

Alguns mitos sobre telescópios e qualidade óptica

Guilherme de Almeida
g.almeida@vizzavi.pt

Introdução

De quando em quando ouvem-se ou lêem-se histórias sobre a relação entre a qualidade óptica de um telescópio e a seu efectivo desempenho. Uns pensam que qualquer telescópio é bom (ou que todos os telescópios são iguais desde que sejam da mesma abertura). Outros entendem que se o erro na frente de onda não for pelo menos $\lambda/10$ pv o telescópio não presta (λ designa o comprimento de onda da luz e para os testes de qualidade óptica dos telescópios considera-se geralmente 630 nm ou 532 nm, consoante os construtores). Até onde vão as complacências de uns e os exageros de outros?

Estes mitos são realmente interessantes, mas, para terem sentido, as afirmações devem ser completas, caso contrário não se sabe de que é que se está a falar. Informações incompletas prestam-se a distorção informativa. Comentarei neste artigo alguns dos mitos mais correntes.

Superfície de onda e frente de onda

Para tornar mais compreensível a linguagem que será utilizada a seguir, impõe-se definir rapidamente alguns termos. A função de um telescópio é, transformar cada feixe de raios paralelos entre si, vindos de cada ponto do objecto observado (a uma distância que para efeitos práticos na observação astronómica se pode considerar infinita), num feixe de raios convergentes num ponto do plano focal. Em particular, se o ponto visado se encontrar no eixo do telescópio, o feixe convergente que a objectiva produz irá convergir no foco principal, F (Fig.1). Em alternativa à linguagem dos raios luminosos pode-se utilizar com vantagem, em certos casos, a linguagem das superfícies de onda, que são, por definição, *perpendiculares em cada ponto* ao raio luminoso que passa por esse ponto.

Reformulando a linguagem, um telescópio tem por objectivo transformar um conjunto de superfícies de onda planas e paralelas entre si num conjunto de superfícies de onda esféricas e centradas no seu foco. A Fig.1 mostra simultaneamente ambas as linguagens: a dos raios luminosos e a das superfícies de onda, evidenciando a perpendicularidade já definida.

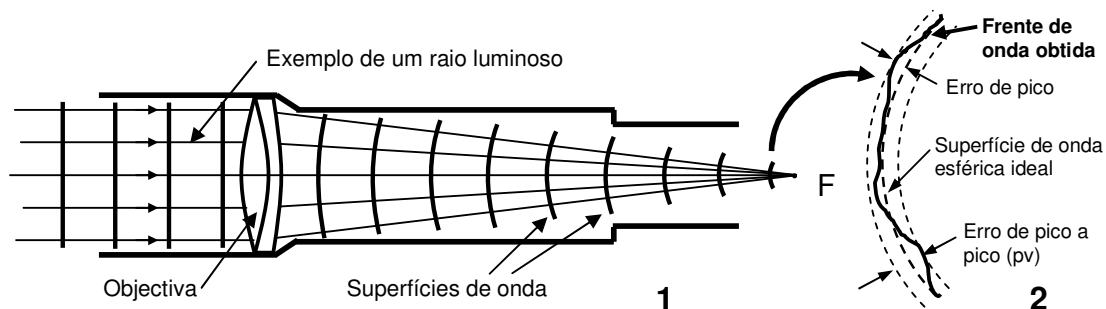


Fig. 1. A função básica de um telescópio (apenas a óptica principal), utilizando a representação dos raios luminosos e a das superfícies de onda. O conceito é genérico e também aplicável a telescópios reflectores. Guilherme de Almeida (2007)

Todos os pontos da mesma superfície de onda estão na mesma fase de vibração e a frente de onda pode ser vista como uma superfície de onda escolhida para estudo. A análise da frente de onda refere-se à óptica principal de um telescópio e a ocular fica fora desse conceito. No entanto inclui-se toda a óptica desde que a luz entra no telescópio até chegar ao seu foco. Por isso, o espelho secundário ou a lente correctora (de um telescópio catadióptrico) entram globalmente na análise. Porém, os requisitos propostos só seriam atingidos plenamente por um telescópio perfeito (telescópio ideal), o que, como devemos saber, não existe no nosso mundo (Fig. 2-1).

Os telescópios reais só conseguem criar superfícies de onda *aproximadamente* esféricas (Fig. 1-2). O desvio entre a forma efectivamente obtida da *onda emergente* (a que abandona o último elemento da óptica principal do telescópio real) e forma da superfície de onda esférica que se deveria obter num telescópio ideal mede a qualidade do telescópio. Quanto menores forem esses desvios, melhor será o telescópio. Tendo em conta a perpendicularidade já referida, o leitor pode concluir que os desvios à esfericidade da frente de onda significam imperfeições de convergência do feixe que converge para o foco. Os esquemas 2 e 3 da Fig. 2 mostram dois casos típicos, referidos na legenda dessa mesma figura.

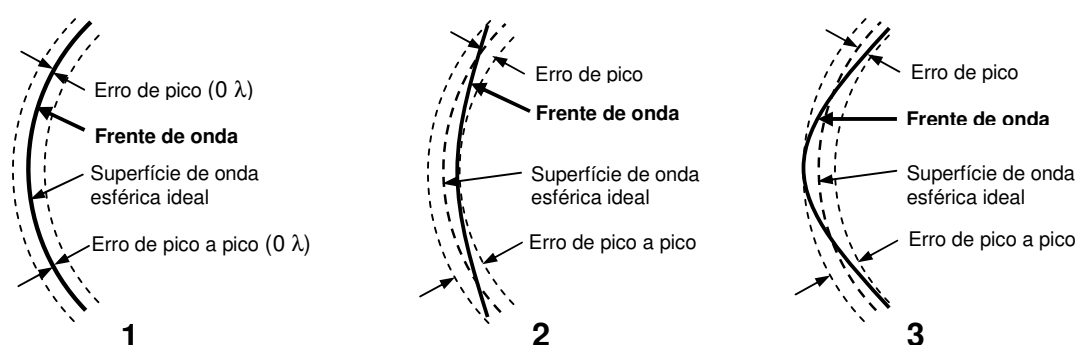


Fig. 2. 1-telescópio perfeito (a frente de onda coincide com a superfície esférica ideal: não há erros); 2- telescópio com aberração de esfericidade (sobrecorreção; 3- telescópio com aberração de esfericidade (subcorreção).

Para quê tanta ênfase na aberração de esfericidade? Será esse o único problema dos telescópios? De facto não é o único problema, mas num instrumento bem construído, com superfícies sem vícios de forma, sem ondulações de superfície (*ripple* e *microripple*) e sem defeitos zonais, a aberração de esfericidade é dominante. Nos refractores, mesmo nos apocromáticos, a aberração de esfericidade varia com a cor da luz, o que se traduz na aberração esferocromática já abordada num artigo que publiquei recentemente na *Revista Astronomia de Amadores*.

Mito 1— um espelho com erro de 1/4 de onda na frente de onda é apenas limitado pela difracção (*diffraction-limited*).

O termo "limitado apenas pela difracção" (*diffraction-limited*) tornou-se a bandeira dos fabricantes de telescópios em massa que pretendem usá-lo como se fosse um atestado de qualidade suficientemente boa. Tal termo (quando usado honestamente) significa apenas que o telescópio é suficientemente perfeito de tal modo que imagens que proporciona (na ausência de qualquer turbulência) não diferem significativamente das originadas por um telescópio perfeito. Os sublinhados anteriores mostram que não se trata de um instrumento impecável ou exemplar, e dão margem para a utilidade de instrumentos ainda melhores; mas tal requinte exige mais tempo de produção e cuidados redobrados, o que não condiz com a produção em massa nem com preços muito acessíveis.

A afirmação "um espelho com erro de 1/4 de onda na frente de onda é apenas limitado pela difracção" é um dos casos típicos de informação incompleta. Ora vejamos. Não se diz se o erro é ptv, ou pv (ambos significam "pico-a-vale" ou pico-a-pico) ou se é RMS (Root Mean Square=desvio-padrão). Vamos assumir que é ptv. Ora um espelho pode produzir um erro de 1/4 de comprimento de onda (ptv) na frente de onda e ser bastante mau; e também pode produzir 1/4 de erro pv na frente de onda e ser razoavelmente bom, até mesmo *diffraction-limited*. Veremos seguidamente porquê.

Se a área da parte da frente de onda onde o erro é $1/4$ de onda for diminuta em relação à frente de onda total que converge para o foco, então o espelho será razoável, e tanto melhor quanto mais pequena for essa fracção. Num espelho bem construído só uma pequena fracção da frente de onda terá esse erro de $1/4$ de onda; o resto será muito melhor do que isso. Por outro lado, se uma parte substancial da frente de onda tiver um erro pv de $1/4$ e só uma pequena parte dessa frente for melhor que $1/4$ de onda (o que é típico de um espelho mal feito), nesse caso o espelho é mau. Por exemplo se 5% da área do espelho tiver um erro pico a pico de $1/4$ de onda e os restantes 95% tiverem erros menores do que $1/4$ de onda pv, o espelho é bom. Há muito que se sabe que o erro pv, só por si, não basta para caracterizar a qualidade do espelho (ou de uma óptica para astronomia). Mais importante é o declive da frente de onda na vizinhança das regiões com $1/4$ de onda de erro: baixos declives dão melhores resultados do que declives acentuados (conforme é referido por autores como Texereau, André Danjon, André Couder, Maréchal e outros). Por isso o melhor indicador é o erro RMS na frente de onda ou então o índice (ou factor) de Strehl, que está directamente relacionado com o erro RMS e a com a obstrução da pupila de entrada.

O critério de Rayleigh (erro pv não excedendo $1/4$ de onda na frente de onda) é válido para definir um limite de qualidade para um telescópio (bem construído) "diffraction-limited" mas está incompletamente referido. De facto, a afirmação não acaba aí: tem de se acrescentar (faz parte do critério) que na maior parte da frente de onda o erro será apreciavelmente menor do que esse $1/4$ de onda. Num espelho com estas características, bem construído, sem vícios de forma, o erro RMS na frente de onda não excederá $\lambda/14$ ou, o que é equivalente, o factor de Strehl não será inferior a 0,80. Assim, o telescópio será "diffraction limited". Isto não quer dizer que em condições excepcionais de baixíssima turbulência, e com um observador perspicaz, um telescópio com erro RMS na frente de onda menor que $\lambda/14$ não dê melhores resultados, sobretudo em observação planetária. Por outras palavras, $\lambda/14$ RMS (ou $\lambda/4$ pv), ambos na frente de onda, constituem o critério *mínimo* para se ter um telescópio de qualidade satisfatória. Mais adiante farei algumas considerações adicionais envolvendo o impacto da obstrução no índice de Strehl.

Mito 2—Um espelho com $1/4$ na frente de onda ($1/8$ na superfície) é um espelho de óptima qualidade.

Na verdade, isto já está implicitamente respondido no ponto 1, dado que um espelho com erro pv de $1/4$ de comprimento de onda, na frente de onda é, por inerência fácil de demonstrar, um espelho com erro pv de $1/8$ na superfície (a reflexão duplica o erro).

Há ainda a famosa experiência de Ceravolo, Dickinson & George (1992): Ceravolo construiu expressamente 4 telescópios newtonianos de 15 cm ($f/8$), com erro na frente de onda apenas por aberração de esfericidade de 1 λ ; $\lambda/2$; $\lambda/4$ e $\lambda/10$, designados respectivamente por letras, por exemplo A, B, C e D. Ora, a equipa desafiou vários observadores credenciados a distinguir os telescópios só por observação visual: os telescópios A e B foram prontamente considerados maus; mas houve muita dificuldade em distinguir os telescópios C e D. Pareciam iguais a quase toda a gente e indistinguíveis com *seeing* médio e bom. Só em circunstâncias excepcionais (*seeing* muito bom) e observadores muito perspicazes, esforçando-se no teste, é que foi possível detectar uma ligeira diferença. Eram telescópios bem feitos, apesar de terem aberração de esfericidade, mas intencionalmente doseada. O artigo de Ceravolo, Dickinson & George (ver nota nas referências finais) foi muito revelador. O resumo das conclusões é o seguinte:

«Terry Dickinson, Peter Ceravolo and Doug George conducted an experiment in which Ceravolo made a set of 6" $f/8$ Newtonians, identical except for the wavefront error of their mirrors. Many observers were invited to try these, and were consistently able to spot the ones made to $1/2$ wave or poorer, but only very experienced observers could detect the subtle differences between $1/4$ wave and $1/10$ wave. Their conclusion was that most amateurs would be perfectly happy with the views from any scope that was an honest $1/4$ wavefront or better.»

Em condições de observação muito favoráveis (turbulência exemplarmente baixa) os observadores planetários mais exigentes, ao observarem pormenores de baixo contraste, descrevem benefícios crescentes quando as frentes de onda instrumentais são gradualmente melhores, até cerca de $\lambda/16$, o que em espelhos bem feitos significa cerca de $\lambda/60$ RMS (ou menor), mas isto refere-se a circunstâncias excepcionais, em locais de eleição, e não à prática corrente do astrónomo amador.

Mito 3—Um espelho esférico de 15 cm f/8 não precisa de ser parabólico.

Um espelho de 15 cm de abertura, com relação focal f/8 apresenta na frente de onda um erro (e) de 1/4 de comprimento de onda. A expressão para calcular isto é simples:

$$e = \frac{8,7 \times D}{\left(\frac{f}{D}\right)^3},$$

onde D é a abertura do telescópio em centímetros, f é a distância focal, nas mesmas unidades de D, e "e" é o erro na frente de onda, expresso em função do comprimento de onda. Para $D=15$ cm e $f/D=8$, teremos

$$e = \frac{8,7 \times D}{8^3} = 0,2548... \text{ (0,25 com dois algarismos significativos), ou seja, } e \approx \lambda/4.$$

Ou seja, este espelho apresentará um erro máximo de 1/4 de onda (na frente de onda), por aberração de esfericidade subcorrigida (ou seja 1/8 de onda na superfície do espelho). Se o único problema do espelho for esse, a fração da área da frente de onda com tal erro estará já muito próximo da borda, ou seja, de certeza que menos de 25% da frente de onda é que tem erro de 1/4 de onda; a parte restante terá erro menor. Muitos amadores (eu próprio também) fizemos há 38 anos espelhos desses e os resultados eram bastante bons, visualmente falando. Isso porque a maior parte da área do espelho tinha erros menores do que 1/8 de onda. A maior parte da luz que vai contribuir para formar a figura de difração vem de áreas do espelho predominantemente melhores do que 1/8 de onda (muito maioritárias num espelho bem feito). Note-se que estou a dizer que um espelho esférico *bem feito*, de $D=150$ mm $f/8$ é muito satisfatório, pode dizer-se bom, mas não digo que será um espelho exemplar, nem digo que não há vantagem em fazê-lo melhor. Para $f/8$ ganha-se em fazê-lo "parabólico" (parabolóide), mas não se ganha tanto como parece. Se for esférico $f/9$, já o erro na frente de onda cai para $\lambda/6$ e com $f/D=10$ (esférico) o erro pv baixa para $\lambda/7,7$. É claro que se ganha em parabolizar, para evitar tubos demasiado longos, desde que se faça um espelho de qualidade: mais vale um espelho esférico bem feito que um parabolóide mal feito. Para relações focais mais curtas (com $D=15$ cm) é essencial que o espelho seja parabolóide, ou não será de todo satisfatório. Jean Texereau, uma reconhecida autoridade em óptica astronómica define (baseando-se em Danjon & Couder) como limite mínimo de aceitabilidade para um espelho esférico de $D=150$ mm uma relação focal $f/8$. Para verificar esta informação, os interessados poderão consultar facilmente a página 16 do link <http://www.astrosurf.com/texereau/chapitre2.pdf> (de Jean Texereau). Indicam-se seguidamente (segundo Texereau) os critérios mínimos a ter em conta na relação focal para que se tenha um erro de $\lambda/4$ na frente de onda, de acordo com a abertura:

Abertura D (em cm)	f mínimo (em cm)	f / D (mínimo)
8	52	6,5
10	70	7,0
12	90	7,5
15	120	8,0
18	153	8,5
20	177	8,9
25	240	9,6
30	303	10,1

4. Índice de Strehl e obstrução

Em complemento ao mito 1 há ainda um aspecto muito curioso que não quero deixar de referir. Mas antes disso convém mencionar que quanto ao índice de Strehl (ξ) se consideram os seguintes valores como referências:

Índice de Strehl	Apreciação	Erro RMS (na frente de onda)
0,70 ou inferior	mediocre	$\lambda/10,5$ ou inferior
0,85	bom	$\lambda/12$
0,80	é o mínimo aceitável (<i>diffraction-limited</i>)	$\lambda/14,1$
0,90	muito bom	$\lambda/19,6$
0,95 ou superior	excelente	$\lambda/27,8$ ou inferior

Para melhor leitura do quadro anterior deve dizer-se que, em ópticas bem feitas, o valor RMS do erro é tipicamente 1/4 ou menor do que o valor pv. Refira-se ainda que a "obstrução" é o quociente do diâmetro do espelho secundário (ou o diâmetro da sua célula de suporte, valendo o maior destes valores) pela abertura (diâmetro útil) do telescópio.

A presença de obstrução (designarei seguidamente a obstrução por "x" para não repetir a letra e já usada para o erro) *piora* o índice de Strehl por um factor *k* dado por:

$$k = (1 - x^2)^2$$

De facto, uma questão é o índice de Strehl (abreviadamente Strehl) determinado pela qualidade óptica intrínseca, por comparação do telescópio em análise com outro que fosse perfeito (ideal), do mesmo tipo, abertura e igual obstrução. Outra coisa é o Strehl *tendo em conta a obstrução*, o que permite comparar a intensidade do centro do disco de difracção dado por esse instrumento com a que daria um instrumento ideal e com a mesma captação de luz, *que não fosse obstruído*. Este é o Strehl *tendo em conta a obstrução*.

Isto significa, quantificando, que se tivermos um telescópio obstruído a 33%, e que pela sua qualidade tenha um índice de Strehl 0,95 (comparado com um instrumento perfeito, do mesmo tipo e da mesma obstrução), o seu índice de Strehl *tendo em conta a obstrução* será:

$$0,95 k = 0,95 (1 - 0,33^2)^2 = 0,95 (1 - 0,33^2)^2 = 0,794 \approx 0,75$$

As conclusões resultantes da equação $k = (1 - x^2)^2$ têm 4 leituras possíveis:

a) O factor *k* só é igual a 1 para ópticas não obstruídas (neste caso $x=0$) e *k* é sempre menor do que 1 quando há obstrução, sendo cada vez menor à medida que a obstrução aumenta.

b) *Para igual perfeição óptica*, um telescópio não obstruído terá sempre um índice de Strehl superior a outro que seja obstruído. E para igual perfeição óptica quanto menos obstruído for o telescópio mais elevado será o seu índice de Strehl). E um telescópio com 25% de obstrução terá um índice de Strehl superior a outro telescópio de igual perfeição óptica mas com 35% de obstrução.

c) *Para igual qualidade final da frente de onda*, um telescópio obstruído tem de ser "mais bem construído" (=maior perfeição óptica) do que um não obstruído (ou com obstrução menor). E um telescópio obstruído, acima de uma certa obstrução, já não poderá ser "*diffraction-limited*", por muito perfeito que seja do ponto de vista óptico, como veremos em d).

d) Um telescópio de obstrução 32,6%, mesmo que fosse opticamente a "perfeição absoluta", não atingiria nunca a condição de "diffraction-limited" (Strehl >0,80). Isso é fácil de ver: basta considerar um telescópio perfeito (Strehl=1,00) e "dar-lhe obstrução" até se ter um Strehl final de 0,80, ou seja resolvendo a equação

$$k = (1 - x^2)^2 \text{ para o caso } k=0,80. \text{ Isso dá, sucessivamente: } 0,80 = (1 - x^2)^2 \Leftrightarrow$$

$$1 - x^2 = 0,89443 \Leftrightarrow x^2 = 0,10557 \text{ e finalmente } x = 0,3249 \approx 32,5\%.$$

Os leitores interessados poderão encontrar on-line uma folha de cálculo que dá directamente o índice de Strehl (como função do erro RMS na frente de onda) intrínseco e também tendo em conta a obstrução, da autoria de Pedro Ré e Guilherme de Almeida:

http://www.astrosurf.com/re/strehl_%20index.xls .

NOTA: Convém referir que nos telescópios refractores (mesmo nos apocromáticos), o valor do índice de Strehl depende do comprimento de onda da luz a que se refere. Em geral os fabricantes apresentam-no para a luz verde-amarelada ($\lambda=546$ nm), cor próxima da correspondente à máxima sensibilidade visual humana; para outros comprimentos de onda este índice já é um pouco menor do que o indicado para 546 nm..

5. Efeitos observados

Será interessante ver até que ponto as conclusões quantitativas referidas no ponto 4 são, ou não, comprovadas visualmente.

A Fig. 3 mostra-nos que, para igual aberração de esfericidade (por ex. $\lambda/4$ pv), o telescópio obstruído a 33% transfere mais energia do disco de Airy para o primeiro anel de difracção do que o telescópio obstruído a 25% e este mais do que o não obstruído. Nota-se também que o telescópio obstruído a 25% e com $\lambda/4$ pv comporta-se neste aspecto melhor do que um outro telescópio de igual abertura, obstruído a 35%, que fosse perfeito (aberração de esfericidade nula). Vê-se ainda que um telescópio obstruído a 35%, ainda que opticamente perfeito, não consegue igualar um telescópio não obstruído da mesma abertura e com aberração de esfericidade $\lambda/4$ pv e $\lambda/3$ pv. Estas imagens revelam-nos que, para obter igual qualidade final (igual perfeição na frente de onda), um telescópio precisa de ser tanto mais perfeito opticamente quanto maior for a sua obstrução.

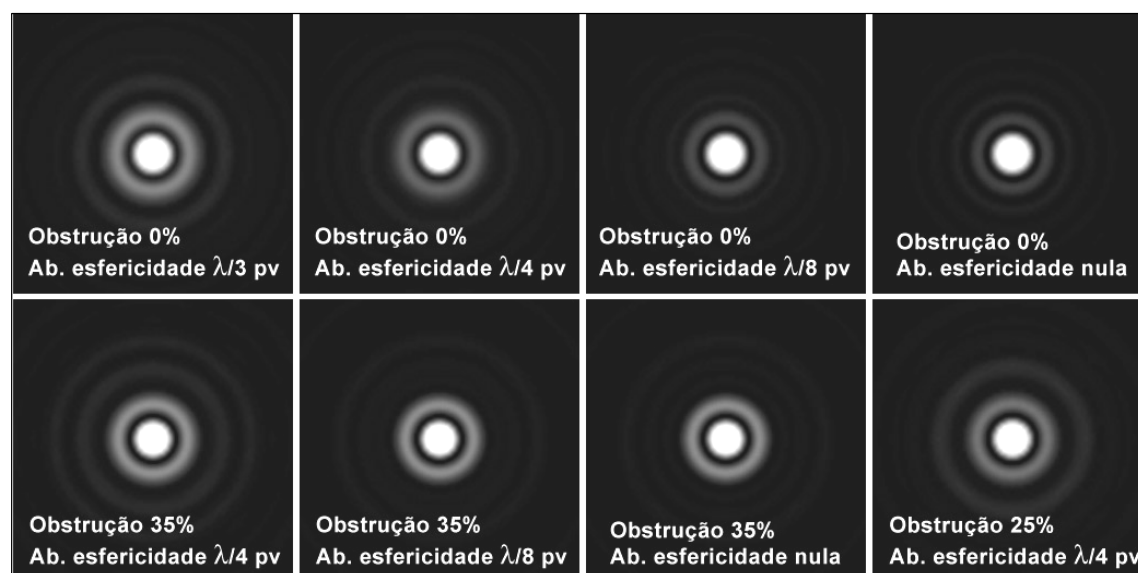


Fig. 3. Figuras de difracção correspondentes a imagens estelares para diversos telescópios, com diferentes aberrações de esfericidade na frente de onda. Imagens simuladas, produzidas em parte com o auxílio do programa *Aberrator V3.0* (<http://aberrator.astronomy.net>). Guilherme de Almeida (2007).

Conclusão

Este artigo fez provavelmente alguma luz sobre assuntos de que em geral pouco se fala. Levantou, também, certamente, algumas surpresas. Espero ter contribuído para ajudar a esclarecer o assunto.

REFERÊNCIAS:

- [1] Suiter, H. R.— *Star Testing Astronomical Telescopes*, Willmann Bell, Richmond, 1999. (www.willbell.com)
- [2] Texereau, Jean — *La Construction du Télescope d'Amateur*, disponível para download grátis em www.astrosurf.com/texereau/. É uma obra datada, dos anos 60, mas ainda interessante (a Óptica não mudou).
- [3] Almeida, G. — *Telescópios*, Plátano Editora, Lisboa, 2004
Livro disponível na Astrofoto (www.astrofoto.com.pt).
- [4] Ceravolo, Dickinson & George (artigo publicado na revista *Sky & Telescope* de Março de 1992), pp. 253-257.