



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

DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE HUBBLE E IDADE DO UNIVERSO ATRAVÉS DA OBSERVAÇÃO DE LENTES GRAVITACIONAIS

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/INPE/CNPq)

Alex Oliveira Rocha (Mackenzie, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: rocha.alex.oliveira@gmail.com

Luiz Claudio Lima Botti (CRAAM, Centro de Radioastronomia e Astrofísica
Mackenzie, Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana
Mackenzie/INPE/DAS/CEA/MCTIC e ROI, Orientador)
E-mail: luizquas@yahoo.com.br

Julho de 2019

DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE HUBBLE E IDADE DO UNIVERSO ATRAVÉS DA OBSERVAÇÃO DE LENTES GRAVITACIONAIS

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a determinação da constante de Hubble e a Idade do Universo através da observação de Lentes Gravitacionais. Fenômeno previsto por Albert Einstein em 1915 na Teoria da Relatividade Geral – comprovada em 1919 durante um eclipse total do Sol, observado em Sobral, no Ceará (Eddington, 1920).

Os desvios dos raios de luz podem gerar imagens múltiplas de uma fonte ou até mesmo distorcer sua forma. Uma Lente Gravitacional é formada devido a uma distorção no espaço-tempo causada pela presença de um corpo de grande massa entre um objeto e o observador.

Este projeto iniciado em março de 2019, tem como objetivo utilizar-se desta variabilidade utilizando dados obtidos de curvas de luz para determinar atrasos de sinais entre componentes de diversos quasares utilizando algoritmos e técnicas matemáticas.

Os sistemas que foram estudados neste projeto foram os quasares-lentes: HE0435-1223, HS 2009+1914, RX J1131-1231, SDSS J1001+5027 e SDSS J1206+4332.

Pode-se assim, calcular a constante de Hubble sabendo-se que a mesma é proporcional a velocidade de dispersão da galáxia-lente e inversamente proporcional ao atraso de sinais de suas componentes. Dessa forma, sabendo-se o atraso entre os sinais A e B de duas componentes ou mais dos quasares, pode-se calcular a constante de Hubble. Como o inverso da mesma possui dimensão de tempo, pode-se desta maneira estimar a idade do universo.

DETERMINATION OF THE HUBBLE CONSTANT AND AGE OF THE UNIVERSE THROUGH THE OBSERVATION OF GRAVITATION LENSES

ABSTRACT

This work aims to determine the Hubble constant and the age of the universe through the observation of gravitational lenses. Phenomenon predicted by Albert Einstein in 1915 in The Theory of General Relativity - proved in 1919 during a total eclipse of the Sun, observed in Sobral, Ceará (Eddington, 1920).

Deviations from light rays can generate multiple images of a source or even distort its shape. A Gravitational Lens is formed due to a distortion in spacetime caused by the presence of a mass body between an object and the observer.

This project, started in March 2019, aims to use this variability using data obtained from light curves to determine signal delays between components of various quasars using algorithms and mathematical techniques.

The systems that were studied in this project were the gravitational lens: HE0435-1223, HS 2009 + 1914, RX J1131-1231, SDSS J1001 + 5027 and SDSS J1206 + 4332.

Thus, the Hubble constant can be calculated knowing that it is proportional to the dispersion velocity of the lens galaxy and inversely proportional to the signal delay of its components. Thus, knowing the delay between signals A and B of two or more quasar components, the Hubble constant can be calculated. Since the inverse of it has a time dimension, one can thus estimate the age of the universe.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, ao meu orientador Luiz Claudio Lima Botti pela amizade, compreensão, confiança, orientação, parceria e sempre estar a disposição para me ajudar contribuindo para o desenvolvimento do projeto e ao meu amadurecimento acadêmico.

Aos colegas e pesquisadores do Centro de Radioastronomia do Mackenzie (CRAAM) que contribuíram transmitindo seus conhecimentos oriundos de suas áreas de atuação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela oportunidade e fomento durante o período de vigência do contrato junto à instituição.

À Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM), pelo espaço e a infraestrutura cedida para o desenvolver do projeto.

Ao projeto COSMOGRAIL, pelo fornecimento dos dados que foram utilizados nesta pesquisa publicamente.

À minha família, pelo amor, incentivo e apoio incondicional durante o desenvolvimento do projeto.

À minha namorada – Letícia, por sempre me apoiar e ajudar durante todos os momentos.

Finalmente, agradeço ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/PIBIC) pela oportunidade cedida.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Lista de Figuras

<i>Figura 1: Efeito Lente Gravitacional</i>	9
<i>Figura 2: HE0435-1223</i>	11
<i>Figura 3: HS 2209+1914</i>	11
<i>Figura 4: RX J1131-1231</i>	12
<i>Figura 5: SDSS J1001+5027 e SDSS J1206+4332</i>	12
<i>Figura 6: Análise das Curvas de Luz do HE0435-1223</i>	20
<i>Figura 7: Análise das Curvas de Luz do HS 2209+1914</i>	24
<i>Figura 8: Análise das Curvas de Luz do RX J1131-1231</i>	28
<i>Figura 9: Análise das Curvas de Luz do SDSS J1001+5027</i>	30
<i>Figura 10: Análise das Curvas de Luz do SDSS J1206+4332</i>	34

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1: Comparação entre as componentes do RX J1131-1231</i>	28
<i>Tabela 2: Resultados</i>	35

Lista de Gráficos

<i>Gráfico 1: HE0435-1223</i>	15
<i>Gráfico 2: HS 2209+1914</i>	15
<i>Gráfico 3: RX J1131-1231</i>	16
<i>Gráfico 4: SDSS J1001+5027</i>	16
<i>Gráfico 5: SDSS J1206+4332</i>	17
<i>Gráfico 6: Componente A do HE0435-1223</i>	18
<i>Gráfico 7: Componente B do HE0435-1223</i>	18
<i>Gráfico 8: Componente C do HE0435-1223</i>	19
<i>Gráfico 9: Componente D do HE0435-1223</i>	19
<i>Gráfico 10: Análise das Curvas de Luz do HE0435-1223</i>	20
<i>Gráfico 11: Componente A do HS 2209+1914</i>	22
<i>Gráfico 12: Componente B do HS 2209+1914</i>	23
<i>Gráfico 13: Análise das Curvas de Luz do HS 2209+1914</i>	23
<i>Gráfico 14: Componente A do RX J1131-1231</i>	25
<i>Gráfico 15: Componente B do RX J1131-1231</i>	25
<i>Gráfico 16: Componente C do RX J1131-1231</i>	26
<i>Gráfico 17: Componente D do RX J1131-1231</i>	26
<i>Gráfico 18: Análise das Curvas de Luz do RX J1131-1231</i>	27
<i>Gráfico 19: Componente A do SDSS J1001+5027</i>	29
<i>Gráfico 20: Componente B do SDSS J1001+5027</i>	29
<i>Gráfico 21: Análise das Curvas de Luz do SDSS J1001+5027</i>	30

<i>Gráfico 22: Componente A do SDSS J1206+4332</i>	<i>32</i>
<i>Gráfico 23: Componente B do SDSS J1206+4332</i>	<i>32</i>
<i>Gráfico 24: Análise das Curvas de Luz do SDSS J1206+4332</i>	<i>33</i>

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO	8
1.1 OBJETIVOS	10
1.2 LENTES GRAVITACIONAIS ESTUDADAS	11
2.0 METODOLOGIA	13
2.1 MÉTODO DE ANÁLISE DAS CURVAS DE LUZ	14
3.0 CURVAS DE LUZ	15
3.1 HE0435-1223	18
3.2 HS 2209+1914	22
3.3 RX J1131-1231	25
3.4 SDSS J1001+5027	29
3.5 SDSS J1206+4332	32
4.0 RESULTADOS	35
5.0 CONCLUSÕES	36
6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

1.0 INTRODUÇÃO

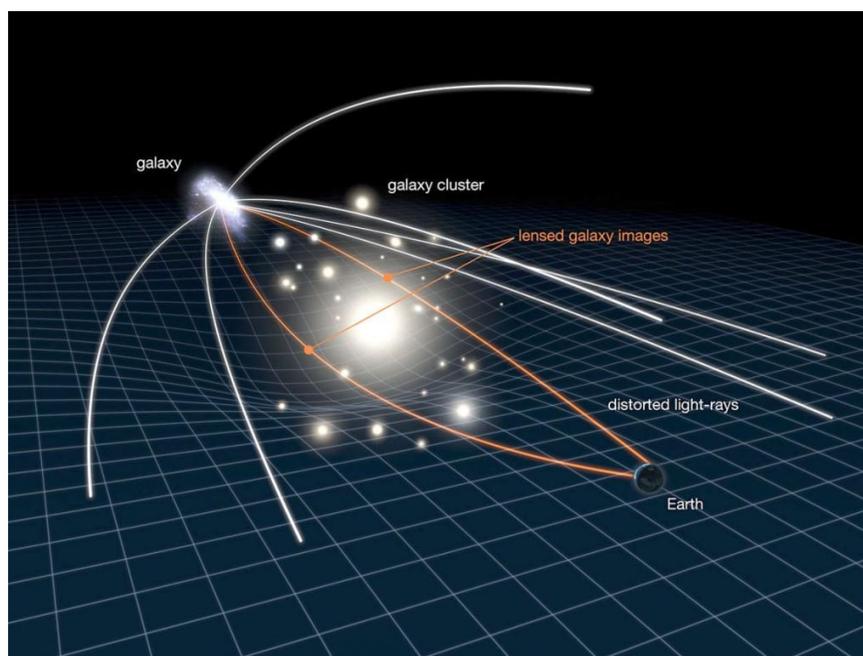
Em 1783 foi mencionado o fato de que a gravidade poderia interferir num raio de luz. Este fenômeno foi discutido por John Michell (geólogo britânico e astrônomo) numa carta endereçada a Henry Cavendish (físico e químico britânico). Michell em 1784 estudou hipoteticamente o caso de um objeto celeste compacto e denso que poderia impedir que a luz escapasse da sua superfície. Ele pensou em um objeto invisível, mas que poderia ser identificado pelo movimento das estrelas próximas a ele. Laplace em 1795, com um intervalo de dez anos após a carta de John Michell, sugeriu a ideia de objetos com alta gravidade capturando a luz. A Teoria de Newton já contemplava a ideia de uma estrela escura, com altíssima gravidade, que levou ao conceito atualmente aceito de buraco negro. Em 1784 Cavendish calculou a deflexão da luz por um corpo tendo por base a Teoria Corpuscular da Luz e a Teoria Newtoniana. Em 1804 John Soldner calculou o desvio de posição angular de uma estrela (Soldner, 1804). O desvio calculado foi de aproximadamente $0,84''$. Valores bem próximos foram calculados por Cavendish e por Einstein (1911) para o caso da interação da luz de uma estrela com o Sol. Após o desenvolvimento da Relatividade Geral em 1915, Einstein (1936) refez seus cálculos e chegou ao valor aproximado de $1,7''$ para o desvio de um raio de luz de uma estrela pelo campo gravitacional do Sol. A.S. Eddington foi um dos poucos a entender a Teoria da Relatividade no início do século passado e em 1919 observou o eclipse solar em Sobral (Ceará) e comprovou que Einstein estava certo, calculando as posições das estrelas no momento do eclipse e comparando com as posições à noite (Eddington, 1920a e 1920b). No eclipse as estrelas apresentaram-se mais afastadas uma das outras. O termo “Lente” foi proposto primeiramente por Oliver Lodge em 1919, para o desvio gravitacional da luz (Lodge, 1919). Em 1912, Einstein já tinha concebido a ideia que um corpo massivo poderia defletir a luz proveniente de um objeto mais afastado, mas não a publicou. Somente em 1936 o fez a pedido de Rudi W. Mandl (Einstein, 1936). Em 1924, Orest Danilovich Chwolson concebeu a ideia de que duas estrelas perfeitamente alinhadas vistas por um observador também alinhado a elas, veria a imagem de um anel entorno da estrela que estaria no primeiro plano. Esses anéis foram chamados “Anéis de Chwolson”, mais tarde denominados “Anéis de Einstein”. Fritz Zwicky percebeu em 1930 que estes efeitos poderiam também ocorrer em grandes distâncias e neste caso galáxias poderiam ser compactas o suficiente para encurvar a luz de objetos situados a distâncias ainda maiores. Zwicky sugeriu que aglomerados de galáxias poderiam ser lentes gravitacionais. Somente em 1979 este efeito foi observado. (Zwicky, 1937).

Na década de sessenta a ideia de lentes gravitacionais ressurgiu e 3 pesquisadores independentemente, Yu.G.Klimov, S.Liebes e S.Refsdal analisaram o efeito de galáxias funcionarem como lentes para outras galáxias. Estudaram o efeito de lente de estrelas em estrelas, de estrelas de aglomerados globulares em estrelas da Via Láctea, e também considerou-se a luz de uma supernova em uma galáxia distante (Klimov, 1963). A luz dessa supernova pode seguir trajetos diferentes para o observador e haveria uma diferença de tempo entre os dois trajetos até o atingir. Daí pensou-se que a diferença de tempo entre estes dois trajetos poderia ser capaz de determinar a constante de Hubble e a massa da galáxia (Liebes (1964) e Refsdal (1964 a e b). Cooke e Kantowski (1975) elaboraram uma expressão geral para o tempo de atraso para várias imagens.

Lente gravitacional é um fenômeno no qual trajetórias de luz vindas de uma fonte são encurvadas por um potencial gravitacional localizado entre a fonte e o observador. Embora as imagens apareçam distintas da fonte, a Teoria da Relatividade Geral mostra uma clara relação entre as propriedades das imagens e a distribuição de massa das lentes. Este fato tem possibilitado o uso de lentes gravitacionais em Cosmologia, principalmente para calcular a distribuição de massa do Universo e estimar distâncias cosmológicas. O efeito de lente gravitacional tem sido estudado desde 1937 (Tikhov, 1937). Nesta época Tikhov estudou o efeito causado pela deflexão gravitacional da luz de uma estrela “S” no campo gravitacional de outra estrela “B” (“S” está atrás da estrela “B” mas próxima à linha de base). Tikhov (1937) mostrou que um aumento considerável da luminosidade aparente de “S” poderia ser possível.

A Figura 1 mostra um campo gravitacional causado por um aglomerado de galáxias (Galaxy Cluster) que curva os raios de luz oriundos de uma outra (X) que situa-se atrás do aglomerado de galáxias em relação ao observador, causando um efeito de múltiplas imagens da galáxia X.

Figura 1: Efeito Lente Gravitacional



Fonte: NASA/ESA

O efeito das Lentes Gravitacionais pode ocorrer em todas as escalas - de aglomerados de galáxias até pequenas estrelas e planetas, até mesmo ocorre quando raios de luz passam perto de nossos próprios corpos, porém este efeito é tão pequeno que é difícil de se medir.

1.1 OBJETIVOS

O presente projeto de pesquisa busca verificar qual é o comportamento temporal (curvas de luz) de diversos quasares candidatos a sistemas de lentes gravitacionais em diversas frequências do espectro eletromagnético. Mais especificamente, analisar qual seria a variabilidade de cada imagem-lente de um sistema, se existe correlação entre possíveis eventos e qual a importância de uma lente gravitacional para a Cosmologia.

Foram estudadas diversas curvas de luz associadas às imagens-lentes nesses sistemas de lentes gravitacionais e determinado o atraso entre os sinais de duas ou mais componentes utilizando-se algoritmos computacionais.

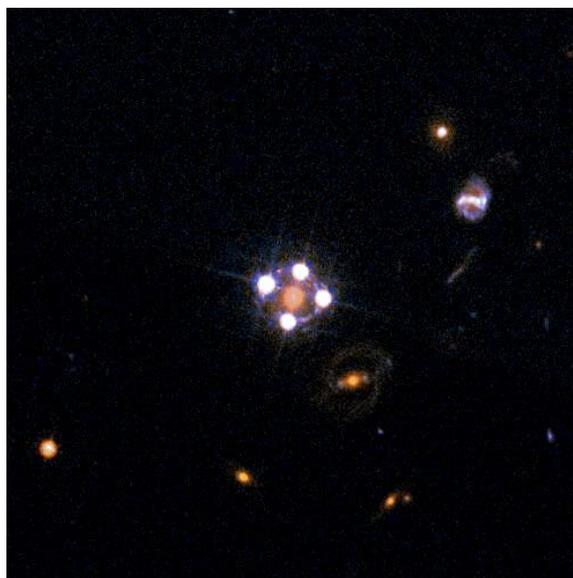
Do conhecimento deste atraso e da velocidade de dispersão da galáxia-lente foi calculada a constante de Hubble. Conhecendo-se a mesma foi possível estimar a idade do Universo.

1.2 LENTES GRAVITACIONAIS ESTUDADAS

As lentes gravitacionais estudadas foram:

HE0435-1223: Localizada no centro da Figura 2, está entre as cinco lentes gravitacionais mais estudadas atualmente. A galáxia em primeiro plano cria quatro imagens quase uniformemente distribuídas do quasar distante em torno dele.

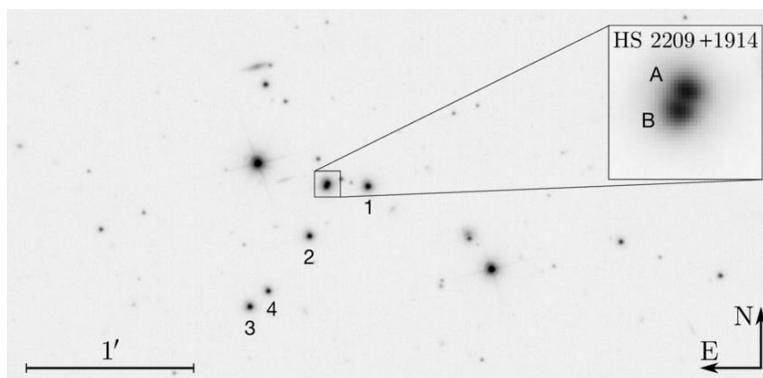
Figura 2: HE0435-1223



Fonte: ESA/Hubble, NASA, Suyu et al.

HS 2209+1914: Localizada na Figura 3, é uma lente gravitacional que cria duas imagens do quasar distante.

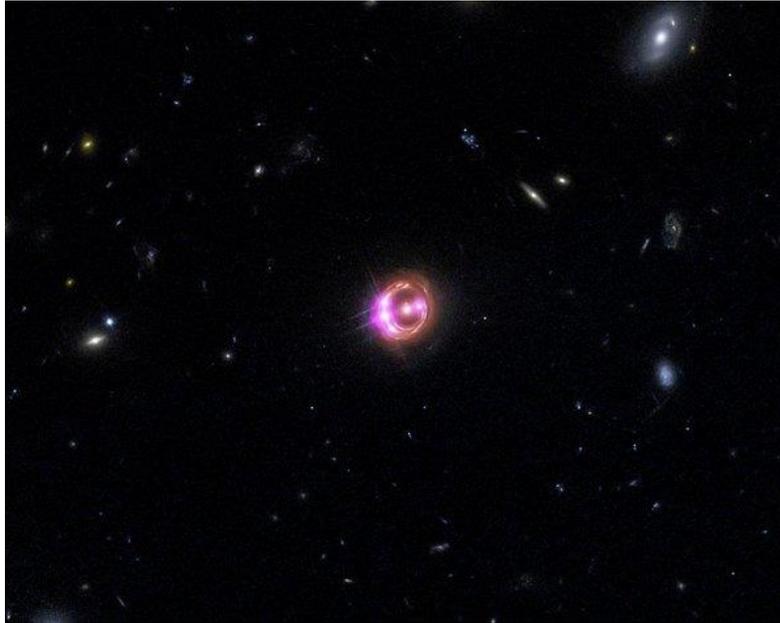
Figura 3: HS 2209+1914



Fonte: Mercator Telescope/Cosmograil

RX J1131-1231: É um distante buraco negro supermaciço contendo um quasar localizado a cerca de 6 bilhões de anos luz da Terra na constelação Taça. Pode-se observar este objeto no centro da Figura 4, onde quatro imagens foram criadas em torno do quasar distante.

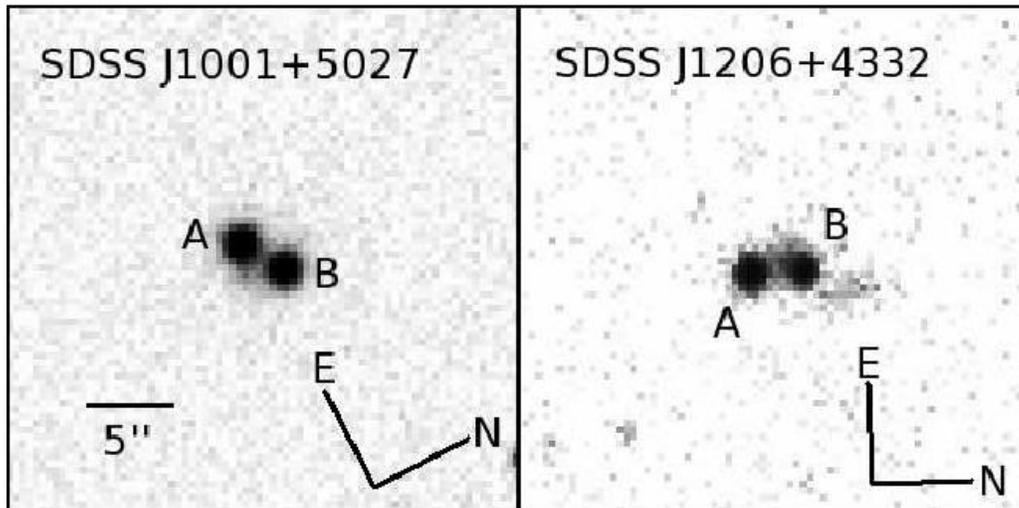
Figura 4: RX J1131-1231



Fonte: NASA

SDSS J1001+5027 e SDSS J1206+4332: Localizada na Figura 5, são lentes gravitacionais que criam duas imagens do quasar distante.

Figura 5: SDSS J1001+5027 e SDSS J1206+4332



Fonte: Mercator Telescope/Cosmograil

2.0 METODOLOGIA

A primeira tentativa para determinar atrasos de sinais vindo de componentes de lentes gravitacionais aconteceu em 1984 (Florentin-Nielsen,1984) utilizando um único telescópio. O atraso calculado foi de aproximadamente 1,5 anos para o quasar 0957+561 – primeira lente gravitacional descoberta. Porém os dados estavam muito ruidosos para se levar em conta a determinação daquele atraso. No mesmo ano outra curva de luz foi publicada (Schild e Weekes, 1984) onde foi notada uma clara indicação de variabilidade. Em 1986 foi estimado um atraso de aproximadamente 1,03 anos (Schild e Cholfin,1986). Outros trabalhos mostraram um atraso de cerca de 415 dias ou seja cerca de 1,14 anos (Vanderriest et al., 1986 e Schild,1990).

Segundo Falco, Gorenstein e Shapiro, 1990 a relação entre o atraso de sinais vindo de duas componentes A e B do quasar 0957+561 (exemplo deste atraso: ~1 ano), a velocidade de dispersão da galáxia-lente (exemplo: ~390 km/s) e a constante de Hubble (H_0) é dada pela Equação 1.

Equação 1: Constante de Hubble

$$H_0 = \frac{V_d(90 \pm 20)}{\Delta T}$$

Onde “ V_d ” é a velocidade de dispersão da galáxia-lente e “ ΔT ” é o atraso no tempo das componentes. A dimensão de H_0 é Km/s/Mpc.

Dessa forma sabendo-se o atraso entre os sinais A e B pode-se calcular a constante de Hubble. Para isso um quasar tem de ser observado em um período longo de tempo (cerca de 10 anos) para que a variabilidade das componentes possam ser registradas e o atraso possa ser calculado.

Sabendo-se que o inverso da constante de Hubble tem dimensão de tempo, pode-se calcular a idade do Universo. Considerando-se que galáxias se afastam uma das outras com velocidades constantes “ v ”, supõe-se que elas estavam juntas num tempo “ d/v ” no passado, o que pode ser traduzido pela Equação 2.

Equação 2: Idade do Universo

$$\text{Idade do Universo} = \frac{1}{H_0}$$

Na verdade, a consideração de velocidade constante não é a correta e somente foi usada neste projeto para ter uma estimativa da idade do universo a partir do conhecimento da constante de Hubble.

Foi realizada uma pesquisa sobre os quasares que poderiam ser candidatos à Lentes Gravitacionais e foram encontrados cinco possíveis sistemas já citados no Capítulo 1.2. Os dados para o desenvolvimento da pesquisa foram obtidos através do Centro de Dados

Astronômicos de Estrasburgo (CDS). Com os dados em mãos, pode-se plotar a magnitude relativa de cada componente das lentes gravitacionais em função dos dias para verificar se há variabilidades; caso haja, observar possíveis ocorrências de explosões na fonte. Desta comparação entre os objetos foram extraídas as diferenças de tempo entre as estruturas observadas nas duas ou mais curvas de luz.

Inicialmente, planejava-se a realização de observações no rádio observatório de Itapetinga mensalmente, para se obter a densidade de fluxo de certas fontes utilizando a técnica de varreduras, com durações de 20,0 segundos e cada observação com 30 varreduras, porém, a antena ainda está em manutenção.

Para a análise das curvas de Luz o Software utilizado foi o MATLAB, onde foram plotados os dados obtidos do Observatório de Estrasburgo e analisados utilizando métodos de análises matemáticas e estatísticas, como regressão, interpolação e interpolador harmônico de Fourier.

2.1 MÉTODO DE ANÁLISE DAS CURVAS DE LUZ

Inicialmente, os dados seriam analisados utilizando-se o algoritmo LSTM, que é uma arquitetura artificial de rede neural recorrente (RNN) utilizada no campo de Deep Learning.

As redes LSTM são adequadas para classificar, processar e fazer previsões com base em dados de séries temporais, pois pode haver defasagens de duração desconhecida entre eventos importantes em uma série temporal.

Nos valores obtidos do Observatório de Estrasburgo, havia uma defasagem nos dados para poder observar o comportamento das curvas de luz em relação às explosões que ocorriam nas fontes, e estes eventos são cruciais para determinar a diferença de tempo entre as explosões das componentes da fonte. Portanto, o algoritmo LSTM seria de extrema importância para determinar estes pontos faltantes nas séries.

Porém, no pouco tempo de pesquisa vigente, este algoritmo não produziu bons resultados quanto deveria, logo, para a determinação do “atraso no tempo” entre as componentes das lentes gravitacionais foi utilizado uma técnica matemática com aplicação da Série de Fourier. Isto é, para cada componente de cada quasar candidato à lente gravitacional foi ajustado uma função harmônica para os conjuntos de dados buscando-se o maior coeficiente quadrático de regressão (R^2) possível, uma vez que este coeficiente informa o percentual de erro do polinômio ajustado que é removido utilizando o ajuste que escolhemos.

Para fins de comparação e determinação da diferença de tempo das curvas de luz, foram plotadas as componentes em um só gráfico e conhecendo-se o polinômio ajustado pelo método de Fourier, pode-se determinar os valores dos pontos de máxima magnitude, ou seja, possíveis explosões na fonte. Comparando-se a defasagem de dias entre a explosão da componente A da fonte com a componente B, e com as demais componentes caso haja, pode-se assim determinar a defasagem de tempo entre os picos de magnitude.

O valor da velocidade de dispersão de cada galáxia-lente foi obtido através da pesquisa em referências na literatura.

3.0 CURVAS DE LUZ

Utilizando os dados obtidos através das observações do Centro de Dados Astronômicos de Estrasburgo (CDS), pode-se plotar a magnitude relativa de cada fonte em função dos dias de observação.

Gráfico 1: HE0435-1223

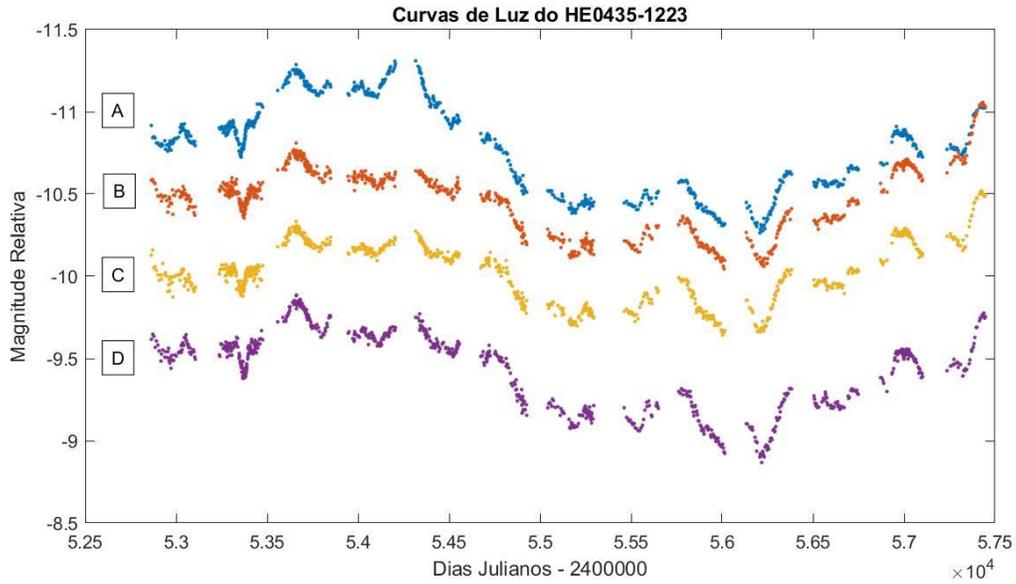


Gráfico 2: HS 2209+1914

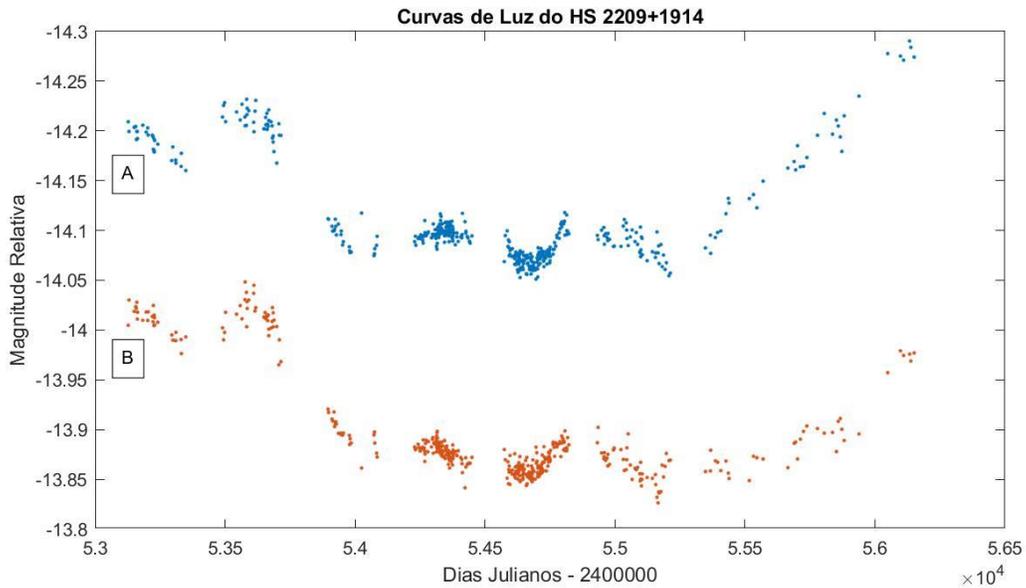


Gráfico 3: RX J1131-1231

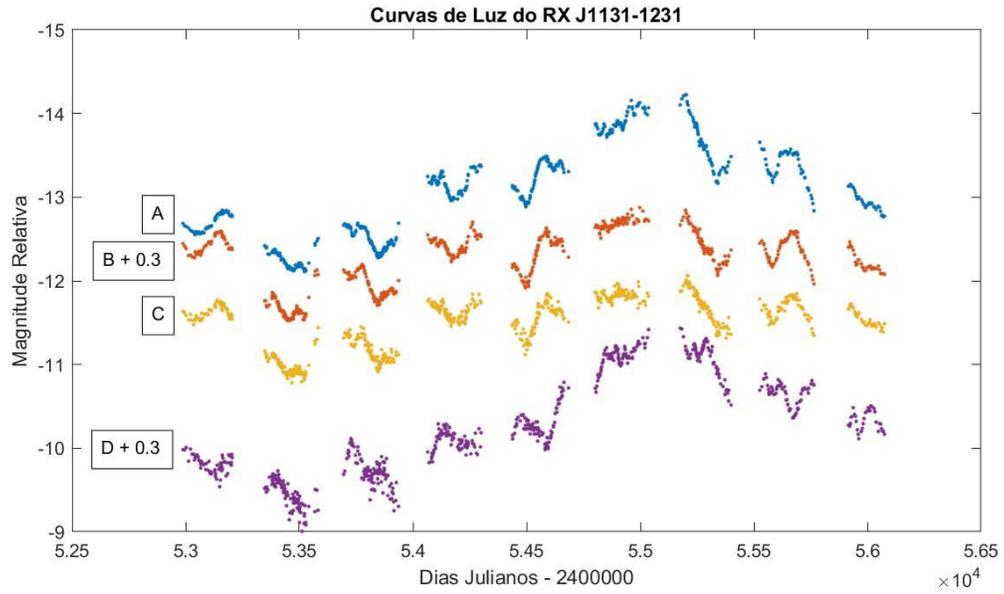


Gráfico 4: SDSS J1001+5027

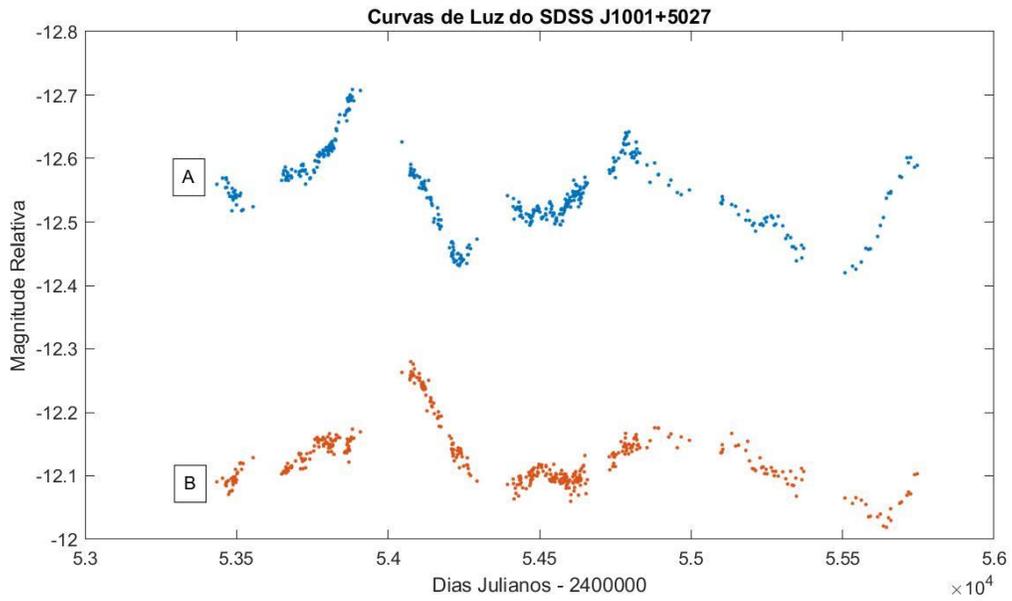
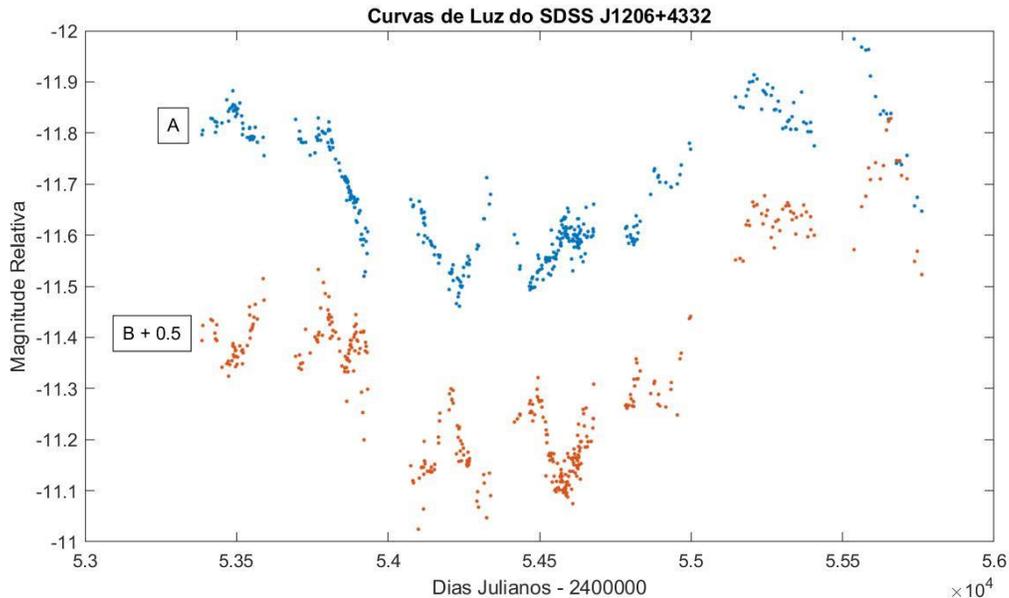


Gráfico 5: SDSS J1206+4332



Dos Gráficos 1,2,3,4 e 5 pode-se observar o comportamento da luz oriunda destes objetos e suas componentes e também é possível notar que há picos de magnitude, ou seja, prováveis explosões nas fontes.

No eixo das abcissas utilizou-se uma técnica onde se subtrai 2400000 do dia Juliano, caso contrário, não seria uma boa maneira de apresentar os dados no eixo, isto é, o início das observações do Observatório de Estrasburgo começou no dia juliano $52864+2400000$, totalizando 2452864, que no calendário gregoriano utilizado normalmente é o dia 12 de agosto de 2003 para a lente gravitacional HE0435-1223.

No total, foram 13 anos de observações de cada candidato a lente que estão nos Gráficos 1,2,3,4 e 5, de 2003 a 2016, devido a isto pode-se observar uma variabilidade periódica nos dados e conseqüentemente, adotar métodos de previsão destes dados para estimar os valores dos pontos faltantes.

Na próxima seção serão apresentados os gráficos para cada candidato à lente gravitacional juntamente com suas componentes e utilizando-se a série harmônica de Fourier pode-se fazer uma previsão nos intervalos das componentes, determinando assim um ajuste razoável para cada conjunto de dados.

3.1 HE0435-1223

Utilizando-se a série harmônica de Fourier pode-se determinar os ajustes para cada componente A,B,C e D da lente gravitacional HE0435-1223. Os ajustes obtidos estão nos Gráficos 6,7,8 e 9.

Gráfico 6: Componente A do HE0435-1223

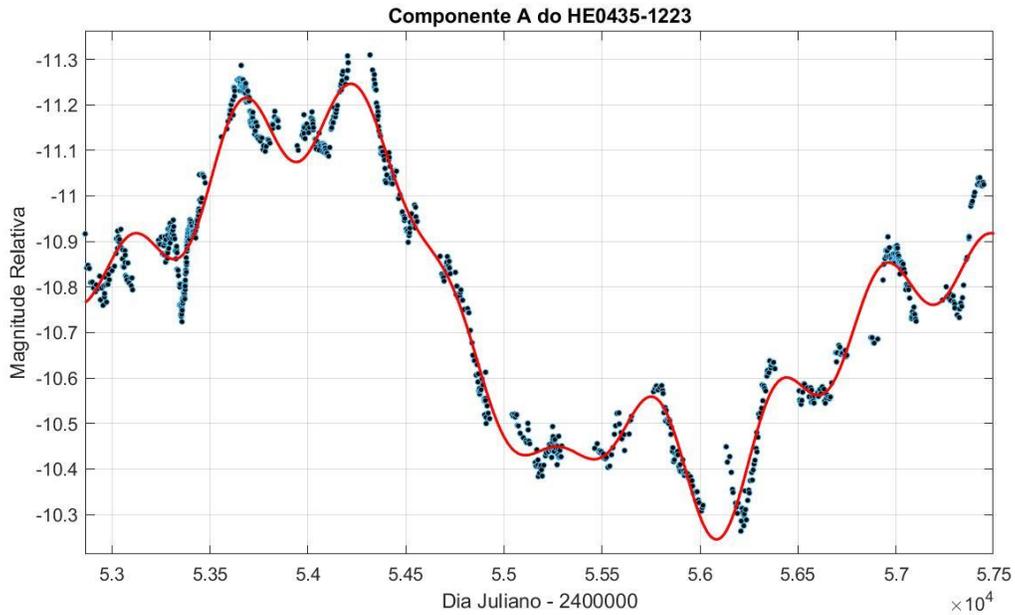


Gráfico 7: Componente B do HE0435-1223

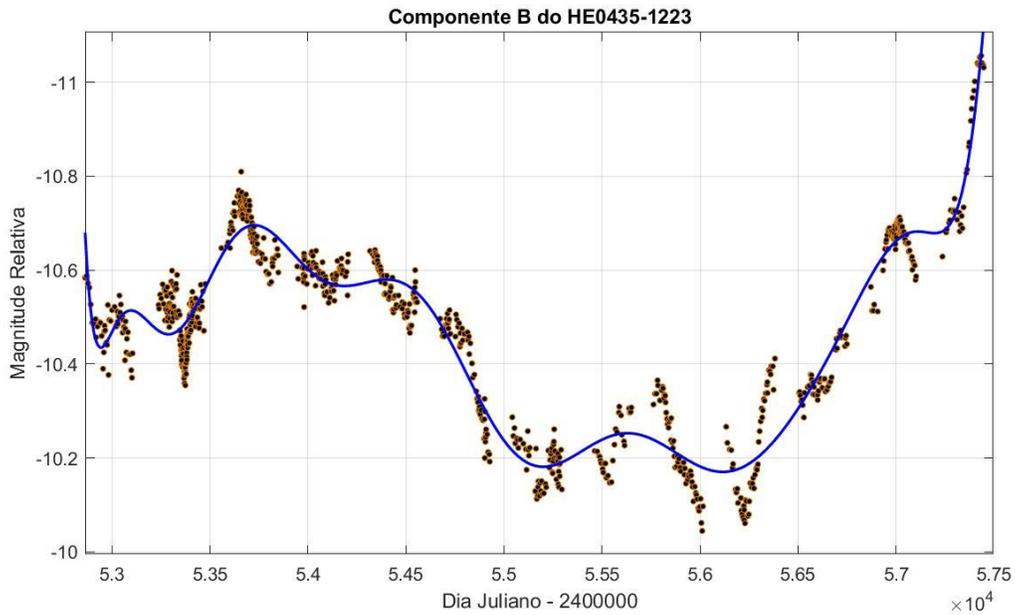


Gráfico 8: Componente C do HE0435-1223

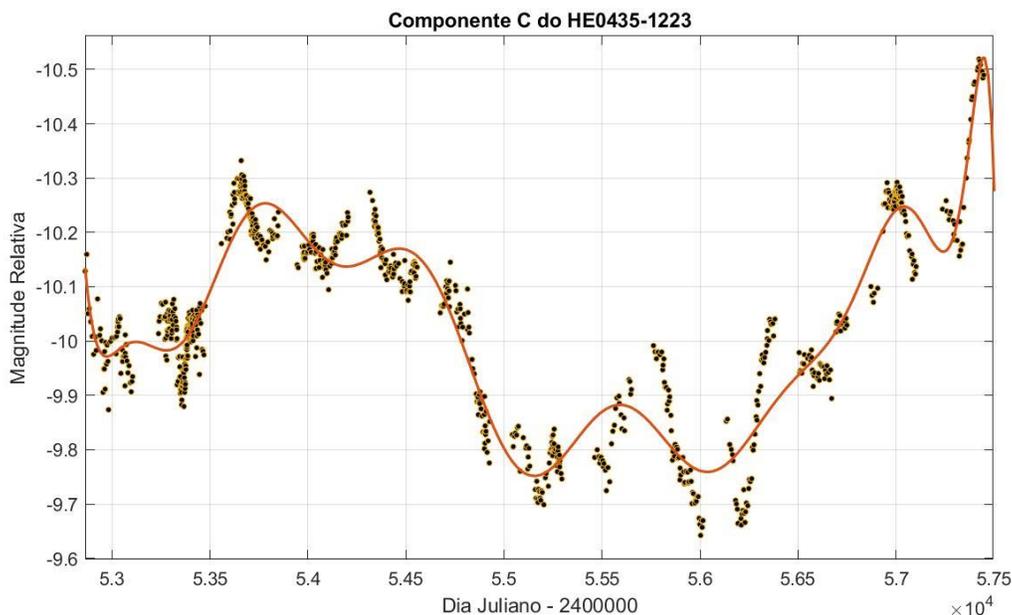
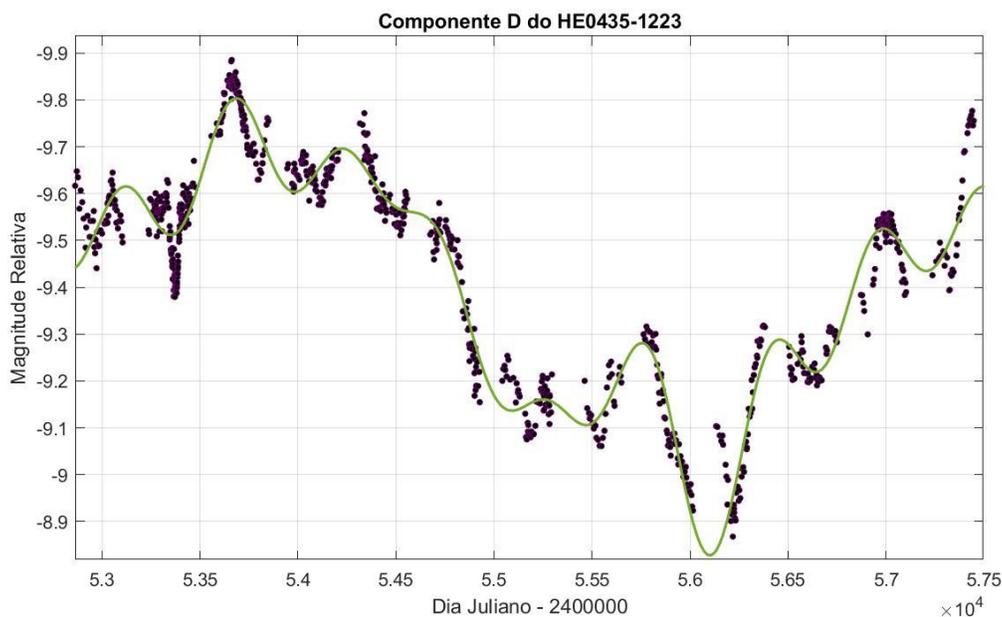


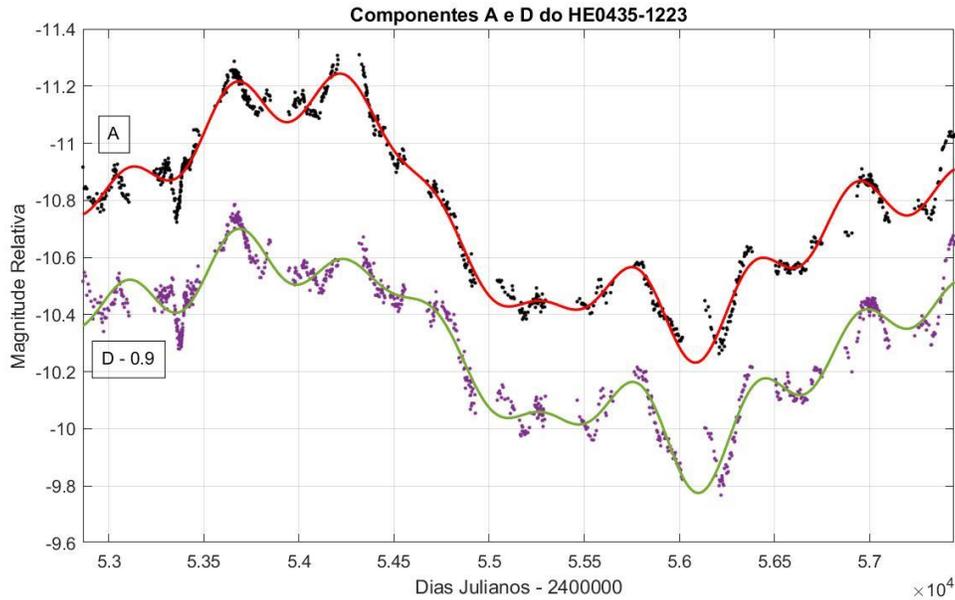
Gráfico 9: Componente D do HE0435-1223



Para a Componente A do HE0435-1223, o ajuste teve o seu coeficiente de regressão quadrático, isto é, o valor de R^2 de 0,9721, ou seja, cerca de 97,21% dos erros do ajuste em relação aos pontos originais foram eliminados utilizando este método para esta componente. Já a Componente B apresentou um valor para este coeficiente um pouco menor, de 0,9244, a Componente C apresentou um valor de 0,8996 e finalmente a Componente D foi calculado o valor do R^2 igual à 0,9465. Logo, pode-se concluir que os ajustes em geral são bons, porém para fins de comparação para a determinação da

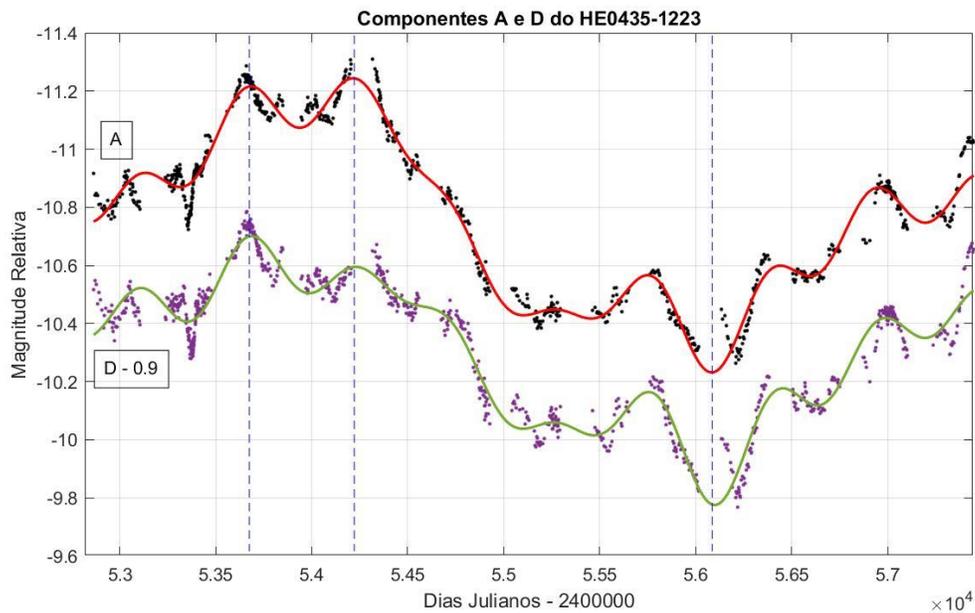
defasagem de tempo entre os picos das fontes será levada em consideração a componente A e D da lente gravitacional HE0435-1223, uma vez que o ajuste para os mesmos apresentaram ser os melhores em relação ao B e o C.

Gráfico 10: Análise das Curvas de Luz do HE0435-1223



O próximo passo é utilizar o software para marcar os picos de máximo e de mínima magnitude relativa da curva de luz ajustada e posteriormente utilizando o polinômio que o algoritmo determinou, calcular o dia no qual ocorreu estes picos para cada componente.

Figura 6: Análise das Curvas de Luz do HE0435-1223



Pode-se notar que há diferenças dos picos de máximo e de mínimo das curvas de luz, e para determinar a diferença de dias entre estes valores foi utilizado os polinômios ajustados pelo algoritmo e calculando-se assim a diferença entre os picos de $(8,0 \pm 0,8)$ dias. Para a determinação da velocidade de dispersão da galáxia que está sofrendo o efeito de lente, foi realizado uma pesquisa na literatura e encontrado o Redshift da mesma como $Z = (1,693 \pm 0,103)$ (H0LiCOW Paper IV).

Pode-se ainda estimar a velocidade de dispersão da galáxia através da Equação 3.

Equação 3: Redshift para desvios pequenos ($z < 1$)

$$z = \frac{v}{c}$$

Se o objeto tiver um desvio para o vermelho muito grande, uma correção relativística deve ser realizada, que no caso será o que deve ser feito para estimar a velocidade de dispersão da galáxia, uma vez que segundo o H0LiCOW Paper IV, o desvio para o vermelho da galáxia que está sob o efeito de lente gravitacional do quasar HE0435-1223 é bem maior do que 1. A correção está representada na Equação 4.

Equação 4: Redshift para grandes desvios ($z > 1$)

$$z = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} - 1$$

Utilizando os resultados obtidos pelo ajuste e pela pesquisa na literatura em relação à velocidade de dispersão, pode-se utilizar a Equação 1 para estimar a Constante de Hubble por este método que foi realizado.

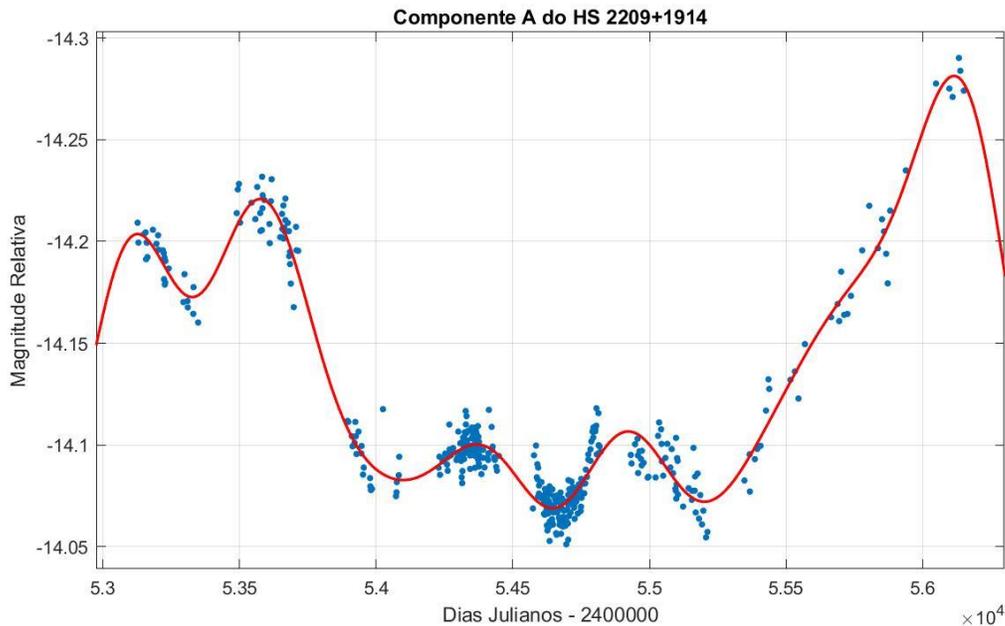
Portanto, utilizando-se o método que foi descrito e os valores obtidos, determina-se que a Constante de Hubble possui o valor de aproximadamente $H_0 = (71,6 \pm 4,7)$ Km/s/Mpc.

Consequentemente, segundo a Equação 2, pode-se estimar a idade do Universo utilizando-se a Constante de Hubble calculada através da lente gravitacional HE0435-1223, obtendo-se o valor para a Idade do Universo de $T_U = (4,18 \pm 0,02) \times 10^{17}$ segundos, isto é, a idade do Universo estimada através dos métodos descritos é de cerca de $T_U = (1,36 \pm 0,02) \times 10^{10}$ anos, ou seja, aproximadamente 13,6 bilhões de anos.

3.2 HS 2209+1914

De maneira análoga, a análise das curvas de Luz dessa lente gravitacional será feita por cada componente, analisando o seu coeficiente quadrático de regressão (R^2) e verificando se o polinômio ajustado pelo algoritmo é razoável para descrever o conjunto de dados, caso R^2 seja um número bom, isto é, o ajuste é fiel aos dados, poderá ser feita a comparação dos ajustes determinando-se assim a defasagem de tempo entre os valores de máximo e de mínimo da função ajustada.

Gráfico 11: Componente A do HS 2209+1914



Para o ajuste da Componente A do HS 2209+1914, obteve-se o coeficiente quadrático de regressão (R^2) com um valor de 0,968, isto é, 96,80% dos erros foram eliminados da regressão utilizando-se o ajuste dado no Gráfico 11. Logo, é possível dizer que o ajuste é razoável para o conjunto de dados da componente A desta lente gravitacional.

Para o ajuste do Gráfico 12, o coeficiente quadrático de regressão foi calculado que seu valor é de 0,9735. Logo, pode-se concluir que ambos os ajustes estão razoáveis para os conjuntos de dados das componentes A e B. Portanto, deve-se fazer a comparação entre os ajustes e determinar os valores de máximo e de mínimo dos mesmos, e por fim, comparar as curvas obtendo-se a diferença de tempo entre tais valores.

No Gráfico 13 pode-se comparar as curvas de luz entre as componentes A e B desta fonte. É notável que há uma diferença de tempo entre os picos de máxima e mínima magnitude relativa, os picos de máxima podem ser prováveis explosões na fonte. Logo, é feito uma comparação destes picos e calculando-se os valores no eixo da abcissa é possível calcular a defasagem de tempo entre os mesmos.

Gráfico 12: Componente B do HS 2209+1914

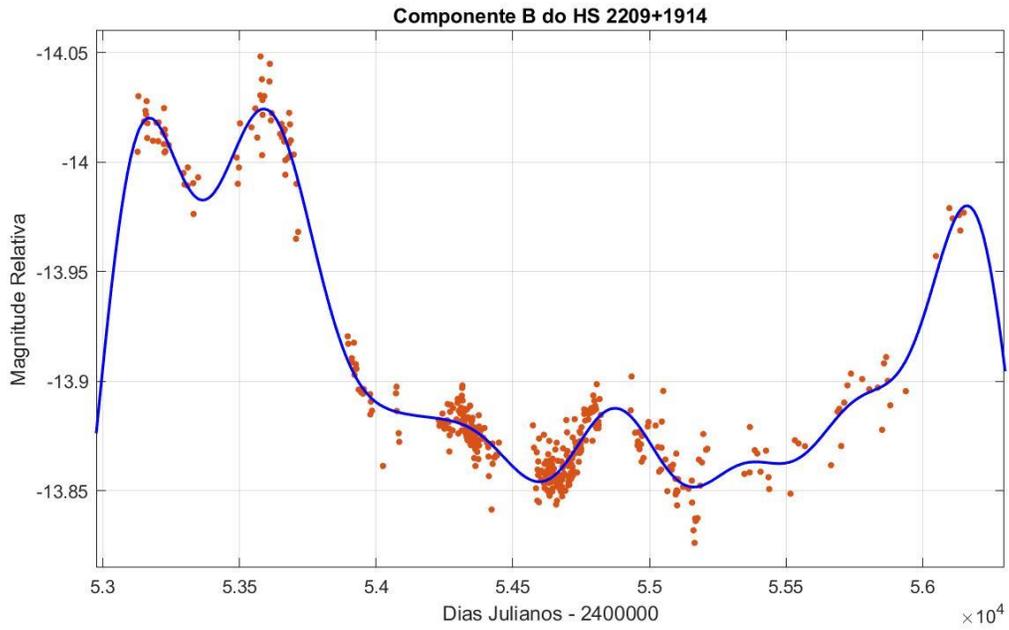
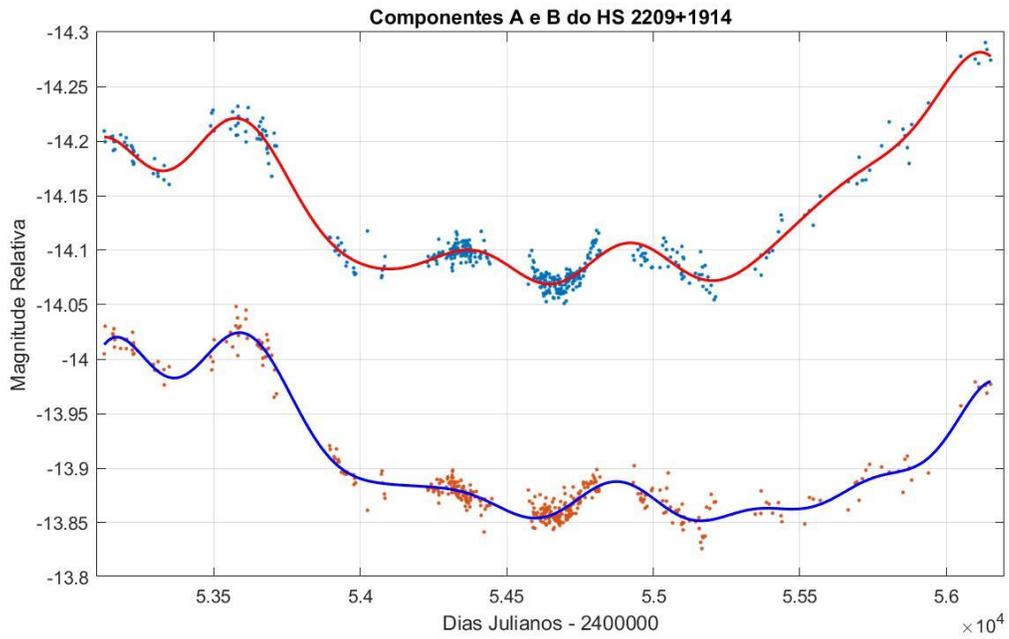
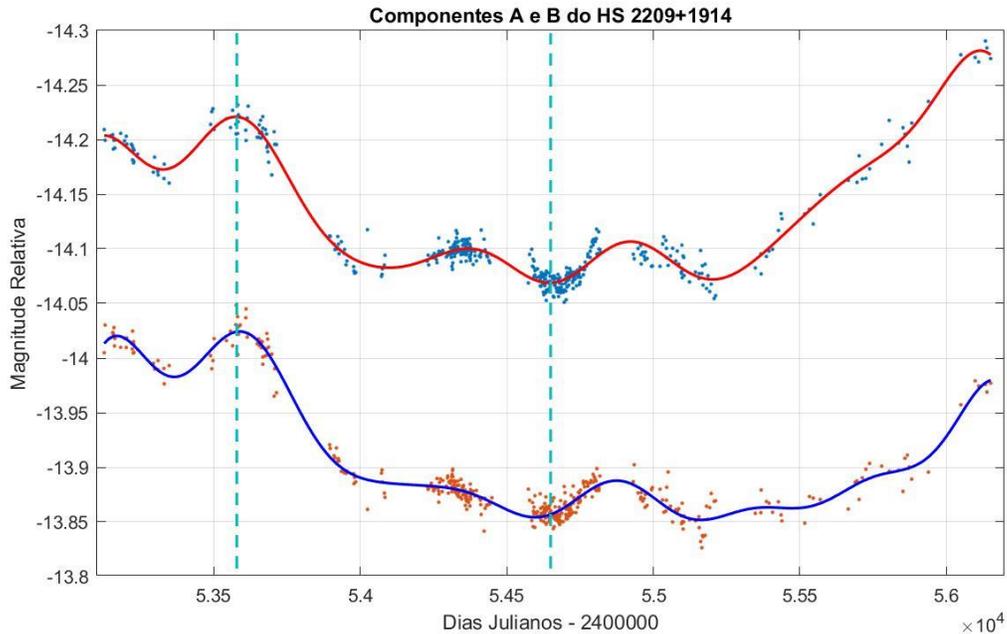


Gráfico 13: Análise das Curvas de Luz do HS 2209+1914



Realizando a análise descrita, tem-se a Figura 7.

Figura 7: Análise das Curvas de Luz do HS 2209+1914



É notável que há uma defasagem entre os valores de máximo e de mínimo nestas fontes, conseqüentemente, utilizando-se o software pode-se determinar qual é o valor desta diferença de tempo, e o mesmo resultou em $(21,56 \pm 3,40)$ dias.

O objeto que está sob o efeito de lente gravitacional deste quasar possui um Redshift de cerca 1,07 (*Fonte: CDS*), onde o intervalo de confiança não foi informado. Conseqüentemente, utilizando-se a Equação 1, pode-se estimar a constante de Hubble para esta fonte.

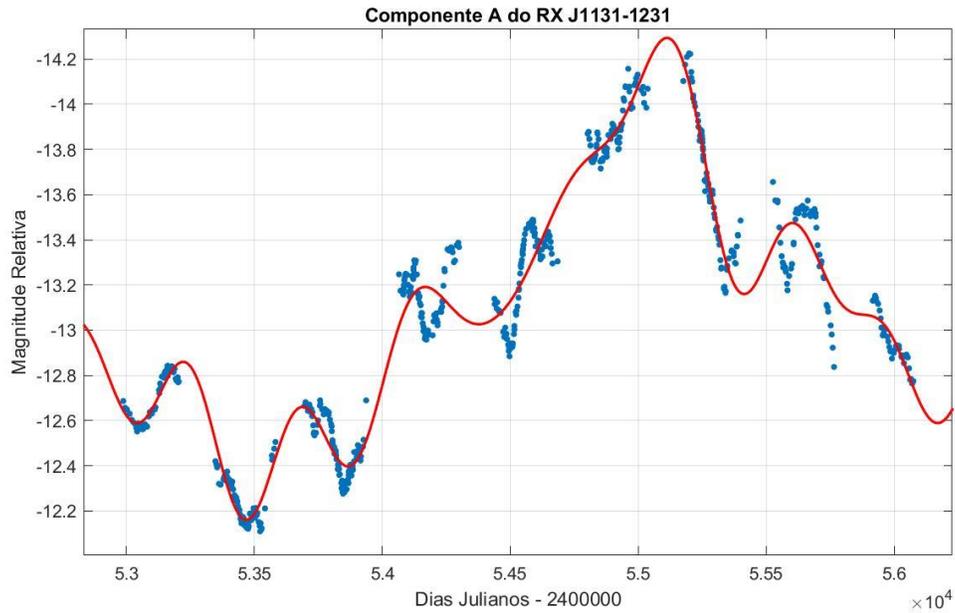
A constante de Hubble estimada utilizando os dados do HS 2209+1914 e o método que foi descrito é de $H_0 = (62,8 \pm 4,8)$ Km/s/Mpc.

Segundo a Equação 2, pode-se estimar a idade do Universo calculando o inverso da constante de Hubble, e este valor resultou em $T_U = (4,92 \pm 0,07) \times 10^{17}$ segundos, transformando em anos, a idade do Universo estimada por este método é de $T_U = (1,55 \pm 0,03) \times 10^{10}$ anos, ou seja, de aproximadamente 15.5 bilhões de anos.

3.3 RX J1131-1231

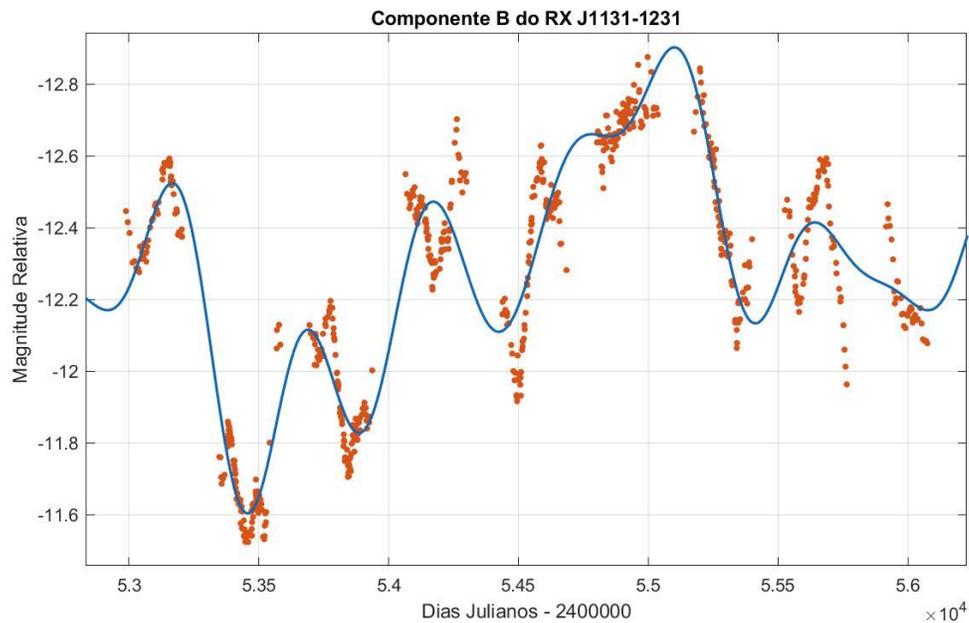
Para este objeto pode-se observar as curvas de luz ajustadas das componentes A, B, C e D nos Gráficos 14,15,16 e 17 respectivamente.

Gráfico 14: Componente A do RX J1131-1231



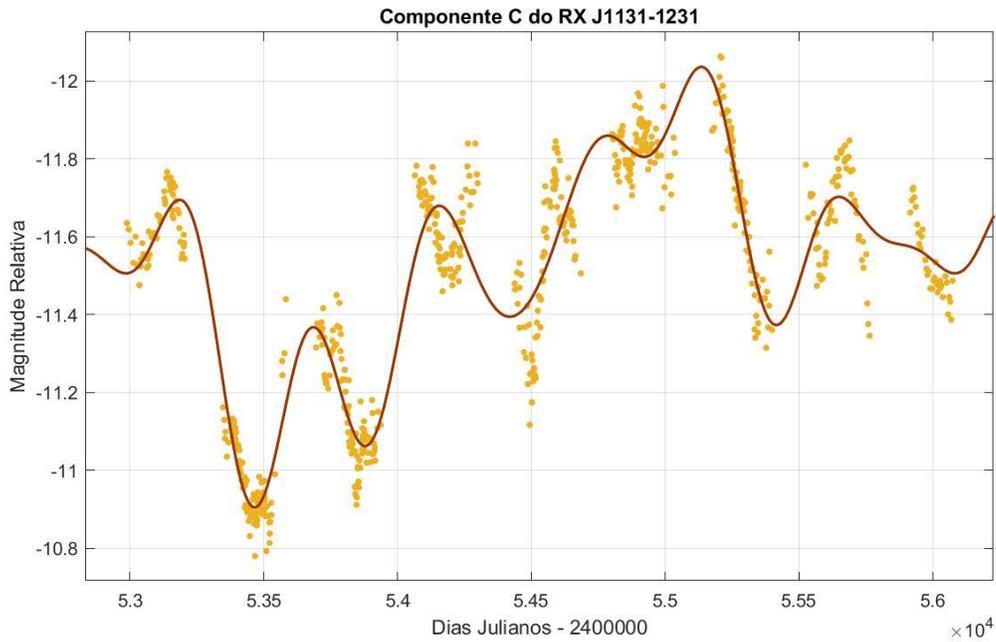
Para o ajuste do Gráfico 14, obteve-se o valor de R^2 igual a 0,9704.

Gráfico 15: Componente B do RX J1131-1231



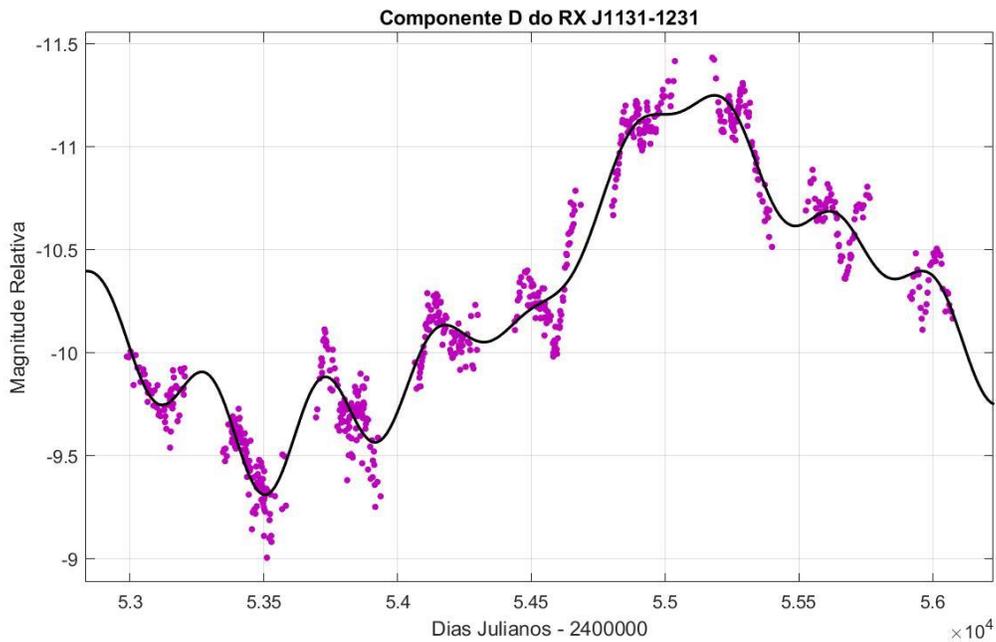
Para o ajuste do Gráfico 15, obteve-se o valor de R^2 igual a 0,9118.

Gráfico 16: Componente C do RX J1131-1231



Para o ajuste na Componente C do RX J1131-1231 foi calculado o valor do R^2 igual a 0,9122.

Gráfico 17: Componente D do RX J1131-1231

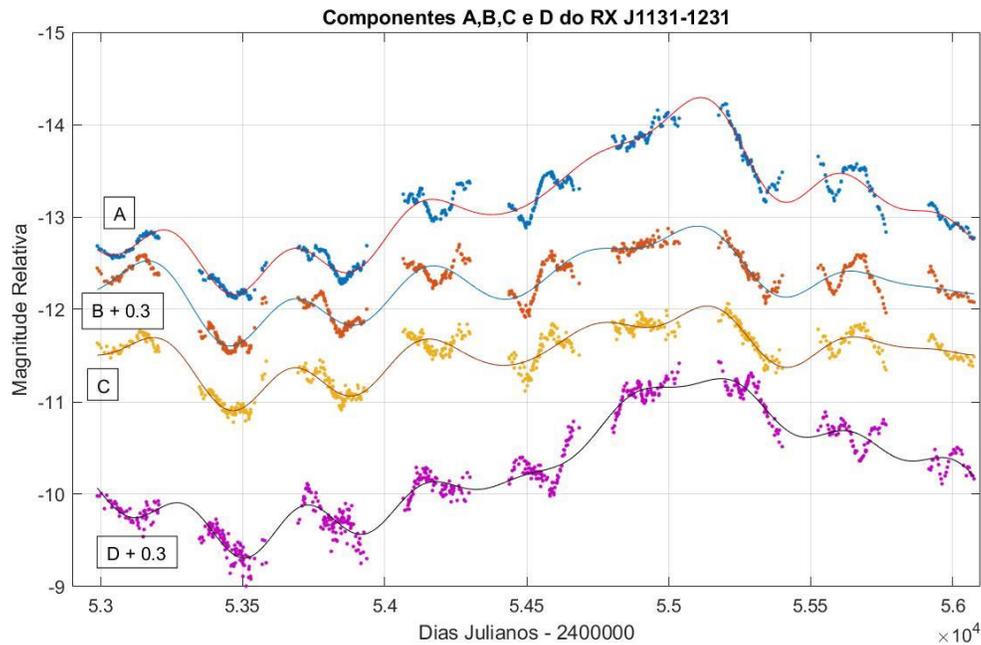


Para o ajuste do Gráfico 17 foi calculado o valor de R^2 igual a 0,9585.

Comparando-se os valores do coeficiente quadrático de regressão (R^2) pode-se observar que os ajustes A e D são os que possuem maiores valores, isto é, os polinômios ajustados pelo algoritmo destas componentes são os que mais se aproximam ao comportamento real dos pontos.

Porém, como todos os ajustes obtiveram um R^2 razoável, pode-se comparar todas as curvas e calcular a defasagem de tempo entre elas.

Gráfico 18: Análise das Curvas de Luz do RX J1131-1231



Como há quatro curvas, utilizando-se o polinômio ajustado pelo algoritmo pode-se determinar os valores dos picos e conseqüentemente a defasagem de tempo entre eles das componentes A, B, C e D. Isto é, há uma defasagem entre A e B, A e C, A e D, B e C, B e D, e C e D. Logo, foi calculado a constante de Hubble para cada comparação entre as componentes.

Na literatura foi encontrado que o “Redshift” para o objeto que está sob o efeito de lente gravitacional do RX J1131-1231 é de cerca de 0,654 (Suyu et al. 2014).

Logo, pode-se utilizar a Equação 1 para determinar a constante de Hubble para cada defasagem entre as componentes e a Equação 2 para estimar a idade do Universo.

Os resultados podem ser observados na Tabela 1, e na Figura 8 pode-se observar os valores de máximo e de mínimo traçados por uma reta que o algoritmo identificou.

Em média para esta fonte (RX J1131-1231) estimou-se que a constante de Hubble vale $H_0 = (67,4 \pm 4,2)$ Km/s/Mpc e a idade média do Universo possui um valor de $T_U = (1,42 \pm 0,04) \times 10^{10}$ anos, isto é, um valor de aproximadamente 14,2 bilhões de anos.

Figura 8: Análise das Curvas de Luz do RX J1131-1231

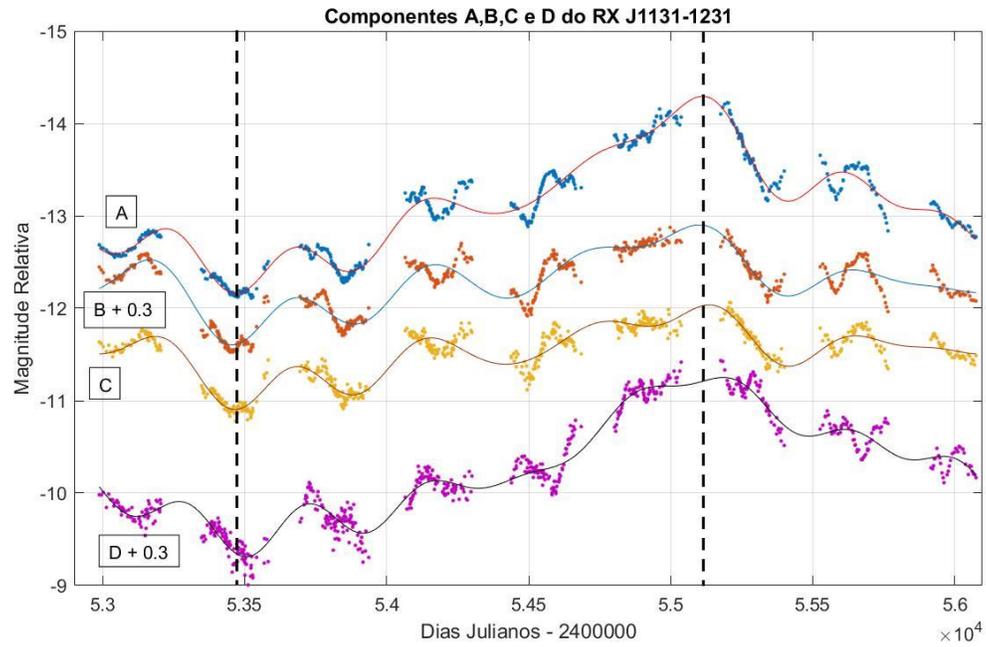
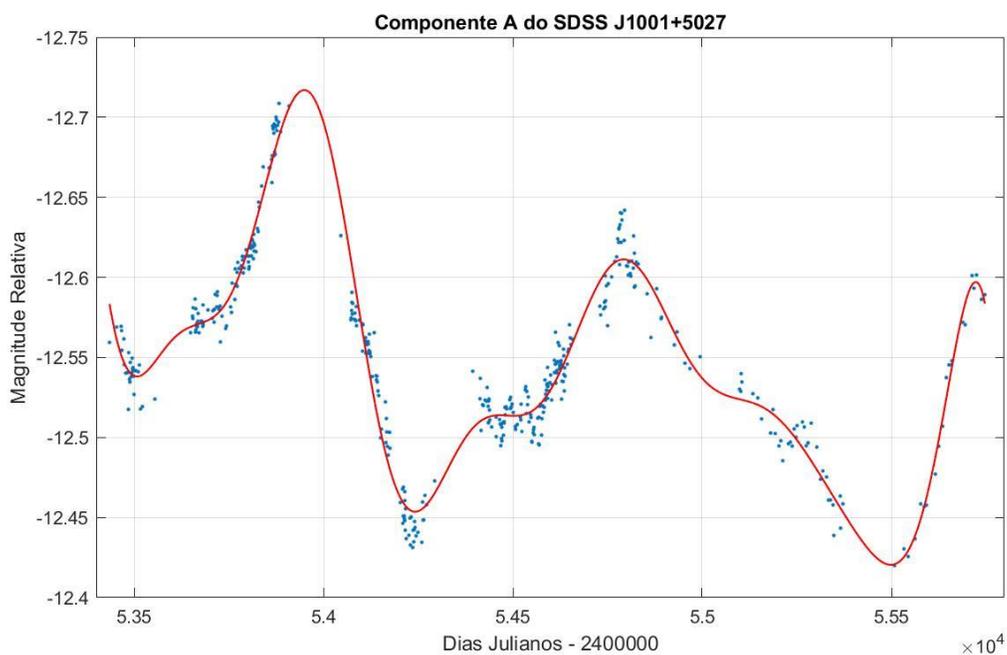


Tabela 1: Comparação entre as componentes do RX J1131-1231

	Δt (dias)	H_0 (Km/s/Mpc) $\pm 3,00$	T (s) $\pm 0,07$	T (anos) $\pm 0,02$
A e B	2,27	73,15	4,10E+17	1,30E+10
A e C	8,03	69,34	4,33E+17	1,37E+10
A e D	22,93	65,73	4,56E+17	1,45E+10
B e C	10,31	68,49	4,38E+17	1,39E+10
B e D	20,65	66,78	4,49E+17	1,42E+10
C e D	30,96	60,63	4,95E+17	1,57E+10

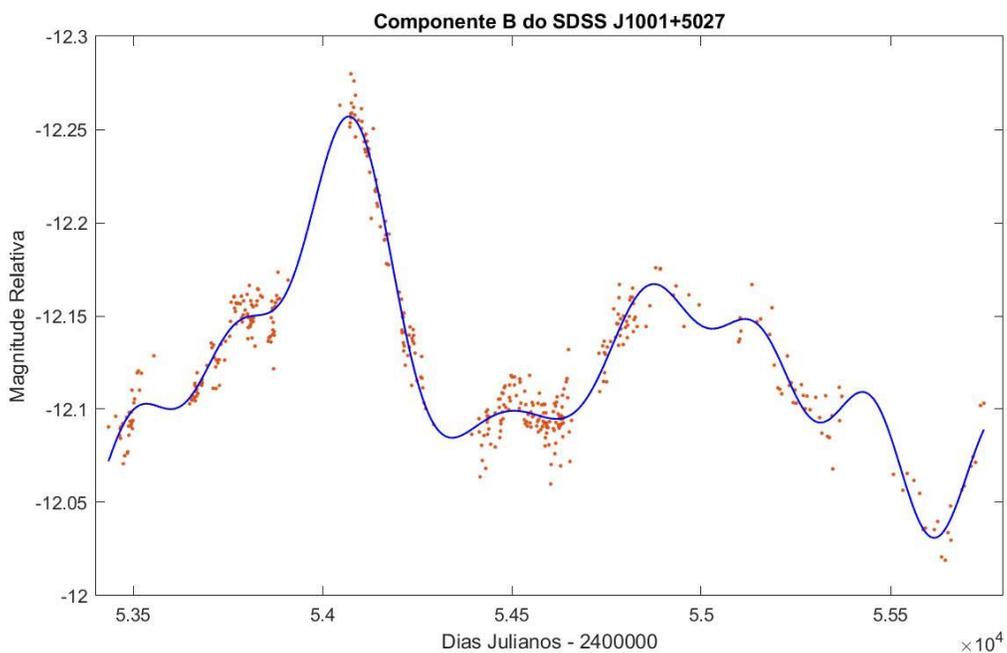
3.4 SDSS J1001+5027

Gráfico 19: Componente A do SDSS J1001+5027



Para o ajuste ao conjunto de dados da componente A do SDSS J1001+5027 calculou-se o valor do R^2 de 0,9554.

Gráfico 20: Componente B do SDSS J1001+5027



Para o polinômio ajustado aos dados da Componente B do quasar-lente o valor do R^2 (coeficiente quadrático de regressão) foi calculado com o valor de 0,9529.

Como ambos os coeficientes quadráticos de regressão apresentam um valor relativamente alto, pode-se fazer a comparação entre a componente A e B deste quasar-lente, e calcular a defasagem de tempo entre o pico de máximo.

No Gráfico 21 é plotada as duas curvas de luz, e é perceptível uma grande diferença de tempo entre os picos de máxima magnitude.

Gráfico 21: Análise das Curvas de Luz do SDSS J1001+5027

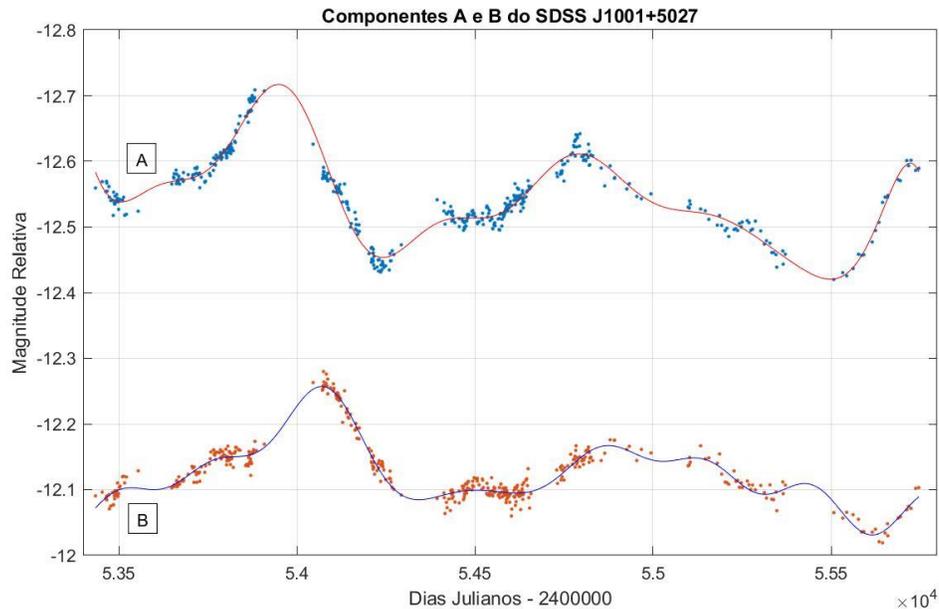
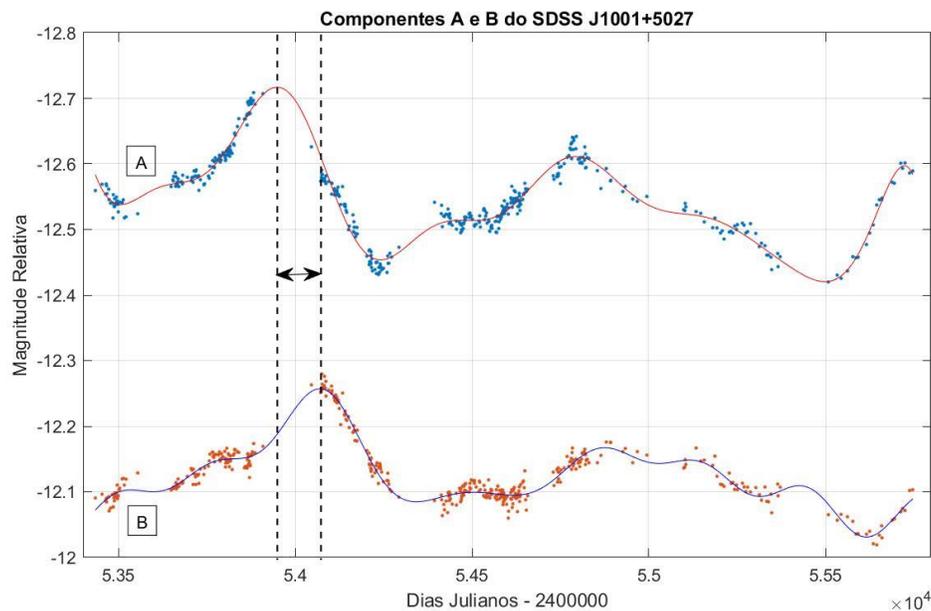


Figura 9: Análise das Curvas de Luz do SDSS J1001+5027



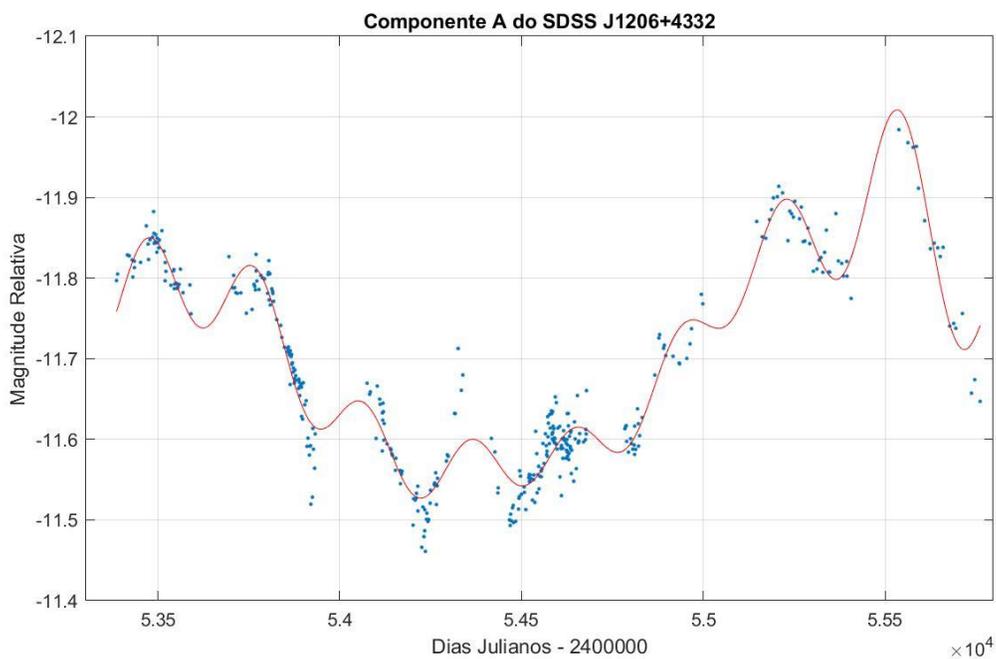
Pode-se notar que há uma grande defasagem entre as curvas A e B do quasar-lente SDDS J1001+5027. Da mesma maneira que foi calculado esta defasagem nas lentes gravitacionais anteriores será feito neste. Logo, utilizando-se o polinômio ajustado pelo algoritmo calculou-se que a diferença de tempo entre os picos da componente A e B deste objeto é de cerca de $(122,52 \pm 3,59)$ dias.

O “redshift” do objeto que está sob o efeito da lente gravitacional é de 1,838 (S. Rathna Kumar et al.,2013).

Utilizando-se a Equação 1 para determinar a constante de Hubble através dos dados obtidos pelo ajuste, pode-se calcular o valor de $H_0 = (75,0 \pm 5,4)$ Km/s/Mpc. Consequentemente, através da Equação 2 pode-se estimar a idade do Universo com o valor de $T_U = (4,00 \pm 0,05) \times 10^{17}$ segundos, isto é, $T_U = (1,27 \pm 0,03) \times 10^{10}$ anos, ou seja, 12,7 bilhões de anos.

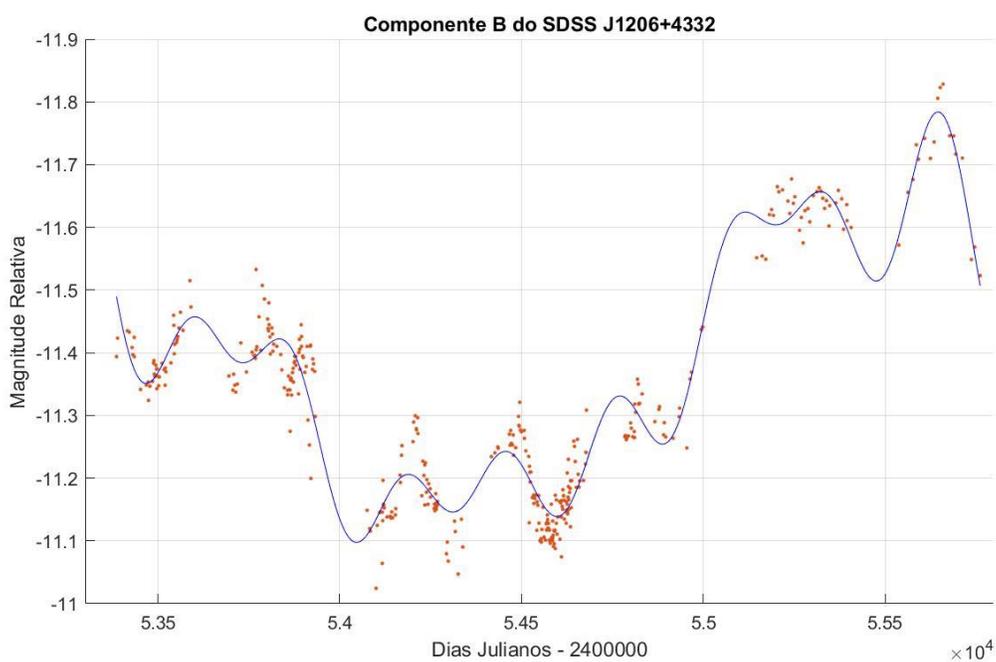
3.5 SDSS J1206+4332

Gráfico 22: Componente A do SDSS J1206+4332



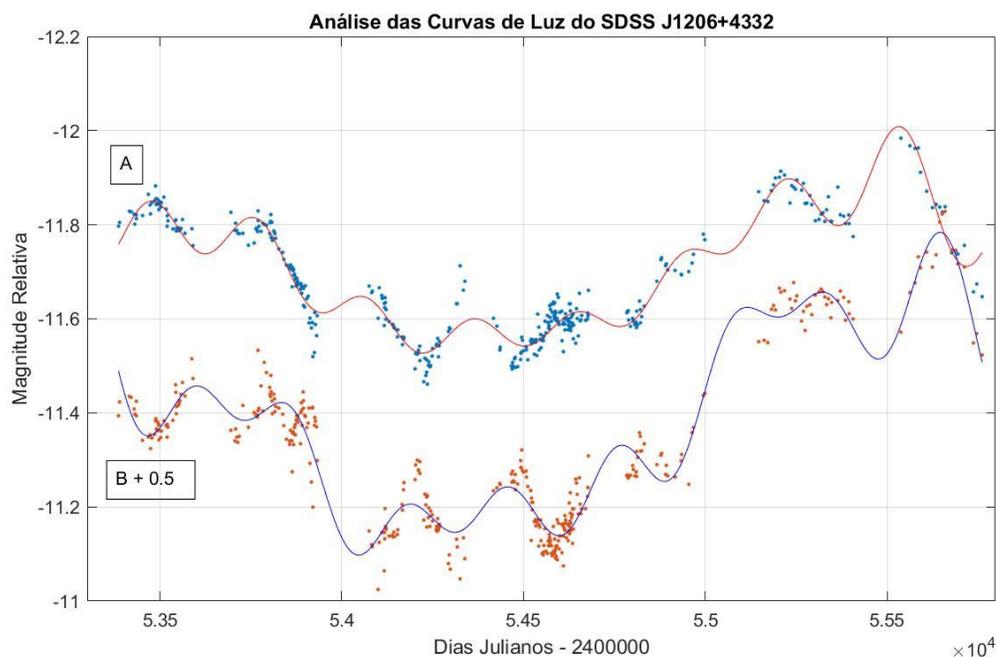
O valor do R^2 calculado pelo ajuste determinado no Gráfico 22 é de 0,9442.

Gráfico 23: Componente B do SDSS J1206+4332



Para o ajuste do Gráfico 23 o Coeficiente Quadrático de Regressão (R^2) foi calculado com o valor de 0,9446. Consequentemente, pode-se dizer que ambos ajustes estão razoáveis para os conjuntos de dados, logo, uma comparação entre as curvas pode ser realizada.

Gráfico 24: Análise das Curvas de Luz do SDSS J1206+4332

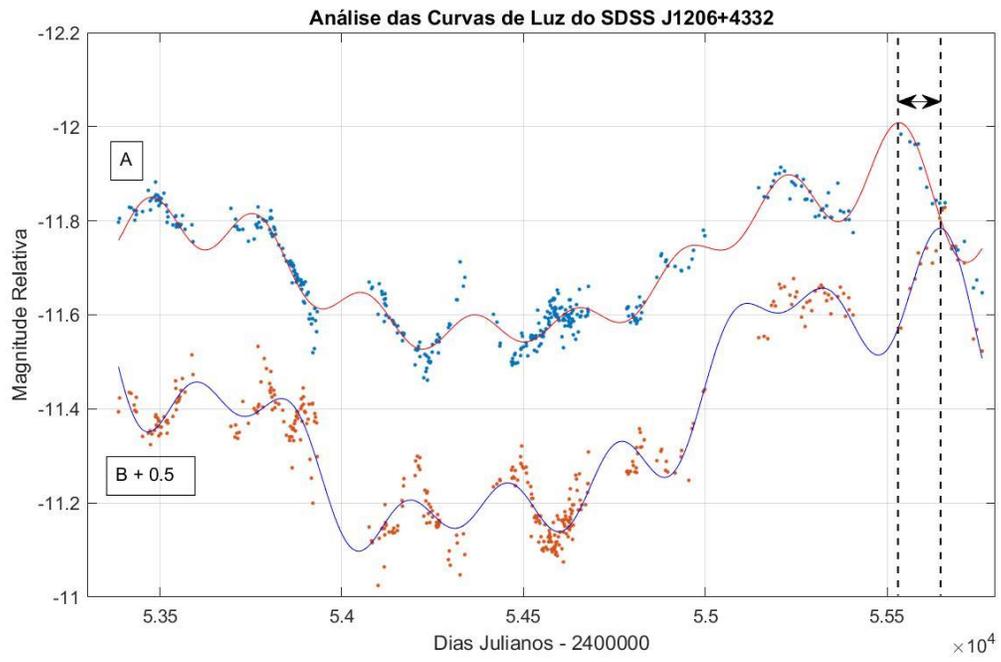


Pode-se observar uma defasagem no valor de máxima magnitude relativa entre as componentes A e B (Figura 10).

Utilizando-se o algoritmo e o polinômio que o mesmo ajustou para as curvas A e B, pode-se estimar a diferença temporal entre o valor de máxima magnitude da componente A em relação à componente B, e este valor foi de $(121,62 \pm 4,32)$ dias. Consequentemente, utilizando-se a Equação 1 pode-se estimar a constante de Hubble com o valor de $H_0 = (73,5 \pm 5,7)$ Km/s/Mpc, para um $z = 1,789$ (Fonte: G.L.Q.D).

Estimando a idade do Universo através da Equação 2, obtêm-se que $T_U = (4,08 \pm 0,03) \times 10^{17}$ segundos, isto é, $T_U = (1,29 \pm 0,02) \times 10^{10}$ anos. Ou seja, pelo método que foi utilizado e os dados pesquisados na literatura foi calculado a idade do Universo de 12,9 bilhões de anos.

Figura 10: Análise das Curvas de Luz do SDSS J1206+4332



4.0 RESULTADOS

Comparando-se os valores obtidos para as lentes gravitacionais e para a Constante de Hubble e conseqüentemente a Idade do Universo pode-se observar a Tabela 2. Para a lente gravitacional RX J1131-1231 foi utilizado o seu valor médio na Tabela 2, os valores para cada curva de luz da Constante de Hubble podem ser consultados na Tabela 1.

Tabela 2: Resultados

Quasar-Lente	Constante de Hubble (Km/s/Mpc)	Idade do Universo (Bilhões de Anos)
HE0435-1223	$71,6 \pm 4,7$	$13,6 \pm 0,2$
HS 2209+1914	$62,8 \pm 4,8$	$15,5 \pm 0,3$
RX J1131-1231	$67,4 \pm 4,2$	$14,2 \pm 0,4$
SDSS J1001+5027	$75,0 \pm 5,4$	$12,7 \pm 0,3$
SDSS J1206+4332	$73,5 \pm 5,7$	$12,9 \pm 0,2$

Pode-se agora calcular a média dos valores obtidos para cada fonte a fim de determinar a constante de Hubble e sua incerteza associada.

Fazendo isto, pode-se obter que o valor da Constante de Hubble (H_0) determinado neste projeto é de $H_0 = (70,0 \pm 6,2)$ Km/s/Mpc. Conseqüentemente, a Idade do Universo (T_U) é de $T_U = (13,8 \pm 1,4)$ bilhões de anos.

O intervalo de confiança da média de H_0 e da idade do Universo foram estimados a partir do teste t-student para um nível de significância $\alpha = 5\%$ e para quatro graus de liberdade, uma vez que não é conhecida o valor da variância populacional de cada medida e teve-se que estimar a partir dos dados amostrais.

5.0 CONCLUSÕES

Em pouco tempo de pesquisa, aproximadamente cinco meses (março a julho), foi possível estimar os atrasos temporais entre as componentes dos quasares candidatos à lentes gravitacionais utilizando-se a técnica de realizar um ajuste polinomial através da série de Fourier para cada curva de luz, determinando-se assim uma função harmônica para cada componente de cada quasar e com a mesma pode-se calcular no intervalo de dados que foram obtidos através do projeto COSMOGRAIL os pontos de máximos e mínimos das curvas e consequentemente determinar a defasagem no tempo de cada um destes pontos em relação a cada componente dos quasares.

Consequentemente, a partir do conhecimento de cada atraso temporal para cada quasar pode-se estimar a constante de Hubble sabendo-se que a mesma é diretamente proporcional à velocidade de dispersão da galáxia-lente e inversamente proporcional a defasagem no tempo em relação às componentes da fonte.

Obteve-se valores para a constante de Hubble para cada quasar candidato a lente gravitacional e finalmente, calculado a média entre cada fonte obtendo-se o valor de $H_0 = (70,0 \pm 6,2)$ Km/s/Mpc. Comparando-se o valor que foi obtido com o valor da constante de Hubble calculada por Kirshner, R em 2004 de $H_0 = (72 \pm 7)$ Km/s/Mpc podemos verificar que o valor que foi calculado no presente projeto possui um erro percentual de aproximadamente 2,7% em relação ao que foi estimado em 2004. Porém, devido à incerteza que se obteve de 6,2 Km/s/Mpc, este valor que foi calculado está dentro da margem de erro do valor estimado por Kirshner em 2004.

A partir do conhecimento da constante de Hubble calculada pode-se estimar a Idade do Universo, uma vez que esta constante possui dimensão de tempo. Realizando-se as conversões adequadas, pode-se estimar a idade do Universo de $(13,8 \pm 1,4)$ bilhões de anos. Comparando o valor que foi obtido com o calculado por Kirshner, R em 2004 de aproximadamente 13,2 bilhões de anos, alcançamos o valor esperado com um erro percentual de 4,4%.

Em suma, pode-se dizer que o projeto pelo pouco tempo de vigência que tomou obteve-se ótimos resultados para a Constante de Hubble e a Idade do Universo, porém grandes incertezas associadas devido ao método da série harmônica de Fourier não ser totalmente precisa, como pode-se observar os coeficientes quadráticos de regressão apresentam erros que não são nulos. O algoritmo LSTM que inicialmente foi proposto poderia otimizar o valor do R^2 para um valor muito próximo de 1.

Como projeto futuro, será estimada o tempo de atraso em relação as fontes dos possíveis quasares candidatos a lentes gravitacionais utilizando-se um algoritmo mais aperfeiçoado, no caso o algoritmo LSTM que busca encontrar padrões nos dados e estimar projeções futuras. Com a utilização deste algoritmo será possível estimar com maior precisão a constante de Hubble para cada fonte e também diminuir as incertezas associadas à esta medida. Também será possível analisar estas curvas não somente na faixa do visível, mas sim desde ondas de rádio até raios gama.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHWOLSON, O. Über eine mögliche Form fiktiven Doppelesterne, *Astr. Nachrichten*, 221,329, 1924.

COOKE,J.H.; KANTOWSKI, R. Time delays for multiply imaged quasars, *The Astrophysical Journal*, 195, L11-L14, 1975.

EDDINGTON.A.S; M.A; M.Sc; F.R.S.Report on the relativity theory of gravitation.The physical society of London,1920a.

EDDINGTON, A.S., *Space, time and gravitation*, Cambridge University Press, Cambridge, 1920b.

EINSTEIN,A. “Über den Einflub der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes” *Annalen der Physick*, 35, 898, 1911.

EINSTEIN, A. “Lens-like action of a star by the deviation of light in gravitational field”, *Science*, 84, 506, 1936.

FLORENTEN-NIELSEN,R. Determination of difference in light travel time for QSO0957-561 A, B. *Astr. Ap.*, 138, L19, 1984.

KLIMOV, YU.G. The deflection of light rays in the gravitational fields of galaxies, *Sov. Phys. Doklady*, 8, 119, 1963.

REFSDAL, S. The gravitational lens effect, *MNRAS*, 128, 295, 1964a.

REFSDAL, S. On the possibility of determining Hubble’s parameter and the masses of galaxies from the gravitational lens effect, *MNRAS*, 128, 307, 1964b.

TIKHOV, G.A. Sur la deviation des rayons lumineux dans le champ de gravitation des étoiles. *Dokl. Akad. Nauk S.S.R.*, 16, 199-204, 1937.

ZWICKY, F. “On the possibility on detecting nebulae which act as gravitational lenses”, *Phys. Rev.* 51, 679, 1937.

ZWICKY,F. “Nebulae as gravitational Lenses” *Phys. Rev.* 51, 290, 1937

Kirshner, R. P., Aguilera, C., Barris, B., Becker, A., Challis, P., Chornock, R., Clocchiatti, A., Covarrubias, R., Filippenko, A. V., Garnavich, P. M., *et al.* (2003) *Bull. Am. Astron. Soc.* **202**, 2308 (abstr.).