disco + barra + bojo + núcleo) pois trabalhamos com quatro modelos diferentes. A forma como é feita a metodologia é descrita no Capítulo 3. A análise está ilustrada no jupyter notebook: `Analise_Distribuicao_Massa.ipynb`.

A função lê a tabela com as galáxias da nossa amostra (nesta tabela de `input` há apenas a linha da componente barra). Esta busca as linhas com informações das outras componentes para o modelo escolhido na “tabela mãe” (a tabela de onde retiramos nossa amostra). A partir disso, segue a metodologia para determinação do fluxo nas componentes e na banda de $4.5\mu\text{m}$.

A função calcula a massa de cada componente do modelo em questão, a massa total do modelo e a massa a partir do fluxo observado. Após isso faz o cálculo da massa relativa contida em cada componente. Todas informações de fluxo e massa são salvas em listas para serem plotadas.

Por fim, a função gera um histograma da massa relativa de cada componente. Também o feito o gráfico que compara a massa total do modelo com a massa calculada para a galáxia a partir do fluxo observado.

A.4 Classificação Morfológica – Presença de barras

Para esta análise, foi criada uma função “bar_in_T” (jupyter notebook: Analise_Tipo_Morfologico.ipynb) . No *input* da função é possível determinar um corte de tipo morfológico e um corte de massa (e.g., T_ini = 0, T_fin = 7, mstar_ini = 9, mstar_fin = 10 – Tipo morfológico de 0 à 7 [S0/a - Sd, logo olha só para espirais], massa estelar $10^9 M_{\odot} \leq M_* < 10^{10} M_{\odot}$).

Esta função lê as colunas da tabela escolhida (em DataFrame) e analisa os seguintes aspectos: se há barra ou não naquela amostra (critério de barra: $F \geq 0.5$ Buta et al. 2015), separa a amostra que possui inclinação menor que 65 graus (para possíveis comparações), separa a amostra segundo os critérios de entrada.

Na coluna F (indicando as famílias, de SA à SB), várias galáxias receberam valor de “NaN” por não ter uma barra e não ter muito sentido dar um valor de F para tal galáxia (e.g., galáxias elípticas, várias irregulares, galáxias muito inclinadas). No entanto, essas galáxias possuem classificação morfológica (e.g., possuem um valor na coluna T) e precisam ser consideradas. Devido a isso, foi atribuído o valor zero aos “NaN”. Em nossa análise, elas aparecerão em histogramas junto as galáxias SA (pois estas possuem $F=0$) apenas para serem contabilizadas pelo código como galáxias sem barra, mas não isso não indica que elas tenham recebido a classificação SA. Atribuir o valor zero aos “NaN”s faz sentido nessa análise pois não estamos preocupados com as galáxias SA, e sim com as SAB e SB (i.e., queremos ver quantas tem barra em relação a todas as outras que possuem classificação morfológica e não tem barra, não nos limitando apenas as que recebem valor em F).

A função devolve as seguintes informações: Número total da amostra de entrada; quantas estão dentro do critério de tipo morfológico determinado na entrada; quantas destas possuem barra; quantas possuem inclinação menor que 65 graus; e destas quantas possuem barra; das com critério de inclinação, quantas estão dentro do corte de massa determinado na entrada; e destas, quantas possuem barra.

A função também gera 6 histogramas (todos considerando amostra dentro do tipo morfológico determinado na entrada): distribuição dos valores da coluna “F” (i.e., famílias, ilustra quantas possuem barra; SA=0.0, SAB=0.5, SB=1.0); distribuição dos valores de tipo morfológico, destacando as galáxias barradas (com critério inclinação menor que 65 graus); e repete os mesmos dois histogramas, só que com com critérios de inclinação menor que 65 graus; e depois com critério de massa determinado na entrada e inclinação menor que 65 graus.