

Astronomia islâmica entre Ptolomeu e Copérnico: Tradição Maraghah (Islamic astronomy between Ptolemy and Copernicus : Maraghah Tradition)

Humberto Antonio de Barros-Pereira¹

Graduando da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil
Recebido em 10/2/2011; Aceito em 28/7/2011; Publicado em 5/12/2011

Este artigo apresenta a descrição, análise e comparação dos modelos da astronomia islâmica na Idade Média com os modelos ptolomaicos para estabelecer o processo de evolução dos modelos cinemáticos na Tradição Maraghah e a motivação para o desenvolvimento destes modelos não ptolomaicos.

Palavras-chave: história da ciência, astronomia, astronomia islâmica.

This article show the description, examination and comparison of the islamic astronomy models in Middle Ages with the Ptolemaic models for establish the process of evolution of the cinematic models at the Maraghah Tradition and the motivation for development these non-Ptolemaic models.

Keywords: history of science, astronomy, islamic astronomy.

1. Introdução

A visão do o papel histórico da astronomia islâmica, na Idade Média, como mera transcritora e tradutora dos trabalhos de Ptolomeu na transmissão do conhecimento para a Renascença [1], vem, a partir dos estudos de Roberts e Kennedy sobre os trabalhos de Ibn al-Shātir [2, 3] na metade do século passado, sendo completamente modificada, pois pesquisas realizadas, desde então, demonstram a importância da astronomia islâmica como reformuladora dos modelos ptolomaicos.

No intuito de estabelecer qual o padrão evolutivo destes modelos e quais os motivos do desenvolvimento desta astronomia não ptolomaica, os modelos islâmicos são, a seguir, dispostos cronologicamente, descritos, analisados e comparados matematicamente aos de Ptolomeu.

2. Astronomia Islâmica

Até o século VI, os árabes possuíam um conhecimento rudimentar de astronomia, pois utilizavam as estrelas como guia nas viagens pelo deserto, na determinação das estações, no uso de calendário lunar e em previsões astrológicas. Com a ascensão, iniciada pelo profeta Maomé no ano de 622, e a rápida expansão islâmica, que em cem anos formou um vasto império do nordeste da Índia à península Ibérica, os tratados gregos de medicina e de ciências exatas foram, do final do século VIII ao início do século IX, traduzidos para o árabe;

iniciando-se, concomitantemente, o processo crítico aos arranjos ptolomaicos frente à diferenciação da física celeste da terrestre [4]. Por um lado, no século IX, surge o movimento de separação da astrologia da astronomia em disciplinas distintas [5], cuja efetivação ocorre no século XIII; por outro, os trabalhos astronômicos, devido ao aperfeiçoamento dos métodos observacionais, visavam ao ajustamento dos parâmetros ptolomaicos básicos, tais como: a posição do apogeu solar, o movimento de precessão dos equinócios, a obliquidade da eclíptica e o comprimento do ano tropical. No leste do império islâmico, no século XI, os trabalhos de Ptolomeu passaram a ser duramente criticados sob o ponto de vista filosófico, tendo como principal crítico o astrônomo al-Haytam, conhecido em latim por Alhazen, devido sua análise dos livros *Almagesto* e *Hipóteses dos Planetas*, onde apresenta suas principais objeções referentes ao equante e ao modelo lunar, que violam o princípio da uniformidade circular de movimento [6]; e, no século XII, surge no oeste do império, na Andaluzia, um novo pólo crítico-filosófico a Ptolomeu de cunho estritamente aristotélico, sendo proeminente o trabalho de al-Bituji. Mas foi a partir do século XIII, no leste islâmico, que ocorre a reforma astronômica com o desenvolvimento de uma astronomia não ptolomaica [7].

2.1. Thabit inb Qurra (século X)

Criticando Ptolomeu, restabelece o ano solar como sendo o ano sideral, abolindo o ano tropical, e assume

¹E-mail: humberto.pereira@usp.br.

que a linha apsidal solar é fixada sideralmente, ou seja, sofre precessão [8].

2.2. Grupo de Maraghah

A denominação Escola de Maraghah é atribuída aos astrónomos associados ao observatório construído, em 1259, na cidade de Maraghah, situado no noroeste do atual Irã, que eram críticos dos modelos ptolomaicos. O cerne do grupo é composto por Mu'ayyad al-Din al-'Urdī (1266), construtor dos instrumentos do observatório, pelo diretor Nasīr al-Din al-Tūsī (1274), pelo seu discípulo: Qutb al-Din al-Shīrāzī (1311), e por Ibn al-Shātir (1375), astrónomo damasceno incorporado ao grupo pelo desenvolvimento independente de modelos não ptolomaicos.

O observatório de Maraghah era equipado com elaborados instrumentos e, segundo Kennedy, não existiam evidências de que as observações neste contribuíram de algum modo aos motivos filosóficos destes astrónomos ao aspirarem à reforma dos modelos ptolomaicos, pois as previsões de seus modelos eram iguais, dentro dos limites da precisão observacional de seu tempo, àqueles obtidos por Ptolomeu [9]; mas esta visão, de mudança essencialmente motivada por fatores filosóficos, foi sendo alterada para a interpretação que relaciona o desenvolvimento de novos modelos, por parte dos astrónomos islâmicos, não somente por fatores filosóficos, mas, também, por parâmetros observacionais [10].

2.2.1. 'Urdī

Considerado como o primeiro astrónomo a desenvolver modelos não ptolomaicos, sendo que, muito provavelmente, os tenha elaborado antes da construção do observatório de Maraghah [11]. Suas principais críticas quanto ao modelo lunar recaem sobre o movimento da deferente ser uniforme em relação ao observador e não ao seu centro; e, também, sobre o fato de que, segundo ele, Ptolomeu teria escolhido ao seu gosto as direções dos movimentos das esferas lunares uma vez que não há dados observacionais indicativos delas. Sem dados diferentes aos de Ptolomeu, 'Urdī elabora um modelo lunar (Fig. 1) que apresenta a Lua percorrendo o epiciclo lunar semelhante ao ptolomaico, não mostrado na figura, em sentido contrário ao movimento dos signos, cujo centro (C), lua média, percorre a deferente no mesmo sentido do epiciclo. O centro da deferente (D) move-se² em volta do observador no mesmo sentido dos signos à distância igual a excentricidade, com deslocamento igual ao triplo do ângulo entre o sol médio e a lua média, chamado alongação média diária (η), medido a partir do eixo observador/sol médio. O observador, por sua vez, está localizado no centro da eclíptica. Esta apresenta

movimento no mesmo sentido dos signos. O movimento da Lua, resultante do modelo de 'Urdī, mostra-se similar ao movimento lunar de Ptolomeu, uma vez que o centro do epiciclo lunar de 'Urdī coincide com o centro do epiciclo lunar ptolomaico (Cp), mas sem a violação da uniformidade de movimento circular, pois o deslocamento do centro do epiciclo lunar sobre a deferente é, em relação ao centro desta, o dobro da alongação média diária [12].

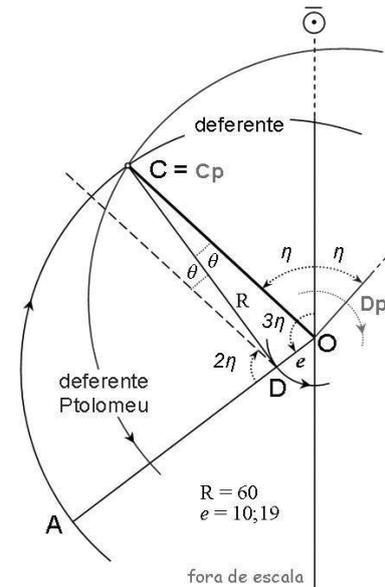


Figura 1 - Modelo lunar de 'Urdī.

A crítica de 'Urdī quanto ao modelo planetário de Ptolomeu recai no movimento da deferente ser uniforme em relação ao equante e não em relação ao seu centro. O modelo para o movimento dos planetas, exceto Mercúrio, desenvolvido para sanar esta discordância do princípio do movimento uniforme foi descrito por Kennedy como sendo de al-Shīrāzī [9], mas estudo desenvolvido por Saliba estabeleceu sua autoria a 'Urdī [13]. Neste modelo (Fig. 2) o centro da deferente está localizado no ponto médio (M) entre o equante (Ep) e o centro da deferente (Dp) do modelo ptolomaico, sendo o movimento da deferente no mesmo sentido dos signos e a longitude média (k_m) medida em relação ao apogeu. O vetor centrado na deferente (N) tem comprimento (r) igual à metade da excentricidade e , também, se desloca no sentido dos signos a taxa igual à longitude média. O epiciclo planetário, não mostrado na figura, semelhante ao de Ptolomeu, está centrado no planeta médio (C) e desloca-se no sentido dos signos. Devido à proposição geométrica de 'Urdī, que estabelece que duas linhas de mesmo comprimento AG e BD descrevem ângulos iguais com respeito à linha AB, sejam internos ou externos, a linha resultante GD é paralela à linha AB (Fig. 3), a linha NM é sempre paralela à CEp.

²O emprego do reflexivo no texto é meramente descritivo, pois o conceito ptolomaico de movimento voluntário, de força vital, aos corpos celestes era repudiado na cosmologia islâmica.

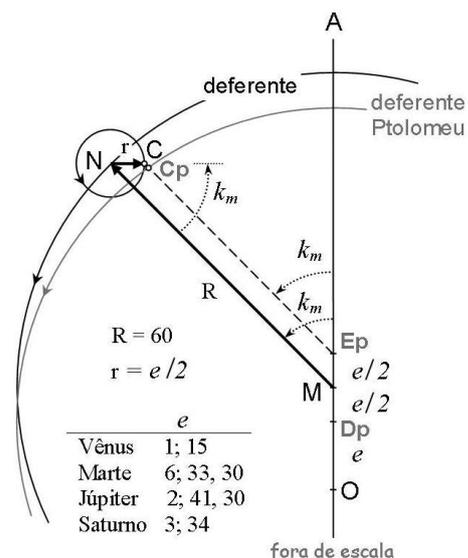


Figura 2 - Modelo planetário de 'Urdī.

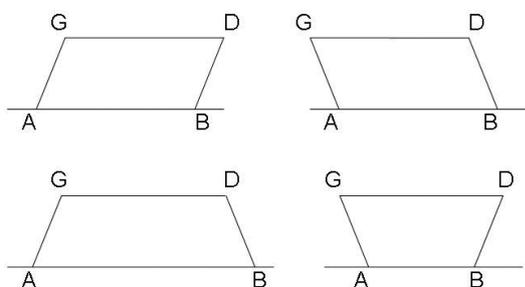


Figura 3 - Urdī's Lemma.

2.2.2. Tūsi

Em seu texto *Tahrīr al-Majistī* (Resumo do Almagesto), onde tece comentários ao livro de Ptolomeu, pode-se observar, na sua crítica à teoria ptolomaica do movimento em latitude dos planetas inferiores causada pelo problema da libração, o arranjo cinemático, atualmente, denominado “par de Tūsi”, que transforma movimento circular em linear e vice versa [14]. No livro *Tadhkira fi 'ilm al-hay'a* (Memento sobre a Ciência da Astronomia) o “par de Tūsi” (Fig. 4), onde a esfera maior move-se por um ângulo α enquanto a esfera menor desloca-se em sentido contrário por um ângulo 2α , causando a oscilação harmônica do ponto H ao longo do diâmetro AB [$DH = f(1 - \cos 2\alpha)$], que também pode ser representado por dois vetores, é empregado no modelo lunar e no planetário [15].

Se o emprego de corpos sólidos (esferas), que dão conta do mecanismo físico tridimensional, assemelha o cosmos islâmico ao aristotélico; por outro lado, o “par de Tūsi”, ao transformar movimento circular em movimento retilíneo e vice-versa, é contrário à distinção aristotélica entre os movimentos terrestres e os celestes [16].

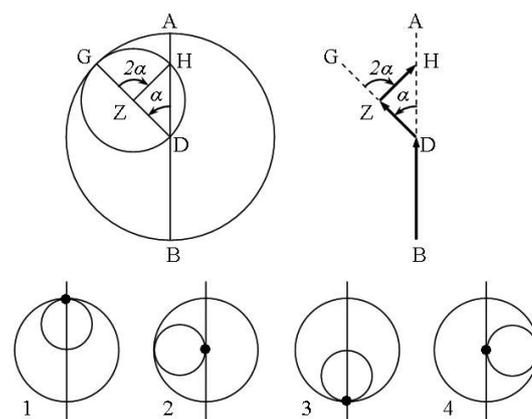


Figura 4 - Par de Tūsi.

O modelo básico elaborado por Tūsi, apresentado por Dreyer [17], baseado no trabalho de Carra de Vaux [18], não será aqui analisado, pois expressa o centro do epiciclo em coordenadas polares.

No modelo para o movimento dos planetas (Fig. 5), exceto Mercúrio, o centro da deferente é fixado no ponto equante (E); portanto, a distância do equante à deferente é constante, ao contrário da variação apresentada nos modelos ptolomaicos. O vetor da deferente desloca-se no mesmo sentido dos signos a taxa igual à longitude média medida a partir do apogeu. Da deferente (N) tem origem o “par de Tūsi” indicativo do planeta médio (C), cujos vetores têm comprimento igual à metade da excentricidade e a variação angular do primeiro vetor igual à longitude média, é responsável pela oscilação aparente do tamanho do vetor da deferente. Portanto, o “par de Tūsi” acarreta na órbita oval do planeta médio, cuja distância ao observador no apogeu é igual a $R + e$ e no perigeu de $R - e$. O epiciclo planetário não mostrado na figura, é semelhante ao ptolomaico [9].

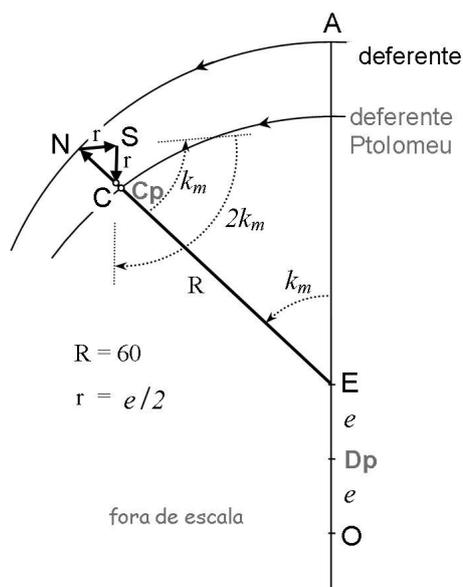


Figura 5 - Modelo planetário de Tūsi.

No modelo lunar (Fig. 6), o primeiro vetor, de

comprimento igual a $R - e$, origina-se no observador e move-se no mesmo sentido dos signos com deslocamento igual à elongação média (η), medido a partir do sol médio. Acoplado a este, o “par de Tūsi”, cujos vetores têm comprimento igual à metade da excentricidade e variação angular do primeiro vetor igual ao dobro da elongação, é responsável pela oscilação da posição do planeta médio. Portanto, o “par de Tūsi” acarreta na órbita oval do planeta médio, cuja menor distância ao observador, igual a $R - e$, ocorre nas elongações de 90° e 270° ; e, tanto em conjunção quanto em oposição, está mais afastado do observador, a uma distância igual a R . O epiciclo lunar, não representado na figura, apresenta-se igual ao do modelo lunar ptolomaico [16].

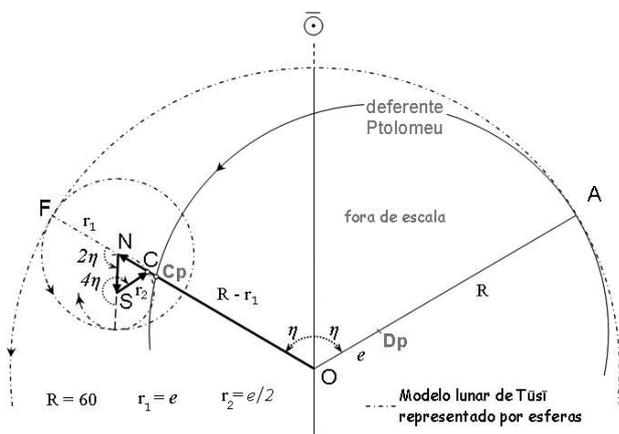


Figura 6 - Modelo lunar de Tūsi.

2.2.3. Shīrāzī

Tanto Kennedy [9] quanto Saliba [10], que se debruçaram sobre os livros de Shīrāzī, assinalam a dificuldade de leitura e análise dos extensos textos com figuras extremamente complicadas. Saliba sublinha que os mesmos foram estudados apenas pontualmente e manifesta a opinião de que trabalhos futuros podem muito bem mudar o quadro atual do conhecimento das contribuições de Shīrāzī.

No modelo lunar de Shīrāzī (Fig. 7), o centro da deferente (M) dista metade da excentricidade do observador e sofre deslocamento no sentido contrário ao dos signos a taxa igual à elongação (η) medida a partir do eixo observador/sol médio; ao passo que o vetor da deferente desloca-se, no mesmo sentido dos signos, com taxa igual ao dobro da elongação, mensurada a partir da linha apsidal. O deslocamento do vetor indicativo da lua média dá-se a partir do prolongamento do vetor da deferente a taxa igual ao dobro da elongação no mesmo sentido da deferente. Por fim, o epiciclo lunar, não mostrado na figura, é semelhante ao de Ptolomeu [9]. Este modelo apresenta todos os movimentos uniformes em relação aos seus centros e, devido à proposição de ‘Urdī a lua média sempre está posicionada sobre a reta observador / lua média ptolomaica.

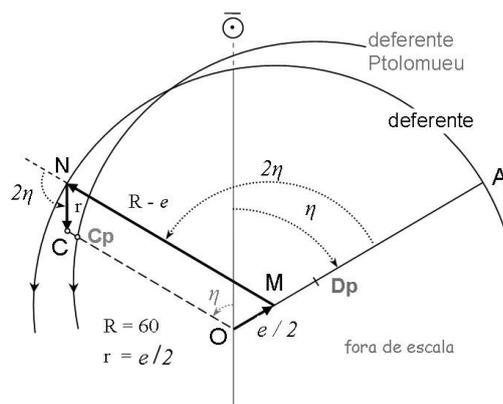


Figura 7 - Modelo lunar de Shīrāzī.

Shīrāzī desenvolveu oito modelos diferentes antes de estipular o modelo definitivo para Mercúrio (Fig. 8). Neste modelo, o centro da deferente (D) dista o dobro da excentricidade do observador, ou seja no mesmo ponto de origem dos vetores do modelo ptolomaico. O vetor da deferente sofre deslocamento segundo a longitude média (k_m), no mesmo sentido dos signos, a partir da linha apsidal; e a partir do final deste vetor (N_1) quatro vetores dispostos em dois “pares de Tūsi”. Estes pares de vetores causam uma aparente variação do tamanho do vetor da deferente, entre 66, no perigeu, e 56;63, para a longitude média de 76° , acarretando ao planeta médio uma órbita oval deformada. O vetor indicativo do planeta médio, de comprimento igual à excentricidade, é acoplado ao final dos “pares de Tūsi”, e sofre deslocamento, no mesmo sentido dos signos, a taxa igual à longitude média, mensurada a partir do prolongamento do vetor da deferente. O epiciclo planetário, não representado na figura, é igual ao do modelo ptolomaico [9].

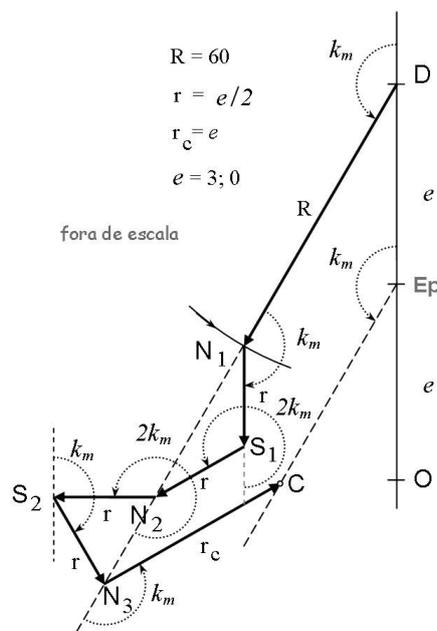


Figura 8 - Modelo de Mercúrio de Shīrāzī.

Para os demais planetas, o modelo de Shātir (Fig. 12 e Tabela 1) apresenta o vetor de raio R se deslocando, no mesmo sentido dos signos, com ângulo (α), sendo que a linha apsidal move-se, no mesmo sentido dos signos, a taxa média de $0;0,0,9,51,46,51^\circ/d$. Ao final deste, outro vetor desloca-se com mesma taxa, mas em sentido oposto, medida do prolongamento do vetor anterior. Contíguo a este, o vetor do planeta médio (C) move-se, a partir do vetor anterior e no mesmo sentido dos signos, com o dobro da taxa do anterior. O vetor do planeta move-se, no mesmo sentido, a taxa igual à anomalia média (γ) medida a partir do ponto denominado por Shātir como o verdadeiro apogeu do epiciclo, que é a intersecção do epiciclo planetário com a reta paralela ao vetor da deferente que passa pelo planeta médio [3, 20].

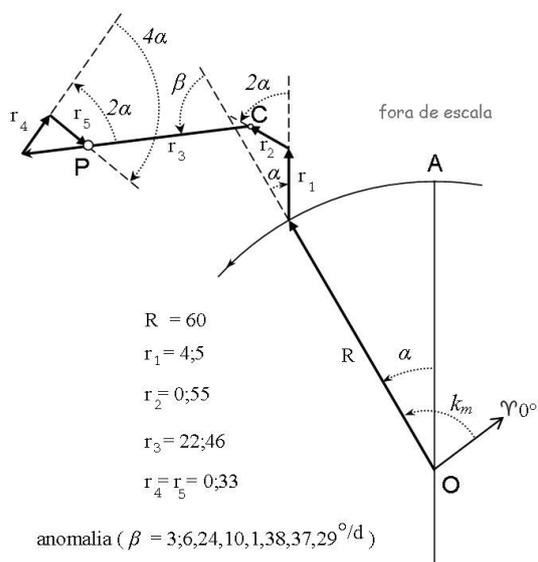


Figura 11 - Modelo de Mercúrio de Shātir.

Tabela 1 - Comprimento dos vetores e anomalia média de cada planeta ($R = 60$ para todos os planetas).

	r_1	r_2	r_3	γ° / d
Vênus	1;41	0;26	43;33	0;36,59,28,26,18,4,56
Marte	9;50,15	3;16,45	39;30	0;31,26,29,44,32
Júpiter	4;2,15	1;20,45	11;30	0;4,59,6,14,35
Saturno	5;21	1;47	6;30	0;2,0,26,17,5

Quanto ao movimento em latitude dos planetas, Shātir não procedeu aos cálculos com base em seus modelos. As latitudes utilizadas por ele na predição das efemérides são basicamente as de Ptolomeu [21].

2.3. Astrônomos pós Maraghah

A tradição Maraghah, de crítica a Ptolomeu e de desenvolvimento de modelos astronômicos não ptolomaicos, continuou, após a desarticulação deste observatório, no

leste do império islâmico até o século XVI. No século XV, dentre os astrônomos do famoso observatório de Uligh Beg, em Samarqand, destaca-se o trabalho de Qushjī. No século XVI, o astrônomo Khafīr continua a tradição.

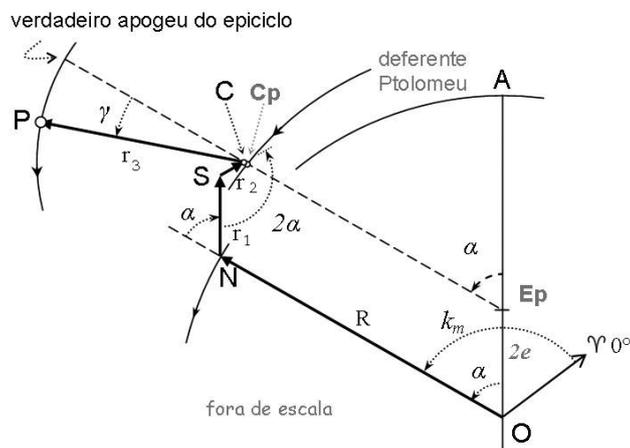


Figura 12 - Modelo de Shātir para Vênus e planetas superiores.

2.3.1. Qushjī

‘Alā’ al-Din al-Qushjī (1474) escreveu dois tratados astronômicos - o que versa sobre o movimento lunar está perdido, mas há grande possibilidade de que seja redescoberto, pois existem inúmeras coleções de manuscritos árabes a serem estudadas [10]; o outro, dedicado à crítica e a reforma do modelo ptolomaico para o planeta Mercúrio, foi escrito quando trabalhou no observatório de Uligh Beg, cujo círculo de astrônomos associados são conhecidos pela extensa produção das tabelas Persas [22].

No modelo para o planeta Mercúrio, Qushjī estabelece que a origem do vetor indicativo do centro da deferente seja alocada no ponto equidistante entre o equante (Ep) e o centro da deferente do modelo ptolomaico (Dp) sobre a linha apsidal, e que este vetor sofre deslocamento com velocidade angular igual à velocidade média do Sol (k_m), no sentido contrário aos signos, medido a partir da linha apsidal. O centro da deferente, por sua vez, desloca-se com o dobro desta velocidade, mas no mesmo sentido dos signos. A sequência de vetores prossegue: primeiro com um par de vetores (Fig. 13) que posiciona o planeta médio, sobre a reta paralela ao vetor da deferente que passa pelo ponto equante ptolomaico; a seguir, o vetor do epiciclo planetário, move-se a taxa igual à anomalia diária (β), medida a partir da reta que passa pelo ponto equante e pelo planeta médio [22].

este há um “par de Tūsi”, cujos vetores têm comprimento igual à metade da excentricidade, que faz com que a origem do vetor indicativo do planeta médio seja sempre posicionada sobre a reta do vetor da deferente; o primeiro vetor do par move-se, no mesmo sentido dos signos, com taxa igual ao dobro da longitude média, mensurado a partir do prolongamento do vetor da deferente, e o segundo vetor do par desloca-se, no sentido contrário ao dos signos, a partir do prolongamento do primeiro vetor do par, com o quádruplo da longitude média. O vetor indicativo do planeta médio origina-se no final do segundo vetor do par e desloca-se com o triplo da longitude média, no mesmo sentido dos signos, medido a partir do prolongamento do vetor anterior. Este arranjo sempre posiciona o planeta médio sobre a reta paralela ao vetor da deferente que passa pelo ponto equante.

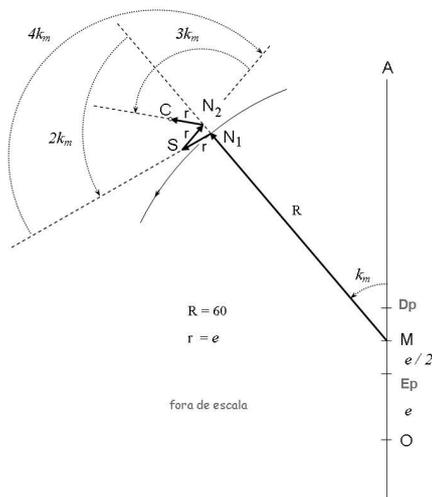


Figura 16 - 1º modelo para Mercúrio de Khafri.

No segundo modelo (Fig. 17), o primeiro vetor, com comprimento igual à metade de excentricidade, desloca-se, no mesmo sentido dos signos, a taxa igual ao dobro da longitude média. O segundo vetor, indicativo da deferente, sofre deslocamento igual à longitude média, no sentido contrário ao dos signos, mensurada a partir do prolongamento do primeiro vetor. O ponto equante (Ep) pertence à reta do vetor da deferente. Acoplado a este vetor, um “par de Tūsi”, com vetores de comprimento igual à metade da excentricidade, cujo primeiro vetor do par move-se no mesmo sentido dos signos a taxa igual ao dobro da longitude média, medida do prolongamento do vetor anterior; e o segundo vetor, indicativo do planeta médio, move-se, em sentido contrário ao dos signos, com taxa igual ao quádruplo da longitude média, medida do prolongamento do primeiro vetor do par. O “par de Tūsi” faz com que o planeta médio seja posicionado sobre a reta do vetor da deferente.

No terceiro modelo (Fig. 18), o primeiro vetor, de comprimento R, indicativo da deferente, sofre deslocamento igual á longitude média, medido a partir da linha apsidal, no mesmo sentido dos signos. Acoplado a este

uma série de quatro vetores, com comprimentos iguais à excentricidade, acabam por indicar o planeta médio, sempre o posicionando sobre a reta do vetor da deferente. Todos os vetores desta série são mensurados a partir de retas paralelas à reta do vetor da deferente, que são posicionadas ao final de cada vetor anterior. O primeiro vetor da série desloca-se no mesmo sentido dos signos, a taxa igual à longitude média, o segundo vetor move-se no sentido oposto ao dos signos, a taxa igual ao dobro da longitude média; o terceiro vetor desloca-se, no sentido oposto ao dos signos, a taxa igual à longitude média; e o quarto vetor move-se, no mesmo sentido dos signos, a taxa igual ao dobro da longitude média.

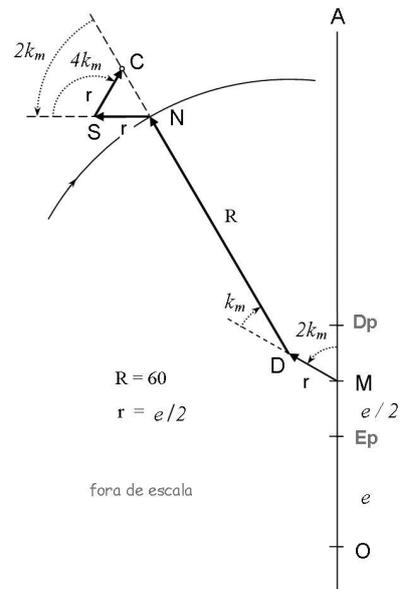


Figura 17 - 2º modelo para Mercúrio de Khafri.

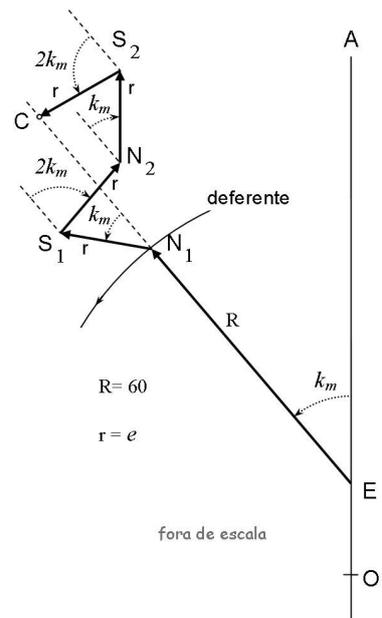


Figura 18 - 3º modelo para Mercúrio de Khafri.

3. Análise dos modelos

Para análise dos modelos astronômicos islâmicos e para comparação com os modelos ptolomaicos [26], os modelos foram tratados como arranjos geométricos no plano cartesiano, onde as coordenadas, em função do ângulo de referência, foram obtidas com a origem dos eixos posicionada no observador.

O modelo solar desenvolvido por Shātir apresenta movimento diário da linha apsidal de $0;0,0,9,51,46,51^{\circ}/d$ no sentido dos signos, discordando do modelo ptolomaico, cuja longitude do apogeu era fixada, a partir do ponto vernal, em $65;30^{\circ}$. Shātir, baseado em observações, atribui este movimento a uma nova esfera, denominada *esfera circundante*, não representada na Fig. 8. Portanto, este movimento difere da precessão, pois esta se relaciona com o movimento das estrelas fixas. Embora a derivação dos parâmetros finais não estejam presentes nos seus trabalhos conhecidos, no livro *Nihāyat* além de estipular, por meio de observações, o diâmetro solar médio aparente em $0;32,32^{\circ}$, também fornece os valores do diâmetro solar aparente no apogeu e no perigeu, respectivamente $0;29,5^{\circ}$ e $0;36,55^{\circ}$; contrariando ao que foi estipulado por Ptolomeu, que negligência a influência da excentricidade da órbita ao estabelecer como constante o diâmetro aparente solar em $0;31,20^{\circ}$.

O modelo lunar de Shātir, além de não possuir a violação da uniformidade de movimento circular e determinar que a anomalia média seja medida a partir da lua média, o que não ocorre no modelo de Ptolomeu, elimina a maior falha do modelo lunar ptolomaico ao apresentar a distância entre o observador e a Lua variando de $68;0^{\circ}$ a $52;0^{\circ}$, cuja razão é de 1,30, o que reflete a variação do diâmetro aparente da lua. Esta variação é mais próxima aos dados observacionais que a variação apresentada no modelo lunar de Ptolomeu, cuja razão é de 1,91.

Os modelos lunares de Tūsī, Shīrāzī e Khafrī são similares, pois fornecem o mesmo posicionamento à lua média sobre a reta observador/lua média ptolomaica,

sendo coincidentes com a lua média de Ptolomeu no apogeu, em quadratura e no perigeu, e, embora apresentem solução para o problema da uniformidade, apresentam discrepância próxima à ptolomaica quanto à variação do diâmetro lunar, pois a máxima distância entre as luas médias dos sistemas é de 1;4,59 (Tabela 2).

A análise de todos os modelos de Khafrī e dos modelos de Qushjī e de Shīrāzī para o planeta Mercúrio, mostra que eles são similares, pois indicam os mesmos planetas médios. A análise do modelo ptolomaico demonstra que a distância observador/planeta médio é maior quando do apogeu do planeta verdadeiro e menor nas longitudes médias de 120° e 240° em relação ao observador; o mesmo ocorre nos modelos de Shīrāzī/Qushjī/Khafrī. O centro do epiciclo destes modelos coincide com o ptolomaico nestes pontos e no perigeu de planeta, ou seja, a longitude média igual a 180° , e, embora nas demais posições as distâncias entre os centros dos epiciclos não ultrapassem $0;16,34$ (Fig. 19), todos os modelos são similares, pois, além da distância angular aparente, não ser maior que $32''$, o que está dentro do limite canonicamente tolerado na Idade Média de $10'$, os planetas médios destes modelos são colineares aos ptolomaicos em relação ao ponto equante, o que é relevante, pois a anomalia média de Mercúrio é mensurada a partir destas retas.

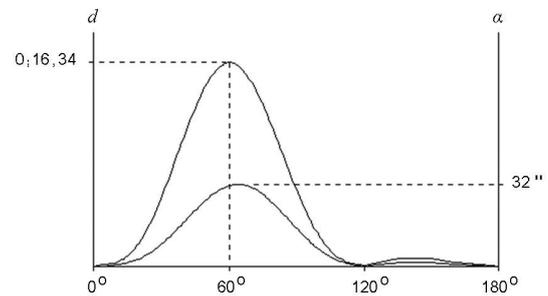


Figura 19 - Para Mercúrio, variação da distância (d) entre os planetas médios de Ptolomeu e dos modelos de Shīrāzī / Qushjī / Khafrī e variação da distância angular aparente (α) entre eles em relação ao observador.

Tabela 2 - As distâncias entre a lua média e o observador no modelo de Ptolomeu e nos modelos de Tūsī/Shīrāzī/Khafrī, com respectivas tangentes, e as distâncias entre as luas médias destes modelos, de acordo com as elongações.

Elongação	Ptolomeu		Tūsī / Shīrāzī / Khafrī		Distância Cp/C
	Distância Cp/O	tg	Distância C/O	tg	
0°	60;0,0	// $O_{\odot m}$	60;0,0	// $O_{\odot m}$	0;0,0
30°	54;1,54	-1,73205	54;50,30	-1,73205	0;48,36
45°	48;36,1	-1,00000	49;41,0	-1,00000	1;4,59
60°	43;42,54	-0,57735	44;31,30	-0,57735	0;48,36
90°	39;22,0	0,00000	39;22,0	0,00000	0;0,0
120°	43;42,54	0,57735	44;31,30	0,57735	0;48,36
135°	48;36,1	1,00000	49;41,0	1,00000	1;4,59
150°	54;1,54	1,73205	54;50,30	1,73205	0;48,36
180°	60;0,0	// $O_{\odot m}$	60;0,0	// $O_{\odot m}$	0;0,0

A análise do modelo de Shātir para as posições de mercúrio médio mostra que há similaridade com os demais modelos islâmicos (Fig. 20a/b), pois a máxima distância angular aparente entre eles é de 7'49", o que está dentro do limite aceitável; sendo, também, similar ao ptolomaico, pois a máxima distância angular aparente entre os planetas médios dos dois modelos em relação ao observador é de 7'32". A análise ao último par de vetores do modelo de Shātir, mostra que este par acarreta uma oscilação aparente no tamanho do vetor do epiciclo planetário, cujo tamanho varia de 23;52 a 21;40, ou seja, uma oscilação aparente do tamanho do epiciclo planetário de 9,66%.

Para o planeta Vênus, o modelo desenvolvido por Khafrī quando comparado ao de Ptolomeu não apresenta, para o observador, variação significativa da distância angular aparente entre os planetas médios (Tabela 3); caracterizando, portanto, a similaridade destes dois modelos. Para os planetas superiores, embora a distância entre os planetas médios dos modelos de Khafrī e os planetas médios ptolomaicos alcance 21'34", a oscilação da distância angular aparente, para o observador, entre os planetas médios permanece dentro do limite aceitável de variação para a época (Fig. 21). Portanto, estes modelos de Khafrī são similares aos ptolomaicos.

Os modelos para Vênus e planetas superiores ela-

borados por 'Urdī, Tūsī e Shātir são similares, pois indicam os mesmos centros dos epiciclos planetários e coincidem com os ptolomaicos no apogeu e no perigeu. A comparação das distâncias angulares aparentes, para o observador, entre estes centros e os ptolomaicos (Tabela 4) mostra que existe similaridades entre os modelos de 'Urdī, Tūsī e Shātir com os de Ptolomeu.

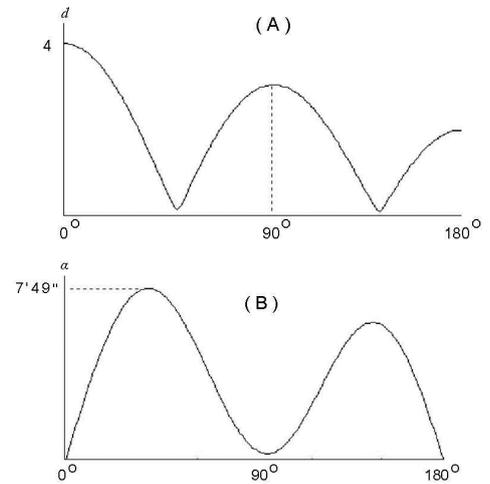


Figura 20 - (A) Variação da distância (d) entre os planetas médios do modelo de Mercúrio de Shātir e do de Qushjī. (B) variação da distância angular aparente (α).

Tabela 3 - Distância entre o planeta médio e o observador nos modelos de Ptolomeu e de Khafrī para Vênus, com respectivas tangentes, a distância entre os planetas médios e a distância angular aparente entre eles de acordo com a longitude média.

Longitude média	Ptolomeu		Khafrī		Distância Cp/C	Distância angular aparente
	Distância Cp/O	tg	Distância C/O	tg		
0°	61;15,0	// OA	61;15,0	// AO	0;0,0	0;0,0°
30°	61;5,31	-1,81692	61;5,43	-1,81692	0;0,12	0;0,0°
60°	60;39,49	-0,62598	60;39,49	-0,62597	0;0,35	0;0,1°
90°	60;2,21	-0,04168	60;3,7	-0,04167	0;0,47	0;0,2°
120°	59;24,17	0,52973	59;24,52	0,52973	0;0,35	0;0,1°
150°	58;55,39	1,65019	58;55,51	1,65019	0;0,12	0;0,0°
180°	58;45,0	// AO	58;45,0	// AO	0;0,0	0;0,0°

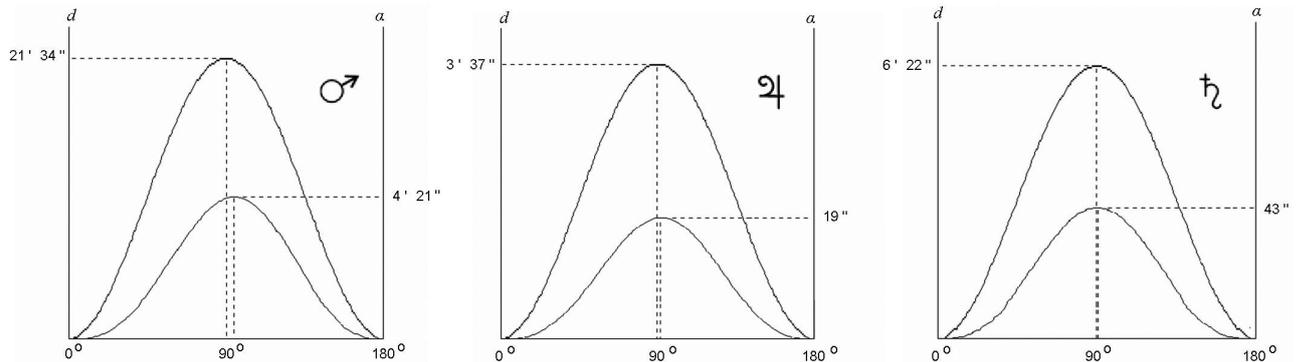


Figura 21 - Variação da distância (d) entre os planetas superiores médios de Ptolomeu e de Khafrī e variação da distância angular aparente (α) entre eles em relação ao observador.

Tabela 4 - Máxima distância entre o planeta médio e o observador do modelo de Ptolomeu e dos Modelos ‘Urdī/Tūsī/Shātīr, com respectivas tangentes, e distância angular aparente entre os respectivos planetas médios dos modelos de Ptolomeu e de ‘Urdī/Tūsī/Shātīr e a longitude média correspondente.

Planeta	Longitude média	Ptolomeu		‘Urdī/Tūsī/Shātīr		Distância angular aparente
		Distância Cp/O	tg	Distância C/O	tg	
Vênus	91°	61;1,2	-0,02421	60;1,49	-0,02420	0;0,0°
Marte	94°	60;36,50	-0,14885	60;57,48	-0,14756	0;4,21°
Júpiter	92°	60;5,13	-0,05481	60;8,50	-0,05472	0;0,19°
Saturno	92°	60;11,36	-0,08404	60;17,55	-0,08383	0;0,43°

4. Conclusão

A astronomia islâmica, a partir do século IX, é caracterizada pela crítica a Ptolomeu, tanto no leste quanto no oeste do império. A tradição de desenvolvimento de modelos astronômicos não ptolomaicos teve origem no observatório de Maraghah, nos meados do século XIII, e não foi abandonada com a desarticulação deste observatório, perdurou até o século XVI.

A primeira vista pode parecer estranho o fato de cada um destes astrônomos islâmicos, com exceção de Shātīr, ter desenvolvido arranjos geométricos para alguns corpos celestes e não para todos; mas, tendo em mente que as críticas islâmicas a Ptolomeu recaíam principalmente ao ponto equante e à variação do diâmetro lunar, uma simples leitura cronológica destes astrônomos e de seus modelos é suficiente para a compreensão de tal mosaico. Assim sendo, ‘Urdī e Tūsī detiveram-se nos modelos lunar e planetários, exceto o de Mercúrio, uma vez que este planeta mostra-se visível apenas alguns dias, pois quase todo seu percurso dá-se sob os raios solares. É bem provável que Shīrāzī, após desenvolver um modelo lunar, dedicou-se exclusivamente ao movimento longitudinal de Mercúrio, uma vez que elaborou outros sete modelos antes do definitivo, ou, talvez, seus modelos planetários estejam perdidos. Shātīr, além de desenvolver arranjos geométricos para a Lua e para os planetas, elaborou um modelo solar que apresenta a variação do diâmetro aparente, sendo que a diferença entre o valor estabelecido por Ptolomeu e o valor médio de seu modelo é de 12 segundos; o que demonstra acurada precisão, ainda mais se observarmos que na Idade Média era aceitável uma variação de 10 minutos para as medidas astronômicas. O modelo lunar de Qushjī está perdido, resta, deste astrônomo, somente o modelo do planeta Mercúrio; mas seu maior legado é a prova geométrica de que todos os modelos planetários podem ser transformados em modelos excêntricos. Por fim, Khafīrī desenvolveu modelos para a Lua e para todos os planetas, sendo que para Mercúrio conhecemos seus quatro arranjos.

Embora a proposição de ‘Urdī e o “par de Tūsī” tenham sido empregados por diversos astrônomos, a evolução destes modelos geocêntricos não ptolomaicos não foi linear, monofilética, na qual as modificações de cada astrônomo vão se somando e, por fim, resulta num modelo mais avançado; mas, sim, ocorreu com a profusão de modelos geométricos diferentes. A análise dos

diferentes modelos elaborados para um mesmo astro demonstra que estes modelos são similares quanto ao posicionamento dos respectivos astros médios. Tendo, portanto, cada astrônomo islâmico elaborado os modelos que melhor lhe descreviam os movimentos dos corpos celestes.

O desenvolvimento de novos modelos, no medievo pelos astrônomos da tradição Maraghah ficou restrito à 1ª anomalia ptolomaica, mas, embora similares aos modelos ptolomaicos quanto ao posicionamento dos astros médios, não implicou, simplesmente, a adequação geométrica dos modelos ptolomaicos ao princípio do movimento circular uniforme, haja vista o sentimento expresso por ‘Urdī ao assumir que seu modelo era o verdadeiro e que o fardo da prova cabia a Ptolomeu [27].

Esta riqueza de modelos da tradição Maraghah foi estimulada por motivos observacionais, pois, embora ausentes nos textos islâmicos os parâmetros e as derivações, há modelos islâmicos que representavam mais realisticamente a variação do diâmetro solar, cujo modelo excêntrico/epiciclo de Ptolomeu não era questionado, e lunar que a variação apresentada nos modelos ptolomaicos; e por motivos filosóficos, como o caso do problema do equante, cujo questionamento não estava restrito à mecânica da não uniformidade do movimento circular em relação ao seu centro, como contido no *Almagesto*, pois a crítica implícita dirigia-se ao cosmos animado ptolomaico [26], apresentado no livro *Hipóteses dos Planetas*.

Referências

- [1] W.C. Rufus, *Popular Astronomy* **47**, 233 (1939).
- [2] V. Roberts, *Isis* **48**, 428 (1957).
- [3] E.S. Kennedy and V. Roberts, *Isis* **50**, 227 (1950).
- [4] G. Saliba, *Journal for the History of Astronomy* **25**, 115 (1994).
- [5] S. Pines, *Isis* **55**, 343 (1964).
- [6] B.R. Goldstein, *Journal for the History of Astronomy* **4**, 138 (1973).
- [7] G. Saliba, *Arab Studies Quaterly* **4**, 211 (1982).
- [8] O. Neugebauer, *Proceedings of the American Philosophical Society* **106**, 264 (1962).
- [9] E.S. Kennedy, *Isis* **57**, 365 (1966).
- [10] G. Saliba, *Arabic Sciences and Philosophy* **1**, 67 (1991).
- [11] G. Saliba, *Isis* **70**, 571 (1979).

- [12] G. Saliba, *Journal for the History of Astronomy* **20**, 157 (1989).
- [13] G. Saliba, *Journal for the History of Arabic Science* **3**, 3 (1979).
- [14] G. Saliba, *Archives Internationales d'Histoire des Sciences* **37**, 2 (1987).
- [15] O. Neugebauer, *The Exact Sciences in Antiquity* (Ed. Dover Publications, New York, 1967).
- [16] W. Hartner, *Proceedings of the American Philosophical Society* **117**, 413 (1973).
- [17] J.L.E. Dreyer, *A History of Astronomy from Thales to Kepler* (Ed. Dover Publications, New York, 1953), p. 268-271, 2^a ed.
- [18] M. Carra de Vaux, *Les Spheres Célestes Selon Nasir-Eddin Attâsi*. Apendice VI de P. Tannery, *Recherches sur l'Histoire de l'Astronomie Ancienne* (Ed. Gauthier, Paris, 1893), p. 337.
- [19] G. Saliba, *Journal for the History of Astronomy* **18**, 35 (1987).
- [20] F. Abbud, *Isis* **54**, 492 (1962).
- [21] V. Roberts, *Isis* **57**, 208 (1966).
- [22] G. Saliba, *Arabic Sciences and Philosophy* **3**, 161 (1993).
- [23] F.J. Ragep, *Journal for the History of Astronomy* **36**, 359 (2006).
- [24] O. Neugebauer, *A History of Ancient Mathematical Astronomy* (Ed. Springer-Verlag, Berlin, 1975).
- [25] G. Saliba, *Journal for the History of Astronomy* **25**, 15 (1994).
- [26] H.A. Barros-Pereira, *Revista Brasileira para o Ensino de Física* **33**, 2602 (2011).
- [27] G. Saliba, *Zeitschrift für Geschichte der Arabisch-Islamischen Wissenschaften* **1**, 73 (1984).