

Fotometria CCD da variável de período ultracurto CY Aquarii

Tasso Augusto Napoleão e Carlos Alberto Colesanti - REA/São Paulo

1 – Introdução.

Desde os trabalhos pioneiros de Cuno Hoffmeister na década de 1930, foram identificadas cerca de duzentas variáveis Cefeidas com período extremamente curto (duração de seis horas ou menos). Essas raras estrelas foram inicialmente classificadas arbitrariamente segundo sua amplitude e denominadas “Cefeidas anãs” (Smith 1955), “estrelas AI Velorum” (Bessel 1969) ou “estrelas RRs” (Kukarkin et al 1969). Nas últimas décadas, entretanto, passou-se a adotar um critério de maior significado astrofísico e relacionado com a população estelar de cada espécime (Eggen 1970, 1979). Esta será a classificação que utilizaremos neste trabalho. Assim, essa classe de variáveis passou a ser conhecida como “Cefeidas de período ultracurto” e representadas pela sigla no idioma inglês USPC (Ultra Short Period Cepheids).

A maior parte das USPCs é da População I, ou seja, estrelas pertencentes ao disco galáctico e com altas metalicidades. Estas passaram a ser conhecidas como “variáveis Delta Scuti”, segundo seu protótipo. A amplitude de suas variações é muito pequena: sua distribuição mostra um valor mais frequente inferior a um décimo de magnitude (Eggen 1979), embora haja alguns poucos exemplares que possuem amplitudes de até uma magnitude. As estrelas Delta Scuti são quase sempre dos tipos espectrais A ou F, correspondendo a uma faixa de temperaturas efetivas entre 7000 °K e 8500 °K, magnitudes absolutas (bolométricas) entre 0.0 e 3.0 (ou seja, luminosidades entre cinco e oitenta vezes a luminosidade solar), e apresentam massas entre 1.5 e 2.5 massas solares. Essas características indicam sua posição no diagrama H-R como pertencentes à faixa de instabilidade das Cefeidas – ou iniciando a queima de hidrogênio no núcleo na idade zero da sequência principal (ZAMS), ou então numa fase pós-sequência principal, já na etapa de queima de hidrogênio nas camadas externas ao núcleo. Ou seja, sua astrofísica já é razoavelmente conhecida. Entre as Delta Scuti típicas encontramos EH Lib, ZZ Mic, AI Vel, DY Her, RS Gru, BS Aqr, DE Lac e SS Psc, entre outras.

Porém existe outro subgrupo – ainda mais raro e intrigante – de USPCs que possuem várias das características da População II. Tanto é assim que elas habitam o halo galáctico, os aglomerados globulares e as regiões mais antigas do disco. Além disso, sua metalicidade é baixa, como seria de se esperar de objetos da Pop II. No entanto, surpreendentemente, elas são estrelas relativamente jovens – bem mais jovens que os demais objetos dessa população estelar. Para explicar esse comportamento anômalo, suspeitou-se (há cerca de trinta anos) que elas poderiam ser estrelas do tipo *blue stragglers*. Esse nome é geralmente reservado às estrelas de aglomerados globulares que se encontram acima e à esquerda do ponto de inversão (*turn-off point*) da sequência principal do aglomerado; sua “relutância” em deixar a sequência principal parece se dever a algum tipo de troca de massa que influenciaria as suas trajetórias evolutivas – o que ocorreria, por exemplo, se essas estrelas fossem binárias. Embora essa conclusão ainda não seja consensual, na última década mais e mais indicações significativas sobre a validade dessa hipótese têm aparecido na literatura, incluindo a descoberta de muitas variáveis deste grupo entre as *blue stragglers* de globulares como Omega Centauri, M3, NGC 5466 e NGC 5053. Assim, decidiu-se recentemente classificar essas raras e peculiares variáveis de período ultracurto e características de População II como um pequeno grupo à parte, hoje denominado variáveis tipo SX Phenicis (SX Phe), de acordo com seu protótipo mais conhecido. São exatamente as características das SX Phe que decidimos estudar através da fotometria diferencial CCD. O presente artigo pretende sumarizar nossos trabalhos observacionais com a primeira delas: a variável CY Aquarii, cujas características serão descritas mais adiante. Novas pesquisas, com ênfase agora nas pouquíssimas espécimes austrais dessa classe conhecidas até hoje, estão sendo efetuadas atualmente; esperamos publicá-las em edições futuras dos Reportes da REA.

Antes de passarmos à descrição de nossos trabalhos e conclusões, cabe um resumo das características gerais das estrelas SX Phe conhecidas até o presente. Seus períodos têm duração da ordem de desde 0.035 dias (nas estrelas de menor metalicidade), até 0.075

dias para as mais ricas em metais. A amplitude de suas variações no visual vai de menos de 0.05 magnitudes até 0.80 mag. Ao contrário do que ocorre com as Cefeidas anãs, existe uma clara relação entre essas amplitudes e seus períodos: as de maior amplitude possuem períodos mais longos, e vice-versa. Uma relação período-luminosidade pode ser definida e sua mais recente versão (Mc Namara 1997) é utilizada no presente artigo. Apenas oito SX Phe “de campo” haviam sido catalogadas em fins da década de 1990, incluindo CY Aqr, SX Phe, DY Peg, XX Cyg, BS Tuc, BL Cam, SU Crt e KZ Hya. Pouco mais de vinte haviam sido identificadas em globulares como os já citados acima. Trata-se sem dúvida de uma classe de variáveis extremamente rara, e certamente impossível de ser acompanhada com precisão visualmente, sem o uso de fotômetros fotoelétricos ou câmeras CCDs. Seu estudo por parte de amadores é, portanto, um interessante desafio que decidimos enfrentar.

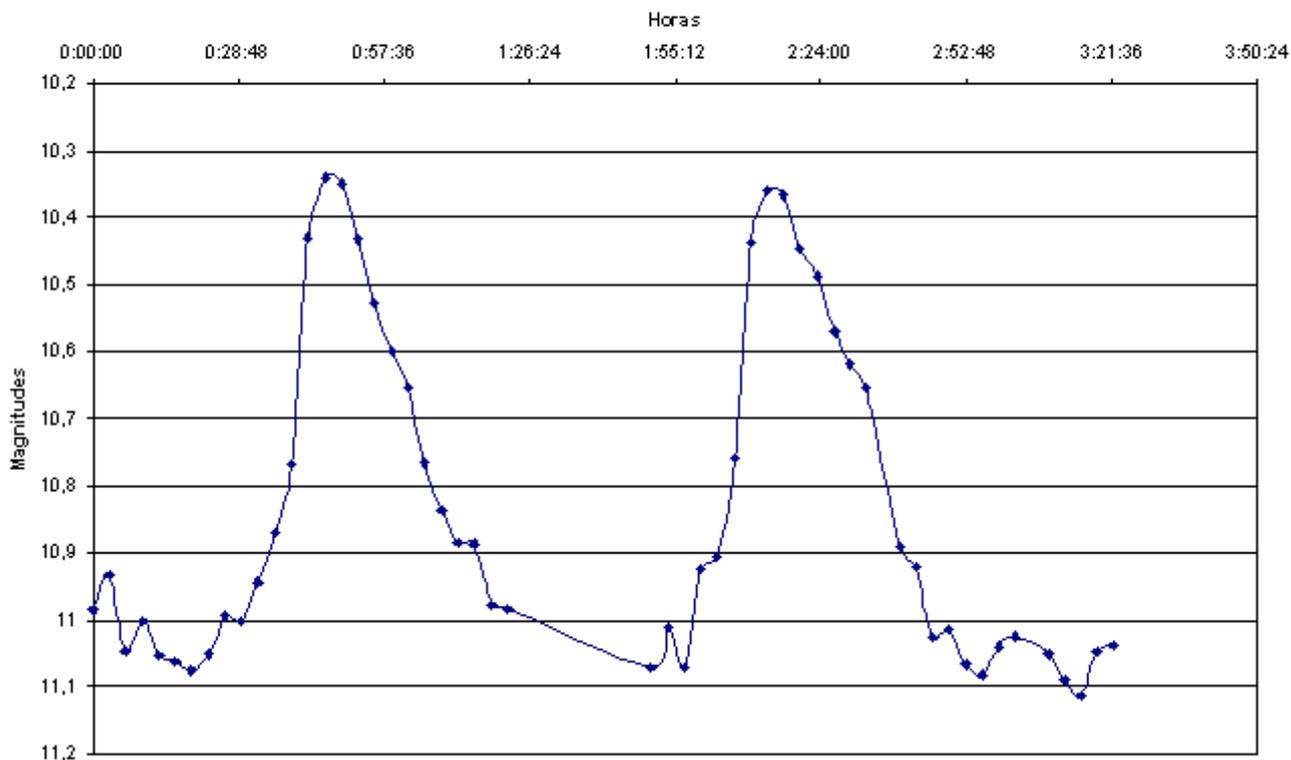
A variável que escolhemos para o início deste programa - CY Aquarii – foi a primeira desta classe a ter sua variabilidade descoberta (por Hoffmeister, em 1930), e pode ser encontrada em ascensão reta 22h 37m 56s e declinação +01°32’56” (equinócio 2000.0). Referências prévias (Mc Namara et al 1996) indicavam um período de cerca de 88 min para a estrela e uma amplitude de variação de 0.74 magnitudes em V.

2 – Trabalhos observacionais.

A série de observações da variável CY Aquarii em que este trabalho se baseia foi efetuada nas noites de 13 - 14 de setembro, 04 - 05 de outubro, e 13 - 14 de outubro de 2001. Utilizamos um telescópio Schmidt-Cassegrain Meade LX-200, de 12 polegadas (305 mm) de abertura e relação focal $f/D=10$ acoplado a um redutor $f/3.3$, levando assim a distância focal para pouco acima de 900 mm. A câmera CCD usada foi a ST-7E da Santa Barbara Instruments Groups (SBIG), em conjunto com o filtro V “*research grade*” do mesmo fabricante, que apresenta FWHM de cerca de 100 Angstroms. A redução fotométrica foi feita com o software “*Astronomical Image Processing for Windows*”, (“AIP4Win”) de Richard Berry e James Burnell; para as reduções posteriores e trabalhos gráficos foi usado o software AVE (*Analisis de Variabilidad Estelar*) desenvolvido por Rafael Barberá, do GEA da Espanha, além do MS Excel. Devemos notar ainda que uma parte de nossos dados foi reduzida independentemente com o software IRAF, usado universalmente pelos profissionais para fotometria CCD, resultando uma excelente concordância com nossos resultados – o que só vem a comprovar a excepcional qualidade do software de Berry e Burnell.

Obtivemos um total utilizável de 142 imagens CCD do campo de CY Aquarii, cada uma delas

Figura 1- Curva de luz de CY Aquarii (04-05/10/2001)



com 10 segundos de integração, e intercaladas entre si por um intervalo de tempo de três minutos. Das referências prévias, já sabíamos que o período de variação de CY Aqr estava ao redor de 88 minutos; nosso planejamento, portanto, previa idealmente uma curva de luz com cerca de 30 pontos para cada ciclo - desde que a noite se mantivesse perfeitamente estável, é claro. Ora, na prática, sabemos que isso raramente ocorre, principalmente nessa época do ano - e assim, em três noites inteiras de monitoramento, pudemos obter duas curvas completas na noite de 04 - 05 outubro, e outras duas na noite de 13 - 14 de outubro. Rejeitamos os pontos obtidos na noite de 13 - 14 setembro, pois a qualidade do céu não se mostrava adequada para as medidas fotométricas.

Cada imagem CCD, centrada em CY Aqr, apresentava campo aproximado de 25 arcmin por 17 arcmin. Este campo era bastante apropriado para que selecionássemos as estrelas de comparação e de checagem para a fotometria diferencial. Escolhemos para comparação a estrela GSC 567-2036, de magnitude $V = 10.78$ (ref. *Tycho 2 Catalogue, 2000*) e classe espectral B9IV; e para checagem, a estrela GSC 567-1826, de magnitude $V = 12.08$. Para cada imagem, a medida fotométrica diferencial feita no *AIP4Win* indicava as diferenças de magnitude DV entre (variável - comparação) e (variável - checagem), além das medidas

da ADU do céu e das três estrelas. Planilhas razoavelmente simples, construídas a partir desses dados, permitiram então construir as curvas de luz.

3 – Curvas de luz brutas.

A curva de luz correspondente aos dois ciclos da noite de 04 – 05 outubro é vista na Figura 1, e aquela que representa os dois ciclos da noite de 13 – 14 outubro, na Figura 2.

Observe-se que, nessas figuras, ainda não indicamos no eixo das abscissas as datas Julianas correspondentes, mas apenas o tempo decorrido desde a primeira medida arbitrária, para que o leitor tenha uma visualização mais clara da curta extensão de cada ciclo.

4 – Curvas de luz fasadas.

No passo seguinte da redução, integramos os diversos ciclos obtidos da observação em uma curva de luz “fasada”, para análise da dispersão dos dados e consolidação dos mesmos em um único ciclo normalizado. Para tanto, realizamos um total de nove “fasagens”, a partir de três diferentes efemérides pré-existentes para a estrela. Essa prática permitiria também uma primeira indicação da existência ou não de possíveis alterações no período da variável no decorrer do tempo

Figura 2 - Curva de luz de CY Aquarii (13-14/10/2001)

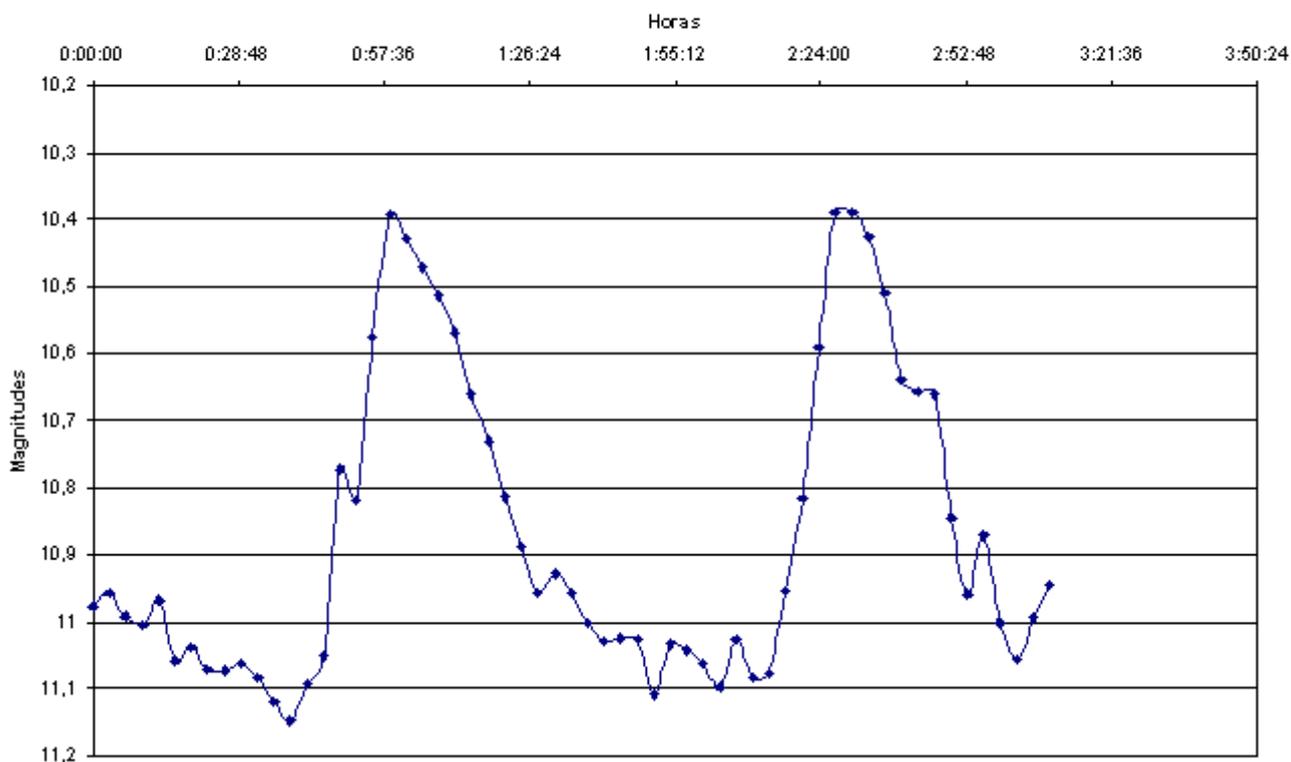
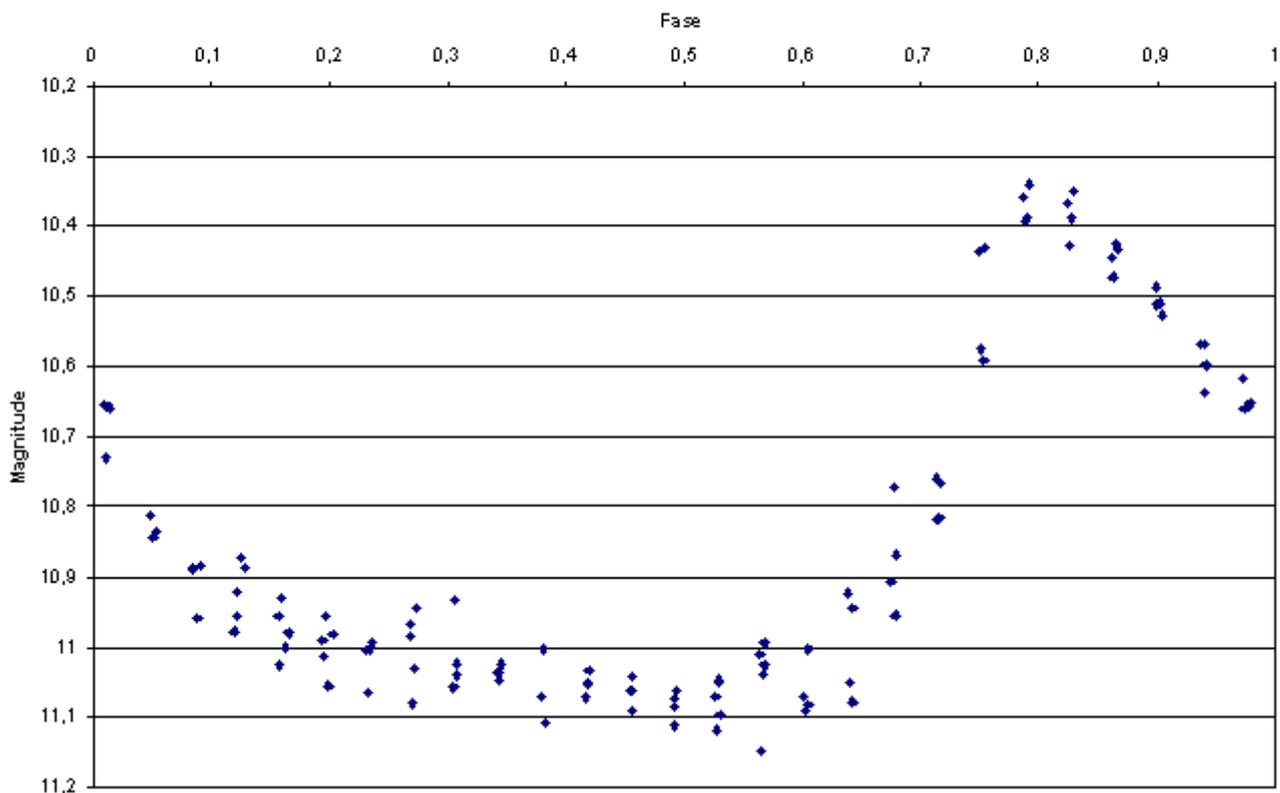


Fig 3 - CY Aqr: Curva de luz fasada (20011004-05 e 20011013-14)



– o que, como veremos mais adiante, acabaria se confirmando.

A primeira efeméride foi a dada em Dolan et al (1992), e foi calculada originalmente por Roland et al (1986). Sua época correspondia à data Juliana 2440892.637, ou seja, a data-calendário de 02/11/1970. O período era dado como 87.89517792 min. Com base nessa efeméride, os ciclos que observamos seriam os de números 185045, 185193 e 184703.

A segunda efeméride foi a dada no IBVS 3428 (Rodríguez et al, 1990). A época era na data Juliana 2446648.487 (05/08/1996), e o período era também de 87.89517792 min. Com base nessa efeméride, os ciclos que observamos seriam os de números 90746, 90894 e 90404.

Finalmente, a terceira efeméride foi a dada em Powell et al (1995) para observações realizadas entre 1989 e 1994. A época neste caso era em DJ 2447668.3152 (21/05/89) e o período, de 87.89560128 min. Esta era a efeméride mais completa e atualizada disponível para a estrela, razão pela qual a usaremos mais adiante nas comparações com nossos resultados.

Por questões de espaço disponível, não reproduziremos aqui todas as nove curvas fasadas obtidas, mas selecionamos (ver figura 3) aquela que escolhemos para as reduções posteriores – baseada na

terceira efeméride e nas noites de 04 – 05 out e 13 – 14 out. A noite de 13 – 14 set, como já mencionamos, foi suprimida. É interessante notar na Fig. 3 a maior dispersão obtida nos trechos da curva nas proximidades do mínimo – fato esse que também se nota nas curvas fasadas de *papers* profissionais (McNamara et al 1996, Powell et al 1995). Neste caso, há também uma dispersão significativa no índice de cor nas proximidades do mínimo, o que possivelmente se relacione à dispersão em V que notamos.

5 - Determinação dos máximos, mínimos e do período.

Os máximos e mínimos foram extraídos das curvas de luz brutas através de duas técnicas distintas, que foram a seguir comparadas para efeito de aferir sua precisão. A primeira foi um simples processo gráfico a partir das curvas Excel – em outras palavras, o bem conhecido método das cordas bi-seccionadas de Pogson, tão usado na fotometria visual. Já o segundo consistiu de uma técnica numérica mais refinada, baseada no algoritmo de Kwee e Van Woerden, e cuja aplicação foi possível através do software AVE, citado acima.

A tabela a seguir demonstra os resultados obtidos pelos dois métodos. Como era de se esperar, o segundo método forneceu resultados bem mais precisos que o primeiro. Nas duas primeiras colunas

temos as datas Julianas heliocêntricas (HJD) obtidas através do processo gráfico (Excel) e pelo processo numérico (AVE). Como informação complementar, indicamos na terceira coluna as incertezas calculadas para este último processo; dependendo do ponto considerado, a incerteza foi estimada entre 0.9 minutos a 2.4 minutos, a mais ou a menos. As magnitudes V medidas encontram-se na última coluna.

Noite de 13-14/10/2001	HJD (Excel)	HJD (AVE)	Incertezas (AVE)	Mag (V)
Máximo 1	2452196.5729	2452196.57855	0.000843	10.38
Mínimo 1	2452196.5580	2452196.55227	0.001376	11.07
Máximo 2	2452196.6362	2452196.63973	0.000774	10.38
Mínimo 2	2452196.6191	2452196.60934	0.000787	11.07
Período em dias (pelos máximos)	0.063300	0.061184		

Noite de 04-05/10/2001	HJD (Excel)	HJD (AVE)	Incertezas (AVE)	Mag (V)
Mínimo 1	2452187.5219	2452187.52055	0.000621	11.07
Máximo 1	2452187.5410	2452187.54377	0.000870	10.33
Mínimo 2	2452187.5813	2452187.57921	0.001688	11.07
Máximo 2	2452187.6018	2452187.60576	0.000908	10.35
Período em dias (pelos máximos)	0.060750	0.061990		

Decidimos, assim, tomar como padrão o processo numérico para as determinações que se seguem. O passo seguinte foi calcular o período mais provável, ponderando as incertezas e a precisão das medidas (baseamo-nos nos máximos apenas, em virtude da maior dispersão dos dados nas proximidades dos mínimos). Este cálculo forneceu o valor que podemos indicar como o mais provável para o período, dentro de nosso limite de erro experimental:

$$P_o = 0.061587 \text{ dias, ou } P_o = 88.68528 \text{ minutos}$$

Em conseqüência, a efeméride que podemos propor baseados em nossas observações seria:

$$C = 2452187.543772 + 0.061587N$$

onde N representa o número inteiro de ciclos passados desde a época DJ=2452187.543772.

6 – Validação dos resultados.

Como se comparariam nossos resultados com aqueles obtidos em pesquisas profissionais ?

O trabalho mais abrangente sobre as efemérides de CY Aquarii foi preparado por um grupo da Brigham Young University, USA (Powell, Joner e McNamara) e publicado em PASP **107** (Março, 1995). Pesquisando possíveis variações a longo prazo no período da estrela, esses autores coletaram 472 épocas individuais dos máximos de CY Aqr, desde as primeiras medidas feitas por Hoffmeister em 1930, até 1994 – um intervalo de 64 anos que cobriu nada menos de 384451 ciclos. Constatando que de fato existiam alterações nos ciclos, e que essas aparentemente se davam de forma descontínua, eles estratificaram as efemérides em quatro equações. A mais recente delas, cobrindo o intervalo de 1989 a 1994, é exatamente aquela a que nos referimos no item 4 acima. Dela extraímos o período de referência:

$$P_R = 0.061038612 \text{ dias}$$

Ora, o período resultante de nossas observações havia sido de:

$$P_o = 0.061587 \text{ dias}$$

Nosso erro observacional foi portanto de aproximadamente **0.89 % apenas**, o que significa um desvio de **47.38 segundos** no ciclo total, em relação à efeméride de referência. Este nos pareceu um resultado realmente bastante razoável, considerando o fato de que trabalhamos com equipamentos amadores. Como se vê, nosso ciclo é menos de **1 % maior** que o ciclo padrão. Porém, até que ponto poderíamos *ter certeza* de que mesmo esta pequena diferença resultou realmente *apenas* de um desvio observacional, e não de um novo (*e real*) aumento no período da estrela, que neste caso teria se dado entre 1994 e 2001 ? Bem, a resposta mais correta que podemos dar aqui seria “Ainda não podemos dizer com certeza; nossa precisão e nosso número de pontos ainda não são suficientes para isso”. Algumas indicações, no entanto, podem ser notadas e serão discutidas no tópico 7 do presente artigo.

Quanto aos valores médios das magnitudes máxima e mínima, nossos resultados

indicaram respectivamente $V = 10.36$ e $V = 11.07$ (com incerteza maior para os mínimos, devido à dispersão). Comparados aos de Powell et al 1995 ($V = 10.42$ e $V = 11.16$ respectivamente), nossos dados apresentaram também concordância bastante razoável, com um erro residual da ordem de 0.06 mag nos máximos e 0.09 mag nos mínimos. A amplitude da variação foi também razoável ($\Delta V = 0.71$ mag em nossos dados e $\Delta V = 0.74$ mag nos de Powell et al). As fontes dos desvios nas magnitudes máxima e mínima podem estar relacionadas (ao menos em parte) à magnitude que admitimos como padrão para a estrela de comparação GSC 567-2036. Lamentavelmente, não existem muitas referências à magnitude V desta estrela, nem mesmo nos bancos de dados “Vizier” e “Simbad”, do *Centre de Données Astronomiques* (CDS) de Strasbourg – sabidamente os mais completos do mundo. Uma referência anterior indicava o valor $V = 10.71$ para a estrela. Esta referência consta do *Hipparcos and Tycho Catalogue* (ESA 1997), que como sabemos é um padrão astrométrico da melhor qualidade, mas nem sempre um padrão ideal para a fotometria. A outra fonte (o *Tycho 2 Catalogue*, de 2000), foi assim escolhida para este trabalho.

7 – Cálculo dos parâmetros físicos de CY Aquarii.

Neste ítem, procuramos calcular uma série de parâmetros físicos de CY Aquarii, a partir de nossos dados observacionais e diversas relações astrofísicas conhecidas. Em seguida, uma comparação é feita com os resultados do paper mais completo que pudemos identificar sobre o assunto (McNamara et al, *The Physical Properties of the SX Phoenixis Star CY Aquarii*, publicado em dezembro de 1996).

Foram calculados os seguintes parâmetros de CY Aqr com base em nossos dados:

- (a) Magnitude absoluta média M_v
- (b) Luminosidade média em unidades solares
- (c) Distância da estrela
- (d) Raio médio da estrela
- (e) Massa da estrela
- (f) Gravidade superficial
- (g) Densidade média

(a) Magnitude absoluta média M_v :

Para determiná-la, utilizamos uma relação empírica período-luminosidade recentemente desenvolvida para as estrelas da classe SX Phoenixis (McNamara, 1997). Esta relação P-L é expressa pela equação:

$$M_v = -3.725 \log P - 1.933$$

Utilizando nosso período P_o já visto no ítem 6 acima ($P_o = 0.061587$ dias), temos :

$$M_v = 2.58$$

(b) Luminosidade média: Pode ser calculada com o Sol como padrão pela equação:

$$M_{v, \text{SOL}} - M_v = 2.5 \log (L / L_{\text{SOL}})$$

Usando M_v calculado acima e o valor de 4.82 para a magnitude absoluta do Sol, resulta o valor de L, medido em luminosidades solares:

$$L = 7.90 L_{\text{SOL}}$$

(c) Distância de CY Aquarii: Pode ser estimada através da equação do módulo de distância, considerando a extinção interestelar ou avermelhamento (A_v). Nesta equação, usamos os valores médios de magnitude aparente (medida) e absoluta (calculada acima), bem como a extinção A_v , cujo valor (0.251) calculamos usando o banco de dados do NED (*NASA Extragalactic Database*). Ver abaixo:

$$V - M_v = 5 \log D - 5 + A_v$$

$$10.71 - 2.58 = 5 \log D - 5 + 0.251$$

$$D = 378 \text{ parsecs (ou cerca de 1232 anos-luz)}$$

(d) Raio médio de CY Aquarii : Pode ser estimado pela equação abaixo, derivada da teoria do corpo negro. Nela, T representa a temperatura efetiva da estrela (que foi avaliada em 7740 °K em McNamara et al 1997), M_v é a magnitude absoluta que calculamos acima, e a constante C, cujo valor numérico é 0.02, é introduzida para normalizar o valor do raio para unidades de raio solar:

$$\log R = 5700 / T - C - 0.2 M_v$$

Resultou para R o valor abaixo:

$$R = 1.59 \text{ raios solares}$$

(e) Massa de CY Aquarii: Utilizamos a equação de pulsação, vista abaixo. Nesta, P_0 representa o período fundamental (aquele que medimos); M e R são respectivamente a massa e raio médio da estrela (que acabamos de calcular); e Q é a constante de pulsação, cujo valor é de 0.0313 dias, para estrelas SX Phenicis com a metalicidade de CY Aqr (McNamara et al 1997)

$$M / R^3 = Q / P_0$$

Substituindo, resulta para M o valor de:

$$M = 1.04 \text{ massas solares}$$

(f) Gravidade superficial: calculada em cm^2 / seg pela expressão da constante de gravitação de Newton. Expressamos o resultado em $\log g$, ao invés de g , da forma como esse valor costuma ser indicado na literatura :

$$g = GM / R^2$$

Substituindo os valores de M e R obtidos e da constante de gravitação universal, resulta:

$$\text{Log } g = 4.05$$

(g) Densidade : Obtida simplesmente pela divisão da massa pelo volume, supondo a estrela esférica. Temos assim:

$$d = M / V, \text{ onde } V = (4P R^3) / 3$$

$$D = 0.92 \text{ g / cm}^3$$

Finalmente, a tabela a seguir consolida todos os parâmetros que obtivemos e os compara com os resultados calculados no *paper* de McNamara et al (1996):

Podemos agregar também aos dados acima a comparação já feita no ítem 6 entre nossos dados fotométricos e os obtidos por Powell et al (1995):

A observação dessas duas tabelas evidencia a compatibilidade de nossos resultados e os dos *papers* profissionais usados como referência, e demonstra que é possível a realização de um trabalho fotométrico de qualidade, mesmo com as limitações naturais decorrentes do equipamento amador usado.

	Este trabalho	Mc Namara et al
Magnitude absoluta média	2.58	2.59
Luminosidade em unidades solares	7.90	7.79
Distância da estrela, em parsecs	378	N/A
Raio médio da estrela, em unidades solares	1.59	1.59 +-0.02
Massa da estrela, em massas solares	1.04	1.06+-0.05
Gravidade superficial, em log	4.05	4.04+-0.08
Densidade média	0.92	N/A

	Este trabalho	Powell et al (1995)
Período em dias	0.061587	0.061038612
Magnitude nos máximos	10.36	10.42
Magnitude nos mínimos	11.07	11.16

Naturalmente, há o que se aperfeiçoar em nossa técnica e em nossos procedimentos – por exemplo, a calibração prévia por meio de uma “cesta” de estrelas-padrão de comparação, ou a redução no intervalo de tempo entre duas imagens sucessivas. Assim, acreditamos que será perfeitamente possível, nos trabalhos futuros, refinar ainda mais a precisão de nossos dados.

8 – O período de CY Aquarii estaria aumentando?

Podemos dizer que não há dúvidas que o período de variação de CY Aquarii aumentou consideravelmente desde a sua descoberta em 1930. Uma simples observação do diagrama das datas de máximo observadas menos as correspondentes datas calculadas (ou seja, o chamado diagrama (O – C)), permite visualizar este fato com clareza. Ver a respeito, por exemplo, o *paper* de Powell et al (1995) já mencionado várias vezes no presente texto.

No entanto, está claro também que ainda não existe um consenso sobre a interpretação desse fenômeno, e muito menos sobre a forma como ele se dá. Diversas interpretações diferentes podem ser encontradas na literatura, porém, de uma forma geral, elas acabam se enquadrando em um entre dois modelos principais. O primeiro deles, sugerido por Coates et al (1994), admite uma variação *contínua e decrescente* no

período da estrela, possivelmente causados por efeitos de luz em um sistema binário. Se esta hipótese for verdadeira, então o diagrama (O – C) deveria apresentar um aspecto parabólico. A segunda, ao contrário, assume variações *descontínuas e abruptas* no período, de tempos em tempos e de forma mais ou menos aleatória. Nos intervalos entre duas discontinuidades, o período se manteria constante. Ora, mudanças abruptas e descontínuas de período implicariam em que o diagrama (O – C) tivesse a forma de segmentos de reta consecutivos, e neste caso as variações de período poderiam ser positivas ou negativas (ou seja, períodos crescentes ou decrescentes). O mecanismo que explicaria esse comportamento é bem mais complexo, e deveria envolver provavelmente efeitos de troca de massa e de mistura aleatória em zonas semi-convectivas. Uma aceitação desta hipótese (proposta, como já vimos, por Powell et al) implicaria também em que novas mudanças de período pudessem ocorrer em poucos anos após a publicação de seu *paper* em 1995.

Examinemos nossos dados observacionais e vejamos se conseguimos detetar alguns desses fenômenos. Vamos, em primeiro lugar, construir uma curva de luz V normalizada, tomando como base observações anteriores. Dados para a construção dessa curva-padrão foram encontrados em McNamara et al

(1996). Indicamos na Figura 4 a curva normalizada e já fasada.

A seguir, vamos adicionar nossos dados brutos e fasados, conforma descrevemos no item 4. Esta curva é a mesma da Figura 3, porém inserimos agora nela barras de erro que representam a incerteza instrumental de nossas medidas – e que avaliamos em dois centésimos de magnitude. Recordemos que as efemérides que usamos na fasagem foram as mesmas usadas para a construção da curva normalizada. O resultado é visto na Figura 5.

Nota-se imediatamente que, apesar de haver uma coincidência razoável no *formato* das duas curvas, elas estão deslocadas entre si – tanto na vertical, como na horizontal. Ora, o efeito vertical (em magnitudes) é com certeza decorrente de um erro experimental sistemático (talvez causado pela calibração da câmera CCD usada, ou por um pequeno erro na magnitude-padrão considerada para a estrela de comparação, como já mencionamos anteriormente, ou por ambos). Vamos esquecer-lo por um momento. Mas o erro na horizontal (ou seja, em fase) pode ser um indicador valioso. Note-se que nossa curva observacional está à *esquerda* da normalizada – o que significa que um ponto qualquer da curva (por exemplo, o máximo, que corresponde à fase 1) está *atrasado* no ciclo; o

Figura 4 - CY Aqr. Curva de luz normalizada

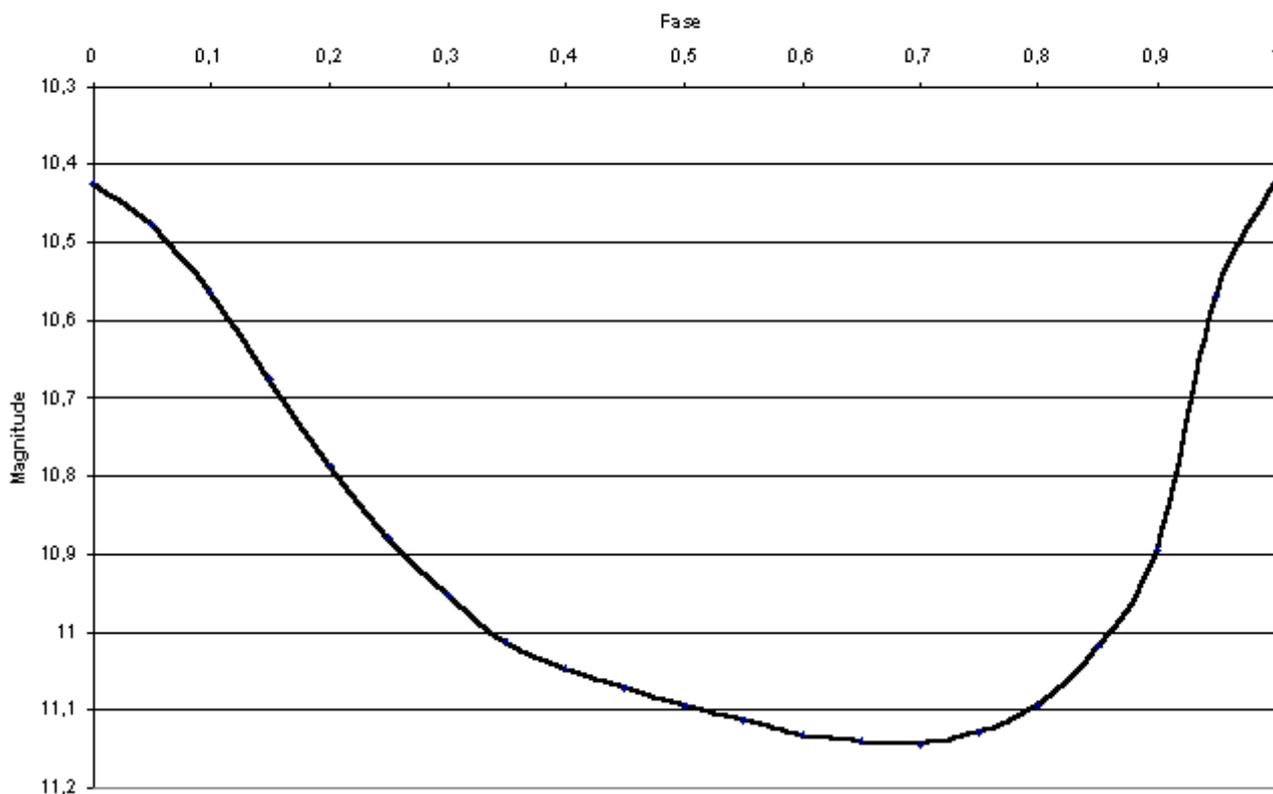


Figura 5: Curva normalizada vs observada

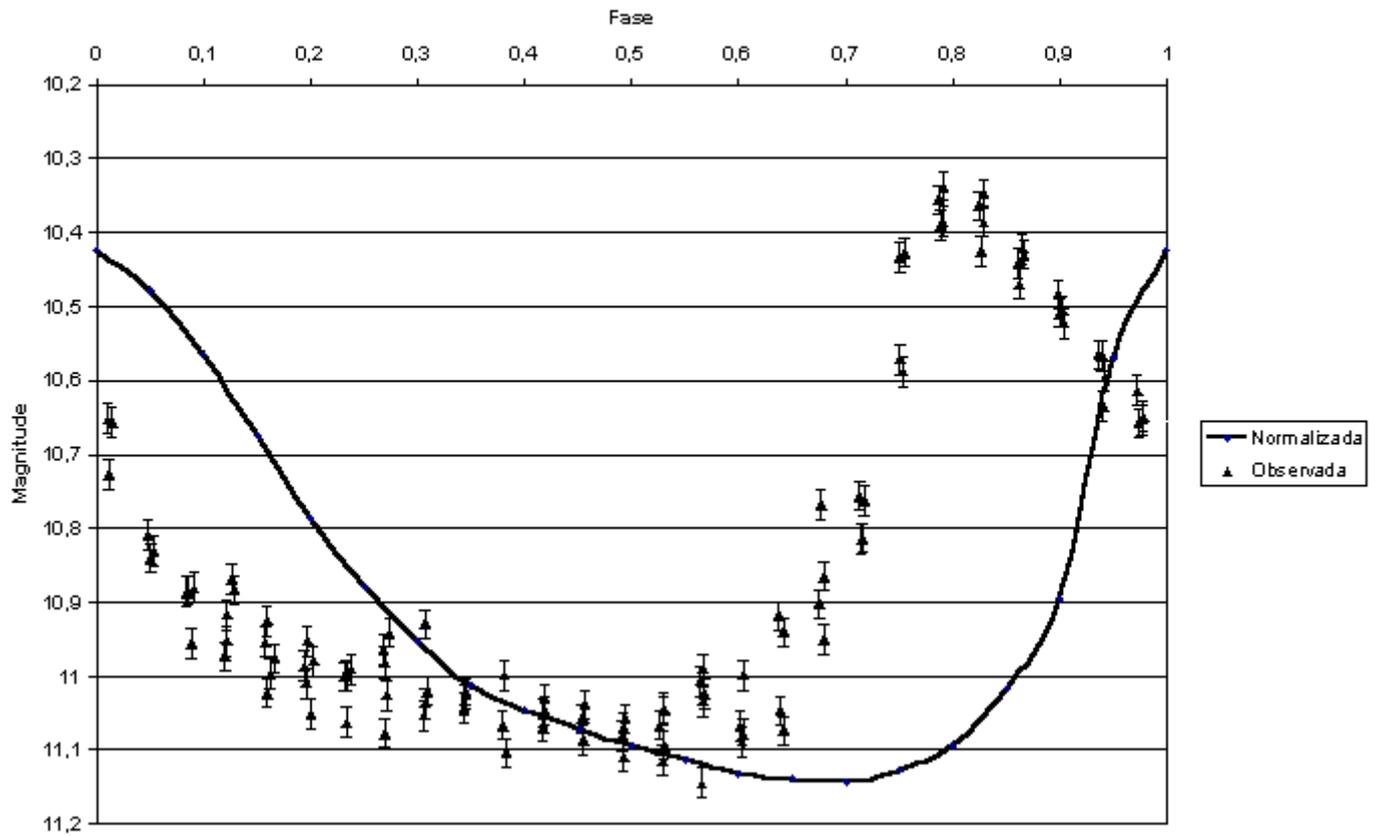
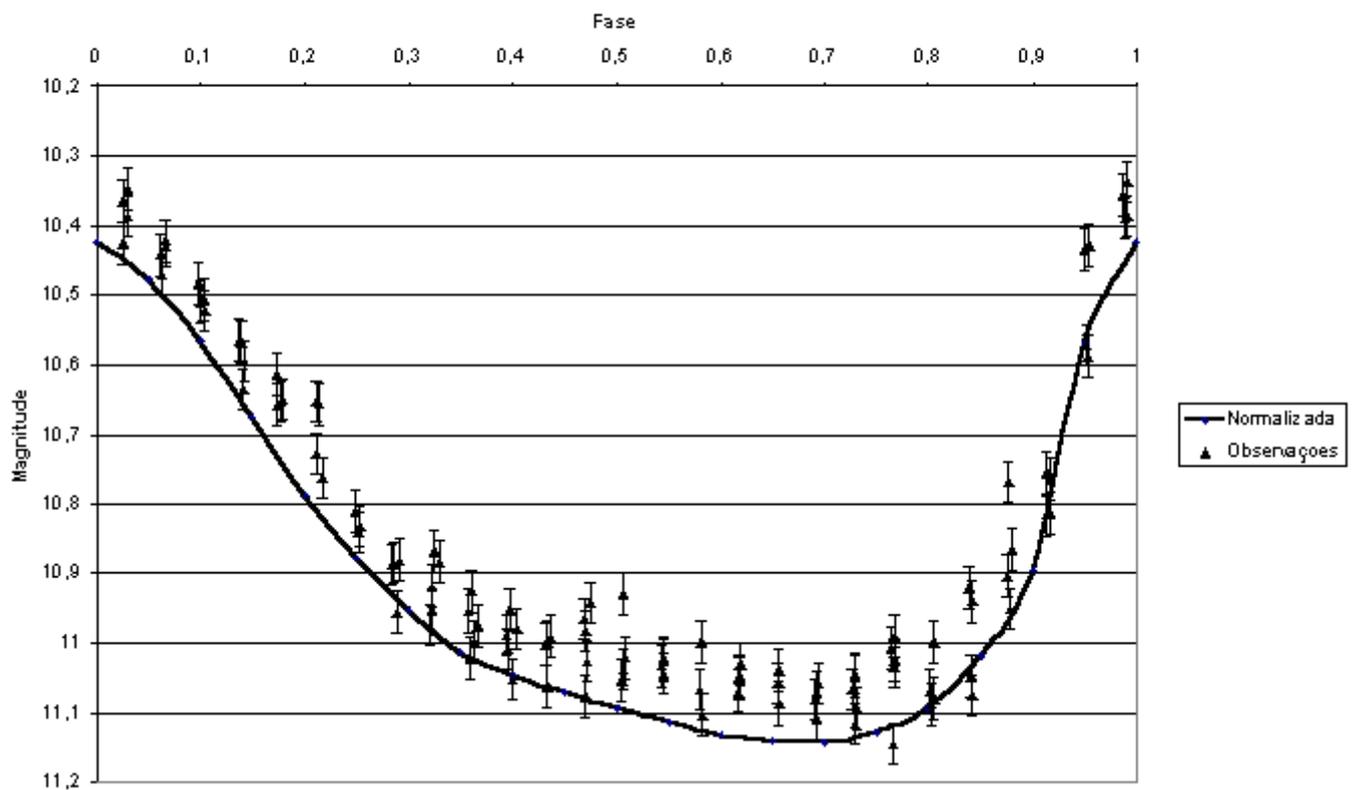


Figura 6-Curva normalizada vs observada, fase corrigida



máximo, em nosso exemplo, parece ser atingido em torno da fase 0.8 – um atraso de 0.2 na fase. Isto poderia indicar que o período *aumentou* desde a época em que as efemérides foram calculadas (1994), o que estaria sem dúvida em linha com as previsões de Powell et al. Calculamos então o que ocorreria se corrigíssemos essa defasagem de 0.2 fases. O resultado é visto na Figura 6.

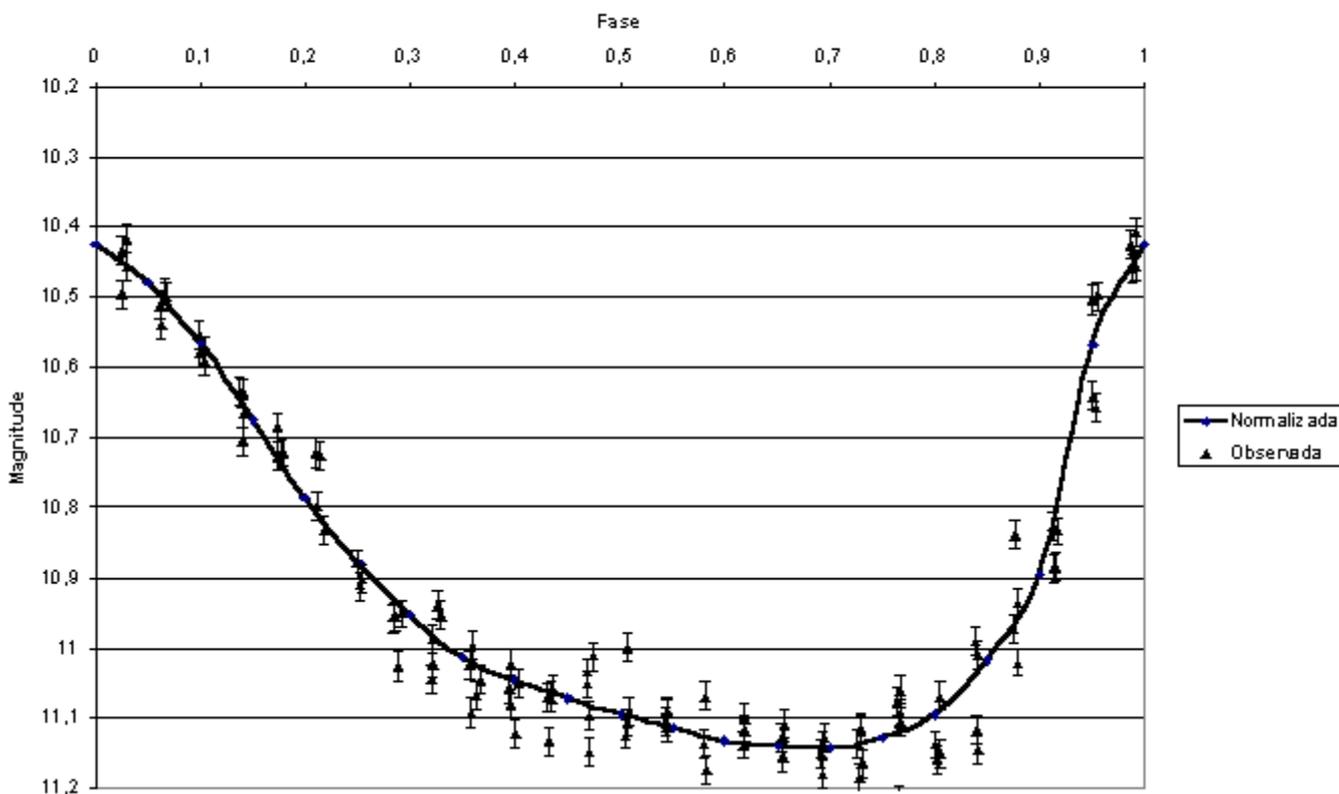
Bem, as duas curvas parecem agora bem mais compatíveis – com exceção, é claro, do desvio na vertical a que nos referimos há pouco. Num último passo, vamos corrigi-lo também. Lamentavelmente, não temos, no momento, meios de determinar o fator preciso de ajuste (lembramos que só existem nas referências duas medidas da magnitude da estrela-padrão, ambas provavelmente imprecisas). Na falta de uma melhor premissa, imaginemos que o fator de correção seja da ordem da diferença entre as duas medidas existentes nas referências – ou seja, cerca de 0.07 magnitudes – e vamos recalcular a curva de acordo com essa premissa. O resultado é visto na Figura 7.

Nota-se agora que a curva de nossos resultados apresenta concordância quase perfeita com a curva normalizada. As conclusões a que chegamos são: a primeira, que será necessário fixar com exatidão o padrão de magnitude da estrela GSC 567-2036 através de uma calibração com estrelas-standard com precisão de centésimos de magnitude; e a segunda, que parece ter

havido realmente, entre 1994 e 2001, outra descontinuidade no período de CY Aquarii, como previsto por Powell et al em 1995.

Infelizmente, nossa base de dados é ainda muito pequena para comprovar essa última hipótese através de um diagrama (O-C) baseado em nossas observações. Será necessário estender o monitoramento de CY Aquarii por mais um bom tempo – talvez dois ou três anos a mais – para que possamos confirmar esse possível alongamento do período com mais segurança. Numa última tentativa, no entanto, pesquisamos as observações de CY Aqr publicadas por outros autores desde 1994, para construir, com seus dados e mais os nossos, um diagrama (O-C) desde aquele ano. Lamentavelmente, existiam apenas duas referências neste sentido: a de Jian-Ning et al, no IBVS 3970, com nove medidas (Janeiro de 1994) e a de Agerer e Huebscher, do BAV Mitteilungen alemão, no IBVS 4382 (Outubro de 1996), mas com apenas duas determinações de máximos. É muito pouco para que possamos tomar conclusões efetivas, principalmente porque os dados dos primeiros autores são também de 1994. A título de curiosidade apenas para os leitores, reproduzimos na Figura 8 abaixo o diagrama (O-C) construído com os dados combinados daqueles autores e mais os nossos.

Figura 7- Curva normalizada vs observada, corrigida em fase e magnitudes



9 - Sumário e conclusões.

Neste trabalho - o primeiro de uma série visando o monitoramento de uma série de variáveis de período ultracurto da classe SX Phenicis - estudamos a estrela CY Aquarii através de fotometria diferencial CCD. Foram obtidas 142 medidas da magnitude V da estrela, que indicaram um período da ordem de 0.061587 dias, ou 88.68528 minutos. A precisão de nossas medidas concordou, com uma margem de erro inferior a 1%, com os dados existentes na literatura profissional. As médias das magnitudes V para os máximos e mínimos da variável foram de 10.36 e 11.07, também compatíveis, dentro de margens de erro respectivamente de 0.06 mag e 0.09 mag, com as referências profissionais. Os parâmetros físicos de CY Aquarii foram calculados com base em nossos dados e em equações astrofísicas convencionais, resultando uma boa compatibilidade com os resultados publicados por outros autores. A comparação de nossas curvas de luz com uma curva normalizada, construída com base em observações até 1994, indicou a existência de um possível aumento no período da variável desde aquela época; uma série temporal mais extensa de medições fotométricas será necessária para comprovar essa hipótese.

10 – Referências bibliográficas.

Agerer, F. and Huebscher, J.: Photoelectric minima and maxima of selected eclipsing and pulsating variables, *IBVS 4382, 1996.*

Binney, J.; and Merrifield, M.: Galactic Astronomy, *Princeton University Press, 1998.*

Dolan, C.; Houck, J.; and Tripoli, R.: Dwarf cepheid variable stars: a study of CY Aquarii, *JAASO, 21, 93-98, 1992.*

Jian-Ning, F.; Shi-Yang, J.; and Yan-Ying, L.: New times of maxima and minima for CY Aquarii, *IBVS 3970, 1994.*

McNamara, D.H.: Luminosities of SX Phoenicis, large-amplitude Delta Scuti, and RR Lyrae stars, *PASP 109, 1221-1232, 1997.*

McNamara, D.H.; Powell, J.M.; and Jonez, M.D.: The Physical properties of the SX Phoenicis star CY Aquarii, *PASP 108, 1098-1104, 1996.*

Nemec, J.; and Mateo, M.: SX Phoenicis stars, *PASP symposium proceedings, 64-76, 1990.*

Ostlie, D.A.; and Carroll, B.W.: An introduction to modern stellar astrophysics, *Addison-Wesley Publ. Co., 1996.*

Powell, J.M.; Jonez, M.D.; and McNamara, D.H.: Long-term period variations of the SX Phoenicis stars CY Aquarii, *PASP 107, 225-231, 1995*

Rodriguez, E.; Lopez de Coca, P.; Rolland, A.; and Garrido, R.: New times of maxima for CY Aquarii, DY Peg and BL Cam, *IBVS 3428, 1990.*

Rodriguez, E.; Lopez de Coca, P.; Rolland, A.; Garrido, R.; and Costa, V.: Delta Scuti stars: a new revised list, *A&A SS 106, 21-28, 1994.*

Figura 8 - CY Aqr - Diagrama (O - C) de 1994 a 2001

