

Olívia Maria Arteiro do Couto Rodrigues

O CICLO SOLAR



Departamento de Matemática Aplicada

Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Setembro / 2000

Olívia Maria Arteiro do Couto Rodrigues

O CICLO SOLAR



*Dissertação submetida à Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
para a obtenção de grau de Mestre em Ensino da Astronomia*

Departamento de Matemática Aplicada

Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Setembro / 2000

A presente dissertação foi orientada pelo Professor Doutor João Lima que sempre mostrou inteira disponibilidade, apoiou e analisou cada etapa do trabalho sempre de forma construtiva e motivadora.

Resumo

A observação do Sol é uma prática antiga embora só a partir da descoberta do telescópio se tenha iniciado o estudo da sua superfície e registado os primeiros desenhos com particular relevância para as manchas. Mais tarde verificou-se que as manchas possuíam um comportamento peculiar, não só na alteração do seu aspecto mas também no modo como se distribuíam no disco solar. Do seu movimento concluiu-se a rotação e a inclinação do eixo do Sol. A periodicidade do seu comportamento definiu o ciclo solar. A previsão com base nos registos acumulados durante séculos levou à necessidade de verificar as conclusões. A observação com a ajuda de instrumentos mais avançados e com telescópios de olhar diferente (em outros comprimentos de onda) encontrou fenómenos que poderão estar relacionados com as manchas.

Actualmente a tecnologia dispõe de meios para observar o Sol de muito perto, de muitas formas e de modo contínuo. A nossa compreensão sobre o Sol e do mecanismo que conduz à formação das manchas ainda não está esclarecido, por isso continua a existir a necessidade de observar, registar, sistematizar e correlacionar os factos.

Este trabalho tem por base a recolha de dados observacionais e a sua análise posterior de modo a verificar algumas propriedades relacionadas com a rotação e actividade do Sol, ambas inferidas a partir do estudo das manchas solares.

Résumé

L'observation du Soleil est une pratique ancienne, quoique, seulement après la invention du télescope, on ait commencé à étudier sa surface et on ait enregistré les premiers dessins, en attribuant une importance toute spéciale aux taches. On a constaté, plus tard, que ces taches possédaient un comportement particulier, en ce qui concernait non seulement l'altération de leur aspect, mais encore la façon dont elles se distribuaient dans la surface du disque solaire. À partir de leur mouvement on a conclu la rotation et l'inclination de l'axe du Soleil. La périodicité de leur comportement a déterminé le cycle solaire. La prevision s'appuyant sur les registres accumulés pendant des siècles a créé le besoin de vérifier les conclusions. L'observation à l'aide d'instruments plus avancés et de télescopes de regard différent (sur d'autres longueurs d'onde) a permis de découvrir des phénomènes qui pourront avoir rapport aux taches.

À présent, la technologie dispose de moyens pour observer le Soleil de tout près, de plusieurs façons et itérativement. Notre compréhension du Soleil et du mécanisme qui conduit à la formation des taches n'est pas encore expliqué. C'est pourquoi il faut continuer à observer, à enregistrer, à systématiser et à établir des corrélations entre les faits.

Ce travail s'appuie sur le recueil de données obtenues à travers l'observation et sur leur analyse postérieure de façon à vérifier quelques propriétés liées à la rotation et à l'activité du soleil, lesquelles ont été inférées à partir de l'étude des taches solaires.

Abstract

Being the observation of the sun an ancient practice, it was not before the invention of the telescope that the study of its surface, as well as the compilation of sketches of the solar disk was made possible, with particular relevance to the sunspots. Later, it was observed that the sunspots had a peculiar behaviour, not only related to their shape, but also to their dispersion on the disk of the sun. The observation of their motions led to conclusions about rotation and inclination of the solar rotational axis. The frequency of their behaviour defined the solar cycle. Previous forecasts of this cycle based on registers collected throughout centuries could now be checked against new theories. The observation of the sun with the help of technologically advanced instruments and accurate telescopes (in different wavelengths) showed rare events that may be related to the sunspots.

Nowadays with the development of accurate technological equipment, the sun can be systematically observed from very close distances and almost continuously. Our understanding of the sun and of the mechanism that leads to the formation of sunspots is not yet clear, so the need to observe, register, systematize and relate facts still exists.

The present work is based on the collection and further analysis of observed solar disk sketches in order to check certain facts related to the rotation and to the activity of the sun, both inferred from the study of the sunspots.

Índice

Capítulo 1 - Introdução	1
Capítulo 2 - Perspectiva históricas	
2.1 - Introdução.....	4
2.2 - Observadores do Sol e da Lua.....	5
2.3 - Observação dos eclipses.....	8
2.4 - A contagem do tempo.....	10
2.5 - A orientação pelo Sol.....	13
2.6 - A observação das manchas e outros fenómenos solares.....	14
2.7 - A observação do Sol no século XX.....	19
Capítulo 3 - As propriedades do Sol	
3.1 - Introdução.....	22
3.2 - O Sol estável	23
3.3 - Estrutura interna.....	27
3.3.1 - O núcleo	27
3.3.2 - Interior radiativo.....	28
3.3.3 - Envelope convectivo.....	29
3.4 - Fotosfera	30
3.4.1 - Granulação fotosférica	32
3.5 - Cromosfera.....	34
3.6 - Região de transição.....	36
3.7 - Corona.....	37
3.8 - Vento solar.....	40
Capítulo 4 - Actividade solar	
4.1 - Introdução.....	44
4.2 - Regiões activas.....	45
4.3 - Proeminências.....	48

4.4 - “Flares”	52
4.5 - Fáculas e “plages”	55
4.6 - Manchas.	57

Capítulo 5 - O Ciclo Solar

5.1 - Introdução.	61
5.2 - O campo magnético do Sol.	62
5.3 - O ciclo das manchas.	66
5.4 - O ciclo magnético solar	71
5.5 - Influência do ciclo solar na Terra	73
5.6 - Alteração da estrutura da corona.	76

Capítulo 6 - Observação do Sol

6.1 - Introdução.	77
6.2 - Métodos de observação	78
6.3 - Contagem do número de manchas.	80
6.4 - Classificação das manchas.	82

Capítulo 7 - A observação do Sol de Janeiro a Julho do ano 2000

7.1 - Introdução	85
7.2 - Determinação do número de Wolf.	86
7.3 - Determinação do sentido e eixo de rotação.	89
7.4 - Distribuição das manchas com a latitude.	92
7.5 - Determinação da velocidade de rotação.	93
7.6 - Evolução e classificação das manchas.	95
7.7 - A área das manchas.	97
7.8 - Considerações finais.	98

Capítulo 8 – Conclusão 100

Apêndices

A - Grelhas de observação.	102
------------------------------------	-----

B - Registos do Sol.	104
C - Tabelas.	108
Glossário.	112
Bibliografia.	118
Páginas de consulta na Internet.	120

Índice de Figuras

Figura	Página
2.1 - Newgrange - na imagem em cima pode ver-se o monumento funerário; à direita realça-se o pormenor das duas entradas (Krupp, 1978)	5
2.2 - Stonehenge, com vista aérea do mesmo monumento, à direita (Krupp, 1978)	5
2.3 - edifício Maia (Donato, 1985)	6
2.4 - edifício Asteca - a pirâmide da Tajin (séc.II e III d.C.) com 365 nichos ou janelas, que simbolizam os dias do ano Asteca (Donato, 1985)	6
2.5 - fotografia de um eclipse solar (Zirin, 1988)	8
2.6 - relógio de sol datado de 700 a.C. (Donato, 1985)	10
2.7 - o astrolábio (Masini, 1979)	13
2.8 - mapa da interpretação da superfície do Sol de 1680 (Whitfield, 1995)	14
2.9 - carta datada de 1625 com o registo de posição das manchas solares ao longo do tempo (Masini, 1979)	15
2.10 - diagrama de borboleta construído com registos da posição das manchas obtidas pelo observatório de Greenwich (Stix, 1991)	16
2.11 - gráfico da variação média anual do número de manchas entre 1600 – 1900 (Wilson, 1994)	17

2.12 - radio-telescópio (Masini, 1979)	19
2.13 - mancha solar (Schmelz, 1992)	20
2.14 - o satélite Skylab (Masini, 1979)	21
3.1 - modelo do Sol (Wilson, 1994)	23
3.2 - gráficos da variação de da luminosidade, massa, temperatura e densidade com o aumento do raio solar (Kaufmann,1997)	24
3.3 - gráfico da variação da rotação com a profundidade para diferentes latitudes construído com dados obtidos em estudos sismológicos do Sol (Lang, 1998) ..	25
3.4 - gráfico da variação temperatura em função da altura (Priest, 1987)	30
3.5- a radiação na direcção do limbo provem de camadas mais altas e por isso mais frias enquanto que a radiação observada no centro, é menos penetrante e por isso mais brilhante (Kaler, 1994)	31
3.6- granulação à superfície do Sol com uma definição de 0,25 segundos de arco (Sturrock,1989)	32
3.7 - aspecto dos jactos (espículas) perto do limbo, à esquerda, e no limbo à direita, obtidos na risca de hidrogénio H α (Priest, 1987)	34
3.8 - esquema da cromosfera destacando as espículas (Monteiro, 1998)	35
3.9 - gráfico que relaciona o logaritmo da temperatura com a altitude de acordo com o modelo descrito para o Sol (Priest, 1987)	36
3.10 - esquema das linhas de campo numa região unipolar, originando o “streamer”; no esquema da direita está representada uma região unipolar estreita (Priest, 1987)	37

3.11 - esquema as linhas de campo na corona que quando se apresentam abertas originam buracos coronais e correspondem a zonas escuras (Zirn, 1989)	38
3.12 - imagem do Sol em raio-X, podendo distinguir-se o buraco coronal na parte superior da imagem, zona escura, os arcos e os pontos brilhantes, na zona luminosa e central da imagem (SOHO, 1997)	39
3.13 - estrutura fina das plumas, na linha de Fe XI, 195 Å (SOHO,1996)	40
3.14 - esquema do vento rápido (à esquerda) e vento lento (à direita) (Monteiro, 1998)	41
3.15 - ejeção de massa de um buraco coronal (SOHO, 1997)	41
3.16 - pormenor de uma grande tempestade giratória (SOHO, 1997)	42
3.17 - esquema da trajectória do vento solar e da geometria do campo magnético solar (Parker,1963)	42
4.1 - as regiões activas são as zonas brilhantes perto do equador (Space Environment Center)	45
4.2 - imagens da superfície do Sol em diferentes comprimentos de onda evidenciando as regiões activas como zonas claras, com excepção para a imagem em luz visível (Science.nasa.gov)	46
4.3 - proeminência activa à esquerda e estável à direita (Kaufmann, 1997)	48
4.4 - a migração de um proeminência estável até ao limbo devido à rotação solar, em H- α . Imagem obtida em 1966 (Priest, 1987)	49
4.5 - pormenor da estrutura da proeminência onde se observamos “pés e arcos” (Priest, 1987)	50

4.6 - proeminências em destaque no limbo e filamentos no disco (SOHO, 1996)	51
4.7 - erupção de uma “ flare” em H- α , perto de uma mancha (Kaufmann, 1997).	52
4.8 - perfil esquemático da intensidade da “flare” em diferentes comprimentos de onda ao longo do tempo (Priest, 1987).	53
4.9 - manchas solares rodeadas de fáculas (Sturrock, 1989)	55
4.10 - “plages ” na risca de Ca II K à esquerda (Stix, 1991); à direita, “plages” e filamentos em H- α (Sturrock, 1989)	55
4.11 - grupo de manchas e ao lado uma mancha em destaque (Zirin, 1988)	57
4.12 - imagem no visível de uma mancha solar (Schmelz, 1992)	57
4.13 - granulação umbral com uma resolução de 5 segundos de arco (Stix, 1991)	58
4.14 - sequência de fotografias de um grupo (em cima) e de uma mancha solar (em baixo) desde o limbo ocidental até ao oriental (Stix, 1991)	59
4.15- esquema do perfil da mancha com representação das linhas de campo e do fluxo convectivo (Zeilik, 1994)	60
5.1 - esquema das linhas de campo magnético solar (a cheio) ; as linhas tracejadas representam o campo de um dipolo magnético perfeito (Carroll,1996)	62
5.2 - esquema da torção das linhas de campo magnético solar ; destaque das linhas de campo que irrompem da superfície (Kaufmann, 1997)	62
5.3 - esquema do arco que numa zona bipolar e imagem do arco magnético (Van Zyl,1996)	63

5.4 - variação do número de fáculas polares (I), das proeminências (II) e do número relativo das manchas (III) com o tempo (Stix, 1992)	64
5.5- esquema A : “efeito- omega” ; esquema B : “efeito- alfa” (science.nasa.gov)	65
5.6 - média anual do número relativo de manchas do Observatório de Zurique (em ordenadas) em função do tempo (em abcissas) desde 1610 até 1970; (Wilson, 1994)	66
5.7 - o esquema mostra a polaridade do par de manchas representando: I –início do ciclo ; II - o máximo; III- o início do ciclo seguinte (Monteiro,1998)	68
5.8 - regras da polaridade de Hale para as manchas: N-norte e S-sul (o V e R indicam o vermelho e o violeta respectivamente para o efeito de Zeeman), e a migração das manchas com a latitude ao longo do ciclo. (Stix, 1992)	68
5.9- magnetograma que exhibe os contornos do campo magnético sobreposto ao diagrama de borboleta obtido pelo Observatório de Wilson sendo a linha contínua a polaridade positiva e a tracejada a negativa (Stix, 1992)	69
5.10 - esquema do modelo que representa a conjugação dos movimentos do plasma para dar origem ao campo magnético solar (Wilson, 1994)	71
5.11 - esquema do efeito do vento solar na magnetosfera da Terra (Van Zyl, 1996)	73
5.12 – variação da percentagem do carbono -14 com o valor respectivo de carbono-12 desde 1050 d.C., incluindo a variação anual de Rz em 1700. Da esquerda para a direita as zonas sombreadas representam o “Máximo Medieval”, o “Mínimo de Sporer” e o “Mínimo de Maunder” (Wilson, 1994)	74
5.13 - a corona num eclipse em 1980, perto do máximo, à esquerda, e à direita, em 1945 perto de um mínimo onde a emissão coronal é reduzida (Stix, 1987)	76
6.1- esquema da montagem para o método da projecção (Ferreira, 1999)	78

6.2- esquema da classificação de Zurique, à esquerda, com a adaptação de McIntosh, à direita, e onde se podem ver o aspecto das manchas em cada estádio (Schmelz, 1992)	83
7.1 - distribuição do número de Wolf diário calculado com os elementos de observação (R_{obs}) e com os fornecidos por NOAA (R_z) referidos à mesma data.	87
7.2 - distribuição de R_z em função de R_{obs} e linha de ajuste	88
7.3 - desenhos elaborados nas observações do dia 3 de Janeiro, pelas 16 horas, e dia 7 de Janeiro, pelas 14 horas e 30 minutos, no Centro de Astrofísica da Universidade do Porto. O ponto assinalado por A indica a posição anterior	89
7.4 - orientação do sistema de eixos com efeito de simetria horizontal.	90
7.5 – distribuição das manchas por faixas de latitude heliográfica com 9° de amplitude	92
7.6 – velocidade angular média, em graus por dia, registada ao longo das diferentes observações e distribuída pela latitude heliográfica	93
7.7 - período de rotação médio do Sol, em função da latitude	94
7.8 - desenhos do pormenor de um grupo de manchas obtidos com uma ocular de 35mm em 4 de Setembro (esquerda) e 10 de Julho (direita)	95
7.9 - imagens do pormenor de dois grupos de manchas “A” e “B” numa sequência entre os dias 13 e 18 de Março de 2000 (Arquivo do Observatório do Hawaii)	95
7.10 - pormenor de várias manchas exibidas na superfície do Sol no dia 22 de Fevereiro de 2000 (Arquivo do Observatório do Hawaii)	96
7.11 - imagem do Sol correspondente ao dia 16 de Março de 2000, retirada dos arquivos do Observatório de Hawaii	97

Índice de tabelas

Tabela	Página
7.1– Valores observacionais (Robs) e valores (Rz) compilados por Nacional Oceanic Atmospheric Administration (NOAA)	86
C.1– Valores observacionais (Robs) e valores (Rz) compilados por Nacional Oceanic Atmospheric Administration (NOAA)	108
C.2 - Registo do número diário de manchas compilado por NOAA em 29/8/2000, referido ao ano 2000	109
C.3 - Distribuição do número de manchas com a latitude	110
C.4 – Mudança de posição (em graus) das manchas ao longo do tempo e em função da latitude	111
C.5 – Velocidade angular (em graus por dia) das manchas em função da latitude	111

“Procuramos sempre nos céus orientação e perspectiva. É a satisfação de uma necessidade. Pode mesmo ser o que os nossos cérebros precisam para compreender o mundo. Qualquer coisa poderia fazer o trabalho, mas os céus fazem-no bem. Repetem-se vezes e vezes sem conta e ninguém pode interferir com eles.”

Dr. Edwin Krupp

Capítulo 1

Introdução

O Sol é um dos objectos celestes que pelo seu misticismo, proximidade e sobretudo pelo papel fundamental na existência e preservação da vida mereceu desde os tempos pré-históricos especial atenção. A dependência da vida à superfície da Terra e os fenómenos climatéricos associados ao Sol justificaram desde sempre a sua observação, sendo esta o ponto de partida para a compreensão dos mecanismos que regem o Sol e que por analogia se podem aplicar as outras estrelas bem mais distantes.

O estudo do Ciclo Solar baseado na observação sistemática do Sol constitui uma forma de verificar as previsões estabelecidas pela análise de registos efectuados durante séculos e relacionadas com outros indicadores como a produção de carbono-14 ou alterações climatéricas relatadas pela História. Sendo o ciclo solar periódico, marcado pela variação do número de manchas e compreendido entre dois valores mínimos, passando por um máximo num espaço de tempo de aproximadamente 11 anos é possível construir uma base de dados observacionais relativamente às manchas.

Encontramo-nos num ano previsto como de actividade máxima apontando para o aparecimento de um grande número de manchas e de outros fenómenos ligados com a actividade solar. Pelo facto de serem as manchas a manifestação mais fácil de observar e contabilizar é sobre elas que o trabalho recai sendo também uma forma de investigação e aprofundamento do tema.

Na vertente pedagógica o trabalho de observação, registo e análise promove o desenvolvimento do indivíduo como um todo tocando os diferentes domínios cognitivo, afectivo e social. As aptidões cognitivas são trabalhadas ao nível do “saber – fazer” quando executa as tarefas previstas, regista e aplica conhecimentos base; do “saber – ser” na tomada de decisões, na aumento de iniciativa, criatividade e autonomia quando, perante um problema concreto, é necessário encontrar soluções ; do “saber – saber” na análise de resultados na qual é necessário um trabalho de pesquisa prévio, que vai servir de suporte para inferir conclusões, mesmo que os resultados não sejam concordantes ou se afastam dos esperados, reformular processos e avançar no estudo fundamentado procurando outras perspectivas, conceitos e teorias.

Na vertente afectiva e social é a partilha de experiências, a troca de ideias e a discussão dos resultados que promove a auto-estima, a tolerância, a consciência de si mesmo e do ser social.

Este trabalho pretende, tendo como base a observação, recolha de dados, sistematização, tratamento de resultados e procura de informação de origem diversificada, integrar conhecimentos de Física do Ensino Básico e também Secundário pelo facto de se tratar de um trabalho que pode ser desenvolvido como projecto. A Química neste trabalho aparece apenas como referência ligada ao estudo da constituição da matéria e das reacções em que intervêm os elementos ou as partículas. A Física é introduzida com a abordagem à observação que é feita não só em luz visível mas estendida ao espectro electromagnético, passando pelos conceitos de força, campo magnético e eléctrico.

Os primeiros quatro capítulos tratam do desenvolvimento das características gerais do Sol, iniciando-se com uma breve perspectiva histórica passando pelas suas propriedades, manifestações de actividade e definição de ciclo solar. Os dois últimos capítulos relatam a observação do Sol, passando pela abordagem de alguns métodos de observação, modo de classificação e contagem das manchas e correlação dos resultados observacionais. Finaliza com uma breve conclusão. Os registos e valores obtidos estão em apêndice assim como as grelhas e tabelas utilizadas provenientes de outras fontes.

A retrospectiva histórica tem por objectivo estabelecer o elo de ligação temporal; desempenha assim um papel fundamental na estruturação do conhecimento que não aparece por acaso mas é fruto de um estudo sistemático, contínuo, cuidado e persistente, demonstrando também a necessidade de existir um espírito aberto a novas ideias, flexível e dinâmico. As propriedades do Sol, que estabelecem o conceito de Sol estável, pretendem dar uma ideia simples do modo de funcionamento do Sol, recorrendo a modelos de base matemática, cujas equações e desenvolvimento estão de acordo com as leis da termodinâmica, hidrostática e mecânica mas que, apesar disso, mostram algumas inconsistências com a prática observacional levando à diferenciação dos vários modelos, razão pela qual se adoptou o modelo standard. As equações e correlações não foram desenvolvidas propositadamente para não conferirem ao trabalho a complexidade de um estudo muito aprofundado sobre o Sol e que está para além dos objectivos iniciais.

Na definição de actividade solar abordam-se os fenómenos mais comuns, utilizando-se a designação original sempre que não há correspondência dos termos em língua materna. O ciclo solar é desenvolvido com a abordagem simples dos efeitos de campo magnético

utilizando apenas o modelo de *dinamo* e diferenciando o conceito de ciclo de manchas e de ciclo magnético, apontando ainda algumas das influências sentidas na superfície de Terra.

Nos capítulos 6 e 7 faz-se uma abordagem mais específica da observação do Sol no que concerne à observação e contagem de manchas assim como a classificação que pode servir como forma de sintetizar informação sobre as manchas. A compilação dos registos observacionais é feita com o propósito de determinar o número médio diário de manchas tendo em conta as condições efectivas da observação, determinar o sentido, o eixo, a velocidade de rotação e a sua distribuição na superfície solar.

Para a classificação das manchas assim como para a determinação da sua área utilizaram-se as imagens provenientes do arquivo do Observatório do Hawaii tendo como objectivo demonstrar que é também possível realizar este trabalho recorrendo a outras fontes. É evidente que neste caso a tarefa fica restrita à análise das imagens, perdendo-se a componente da observação directa, que ao efectuar a transposição de imagem para o papel desenvolve a noção de distribuição espacial e proporcionalidade em termos de dimensão relativa, privando-se também da oportunidade de manusear os instrumentos (em particular o telescópio).

As considerações gerais debruçam-se sobre os resultados obtidos, as condições em que se realizou e a forma como decorreu o trabalho não esquecendo que a informação disponível na Internet pode ser um bom auxiliar e complemento de um trabalho deste género, tornando-o mais atractivo tendo em conta o nível etário dos alunos.

Finalmente a conclusão que não pretende encerrar o trabalho de observação mas estabelecer de algum modo a sua continuidade no tempo sugerindo a sua importância quer a partir da observação com utilização do telescópio quer obtendo as imagens em tempo real na Internet.

Ao longo do texto foram seleccionadas algumas palavras e colocadas no estilo itálico como chamada de atenção pelo facto de se encontrarem desenvolvidas no glossário.

Capítulo 2

Perspectiva histórica

2.1 - Introdução

A Humanidade aprendeu a conhecer desde muito cedo os fenómenos astronómicos ligados ao Sol, à Lua e às estrelas, muito embora fossem inicialmente interpretados como a manifestação de forças sobrenaturais, que interferiam e orientavam o destino do Homens. No entanto, o conhecimento ainda que rudimentar das estações do ano e das *lunações* surge pela necessidade dos agricultores se situarem na época das sementeiras e colheitas, sendo a observação da posição das estrelas mais brilhantes utilizada para resolver os primeiros problemas de orientação dos povos nómadas e dos pastores.

Mais tarde, encontrou-se no ciclo lunar e depois no ciclo solar (entendido como a sequência das estações do ano) uma forma para a contagem do tempo. Ainda hoje, após ajustes e rectificações, é o calendário solar que continua a ser usado.

Com o aparecimento do telescópio o Homem volta-se para o espaço exterior e na tentativa de o compreender e explorar, avança nos estudos do meio interestelar desenvolvendo novas tecnologias. O estudo do Sol com todos os fenómenos a ele inerentes faz também parte dessa procura que, por semelhança ou por extrapolação, serve de modelo para as estrelas mais distantes.

Hoje em dia, com a utilização dos satélites, é possível recolher imagens de forma contínua e em diferentes comprimentos de onda, permitindo uma abordagem diversificada que conduza ao aperfeiçoamento dos modelos e teorias nos diferentes campos da Astronomia.

2.2 - Os observadores do Sol e da Lua

Em monumentos antigos como Newgrange e Stonehenge, a existência de alinhamentos astronómicos é sugerida pelo facto de certas características desses monumentos possuírem orientações que coincidem com alinhamentos solares e alinhamentos lunares (referidos a certas datas). Não se coloca porém de parte, a existência de alinhamentos referentes também a estrelas de primeira grandeza embora estes sejam mais difíceis de confirmar.

Na Irlanda, o monumento funerário Newgrange constitui o exemplo de uma construção *megalítica*, edificado por volta de 3000 a. C. e possui duas entradas dispostas de tal modo que o Sol só ilumina a câmara, situada ao fundo do corredor, no *solstício* de Inverno.

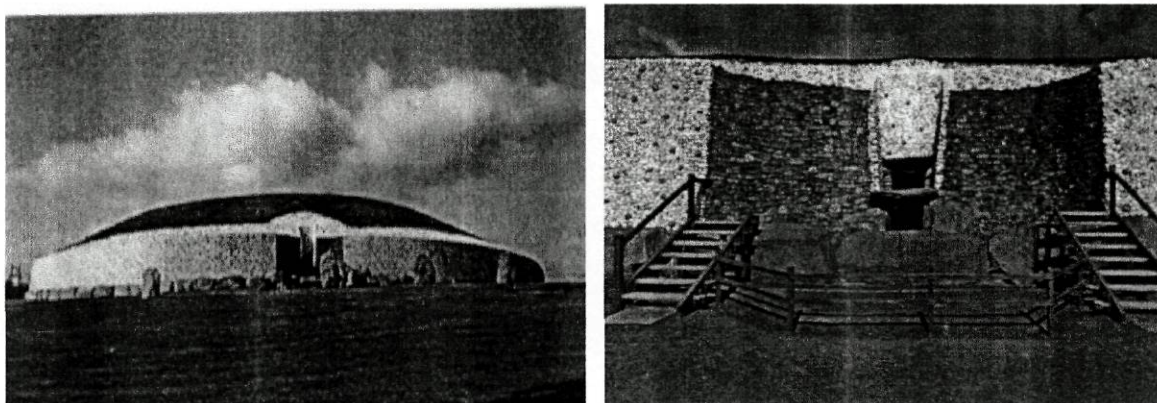


Figura 2.1 - Newgrange - na imagem em cima pode ver-se o monumento funerário; à direita realça-se o pormenor das duas entradas (Krupp, 1978).

Há um outro monumento da mesma época, Stonehenge, que possui um alinhamento de pedras com a direcção do nascer do Sol no solstício de Verão.

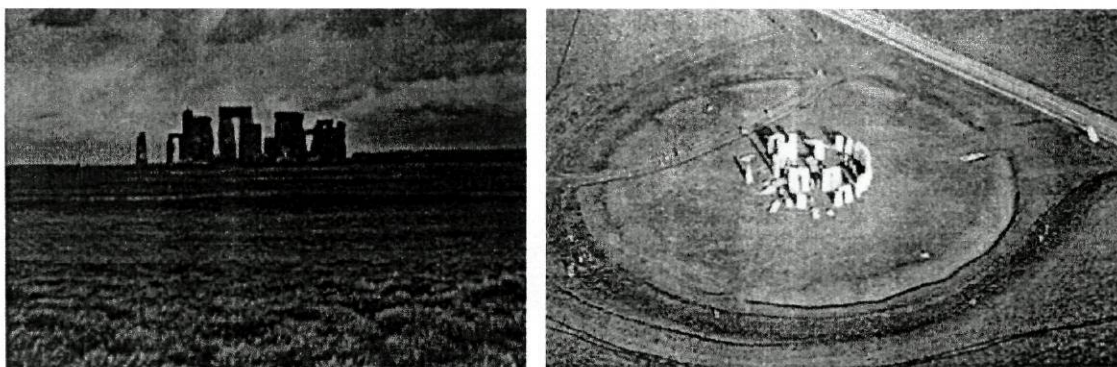


Figura 2.2 - Stonehenge, com vista aérea do mesmo monumento, à direita (Krupp,1978).

Ainda nas civilizações antigas dos povos Maias, Incas e Astecas podemos referir alguns edifícios que nos dão testemunho da importância da observação do Sol e da Lua e da sua utilização na contagem do tempo pois, também eles, possuem alinhamento astronómico ligado á posição dos astros, com especial realce para o Sol.

Os Maias possuíam sistemas de contagem do tempo baseados não só na posição do Sol como também de Vénus e elaboraram tabelas de forma a prever as posições relativas de Vénus, da Lua e do Sol.

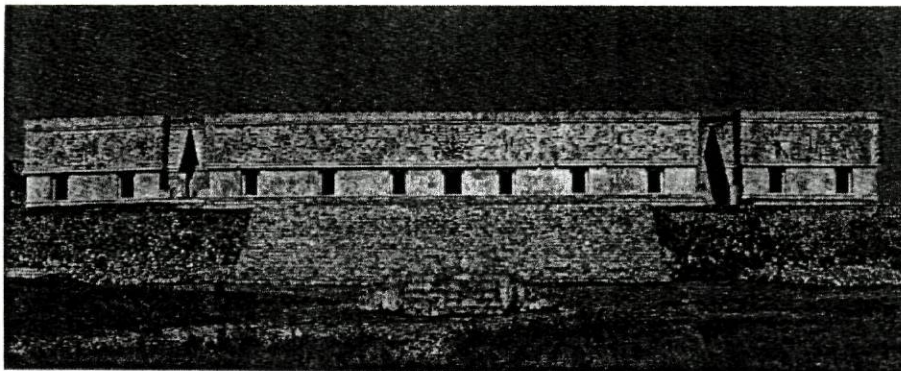


Figura 2.3 – edifício Maia (Donato, 1985)

Esta conclusão advém da análise das tabelas de Vénus do Codex de Dresden que cobrem um período de 11960 dias e igualam 56 almanaques sagrados de 260 dias e onde aparecem figuras intercaladas e cujos intervalos de tempo correspondem a *eclipses* solares.

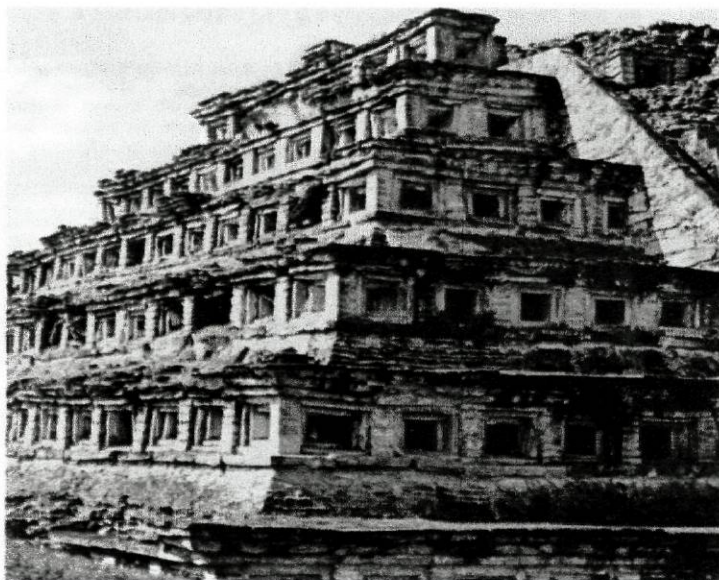


Figura 2.4 – edifício Asteca - a pirâmide da Tajin (séc.II e III d.C.) com 365 nichos ou janelas, que simbolizam os dias do ano Asteca (Donato, 1985).

Os Egípcios também se interessaram pelos astros e supõe-se que construíram as pirâmides e obeliscos de acordo com conhecimentos que tinham sobre o seu movimento. As aberturas das pirâmides permitiam a entrada da luz solar e da luz de algumas das estrelas mais brilhantes e os obeliscos poderão ter funcionado como relógio de Sol.

Os Gregos também foram observadores atentos do Sol pois foi a partir da observação e análise da sombra de varas espetadas no solo em diferentes locais (Alexandria e Siena) que Eratóstenes (257- 195a.C.) concluiu que a Terra não podia ser plana e mediu, com uma precisão de 4%, o seu diâmetro.

2.3 – A observação dos eclipses

Os eclipses do Sol e da Lua são fenómenos celestes que chamaram desde cedo a atenção dos povos pela sua espectacularidade sendo por isso objecto de estudo sistemático. Há registos da observação de eclipses solares desde 2000 a.C. pelos Chineses e posteriormente pelos Gregos em 600 a.C.. Os chineses referem os eclipses nas suas crenças como sendo um dragão a engolir o Sol sendo por isso necessário a existência de astrónomos para afugentar o monstro.

Os Babilónios (300 a.C.) terão descoberto o *ciclo de Saros* em relação ao qual se repetem tanto os eclipses solares como os lunares. Este reconhecimento foi possivelmente uma consequência da prática do registo metódico das observações ao longo do tempo, feito por escribas e sacerdotes, no intuito de poderem prever as *efemérides*, independentemente das condições atmosféricas e assim “prever o futuro”. Os Egípcios testemunham as suas observações ao gravar na cadeira dourada de Tutankamen um emblema em tudo semelhante ao aspecto da *corona solar*.

Vistos da Terra os diâmetros aparentes do Sol e da Lua são em média quase iguais. Por consequência e em condições favoráveis, quando o eclipse é total, são visíveis fenómenos que ocorrem na parte mais exterior da *atmosfera solar*, a *corona*, e permitiram desde cedo observar o comportamento do Sol em diferentes épocas.

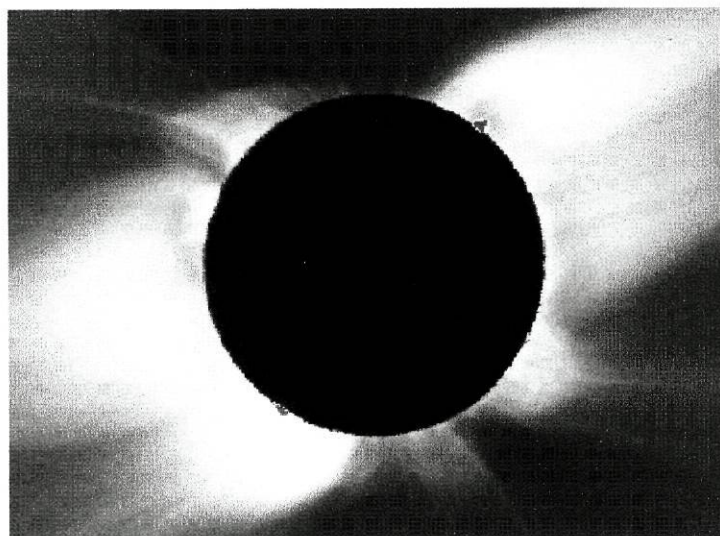


Figura 2.5 – fotografia de um eclipse solar (Zirin, 1989)

As *proeminências* são referidas em crônicas Russas medievais e novamente citadas em 1733 durante a observação de um eclipse onde se distinguem as camadas exteriores – a *cromosfera* e a *corona*. Em 1851 durante um outro eclipse a *corona* que é fotografada pela primeira vez, como um halo fraco em torno do Sol e as *proeminências* são definitivamente associadas ao Sol e não à Lua, desfazendo dúvidas anteriores.

Entretanto com o desenvolvimentos da análise por *espectroscopia* é iniciado o estudo sistemático do Sol fora das condições especiais de eclipse. Mesmo assim é ainda durante um eclipse em 1868 que Angelo Secchi (1818 – 1878) detecta a linha de emissão de um elemento novo no Sol – o hélio assim como uma outra risca desconhecida de emissão a que se atribui um elemento hipotético chamado “*coronium*”. É a partir desta sequência de observações e descobertas que, já no século XX, mais concretamente em 1930, Lyot (1897-1981) inventa o *coronógrafo* para observar e estudar a *corona* sem a ajuda dos eclipses.

2.4 – A contagem do tempo

O cálculo do tempo baseia-se em certas unidades de tempo como o dia, o mês e o ano que são originalmente definidas com base em fenómenos astronómicos. Inicialmente o dia era o espaço de tempo compreendido entre dois nascimentos, ou ocasos, consecutivos do Sol, o que o tornava numa medida de tempo de grande irregularidade. Nem mesmo o intervalo de tempo compreendido entre duas culminações superiores do Sol, o *dia solar verdadeiro*, é uniforme ao longo do ano, razão pela qual hoje se usa o *dia solar médio* cuja duração é constante e corresponde à duração média do dia solar verdadeiro.

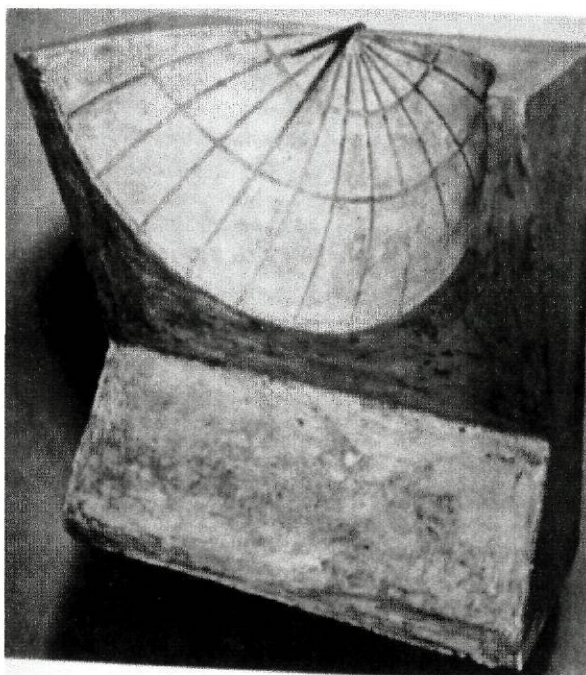


Figura 2.6 – o relógio de sol datado de 700 a.C. (Donato, 1985)

A unidade de tempo que se segue naturalmente é o tempo dado pela duração de uma *revolução sinódica* da Lua - o mês sinódico. Este mês tinha grande importância para os povos nómadas da Ásia Menor (que guardavam os rebanhos durante a noite) e ainda hoje é a base dos calendários dos Muçulmanos e Hebreus.

Por sua vez, para os agricultores egípcios, o regresso das estações constituía a mais importante das grandes unidades de tempo e por tal definiram este período de tempo como *ano solar tropical*. Paralelamente, utilizavam um calendário de doze meses lunares com a

correção de um décimo terceiro mês associada à posição de Sírius que se repetia ao fim deste intervalo de tempo: o ano.

No Egito foi encontrado um relógio de sol (ou sombra) datado de cerca de 1500 a.C. sendo provavelmente o mais antigo conhecido até hoje e, tal relógio, permitiria determinar o movimento aparente do Sol, as datas dos solstícios e dos *equinócios*. Os Babilónios também utilizavam o ano com doze meses lunares introduzindo uma correção mas sem regra definida. Mais tarde ao reconhecer o ciclo metónico procederam a correções mais precisas na contagem do tempo.

O calendário Muçulmano ainda hoje se baseia no ano lunar com doze meses sinódicos: a consequência é que o início de cada ano vai sendo antecipado sucessivamente 11 a 12 dias e ao fim de 32 a 33 anos vê as estações percorridas em sentido inverso.

O calendário Judaico, como o Grego e o Romano, baseava-se no ano “luni-solar” cuja duração conciliava o alternar das estações com a introdução de um décimo terceiro mês. Os romanos herdaram dos Gregos o ano “luni-solar” mas pelo facto de utilizarem arbitrariamente as regras de correção, que regulavam a introdução dos meses intercalados, o calendário romano no tempo de César estava em condições desastrosas. Procede-se então a uma reforma baseada em observações astronómicas dando origem ao denominado calendário juliano (século 46 a.C.). A História refere este ano como o “ano da confusão” pois para entrar em vigor a nova contagem foi necessário que a duração deste último ano fosse de 445 dias. O ano passou então a ter início no primeiro dia do mês de Janeiro e foi definido como o espaço de tempo igual a 365 dias e seis horas.

Estava assim substituído o ano lunar de 12 meses pelo ano solar com duração de 365,25 dias onde ao fim de cada três anos normais (de 365 dias) se segue um ano de 366 dias – o ano bissexto. O ano é então dividido em doze meses com comprimento médio ligeiramente superior ao de um mês sinódico. Ao fim de alguns séculos verifica-se que o início da Primavera se deslocou de tal forma que em 1528 começava 10 dias mais cedo. É então que o Papa Gregório XIII, no século XVI, introduz nova correção: os anos terminais de cada século só são bissextos se forem divisíveis por 400. Refeitas as contas, a cada ano com a duração de 365,25 dias é retirada a fracção de $\frac{3}{400}$ sendo então a duração do ano de 365,2425 dias, o que se aproxima muito da duração do ano tropical. Ainda assim, com este calendário verificar-se-á um acréscimo de 1 dia por cada 3300 anos.

Perde-se, aos poucos, com estas alterações a ligação entre o ciclo da Lua e o calendário muito embora a previsão da data da Páscoa seja feita com base numa correlação entre o

calendário gregoriano e o movimento lunar. A data da Páscoa oscila entre os dias 22 de Março e 25 de Abril e corresponde ao domingo imediatamente após a lua cheia, depois do equinócio da Primavera. Actualmente utilizamos o calendário gregoriano, corrigido relativamente à duração dos meses e à atribuição de mais um dia para o ano considerado bissexto, sem esquecer que muito provavelmente e a longo prazo, outras rectificações terão de ser feitas.

2.5 – A orientação pelo Sol

O Sol serviu também como forma de orientação quer pelo facto de através da relação da sua posição com a *declinação* (ou com a *altura*) se poder saber qual a *longitude* ou a *latitude*, quer como suporte e modo de funcionamento de alguns instrumentos como o sextante, o quadrante ou o astrolábio.

O astrolábio é um instrumento muito antigo, descoberto e utilizado por astrónomos Gregos, desenvolvido mais tarde pelos Árabes e adaptado pelos Portugueses nas viagens marítimas, nos séculos XV e XVI. Desempenhou um papel importante na orientação pelos mares do Hemisfério Sul, pouco ou nada conhecidos dos marinheiros portugueses.



Figura 2.7 – o astrolábio (Masini, 1979)

A sua utilização era simples. Para efectuar a medição da altura do Sol ao meio-dia (com a qual se podia determinar a latitude do lugar) bastava colocar o astrolábio, de modo que o diâmetro existente na roda ficasse absolutamente na horizontal e indicasse, por isso, a linha do horizonte. Em seguida, girava-se o eixo, até que a luz do Sol entrasse por um orifício situado numa *pínula* desse eixo e se fosse projectar em qualquer objecto. Nesse momento, o eixo estava alinhado com o Sol e restava medir a altura na graduação da roda. Ao longo das grandes viagens era indispensável medir repetidas vezes a altura do Sol e com base nas medições escreveram-se as primeiras cartas de navegação sendo atribuídas aos portugueses a elaboração das primeiras tabelas - o códice - do Oceano Atlântico.

2.6 – A observação das manchas e de outros fenómenos solares

Há conhecimento de observações esporádicas, datadas de alguns séculos antes de Cristo e realizadas a olho nu pelos chineses e gregos, onde se referem à existência das *manchas solares*. Mas só no século XVI-XVII, com o aparecimento do telescópio se torna então possível observar “de perto” a superfície do Sol e as suas manchas. A observação é também estendida a outros planetas tendo-se observado as crateras na Lua e os satélites naturais de Júpiter. São referidos nesta época nomes como Johann Goldsmid na Holanda (1587 - 1616), Galileu Galilei em Itália (1564 - 1642), Christopher Scheiner na Alemanha (1575 – 1650) e Thomas Harriot (1560 – 1621) em Inglaterra que terão em simultâneo feito observações do Sol e identificado as “deformidades” ou manchas, na época onde o Sol era considerado como o ser perfeito e imutável.

Os resultados terão sido publicados primeiro por Goldsmid (ou Fabricius como era conhecido) que não vão além das observações iniciais embora conclua já que o Sol deveria girar. Scheiner observou os “ pontos negros” no Sol, pensando tratar-se de defeito nas lentes do telescópio e foi desencorajado a publicar os resultados. Mais tarde avançou com a ideia de que seriam pequenos planetas.

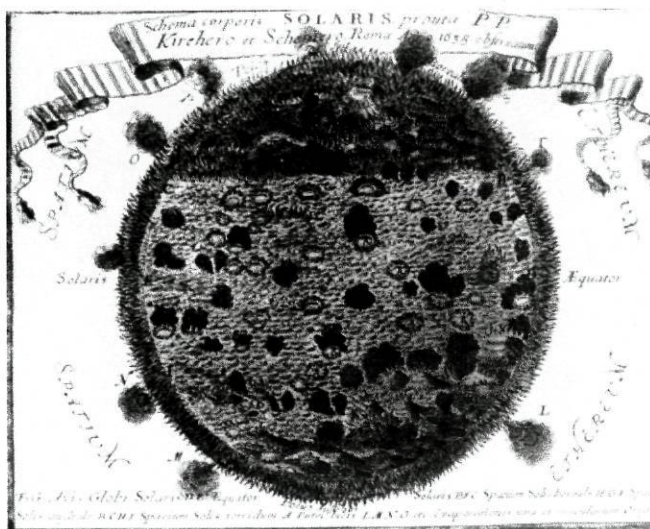


Figura 2.8 - mapa da interpretação da superfície do Sol de 1680 (Whitfield, 1995)

Existiam na época outras leituras da imagem do Sol projectada pelo telescópio: a Figura 2.8 mostra a interpretação das manchas como sendo montanhas, vulcões e nuvens de fumo

com um aspecto de tal modo agressivo que corroborava a ideia de que só existiria vida na Terra. Galileu, dois anos mais tarde, conclui com base na mudança de tamanho e forma que os pontos negros eram manchas. O registo cuidado e contínuo das manchas solares mostraram que estas se moviam lenta e regularmente pela superfície solar tendo Galileu atribuído a mudança de posição ao movimento de rotação do Sol em torno de um eixo num período aproximado de 27 dias.

Pelo facto de estarmos numa época onde o poder religioso impera com todos os seus pressupostos e leis sobre a perfeição torna-se difícil atribuir com exactidão quem terá efectivamente descoberto e concluído que o Sol possuía manchas, uma vez que a publicação dos registos, estudos e conclusões é fortemente condicionada e sancionada.

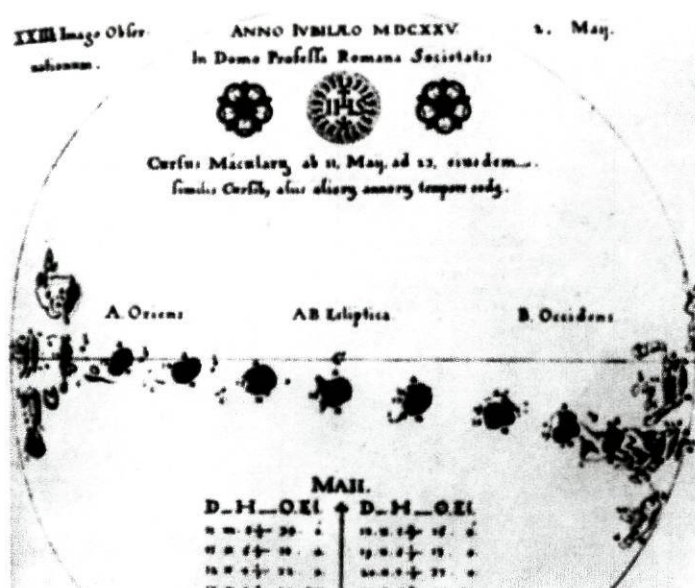


Figura 2.9 - carta datada de 1625 com o registo de posição das manchas solares ao longo do tempo (Masini, 1979)

No entanto e independentemente de quem foi o primeiro, Scheiner ou Galileu, há registos de observações que levam à localização dos “pontos escuros” nas zonas de baixa latitude, perto do equador mas nunca perto dos pólos e com velocidades maiores nas zonas de menor latitude. Scheiner desenha detalhadamente as manchas solares realçando a região da *umbra* e da *penumbra*.

A partir de Galileu, o estudo das manchas solares torna-se importante e muitos outros nomes surgem em destaque. Em 1769, Alexander Wilson (1721 – 1793) observa um ponto muito grande na superfície do Sol e verifica que ao aproximar-se do limite ocidental a zona da

penumbra se contrai gradualmente até desaparecer. Quando o ponto reaparece novamente, cerca de duas semanas mais tarde na zona limite oriental, o mesmo comportamento é observado mas em sentido oposto. Este fenómeno ficou conhecido como “efeito de Wilson” na tentativa de o explicar diz que a forma em disco das manchas origina uma depressão removendo o material luminoso da superfície, deixando ver o interior escuro do Sol sendo esta uma das concepções aceite na época.

Heinrich Schwabe (1789 – 1875) fez observações durante 43 anos e concluiu que o número de manchas aumentava e diminuía ciclicamente num período com cerca de dez anos, embora mais tarde se venha a verificar ser de onze.

Uma outra contribuição importante foi a descoberta das “flares” e o estabelecer da relação, ainda que prudente, entre as manchas, “flares” e *campos magnéticos* quando após a observação da formação de uma “flare”, se registou uma tempestade magnética na Terra.

Em 1852, Edward Sabine (1788-1883) reparou que as variações da intensidade do campo magnético coincidiam com o ciclo das manchas solares. Estes estudos foram continuados por Richard Carrington (1821 – 1893) e por Gustav Spörer (1822-1895), que identificaram os movimentos característicos das manchas relacionadas com a latitude, enquanto a *espectroscopia* tornava possível detectar a descida de temperatura nas zonas ocupadas pelas manchas. Carrington conclui que o Sol possuía *rotação diferencial*, ao comparar a taxa de rotação das manchas localizadas em diferentes latitudes e determinou que o período de rotação é maior nos pólos do que no equador como já teria suposto Galileu.

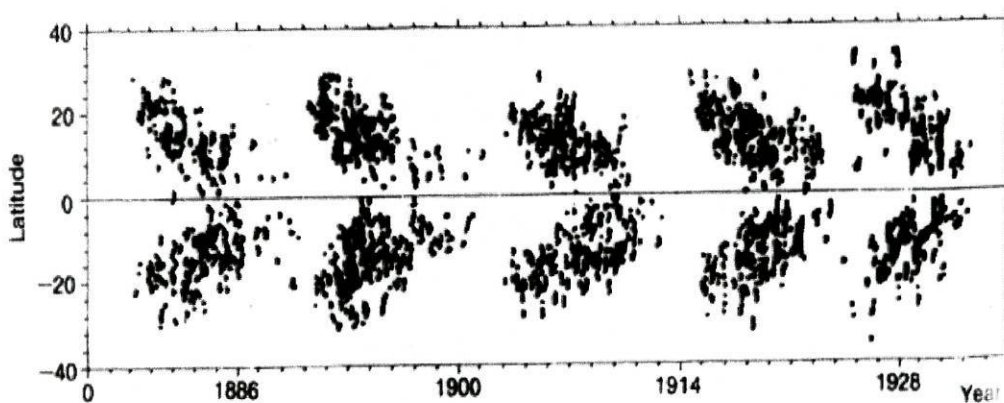


Figura 2.10 – diagrama de borboleta construído com registos da posição das manchas obtidas pelo Observatório de Greenwich (Stix, 1991)

A observação detalhada das obtidas pelo observatório de Greenwich desde 1874 inclui o tamanho e a posição das manchas para além do seu número. Estes dados mostraram que as

manchas não aparecem aleatoriamente sobre a superfície mas concentram-se em duas faixas de latitude de um e de outro lado do equador. Este registo sistemático da posição em função do tempo deu origem ao diagrama da figura 2.10 conhecido como “diagrama de borboleta”. Neste diagrama pode verificar-se que as manchas aparecendo em latitudes elevadas e deslocam-se lentamente para o equador.

Rudolph Wolf (1816 – 1893) é também um nome a destacar na procura e no estudo de registos sobre o número de manchas e determinação da duração média do ciclo solar. O seu nome está ligado ao observatório de Zurique de onde partem os primeiros cálculos utilizando a *equação de Wolf* para a determinação diária do número relativo de manchas utilizado no estudo da evolução do ciclo solar.

Entretanto a aplicação da espectroscopia ao estudo dos corpos celestes por análise da radiação luminosa emitida ou reflectida veio aprofundar os conhecimentos da estrutura e do comportamento dos astros tão distantes e inacessíveis, sendo o sol o primeiro a ser observado com mais detalhe. Kirchhoff (1824 – 1887) descreveu o Sol, ampliando os conhecimentos da *fotosfera*, sendo mais tarde demonstrado que se poderiam observar outros fenómenos como as proeminências, que se expandem como labaredas à volta da fotosfera. Foi também estudada a cromosfera tendo a construção dos *espectrógrafos* impulsionado a técnica da observação solar. Em 1890 George Ellery Hale (1868 – 1938) inventa e constrói o *espectro-heliografo* e dos seus variados estudos mostra que as manchas são zonas mais frias (cerca de 4.000 K) do que o plasma vizinho (cerca de 6.000 K) e consegue observar o Sol em diferentes comprimentos de onda.

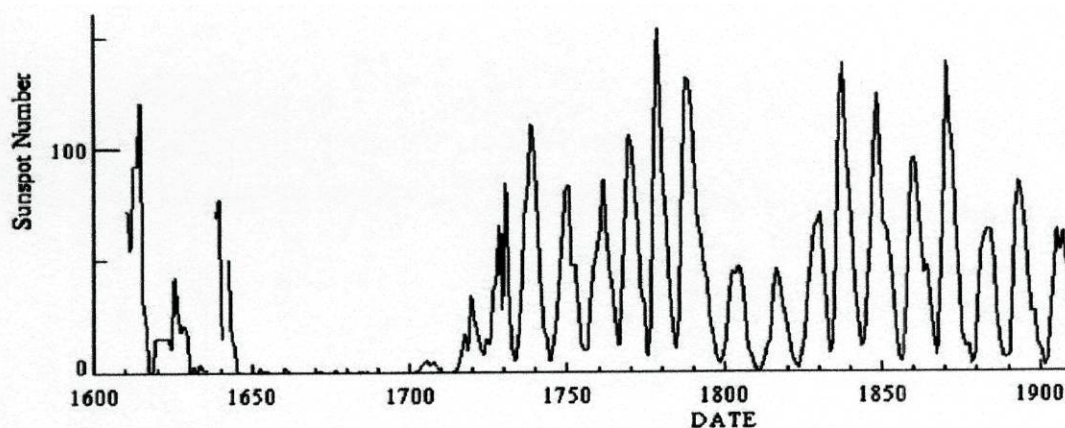


Figura 2.11 - gráfico da variação média anual do número de manchas entre 1600 – 1900 (Wilson, 1994)

Edward Maunder (1864 - 1937), em 1893, decidiu estudar registos antigos de manchas solares. Constatou que entre 1645 e 1715 o número de manchas era muito reduzido em comparação com as restantes épocas. Esse período era coincidente com a onda de frio que tinha atingido a Europa de tal modo que os rios Tamisa e Sena tinham gelado. Maunder associou assim os dois fenómenos, o clima na Terra e a actividade solar tendo concluído que possivelmente estariam ligados ficando esse período conhecido como “*mínimo de Maunder*” que coincide com a “mini época glacial ”.

2.7 – A observação do Sol no século XX

Depois dos sucessos obtidos com os métodos fotográficos e espectrográficos a *astrofísica* progride rapidamente graças ao desenvolvimento da *radio-astronomia*, um ramo da física. Pode considerar-se que a radio-astronomia nasce em 1942 mas já em 1888 Hertz realizou a celebre experiência sobre a irradiação electromagnética, dando os primeiros passos para a investigação e o desenvolvimento desta técnica.

Em 1894 surgem as primeiras tentativas de Lodge para a captação das ondas de radio solares. Em 1932 Karl G. Jansky (1905 – 1950), engenheiro da Bell Telephone Laboratories, ao efectuar estudos para eliminar os ruídos de fundo e interferências que prejudicavam os circuitos transoceânicos apercebeu-se que certas interferências tinham origens estranhas. Foi então construído o primeiro radio-telescópio, conseguindo-se determinar os sinais de frequência de rádio provenientes do centro da galáxia. Em 1936 alguns radioamadores detectaram sinais que caracterizaram como estranhos zumbidos aquando da passagem das manchas solares. Estas interferências foram interpretadas por especialistas como provenientes da *ionosfera* e não directamente do Sol.

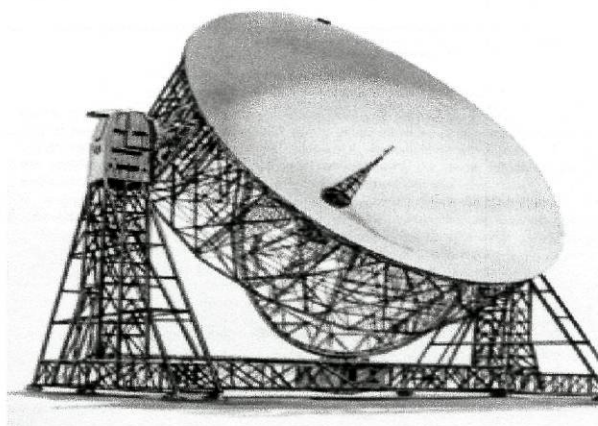


Figura 2.12 – radio-telescópio (Masini, 1979)

Um continuador da obra de Jansky foi Grote Reber (1911 -), que concebeu uma grande antena e desenhou o primeiro mapa radio da Galáxia. No entanto, este trabalho carecia da determinação da origem exacta da radiação, isto é, se era de natureza térmica ou de outra proveniência. A pouco e pouco se tornou evidente que a radiação galáctica consistia numa

radiação de origem predominantemente térmica em comprimentos de onda da ordem dos 1,86 m e por uma segunda componente não térmica nos comprimentos de onda maiores, 14,6 m.

Aquando da Segunda Guerra e por necessidades defensivas, as técnicas de recepção e emissão via rádio foram aperfeiçoadas e foram detectados, por mero acaso, sinais estranhos e particularmente fortes: o que se pensava ser uma “interferência” do inimigo veio a revelar-se como simples ondas de radio emitidas pelo Sol em concomitância com a formação de uma grande mancha sol.

Depois da guerra, em 1945, Appleton (1892-1965) evidenciou que a formação de manchas coincidia com emissão de sinais de rádio, sendo esta hipótese confirmada quando se registou a formação de uma outra mancha com emissão de ondas de radio. Paralelamente à recepção dos sinais rádio em simultâneo com a formação das manchas, também se verificou que a radiação proveniente das regiões das manchas solares era polarizada circularmente.

A aplicação de métodos sismológicos, como tentativa de obter dados do interior do Sol, por alteração das características das ondas, também teve a sua contribuição na construção de modelos criando uma nova vertente : a *heliosismologia* na década de 70.



Figura 2.13 – mancha solar (Schmelz, 1992)

A par do telescópio tradicional, que durante séculos foi o único instrumento utilizado aparece o radio-telescópio e actualmente já existem os satélites artificiais que impulsionam o estudo do Universo. As primeiras tentativas de observação do *espectro* solar fora da atmosfera terrestre, mediante o uso de foguetões V2 remontam ao ano de 1946. A observação com a ajuda de um satélite tem a vantagem de poder ser contínuo (não existe noite) e eliminar o efeito de escudo da atmosfera.

A missão do satélite Skylab, lançado em 25 de Maio de 1973 para a recolha de imagens do Sol revelou a existência de furos ou *buracos coronais*, pontos de emissão de raios X e um número indeterminado de pequenas estruturas brilhantes na corona. Foi entretanto destruído pelo Sol em 1979.

Detectam-se fora da atmosfera terrestre os denominados *raios cósmicos* cuja origem se desconhece, atribuindo-se no entanto, uma pequena parte ao Sol, associada às grandes erupções solares responsáveis também pelas perturbações das emissões radioeléctricas solares.

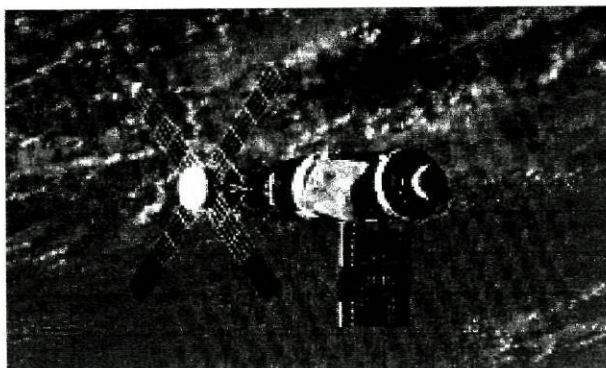


Figura 2.14 – satélite Skylab (Masini, 1979)

A tecnologia espacial no estudo do meio interestelar revelou a existência de partículas ionizadas e campos magnéticos originando fluxos de matéria provenientes da atmosfera solar, o *vento solar*, que modifica as linhas de força do campo magnético terrestre. O satélite Ulisses lançado em 1990 tem como missão estudar o vento e campo magnético do Sol em diferentes latitudes, já que possui uma órbita perpendicular à *eclíptica*, permitindo a observação dos pólos do Sol. Actualmente existem outros satélites como o ‘SOHO’ lançado em 1996 e o ‘Yokho’, colocado no espaço em 1991 e tem por objectivo observar a emissão de raios-X e fornecer dados por espectrometria da corona e de “flares” solares. Continuam operacionais e têm sido importantes na determinação da natureza das conexões magnéticas na atmosfera e nas características solares ligadas com a actividade. O equipamento pelo facto de ser diversificado permite uma missão também com objectivos múltiplos sendo o estudo do Sol mais detalhado.

A possibilidade de observação em diferentes comprimentos de onda vai permitir aprofundar, à distância, os conhecimentos sobre a constituição, funcionamento, evolução e todos os fenómenos relacionados com o Sol mesmo os que são transitórios e que estão associados à actividade solar.

Capítulo 3

As propriedades do Sol

3.1 - Introdução

O Sol é a estrela mais próxima da Terra e por isso assume um papel importante não só na preservação dos seres vivos, pela sua contribuição diária de energia, como pelo facto de ser a mais acessível à observação e recolha de dados, para além de estar ligada a alterações geomagnéticas e, possivelmente, climatéricas sentidas na superfície terrestre.

Como estrela de pequena massa e de meia idade, o Sol possui características físicas e químicas que podem ser consideradas constantes no tempo e que definem o denominado Sol calmo, quieto ou estável. Este conceito prende-se com o facto de existirem no Sol fenómenos transitórios, de curta duração, podendo ser ou não cíclicos e caracterizam o Sol activo ou mais vulgarmente, constituem a actividade solar. O modelo que subdivide o Sol em camadas desde o interior (não visível) até à superfície, observada na banda de comprimentos de onda correspondentes à luz visível, baseia-se essencialmente no modo como o Sol produz, transporta e liberta a energia. É conhecido como o modelo standard.

O limite visível do Sol denominado por superfície, não corresponde a uma zona sólida ou rígida, pois o Sol é um corpo gasoso, delimitado por uma fina película que corresponde à parte superior das células de *convecção*, onde o transporte de energia deixa de ser convectivo e passa novamente a ser *radiativo*.

Acima da superfície, que delimita o disco solar observado na Terra, o Sol possui uma camada de gases muito rarefeitos subdividida em fotosfera, cromosfera e corona, existindo uma zona de transição entre a cromosfera e a corona com características peculiares e ainda por compreender.

Na descrição das características do Sol existem autores que consideram o vento solar como fenómeno transiente pelo facto de sofrer forte influência das mudanças estruturais do *campo electromagnético*. No entanto o vento solar pode se considerado como um fenómeno associado ao Sol estável uma vez que a sua existência é constante muito embora apresente algumas variações no tempo.

3.2 - O Sol estável

O Sol está classificado no *diagrama de Hertzsprung-Russel*, como uma estrela da sequência principal, do *tipo espectral G2*, com idade aproximada de $4,5 \times 10^9$ anos (menos de metade da idade das estrelas mais velhas da Galáxia), temperatura de superfície 5700 K e propriedades comuns a muitas outras estrelas com a mesma massa e raio.

Podemos enumerar algumas outras características como massa de $1,989 \times 10^{30}$ Kg, raio de $6,9599 \times 10^8$ m, volume $1,4122 \times 10^{27}$ m³, densidade média de $1,409 \text{ g/cm}^3$, luminosidade de $3,827 \times 10^{33}$ erg /s e composição química em termos da abundância relativa (%) em número de átomos : hidrogénio (92,1); hélio (7,8); oxigénio (0,061); carbono (0,030); azoto (0,0084); néon (0,0076); ferro (0,0037); silício (0,0031); magnésio (0,0024); enxofre (0,0015) e outros elementos que aparecem apenas como vestígios (cerca de 0,0015).

O interior é considerado como uma esfera maciça de plasma, comprimido por acção da própria gravidade e no estado ionizado devido à elevada temperatura. Pelo facto de não ser possível observar a sua estrutura interna recorre-se a modelos físico/matemáticos, cujas equações dependem de grandezas observáveis como a temperatura de superfície, luminosidade, massa e composição química que são usadas como condição fronteira.

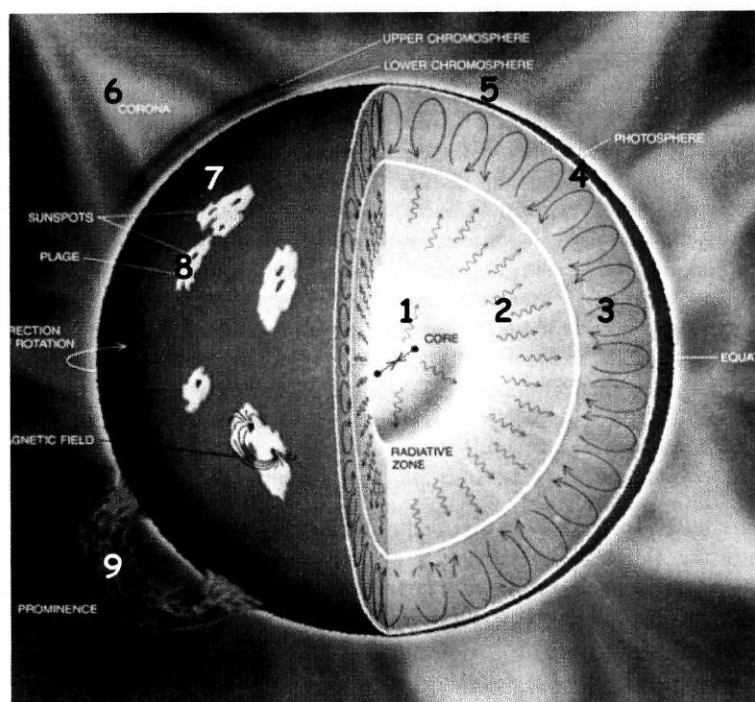


Figura 3.1 – modelo do Sol (Wilson, 1994)

A Figura 3.1 representa o interior do Sol em corte, desde o núcleo (1), passando pela camada intermédia (2) cujo processo de transporte de energia é radiativo e seguida por uma zona convectiva (3). Esta última é delimitada por uma fina película onde o transporte de energia volta a ser radiativo (4) sendo considerada a superfície do Sol, denominada por fotosfera, já que é a zona visível (luminosa). Acima da fotosfera há também a referência à cromosfera (5) seguida da corona (6). Neste esquema estão também representadas algumas manifestações de actividade como as manchas (7), as “*plages*” (8), uma proeminência (9) que se eleva da superfície e que serão abordadas na actividade solar.

As variações de propriedades físicas do Sol desde o centro até á superfície podem ser ilustradas por um modelo, que está esquematizado na Figura 3.2 como um conjunto de gráficos que relacionam a variação da luminosidade, massa, temperatura e densidade em ordenadas, com o aumento do raio solar (em percentagem) em abcissas.

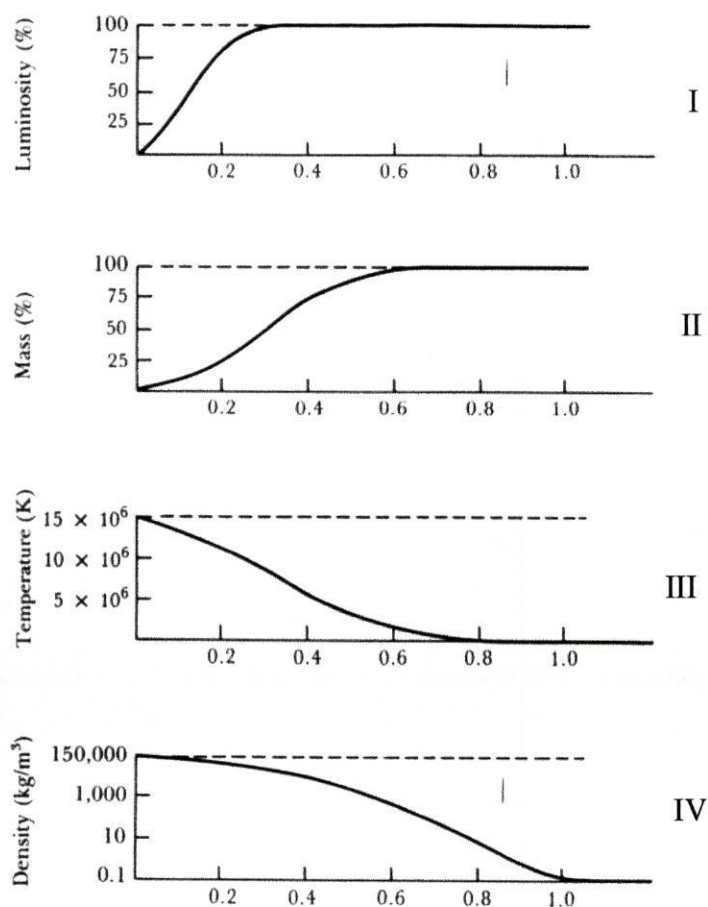


Figura 3.2 - gráficos da variação de da luminosidade, massa, temperatura e densidade com o aumento do raio solar (Kaufmann,1997)

Os gráficos correspondem à representação do modelo standard aceite para o Sol admitindo que:

- * (I) a luminosidade é produzida no núcleo e transportada até à superfície;
- * (II) a massa do Sol está mais concentrada nas zonas centrais (as de maior densidade) e a quase totalidade é atingida a pouco mais de 50 % do raio;
- * (III) a temperatura varia de acordo com a produção de energia e transporte até ao exterior. É elevada no centro e decresce até perto da superfície;
- * (IV) a densidade (ou as forças de pressão) uma vez que corresponde a uma situação de equilíbrio *hidrostático*, decresce à medida que nos afastamos do centro até atingir um valor muito baixo na superfície.

Uma outra técnica de estudo que contribuiu para o desenvolvimento de modelos da estrutura interna do Sol é baseada nos modos próprios de oscilação das ondas que se propagam no Sol - a *héliosismologia*. Esta técnica, baseada no facto do Sol ser uma esfera gasosa que ao ser atravessada por ondas apresenta o fenómeno de reflexão, vai permitir estabelecer uma estrutura interna baseada nas propriedades das ondas. Os tipos de ondas estacionárias observados no Sol estão associados a dois modos de oscilação: o “modo p” relacionado com as ondas acústicas (e suportadas pela pressão do gás) e o “modo g” com as ondas de gravidade (que são suportadas pela gravidade). Pelo facto de nas zonas convectivas não existir o “modo g” e apenas o “modo p” ser observado à superfície, pode inferir-se propriedades do Sol tais como a temperatura, pressão e rotação pela mudança das características das ondas: a amplitude, o período e a velocidade de propagação.

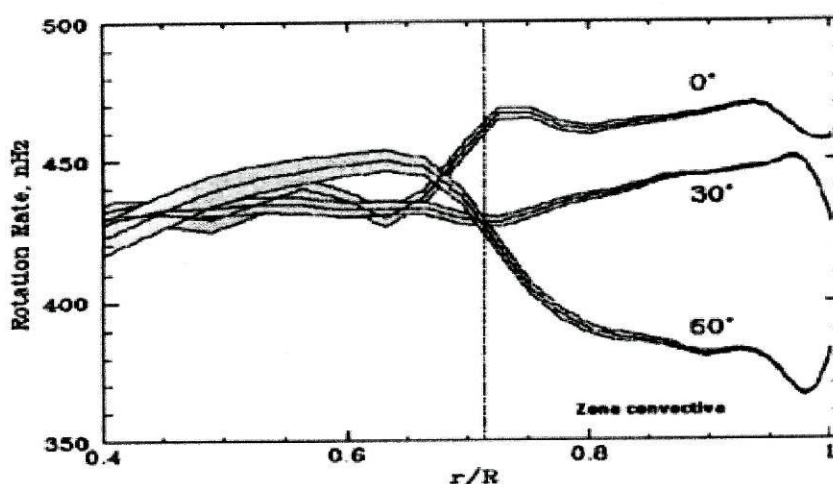


Figura 3.3– gráfico da variação da rotação com a profundidade para diferentes latitudes, construído com dados obtidos em estudos sismológicos do Sol (Lang, 1998)

A rotação diferencial do Sol é um exemplo da aplicação do estudo sismológico onde se podem verificar as diferenças de comportamento do fluido e a dependência da velocidade de rotação não só com o raio (profundidade) mas também com a latitude.

Por análise da Figura 3.3, a estrutura interna do Sol apresenta uma zona perto do núcleo (que se estende até cerca de 40% do raio total) e cujo comportamento em relação à rotação se pode considerar próximo do de um corpo rígido, isto é, com rotação uniforme (admite-se que o núcleo do Sol é compacto e muito denso). À medida que nos vamos afastando do centro (a densidade vai sendo menor) a rotação deixa de ser uniforme. É de salientar que a maior diferença aparece para latitude de 60° . Para valores de raio que correspondem à zona onde o modelo standard admite que o processo de transferência de calor deixa de ser radiativo e se iniciam os movimentos característicos das correntes de convecção (valores acima de 70% do raio total) a variação de rotação com a latitude e com o raio é notória. Próximo dos pólos (latitudes de 60°) a rotação é mais baixa e neste caso existe uma maior variação com a profundidade. No equador a rotação é máxima, correspondendo também à zona onde a variação com a profundidade é menor a par com as latitudes baixas.

A rotação diferencial está também ligada às manifestações de actividade solar em virtude do modo como ela pode afectar a configuração das linhas de campo magnético à superfície do Sol.

3.3 – Estrutura interna

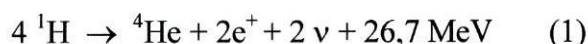
O modo como o transporte de energia é feito desde o núcleo até à superfície depende da estrutura térmica do interior e da eficiência dos processos envolvidos. Se o valor do gradiente de temperatura real, numa faixa considerada, é menor do que o gradiente *adiabático* local, o processo que regula o transporte de energia é radiativo, controlado pela taxa do gradiente de temperatura local. Se pelo contrário, o gradiente real de temperatura exceder o gradiente adiabático, então o elemento de fluido está mais quente que a periferia e vai iniciar-se um processo instável dominado pelas correntes de convecção. Os movimentos ascendentes e descendentes estabilizam o gradiente de temperatura por troca de calor com o exterior sendo acompanhados por uma diminuição de densidade. No cimo das correntes de convecção há novamente uma fina camada de fluido (a fotosfera) que apresenta características de densidade e temperatura que obrigam a retomar novamente o processo de radiação (o gradiente de temperatura real é menor do que o adiabático).

Os modelos solares indicam que o núcleo de hidrogénio “queimado” ocupa aproximadamente um terço do raio do Sol sendo a radiação o transporte eficiente de energia na zona contígua (segunda–terça parte) e quando atinge os limites de gradiente de energia muda o regime de transferência e são as correntes de convecção que controlam o processo até à periferia, sendo, no limite novamente radiativo.

A teoria que modela o interior do Sol tem também como objectivo explicar o fluxo de *neutrinos*, a abundância de lítio na composição química e as propriedades oscilatórias do Sol, de acordo com as observações.

3.3.1 – O núcleo

É a região central onde as reacções *termonucleares* consomem o hidrogénio convertendo-o em hélio e em energia que deixa a superfície como luz visível. Estas reacções podem ser descritas pela equação:



que descreve a cadeia prótão – prótão (cadeia pp) onde grupos de quatro prótões (^1H) são convertidos em núcleos de hélio (^4He) tendo outros núcleos de hidrogénio a desempenhar o papel de catalisadores. Pelo facto de cada prótão ter a carga +1 e cada núcleo de hélio a carga +2 então, a equação em termos de carga eléctrica possui o valor de +4 em ambos os membros. Relativamente à massa, cada núcleo formado perde cerca de 3% sob forma de energia que se liberta como radiação γ de alta frequência e neutrinos.

Estas reacções são sensíveis à temperatura e densidade pelo que só se realizam no centro ou perto dele. Os núcleos individuais de hidrogénio ionizado devem colidir com energia suficiente para vencer a força eléctrica repulsiva das duas partículas carregadas positivamente. A temperatura no núcleo ronda os $15 \times 10^6 \text{ K}$ e a densidade é da ordem de 150 g/cm^3 (cerca de 100 vezes a densidade média). A energia é libertada sob a forma de radiação γ de alta frequência e por neutrinos que são detectados à superfície da Terra e dão consistência ao modelo de reacções nucleares proposto para o Sol.

A temperatura e a densidade decrescem rapidamente com o aumento do raio sendo que a cerca de 25% da distância total ao centro a densidade tem valores de 20 g/cm^3 e a temperatura é cerca de metade do valor central.

3.3.2 – Interior radiativo

A zona radiativa estende-se desde o limite do núcleo até à base da camada seguinte, isto é, entre 25% a 75% da distância à superfície do Sol (ver Figura 3.1). Esta zona é caracterizada pelo método de transporte de energia - a radiação. A energia gerada no núcleo é libertada na sua maior parte na forma de raios- γ e raios-X que fluem através do gás à medida que este se torna menos denso - a densidade passa de valores de 20 g/cm^3 para $0,2 \text{ g/cm}^3$. A descida de densidade é acompanhada pela descida da temperatura que atinge cerca de $2 \times 10^6 \text{ K}$.

A camada radiativa termina numa região onde se iniciam as correntes de convecção como forma de transporte da energia até à fotosfera e pensa-se que este movimento de partículas está na origem do campo magnético solar.

3.3.3 – Envelope convectivo

É a camada que se estende até à superfície visível (Figura 3.1) com uma profundidade de cerca 200000 Km (os restantes 30 % do valor do raio). Na base da zona convectiva a temperatura é elevada, torna-se opaca à radiação pelo que se cria instabilidade e o gás começa a efectuar movimentos ascendentes /descendentes analogamente ao que se passa com a água em ebulição. Estes movimentos de convecção transportam o calor rapidamente para a superfície onde o fluido se expande e arrefece enquanto se eleva. Na superfície a temperatura é da ordem dos 5700K e a densidade é de somente 0,0000002 g /cm³. Os movimentos do fluido formam células de convecção cujos topos atingem a fotosfera e lhe dão uma textura particular.

3.4 - Fotosfera

É a camada que limita o Sol e que pode ser observada na parcela visível do espectro contínuo de radiação: forma portanto o disco solar visível propriamente dito. É uma película fina que em fotografias de grande resolução mostra uma textura irregular que se assemelha a godos (pedras arredondadas e polidas da praia) dando ainda a impressão de estar em movimento contínuo. Estas características morfológicas estão relacionadas com as correntes de convecção apresentadas no modelo do Sol, que se estendem por toda a superfície e denominam-se por granulação.

Modelos normalmente usados para descrever a fotosfera supõem as propriedades termodinâmicas em regime estacionário variando somente com a altura. A variação da temperatura é descrita no gráfico da Figura 3.4 considerando a espessura da fotosfera de 550Km, observada no comprimento de onda de 5000\AA e que corresponde à profundidade óptica (τ) igual a um, definida como a origem da radiação emergente de frequência ν e onde o valor local da *função de Planck*, corresponde à intensidade da radiação normalmente emergente.

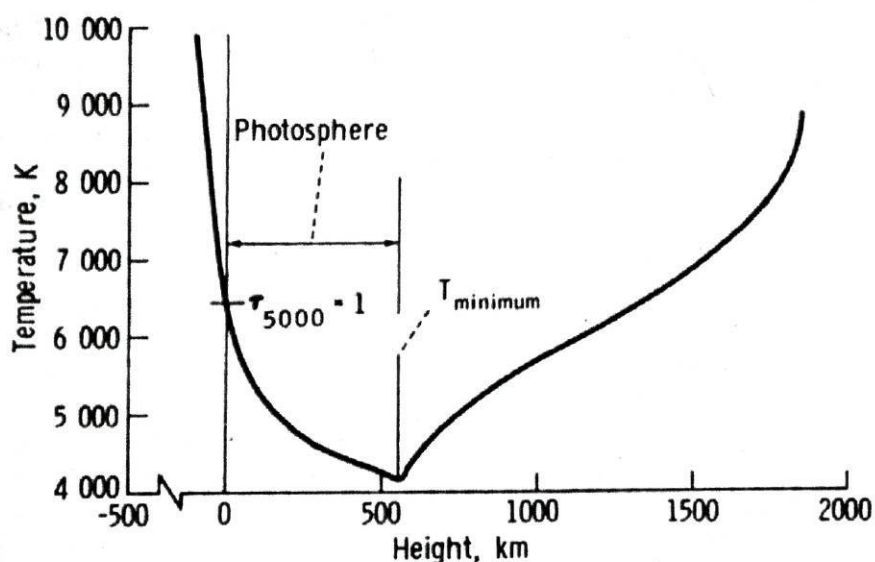


Figura 3.4 – gráfico da variação temperatura em função da altura (Priest, 1987)

A vantagem desta definição é dada pelo facto de se poder associar uma temperatura ao nível de radiação observada. Assim para o Sol, os picos de radiação de comprimentos de onda perto de 5000\AA corresponde a uma temperatura de 5800 K .

Um dos fenómenos que também se observa no disco solar é o escurecimento do *limbo*. O Sol oferece a possibilidade de se deduzir directamente da observação a variação de temperatura com a profundidade fornecendo elementos sobre a estrutura física (distribuição de temperatura, por exemplo) das camadas limítrofes à fotosfera. Ao comparar a radiação do centro do disco solar com a do limbo, verifica-se um ligeiro escurecimento em direcção a este, pois quanto mais próximo da margem do disco mais oblíqua resulta a direcção visual, com a consequência de a radiação ter origem nos estratos cada vez mais elevados onde a temperatura será mais baixa e por isso menos brilhante.

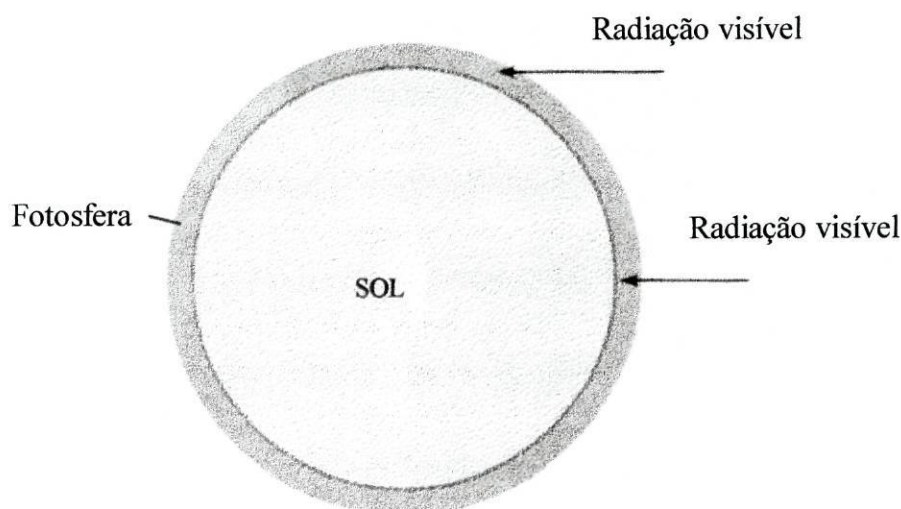


Figura 3.5 – a radiação na direcção do limbo provem de camadas mais altas e por isso mais frias enquanto que a radiação observada no centro, é menos penetrante e por isso mais brilhante (Kaler, 1994)

É também na fotosfera que têm origem os fenómenos que estão na base da actividade solar tais como manchas solares, “flares”, proeminências e *filamentos* entre outros, que serão desenvolvidos nos capítulos seguintes.

3.4.1 – Granulação fotosférica

A granulação representa o mais pequeno movimento padrão, bem definido na superfície do Sol, com um aspecto típico dado pela Figura 3.6, exibindo uma estrutura de forma poligonal, mais ou menos regular, formada por pequenas células brilhantes, separadas por faixas escuras e estreitas com um afastamento médio de 1400 Km (de centro a centro). Estas células são o resultado do movimento das correntes de convecção que atingem a superfície do Sol, com velocidade de 0,4 Km/s e deslocam-se horizontalmente com velocidade menor (cerca de 0,25 Km/s) arrefecem e descem novamente. O contraste de intensidade entre as regiões brilhantes e as escuras varia de 10 a 20% quando observado em comprimentos de onda torno dos 5500Å, correspondendo a variações da temperatura na ordem de 200 K. As zonas mais claras na superfície do Sol correspondem ao gás ascendente que chega do interior, com temperaturas mais elevadas e por isso mais brilhante; estão rodeadas de zonas mais escuras, ou seja, mais frias, de gás em sentido descendente.

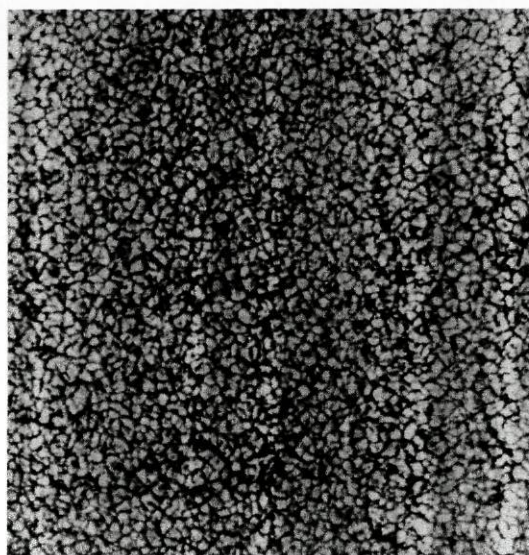


Figura 3.6 - granulação à superfície do Sol com uma definição de 0,25 segundos de arco (Sturrock,1989)

Durante a observação da superfície do Sol, mais concretamente na tentativa de dar consistência a um dos modelos propostos para os campos de velocidade, identificou-se uma componente oscilatória forte, a que se chamou “oscilações de cinco minutos” devido ao seu período característico. Estas oscilações foram interpretadas como resultado de um efeito de ressonância de ondas acústicas, aprisionadas sob a fotosfera. Ao separar a componente

oscilatória dos dados de velocidade, verificou-se que o deslocamento para o azul coincidia com a posição dos grânulos brilhantes (movimento ascendente) e que o deslocamento para o vermelho estava de acordo com as linhas escuras (movimento descendente). Esta constatação vem reforçar a ideia de que a origem da granulação está seguramente nas correntes de convecção. Mas, se os outros dados obtidos laboratorialmente, forem também concordantes, poderemos estimar que a formação das correntes de convecção se faz a uma profundidade na ordem dos 600 Km, tomando como referência o nível de profundidade óptica igual a um, para comprimentos de onda em torno de 5000Å.

Fotografias de grande resolução permitiram delimitar zonas na superfície solar com base em diferenças de velocidade do movimento do fluido (campo de velocidades) e levaram à definição de uma outra estrutura, com uma extensão compreendida entre 20000 e 40000Km, designada por supergranulação. Certos autores admitem ainda a existência de uma terceira classe de células mais extensas tendo origem na base da zona de convecção e cujas dimensões transversais seriam da ordem de 200000Km designando-a por mesogranulação. No entanto as tentativas de correlacionar a velocidade de superfície com as variações de brilho nas células de origem convectiva não chegaram ainda a resultados conclusivos. Os grânulos possuem um tempo médio de vida pequeno, cerca de 8 minutos embora possam permanecer por 15 minutos, estando constantemente a renovarem-se por processos de expansão e fragmentação. Observaram-se ainda os denominados grânulos explosivos que são mais brilhantes que o normal e formam anéis que se expandem com velocidades de 1,5 a 2Km /s, fragmentando-se em cerca de 10 minutos. Para um grânulo com o tamanho de 800 Km e velocidade de 0,4Km/s o tempo de passagem será da ordem dos 30 minutos, o que significa que não existem muitos na vida de uma célula, sendo a convecção consequentemente um processo não estacionário, dificultando o seu tratamento.

Ao analisar a superfície fotosférica na escala dos 30000Km, ou seja, considerando o modelo da supergranulação, a velocidade para o material ascendente no centro é de 0,1Km/s, movendo-se horizontalmente com valores típicos de 0,3 a 0,4 Km/s e depois desce no limite da célula com 0,1 a 0,2 Km/s. As células dos supergrânulos têm forma irregular e o diâmetro pode variar de 20000 Km a 54000 Km com um valor médio de 32000 Km, apresentando um valor maior em cerca de 10% perto das regiões activas. Na fotosfera exibem uma pequena ou quase nenhuma variação de brilho, sendo no entanto mais visíveis perto do limbo como padrão de movimentos horizontais. Os supergrânulos individuais possuem um tempo de vida entre 1 e 2 dias o que coincide com o seu tempo de passagem.

3.5 – Cromosfera

É a camada irregular que envolve a fotosfera e deve o nome ao facto de se mostrar com o aspecto de uma orla clara durante os eclipses, imediatamente após a ocultação do disco ou antes do reaparecimento do Sol. Formada principalmente por vapores de hélio e hidrogénio que vão ficando rarefeitos à medida que nos afastamos da superfície, fora do limite visível do Sol, e possui valores de densidade entre 10^{23} a 10^{15} partículas/m³ (valores médios da fotosfera, limite inferior, e da região de transição, limite superior, respectivamente). A espessura é de alguns milhares de quilómetros verificando-se uma subida de temperatura de cerca de 4200 K até 20000 K.

A observação desta camada do Sol, e particularmente junto do limbo, realizada com o espectro-heliógrafo a funcionar na luz da risca de hidrogénio H α revela a existência de jactos de plasma (espículas) que se elevam na cromosfera com uma velocidade de 20 a 30 Km/s e chegam a tingir uma altura de 11000 Km antes de se desvanecer, mantendo de certa forma o valor da velocidade, apesar da desaceleração gravitacional a que está sujeita.

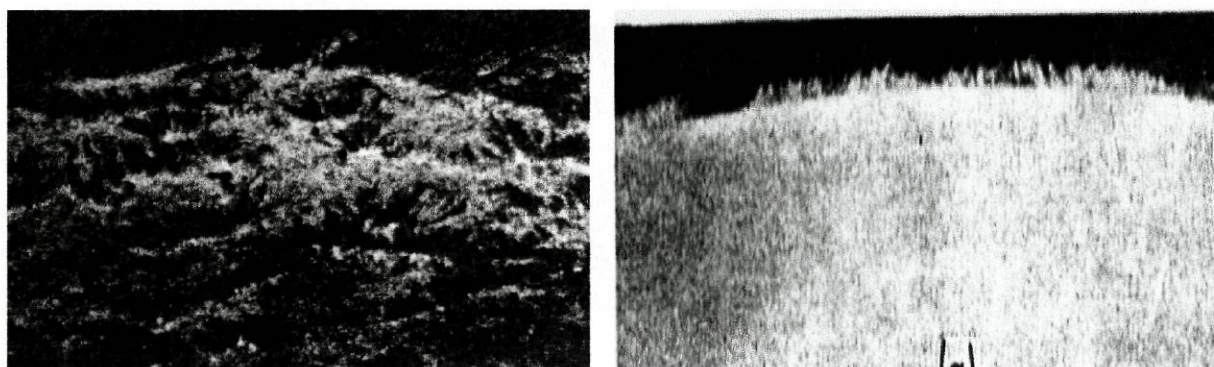


Figura 3.7 – aspecto dos jactos (espículas) perto do limbo, à esquerda, e no limbo à direita, obtidos na risca de hidrogénio H α (Priest, 1987)

Estes jactos de material possuem um tempo de vida característico de 5 a 10 minutos, diâmetros de 500 a 1200Km, comprimentos máximos de 10000 a 20000Km, temperaturas de 10000 a 20000K e uma densidade de electrões que varia entre 3×10^{16} e 3×10^{17} partículas/m³ para além de exhibir uma velocidade de rotação considerável e estão associados a células de super-grânulo, contando-se cerca de 30 espículas por supergrânulo, com inclinação média de

20° com a vertical.

No disco observam-se linhas alongadas, umas escuras e outras brilhantes, com dimensão de 700x7000 km que se designam por fibrilas e que se localizam na junção dos supergrânulos. As espículas cobrem cerca de 1% do disco e são predominantemente verticais enquanto que as fibrilas ocupam cerca de 50% do disco e são principalmente horizontais.

A origem da formação das espículas está provavelmente na interacção do plasma com os campos magnéticos intensos nos limites dos supergrânulos, dirigidos por ressonância entre os movimentos do fluido ao longo dos tubos de fluxo, que ladeiam os supergrânulos ou os grânulos, em vibração irregular. Uma outra hipótese admite instabilidade térmica ao longo das linhas de campo como a causa para a formação das espículas.

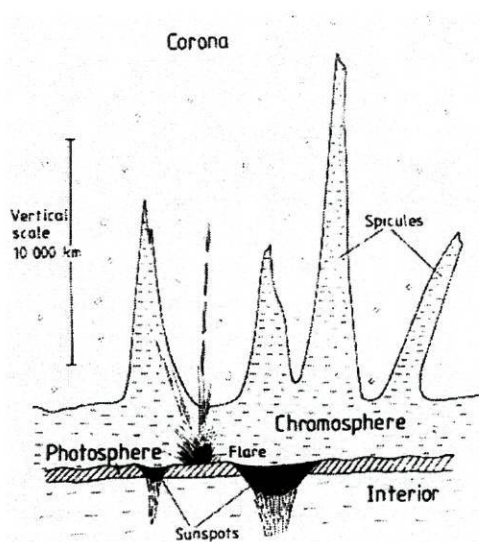


Figura 3.8 - esquema da cromosfera destacando as espículas (Monteiro, 1998)

Nas regiões polares onde o campo magnético possui provavelmente as linhas de campo aberto, os jactos de material assemelham-se a uma pequena ondulação e são denominados por macrospículas. Após elevarem-se com velocidades de 10 a 150Km/s a uma altura compreendida entre 4000 e 40000 Km caem e desvanecem-se num período que pode durar entre 8 a 45 minutos. Possuem um diâmetro na ordem dos 4000 a 11000 Km e densidades de 10^{16} partículas/m³.

Na cromosfera também se observam fenómenos ligados à actividade solar como “flares”, “plages” e proeminências.

3.6 – A região de transição

É a zona que separa a cromosfera da corona numa espessura de 1700 ± 800 Km para as regiões ditas estáveis pois parece elevar-se mais nas regiões perto dos pólos, embora tal facto possa dever-se à presença das macroespículas.

A observação desta região é feita principalmente em linhas de emissão de EUV e muitas vezes inclui a análise conjunta da zona de cromosfera média e elevada já que esta zona não pode ser considerada como uma camada horizontal e estática mas sim a soma de pequenas fatias, finas e dinâmicas, em interacção continua por introdução de espículas com o plasma coronal. Para além das espículas ainda se observam pequenas explosões e jactos supersónicos em locais acima das macroespículas.

O estudo da região de transição é particularmente interessante pelo facto de a temperatura sofrer um aumento abrupto e significativo: de cerca de 30000 K para 200000K numa distância de apenas 30 Km e nos restantes 2500 Km a ascensão é lenta e a temperatura eleva-se de 200000 K até 1000000 K.

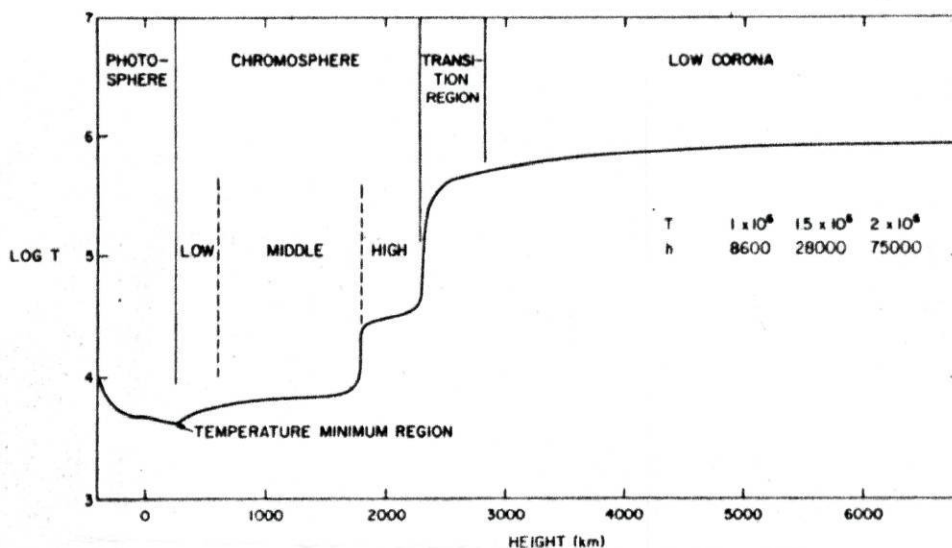


Figura 3.9 - gráfico que relaciona o logaritmo da temperatura com a altitude de acordo com o modelo descrito para o Sol (Priest, 1987)

Esta subida de temperatura à medida que nos afastamos do Sol é um problema ainda em aberto e constitui o denominado problema do aquecimento da corona. Pensa-se que este aumento de temperatura está relacionado com a cedência de energia por parte de ondas acústicas ou de outras relacionadas com o campo magnético do Sol.

3.7 – Corona

A corona é a camada mais exterior do Sol, com temperatura típica de 2×10^6 K e a mais rarefeita, possuindo valores de densidade média desde 10^{14} partículas/ m^3 que diminui rapidamente com a altitude, atingindo valores menores que 10^{10} partículas/ m^3 para uma altura de 10 raios solares (próximo de 7000000 Km).

As estruturas visíveis possuem uma densidade maior, cerca de 5 a 20 vezes a densidade média da corona. De realçar uma estrutura designada por “streamers”, mais densa que os valores médios da corona (3 a 5 vezes maior) e radial, que se estende a uma altura de 0,5 a 1 raio solar até cerca de 10 raios solares e forma uma espécie de elmo, situando-se acima das proeminências ou sobre as regiões activas. A estrutura de “streamers” possui uma base redonda (ou em arcada) de linhas de campo fechadas, encimadas por lâminas de linhas de campo abertas desenhando uma abóbada pontiaguda. Foi sugerido que os “streamers” formam-se quando o plasma se encontra numa região de linhas de campo fechadas e ao tornar-se suficientemente quente consegue romper as linhas de campo formando uma folha de corrente neutra.

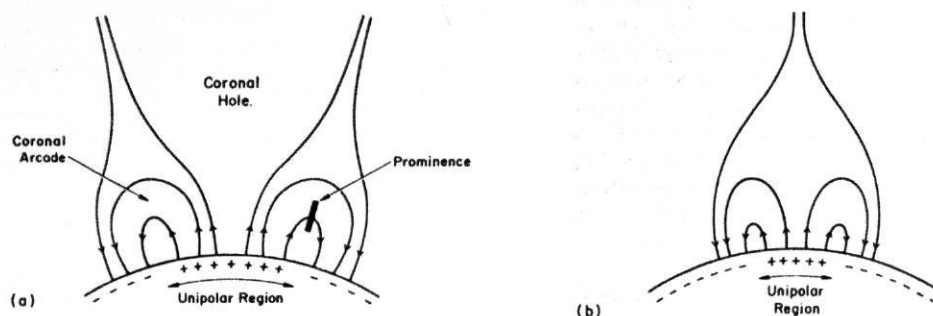


Figura 3.10 - esquema das linhas de campo numa região unipolar, originando o “streamer”; no esquema da direita está representada uma região unipolar estreita (Priest, 1987)

A observação da corona em raios-X, possível apenas com a ajuda de satélites, uma vez que a atmosfera terrestre absorve este tipo de radiação, mostra duas regiões distintas: uma relativamente escura que corresponde ao buracos coronais, onde as linhas de campo serão predominantemente abertas e as zonas claras com um número indeterminado de anéis ou

arcos coronais (loops) e pontos brilhantes, que correspondem a zonas predominantemente fechadas. Os buracos coronais são zonas com densidade mais baixa (cerca de três vezes menor que a média para a coroa) e temperatura ligeiramente menor (valores na ordem dos $1,4 \times 10^6$ K a $1,8 \times 10^6$ K numa altura até 2 raios solares). Possuem uma estrutura magnética aberta e divergente situada por cima das regiões unipolares da fotosfera e cromosfera baixa, uma vez que as propriedades do plasma nestas regiões e com campo magnético aberto, não se distinguem com nitidez dos seus arredores mas identificam-se, ainda que levemente, em observações na risca de He, para comprimentos de onda de 10830 \AA . Pede-se ainda referir que as observações do Skylab revelaram que os buracos coronais podem resistir períodos de tempo que correspondem a algumas rotações solares e por isso considerados como características solares, embora estejam também eles relacionados com o ciclo das manchas, pois desapareceram perto do valor máximo.

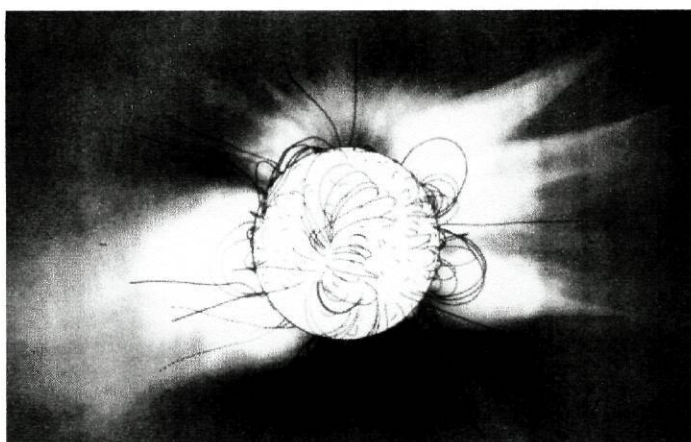


Figura 3.11– esquema as linhas de campo na coroa que quando se apresentam abertas originam buracos coronais e correspondem a zonas escuras (Zirin, 1989)

Os arcos ou anéis podem ter até 700000 Km de comprimento e em raios-X apresentam uma temperatura de 2 a 3×10^6 K e densidade de 7×10^{14} partículas/ m^3 . As extremidades estão enraizadas nos pontos de campo magnético intenso, perto da orla das regiões activas. A duração de um arco é de apenas um dia mas um sistema de vários arcos pode resistir durante vários meses. Dependentes da conexão entre as regiões activas estes anéis brilhantes podem permanecer ainda durante cerca de 12 dias, com uma visibilidade intermitente. Pode acontecer que os arcos se interliguem e alterem a sua temperatura e densidade para valores de $3,1 \times 10^6$ K e $1,3 \times 10^{15}$ partículas/ m^3 respectivamente.

Os pontos brilhantes observados em raio-X, têm diâmetro típico de 22000 Km, distinguindo-se ainda um núcleo com 4000 a 7000 Km. São observados cerca de 1500 pontos por dia e possuem vida média de 8 horas podendo alguns brilhar durante 2 dias. É de notar que menos de 15% destes pontos permanece mais que um dia e muito poucos sobrevivem mais que 2 dias. Isto parece consistir em dois tipos de pontos brilhantes: um com tempo de vida de 2 dias ou menos, distribuindo-se uniformemente sobre o disco solar; o outro com tempo de vida mais longo parecem distribuir-se de forma semelhante à das regiões activas : ocorrem a latitudes de $\pm 30^\circ$.

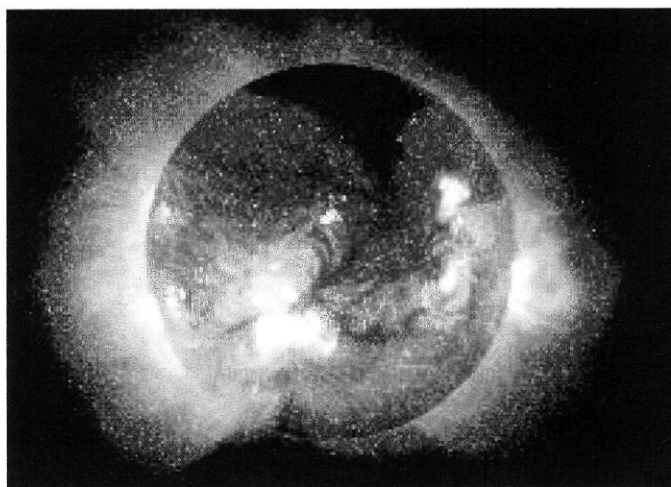


Figura 3.12 – imagem do Sol em raio-X, podendo distinguir-se o buraco coronal na parte superior da imagem, zona escura, os arcos e os pontos brilhantes, na zona luminosa e central da imagem (SOHO, 1997)

Os pontos brilhantes são manifestações coronais de minúsculas áreas bipolares de fluxo emergente, conhecidas como regiões efémeras e parecem consistir em diversos anéis com dimensões típicas de 12000 Km em comprimento e 2500 Km em largura. Ao emergir através da superfície o fluxo magnético é observado mais como pontos brilhantes do que como regiões activas estando a proporção de fluxo emergente observada relacionada de algum modo com os fenómenos de actividade: em 1970 foi de 40% (máximo no número de manchas) e de 95% em 1976 (mínimo de manchas).

3.8 - Vento solar

O facto da corona possuir uma temperatura elevada associado à pressão da radiação vai provocar a libertação de massa para o espaço na forma de plasma ou partículas (electrões e protões mais ou menos igual em número) que são aceleradas pela interacção do campo magnético, atingindo velocidades até cerca de 800 Km/s, espalhando-se por todo o sistema solar, fazendo-se sentir não só na Terra como a uma distância de 50 a 100 UA.

A interacção entre o plasma e o campo magnético na corona solar determina o tipo de fenómeno que pode ocorrer. Quando as linhas de campo provenientes fundamentalmente de regiões polares do Sol se abrem, formam o chamado buraco coronal de onde saem e se expandem, para o espaço interplanetário, correntes de plasma que dão origem ao vento solar. Tais buracos coronais parecem estar repletos de estruturas finas designadas por plumas e que têm sido recentemente sugeridas como fonte do vento solar. Estas plumas são especialmente visíveis no mínimo de actividade solar.

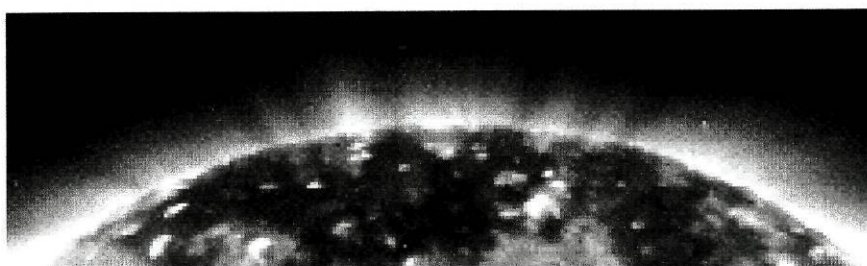


Figura 3.13 – estrutura fina das plumas, na linha de Fe XI, 195 Å (SOHO,1996)

O facto do campo magnético do Sol não ser regular vai alterar as características do vento em termos de intensidade, polaridade, velocidade e composição química. Assim, dependendo do local onde o vento é emitido, este pode ter diferentes características. Nas zonas de buracos coronais o vento é rápido porque as partículas podem facilmente deslocar-se ao longo das linhas de campo abertas, sendo este o fluxo que se observa com características mais uniformes. Os fluxos de alta velocidade giram com o Sol num período equatorial de aproximadamente 27 dias sendo na superfície da Terra correlacionados com as tempestades geomagnéticas. Nas zonas de actividade onde as linhas de campo estão mais fechadas, há interacções entre fluxos de velocidades diferentes produzindo efeitos de compressão e ondas de choque para além de dificultarem a emissão de partículas ionizadas podendo estar,

eventualmente, na origem do denominado vento lento, uma vez que o plasma é aprisionado pelas linhas de campo.

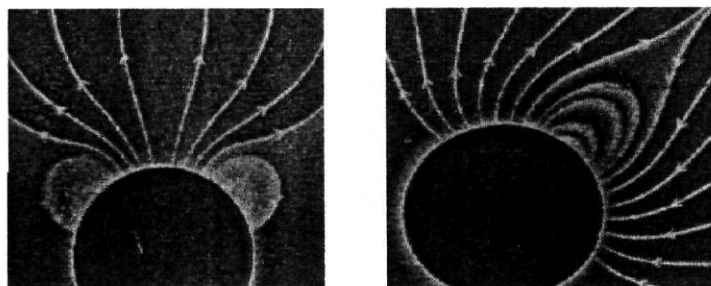


Figura 3.14 – esquema do vento rápido (à esquerda) e vento lento (à direita)
(Monteiro, 1998)

Os anéis de campo magnético, localizados abaixo das correntes coronais, podem expandir, ou podem ser ejetadas explosivamente para o espaço interplanetário. A tão chamada explosão transitória de massa coronal produz uma enorme nuvem de plasma no espaço interplanetário. Esta nuvem, designada por Ejeção de Matéria Coronal, alcança a Terra num intervalo de tempo de 1 a 2 dias e pode envolver uma massa de 10^{16} g (10 biliões de toneladas) de gás que é ejetada a mais de 200 Km/s.

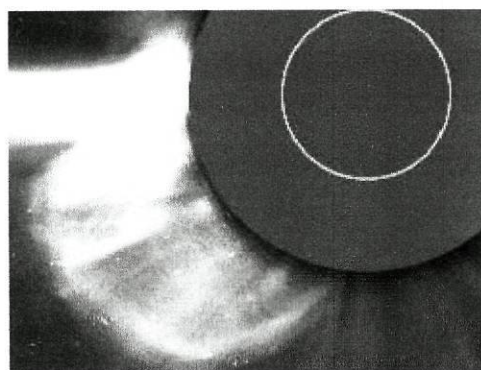


Figura 3.15 - Ejeção de massa de um buraco coronal (SOHO, 1997)

Também se observam no Sol, fenómenos semelhantes a um tornado que sopra com velocidade da ordem de 500000Km/h. Eles ocorrem com frequência perto dos pólos Norte e Sul do Sol e são mais abrangentes que na Terra pois um tornado na superfície da Terra sopra com velocidade entre 400 e 500 Km/h. Cientistas britânicos descobriram os tornados por observações realizadas a partir do satélite SOHO.

Os maiores efeitos sentidos na Terra estão associados a estas ejeções de matéria coronal que devido à grande emissão de partículas solares causam tempestades geomagnéticas que interferem com a emissão/recepção de rádio e originam as *auroras boreais*.

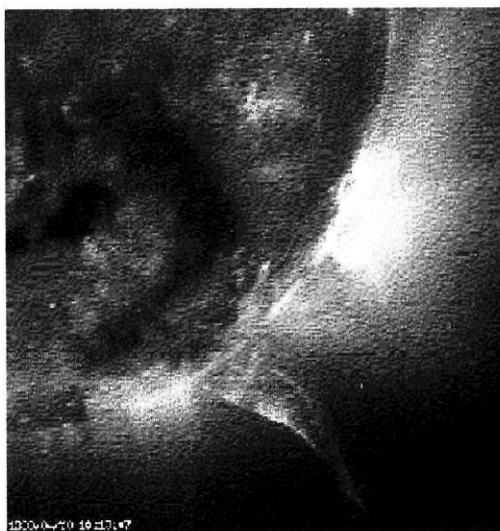


Figura 3.16 - pormenor de uma grande tempestade giratória (SOHO, 1997)

As partículas que constituem o vento solar são emitidas com velocidade radial muito elevada possuindo também velocidade tangencial. Pelo facto do Sol possuir movimento de rotação, o campo magnético solar vai adquirir uma estrutura em espiral denominada de espiral de Arquimedes. Este fenómeno pode ser comparado ao fluir da água quando sai de uma mangueira giratória no jardim.

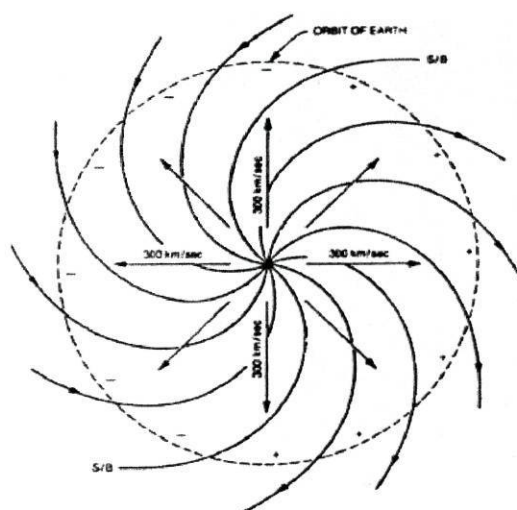


Figura 3.17 – esquema da trajetória do vento solar e da geometria do campo magnético solar (Parker, 1963)

O plasma que constitui o vento solar flui, não na direcção radial relativamente ao Sol, mas inclinado cerca de $1,5^\circ$. Isto pode significar que o momento angular do Sol está a ser transferido para o vento solar provocando a sua desaceleração.

Capítulo 4

Actividade solar

4.1- Introdução

O Sol foi e ainda é tratado, ao nível do seu modelo standard, como um corpo estável, homogéneo e de simetria esférica, de acordo com as características consideradas constantes e que estabelecem o Sol estável. A descoberta do campo magnético do Sol e a correlação feita entre o movimento do plasma, através das células de convecção, e as interacções entre linhas de campo magnético, que são distorcidas por meio desses movimentos, vem explicar de algum modo a observação dos fenómenos na atmosfera do Sol e que no seu conjunto definem a actividade solar. Estas manifestações envolvem grandes quantidades de matéria e energia aparentando, de certo modo, uma interligação e um carácter cíclico. A primeira evidência deste carácter prende-se com o estudo sistemático das manchas solares que são o fenómeno de mais fácil observação à superfície do Sol.

No entanto, o interesse do estudo da natureza e desenvolvimento do Sol não se confina unicamente ao conhecimento dos mecanismos possíveis para explicar este astro e extrapolar para os outros que lhe são semelhantes, mas pela importância que os fenómenos de actividade possam ter ao interferirem com o meio interestelar e com o ambiente terrestre.

Torna-se então interessante observar e comparar as características dos vários fenómenos, em diferentes níveis da atmosfera, tendo a utilização de comprimentos de onda diversificados contribuído para enriquecer este estudo. A fotosfera ao ser observada em luz branca destaca as manchas solares. A linha H- α , que corresponde a um comprimento de onda de 6563 Å e a de cálcio-K (Ca-K) com comprimento de onda 3934 Å são utilizadas para observar a camada acima da fotosfera ou seja, a cromosfera e os fenómenos que aí se manifestam como sejam as proeminências e as “flares”. A corona, que foi durante muito tempo observada unicamente em alturas de eclipse, pode ser estudada agora em diferentes comprimentos de onda uma vez que a energia é emitida como ondas de rádio longas até aos raios-X curtos. As estruturas dos arcos e dos chamados “buracos coronais” são estudadas em pormenor nas imagens de raio-X.

4.2 - Regiões Activas

As regiões activas são caracterizadas pelas diferentes manifestações e interacções entre campos magnéticos que têm origem no interior do Sol e emergem acima da fotosfera estando associadas de uma forma ou de outra com as manchas e com o ciclo de actividade. A detecção em raio-X mostra pontos brilhantes na corona, que se desvanecem num período menor que um dia e localizam-se perto da zona do equador, em constante renovação, sendo estas regiões bipolares também as preferidas das manchas, proeminências, “plages”, “flares” e outros fenómenos de actividade.

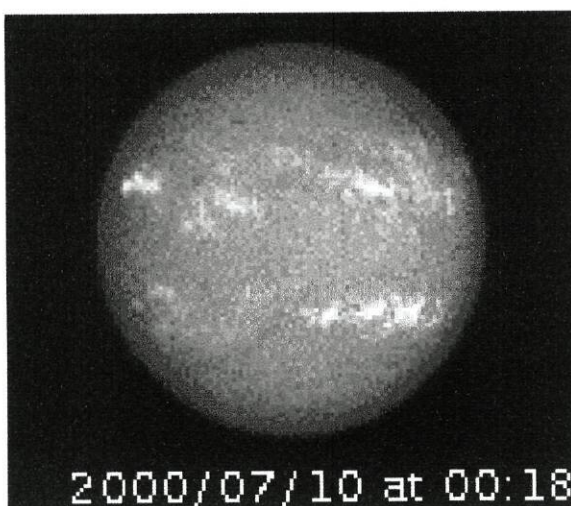


Figura 4.1 - as regiões activas são as zonas brilhantes perto do equador; imagem em H- α (Space Environment Center)

As regiões de fluxo emergente aparecem próximo de regiões já activas e dão origem a uma região nova que se desenvolve e se combina com alguns filamentos podendo originar um par de manchas unidas por um arco escuro, designados por sistema de arco-filamento. Os arcos possuem um comprimento aproximado de 30000Km e uma altura de menos de 5000Km elevando-se com uma velocidade máxima de 10Km/s tendo nas extremidades uma velocidade de queda de 50 Km/s. Estes arcos magnéticos estendem-se para fora da corona com um tempo de vida cerca de 20 minutos sendo substituídos por um novo conjunto de arcos que emergem da fotosfera e que originam o aparecimento de manchas, muito embora as regiões activas possam ser isentas de manchas durante semanas.

Após 3 a 4 dias a região activa considera-se bem desenvolvida e forma uma zona brilhante - a “plage” - com cerca de 200000Km de extensão, podendo distinguir-se na zona mais profunda um grupo de manchas cercada por fáculas. Referira-se que as fáculas e as “plages” são regiões brilhantes localizadas na fotosfera e na cromosfera respectivamente.

A região continua a crescer e atinge um máximo em 10 ou 15 dias, deteriorando-se lentamente com a dispersão do fluxo magnético dando dar lugar a uma nova região de actividade mais complexa ocasionada por interacções magnéticas. As regiões activas ocupam longitudes preferenciais que acompanham o movimento de rotação do Sol e podem persistir ao longo de anos. São regiões bipolares com fluxos magnéticos bem definidos, em regiões de polaridade oposta, emergindo o fluxo novo com orientação diferente do já existente.

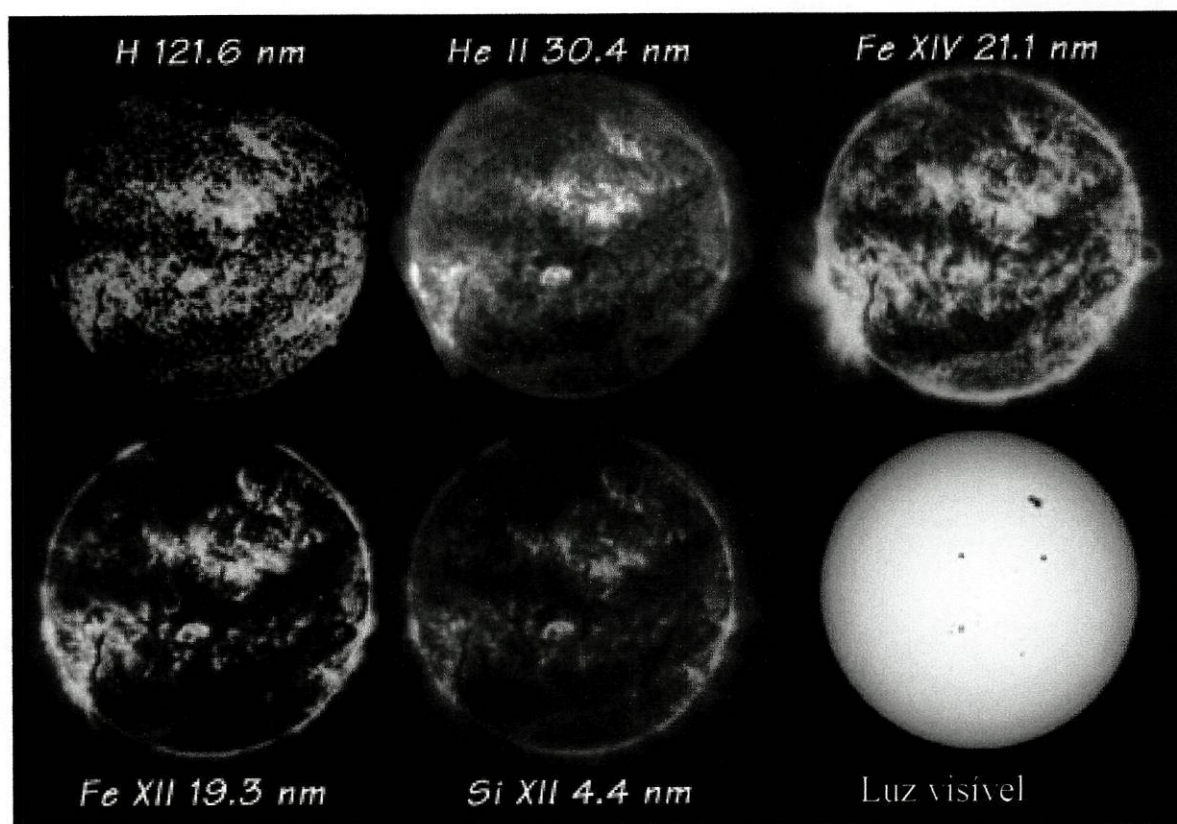


Figura 4.2 – imagens da superfície do Sol em diferentes comprimentos de onda evidenciando as regiões activas como zonas claras, com excepção da imagem em luz visível (Science.nasa.gov)

Na fotosfera as concentrações de fluxo magnético manifestam-se acima das manchas dispersando-se lentamente com a região activa podendo reaparecer mesmo depois das manchas se extinguirem. A observação em raio-X mostra a corona acima das regiões de

actividade e indica-nos a existência de uma condensação ou um aumento local de massa com densidade na ordem dos 10^{16} partículas / m^3 e temperatura de 3000000 K rodeado por uma chuva permanente com densidade e temperatura menores. As extremidades da região activa são marcadas às vezes por um padrão radial ou ligeiramente espiralado, constituído por fibrilas, uma vez que os filamentos activos estão sempre ligados a uma linha de inversão magnética. Os campos magnéticos da região activa evoluem provavelmente por uma série de estados estacionários provocado pelos movimentos das células de fluido na fotosfera com as linhas de força a elevarem-se e a interagirem ao longo dos diferentes extractos da atmosfera solar.

4.3 - Proeminências

As proeminências são estruturas que, de acordo com o estado de ionização do material e consequentemente da sua temperatura, pertencem à cromosfera. No limbo mostram-se brilhantes e são observadas em linhas de emissão cromosférica especialmente as de hidrogénio neutro. No disco são vistas, utilizando comprimento de onda em H- α , como linhas finas, escuras e sinuosas designando-se então as proeminências por filamentos que por serem mais frias são também mais escuras, contrastando com o brilho do disco.

Pelo facto das proeminências se projectarem acima da cromosfera média penetrando na massa coronal são consideradas muitas vezes como parte da corona, destacando-se desta pelo facto de possuírem uma temperatura cerca de cem vezes mais baixa, de serem mais densas, desde cem a mil vezes mais, relativamente aos valores médios obtidos para a corona. Supõe-se que a sustentação da proeminência acima da superfície do Sol durante semanas ou mesmo meses poderá ser causada por forças de origem magnética.

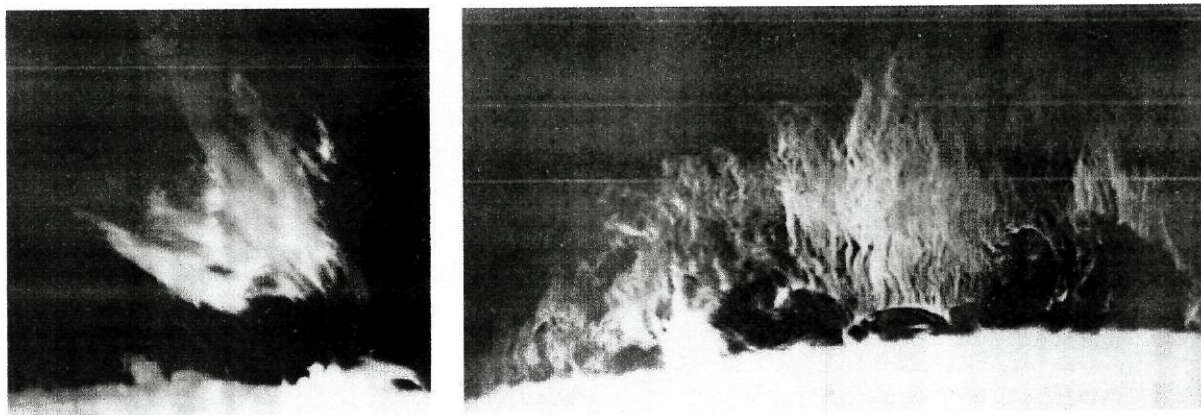


Figura 4.3 - proeminência activa à esquerda e estável à direita (Kaufmann, 1997)

As proeminências podem ser classificadas basicamente como activas (ou eruptivas) e estáveis dependendo do seu tempo de vida que pode ser de minutos ou horas, para as activas, até alguns meses para as estáveis. Uma proeminência estável inicia a sua formação (que é observada no disco como um pequeno filamento) numa região activa situada ao longo de uma linha de inversão magnética, entre duas regiões de polaridade oposta podendo, por vezes, incorporar uma mancha num dos lados. Quando a região activa se dispersa, a proeminência

torna-se mais densa, transformando-se estável e pode-se desenvolver durante meses, alongando-se e migrando lentamente para o pólo mais próximo.

Os valores médios de densidade para as proeminências estáveis são de 10^{17} partículas/m³. Para o campo magnético os valores variam de 5 a 10 G e a temperatura é da ordem dos 7000K. As dimensões médias de uma proeminência estável são de 200000 Km para o comprimento, 50000 Km para a altura e 6000 Km para a espessura. Estes valores variam ao longo da estrutura da proeminência tendo para a zona central valores que diferem dos da periferia. A localização das proeminências é também importante porque as que se situam em regiões de baixa latitude possuem um tempo de vida inferior às que estão localizadas perto dos pólos.



Figura 4.4 - a migração de um proeminência estável até ao limbo devido à rotação solar, em H- α . Imagem obtida em 1966 (Priest, 1987)

A formação dos filamentos ou das proeminências (se observadas no limbo) ocorre sempre na linha de inversão de polaridade e é necessário que primeiramente as fibrilas se alinhem pelas extremidades formando um canal que, ao desenvolver-se se transforma eventualmente num filamento. Isto sugere também que o campo magnético está alinhado ao longo do filamento e o desaparecimento da proeminência assim formada é feito lentamente, dispersando-se e abrindo para cima, por erupção, ou fluindo para baixo da cromosfera. No entanto a migração para um polo magnético provoca o alongamento da estrutura que é agravado pela rotação diferencial, enquanto que a altura e a largura permanecem relativamente constantes.

As proeminências activas estão situadas em regiões activas e associam-se a “flares”. São estruturas dinâmicas com movimentos violentos e cuja duração é apenas da ordem dos

minutos podendo permanecer durante algumas horas. A temperatura média é mais elevada que as da classe anterior embora estas possuam dimensões cerca de 3 a 4 vezes menores do que as de uma proeminência estável. Podem assumir vários aspectos, dependendo das linhas de campo magnético e manifestam valores de 100 a 200 G para a intensidade do campo magnético. As proeminências activas tendem a ocupar zonas situadas a 10° de latitude das manchas que se movimentam em direcção ao equador durante o ciclo solar mas também podem ocupar zonas com latitude em volta de 70° dispendo-se quase paralelamente à linha do equador. Estas zonas formam-se, aproximadamente, 3 anos após o máximo das manchas e migram para os pólos alcançando-os e acompanham a inversão da polaridade do campo magnético global do Sol.



Figura 4.5 - pormenor da estrutura da proeminência onde se observamos “pés e arcos (Priest, 1987)

A estrutura da proeminência está como que ancorada na cromosfera com uma série de pés regularmente espaçados e que se assemelham a troncos de árvores formados por linhas verticais. Estes pés estão posicionados nos limites dos supergrânulos e estão ligados por arcos entrelaçados onde o material flui continuamente com a velocidade de 1Km/s, muito menor que o valor de queda livre. A perda de massa é muito grande e é substituída de algum modo pois dificilmente se observa o movimento ao longo da linha central de um filamento estável, a menos que esta interaja com uma mancha, onde se consegue ver o fluxo de matéria ao longo da linha central.

Imagens de eclipses ou do coronógrafo mostram uma região de densidade reduzida (a cavidade coronal que também pode ser visto em raio-X) cercada por uma proeminência. No entanto, esta ausência de massa na corona não é suficiente para explicar a massa e a persistência no tempo da proeminência. Uma arcada ou arco coronal fecha-se acima da

proeminência e em torno da cavidade coronal, formando como que um capacete de “streamers”, tal como o esquema da Figura 3.10

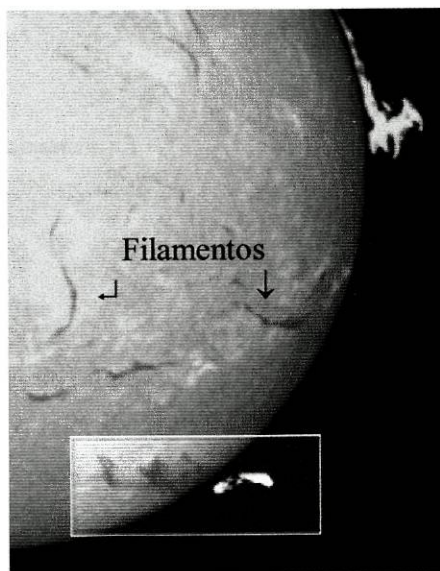


Figura 4.6 - proeminências em destaque no limbo e filamentos no disco (SOHO, 1996)

Observações no ultra-violeta fornecidas pelo Skylab mostram, com uma definição de 5 segundos de arco, que o tamanho das proeminências é idêntico nas riscas obtidas para temperaturas entre 10^4 (risca de Ly α) e 3×10^5 K (risca de O VI). Acima destes valores a proeminência começa a expandir e a esbater-se com a corona circundante, deixando de existir fronteiras bem delimitadas.

4.4 - “Flares”

É um dos fenómenos mais violentos observados no sistema solar que pode ser definido de forma simplista como um clarão, quando observado em H- α e pode ter, simultaneamente, manifestações electromagnéticas para além de ejectar partículas de alta energia e plasma no vento solar.

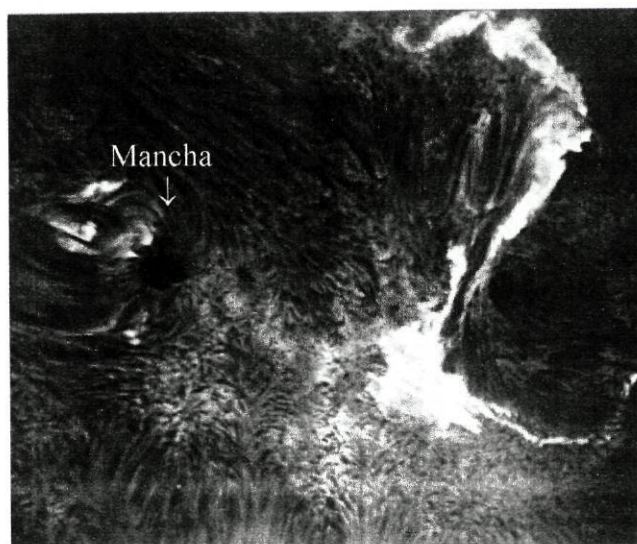


Figura 4.7 - erupção de uma “flare” em H- α , perto de uma mancha (Kaufmann, 1997)

O clarão em H- α é somente utilizado como uma resposta secundária para a conversão de energia magnética em calor e para a existência de partículas acima dos arcos coronais, nas regiões activas. A descrição básica de uma “flare” dada pela observação em H- α na cromosfera baixa mostra o seu desenvolvimento desde a fase de “pré-flare”, passando pelo clarão (flash) até à fase principal. O processo é iniciado e a energia liberta-se numa região mais quente situada acima da “flare” que pode ver a sua temperatura elevar-se até 10^7 K.

Analisando o gráfico da Figura 4.8 podemos constatar que a emissão de raio-X próximo (energia menor que 10 keV) possui uma fase de “pré-flare” de alguns minutos antes do flash por causa da emissão térmica de plasma coronal. No início da “flare”, momentos antes, cerca de 1 minuto, verifica-se uma fase impulsiva com emissão de micro-ondas, raios- γ e raio-X persistente (energia maior que 30 keV) causada pela emissão de electrões muito acelerados. Depois da fase impulsiva alguns eventos maiores (“flares” de maior dimensão) podem exibir uma segunda componente tendo como consequência o facto das partículas poderem ser

novamente aceleradas. Para outros eventos em que as partículas são pouco aceleradas, a fase impulsiva pode ocorrer para valores onde a energia em H- α é maior e designam-se por “flares” térmicas. Estas ocorrem em regiões mais ou menos complexas e têm uma ascensão mais lenta até ao máximo.

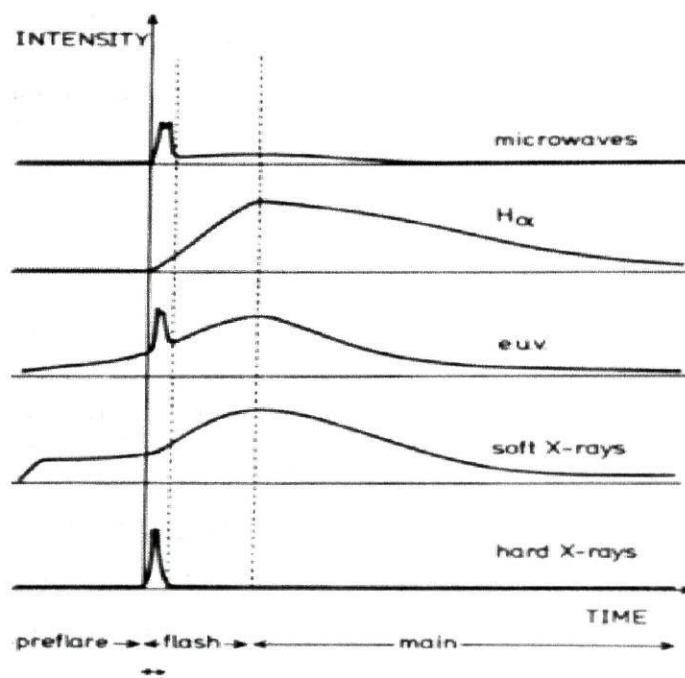


Figura 4.8 – perfil esquemático da intensidade da “flare” em diferentes comprimentos de onda ao longo do tempo (Priest, 1987)

A perturbação na atmosfera solar provocada por uma “flare” pode manifestar-se de muitas formas, excepto quando ocorre dentro de uma região de linhas de campo fechado, com emissão de raio-X que indica a presença na coroa de fluxos de electrões de elevada energia, acelerados até um terço da velocidade da luz. Esta emissão rápida para o exterior, a partir do local onde ocorre a “ flare”, sugere a existência de uma onda de choque rápida de natureza hidrodinâmica e magnética. A ejeção de massa proveniente da “flare” move-se mais rapidamente que o vento distinguindo-se do meio envolvente e quando observada no limbo desenha um arco ou anel acima da fotosfera. A energia libertada varia entre 10^{22} J para as pequenas “ flares”, a 10^{25} J para eventos de maior dimensão.

As diferentes propriedades das “flares” como a energia libertada, a intensidade de campo magnético e a morfologia indicam que a origem provável estará nas regiões activas complexas e de rápida evolução. Isto porque as regiões bipolares simples mostram pouca actividade para além de não se verificarem grandes mudanças na fotosfera, por baixo da

“flare”. Esta pode sobrevir repetidamente no mesmo lugar, com as mesmas características ou pode ser provocada pela ocorrência de outra “flare” ainda que distante levando à distinção destes dois fenómenos. Assim pode-se categorizar o primeiro como “flare” de arco simples e o segundo como “flare” de fita dupla.

A “flare” de arco simples é de pequenas dimensões onde o brilho se desvanece sem alterar a forma ou a localização, podendo ocorrer numa região unipolar de grande escala ou próximo de uma mancha, acompanhada por vezes de um fluxo de plasma que é ejectado com uma densidade média de 10^{16} partículas/m³ num intervalo de tempo até 500 s. A “flare” de fita dupla é muito maior e ocorre perto do filamento que serpenteia no meio da região activa complexa. A observação em H- α mostra que durante a fase de “flash” as fitas localizam-se uma em cada lado do filamento (ou no canal de fibrilas) e deslocam-se com velocidade de 2 a 10 Km/s sendo frequentemente conectados por uma arcada designando-se por “post-flare loops”. A erupção inicia-se lentamente e num período típico de 10 minutos (embora possa demorar até uma hora) passa da fase de “pré-flare” à de “flare” acelerando rapidamente. A “flare” de fita dupla pode ocasionalmente aparecer em zonas desprovidas de manchas associada à erupção de uma proeminência. Existem outras diferenças entre estes dois tipos de “flare” como o facto de a de arco simples aparecer como um único ponto em raio-X. Esta última quando observada em raio-X distante pode ser descrita como sendo de volume, altura e escala de tempo pequenos e de elevada energia sendo a “flare” de fita dupla descrita com propriedades opostas.

4.5 – Fáculas e “plages”

As áreas brilhantes observadas em H - α na fotosfera, geralmente perto do limbo ou da periferia do disco solar são designadas por féculas e correspondem às regiões activas.

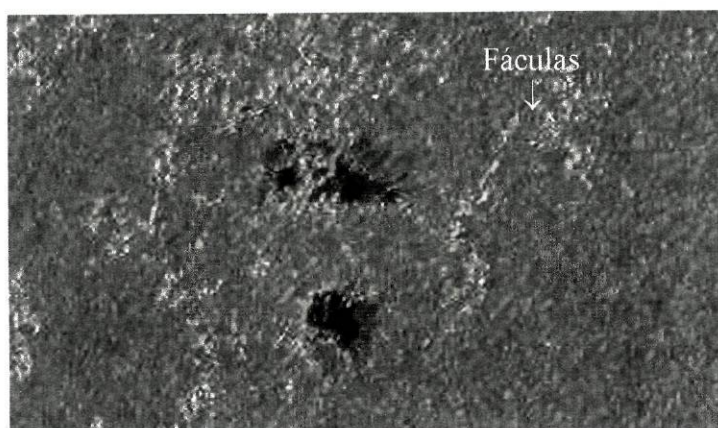


Figura 4.9 – manchas solares rodeadas de féculas (Sturrock, 1989)

Estas zonas são também áreas de campo magnético elevado mas com intensidade menor que o correspondente às manchas e conferem um aumento de brilho ao disco especialmente no máximo de actividade. As féculas estão também associadas a outros fenómenos de actividade pelo facto de se registarem alterações na intensidade luminosa com o decorrer do ciclo de manchas.

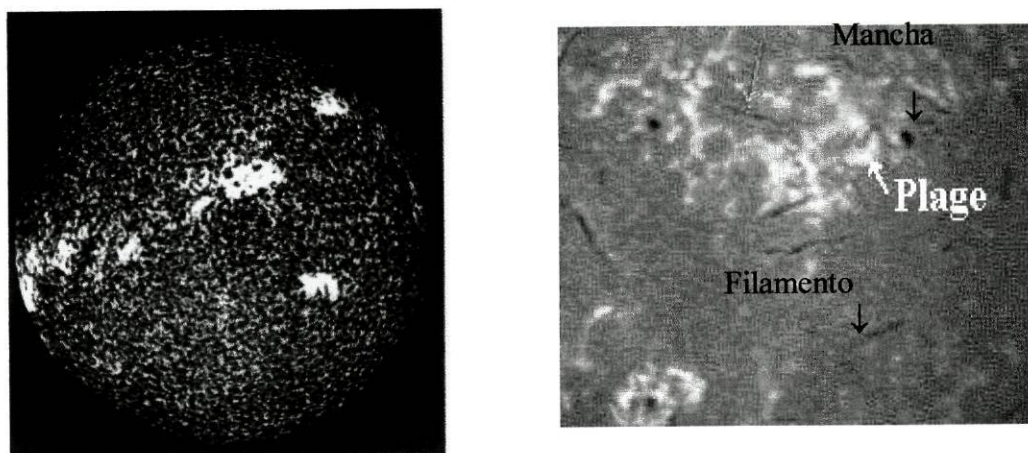


Figura 4.10 - “plages” na risca de Ca II K à esquerda (Stix, 1991); à direita, “plages”, filamentos e manchas em H- α (Sturrock, 1989)

As “plages” são zonas brilhantes na cromosfera, quando observadas em H- α , numa extensão média de 200.000 Km (medidos transversalmente), com duração aproximada de 100 dias, rodeando as manchas (os pontos negros) em desenvolvimento e tal como as fáculas estão associadas a campos magnéticos responsáveis pela emissão cromosférica.

As linhas de emissão em comprimentos de onda da risca de Ca II K mostram as zonas de “plages” que são coincidentes com as regiões activas de campo magnético. Na Figura 4.10 estão também assinalados os filamentos que têm papel activo no desenvolvimento e na interacção de campos magnéticos.

4.6 - Manchas solares

Os pontos escuros que aparecem na superfície do Sol, quando se observa no visível, são designados por manchas solares. Surgem normalmente em grupos, mais ou menos numerosos, podendo aparecer também em pares e, mais raramente, manchas isoladas. A dimensão de uma mancha típica pode ser de 40000 Km a 60000 Km de diâmetro (que corresponde a uma área cerca de 1% da superfície do Sol) existindo registos de manchas com 75000 Km como uma que foi observada em Abril de 1947. As mais pequenas que se observam como pontos são designadas por poros. A dimensão de cada mancha está ligada ao seu estágio de evolução. Um grupo de manchas pode estender-se até cerca de 100000 Km.

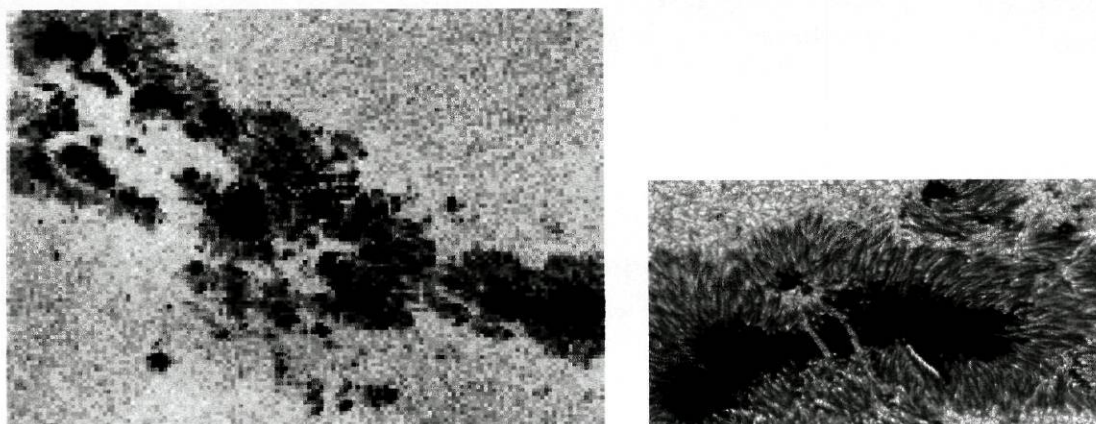


Figura 4.11– grupo de manchas e ao lado uma mancha em destaque (Zirin, 1989)

A estrutura da mancha pode comportar uma zona central escura – a umbra – e um contorno mais claro, ligeiramente acinzentado chamado penumbra.

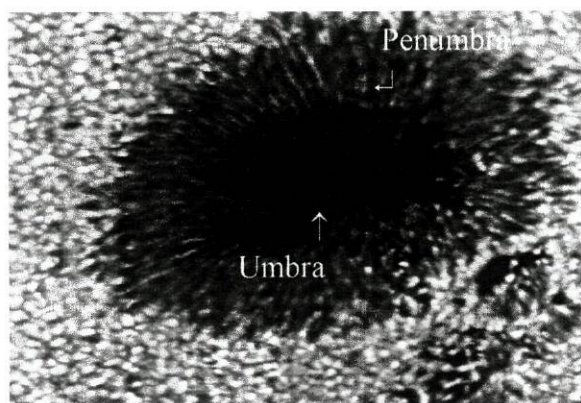


Figura 4.12 – imagem no visível de uma mancha solar (Schmelz, 1992)

A umbra possui um diâmetro típico de 10000 a 20000 Km com valores de temperatura e campo magnético próximos do uniforme sendo a intensidade luminosa de 5 a 15% do valor fotosférico. A penumbra cerca a umbra e consiste em listas claras e escuras ou filamentos radiais com uma extensão típica de 5000 a 7000 Km e 300 a 400 Km de largura. Os filamentos individuais da penumbra resistem apenas cerca de 6 horas, bastante menos que a vida da mancha no seu conjunto. Contudo, a configuração das manchas varia existindo grandes manchas sem penumbra e regiões isoladas de penumbra sem umbra. As estruturas escuras e pequenas sem penumbra, designadas por poros, podem existir dentro de grupos de manchas ou aparecer como estruturas isoladas e possuem tempo de vida de algumas horas a diversos dias. A estrutura de algumas manchas inclui pistas de material brilhante, chamadas ‘pontes claras’ introduzidas ou atravessadas na umbra, que podem durar horas ou dias. Fotografias de alta resolução mostram a ‘granulação umbral’ que pensa-se, será uma reminiscência da granulação fotosférica, indicando a existência de um campo de velocidades em pequena escala, dentro das manchas. Em 1908 J. Evershed descobriu, por aplicação do efeito Doppler, que os gases no interior das manchas fluem elevando-se nas franjas exteriores da penumbra e descem no centro da umbra.

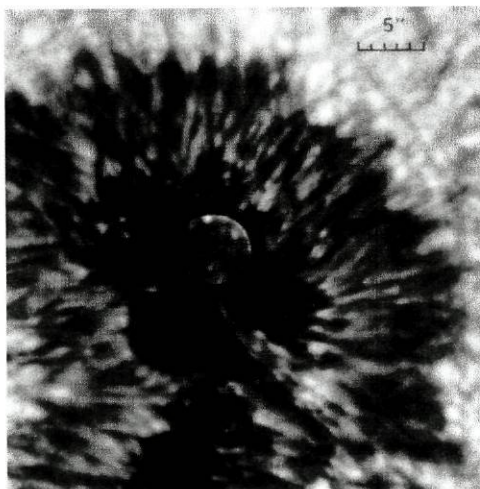


Figura 4.13 – granulação umbral com uma resolução de 5 segundos de arco (Stix, 1991)

As zonas de umbra e penumbra são mais frias que a fotosfera e por isso mostram-se mais escuras em contraste com a superfície do Sol. As medidas de temperatura correspondendo à camada com $\tau=1$, indicam para a umbra cerca de 3700 K, para penumbra cerca de 5700 K e para a fotosfera 5800 K.

A umbra é mais transparente que a fotosfera e essa diminuição de opacidade na zona da mancha representa uma depressão na superfície solar. Esta depressão foi observada por

Wilson em 1769 quando verificou a alteração do aspecto da mancha ou grupo de manchas quando se aproximavam ou afastavam do limbo, tendo uma forma também diferente no centro do disco solar. Este efeito ficou conhecido como “efeito de Wilson” e é documentado na Figura 4.14.

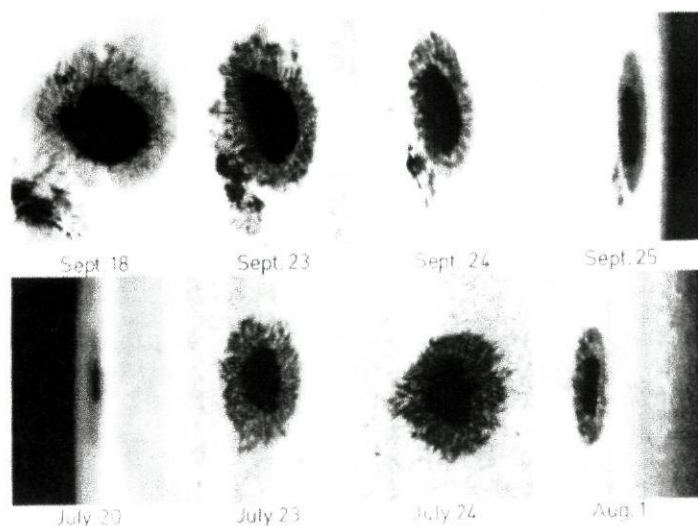


Figura 4.14 – sequência de fotografias de um grupo (em cima) e de uma mancha solar (em baixo) desde o limbo ocidental até ao oriental (Stix, 1991)

Para os pontos perto do limbo o efeito de Wilson prende-se com o facto de a penumbra ser aparentemente mais estreita do que para os pontos no centro do disco dando também a ideia de que as manchas são depressões na superfície solar. A zona da penumbra faz a transição entre a parte mais fria e central da mancha e a granulação fotosférica.

As manchas possuem um tempo de vida na ordem das dezenas de dias até cerca de 100 dias e encontram-se próximas umas das outras, formando os grupos que podem ser mais ou menos numerosos, sendo raro observar manchas isoladas. Ocorrem normalmente aos pares e cada mancha possui polaridade oposta. São designadas, conforme a sua posição relativa ao movimento de rotação do Sol de Este para Oeste, como mancha-p - de “preceding” ou mancha líder, que se localiza na parte ocidental e ligeiramente mais perto do Equador e na parte oriental a mancha-f - de “following” ou seguidora. A inclinação do eixo entre a mancha líder e a seguidora diminui durante o tempo de evolução, desde uma inclinação média de 10° a 20° no início da sua vida, até uma inclinação de 5° no final, sendo esta variação consequência do crescimento do próprio grupo. Localizam-se ainda em latitudes compreendidas entre 40° e 15° a norte e a sul do equador solar.

Existem modelos para explicar a formação das manchas baseadas na teoria magnetohidrostática. Baseiam-se no estudo do campo magnético das manchas ao qual é atribuído a origem da escuridão da zona central como resultado da interacção das linhas de campo com os fluxos ascendentes e descendentes das correntes de convecção, dando origem a grandes zonas mais frias e por isso mais escuras à observação. O efeito do campo magnético inibe a convecção no interior da mancha fazendo o gás arrefecer sem que seja substituído por gás vindo do interior e por isso mais quente.

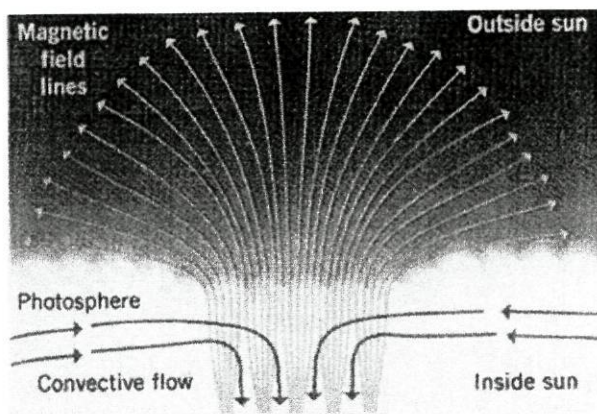


Figura 4.15– esquema do perfil da mancha com representação das linhas de campo e do fluxo convectivo (Zeilik, 1994)

O modelo descreve a mancha como um tubo de fluxo magnético encaixado no plasma solar e supõe que o fluxo magnético é conduzido em pequenas parcelas até à superfície por acção das forças magnéticas de configuração divergente na superfície, conjuntamente com o fluxo nos supergrânulos. A formação das manchas também poderá ter como origem a expansão do fluxo magnético no centro de uma célula de supergranulação que é detectada inicialmente em H- α como um sistema de arco-filamento evoluindo em torno de pontos estáveis. O desenvolvimento deste sistema origina inicialmente um poro, desprovido de penumbra, que pode tornar-se uma mancha pequena. A evolução pode prosseguir originando uma mancha maior por fusão com outras pequenas manchas ou um par de manchas por divisão. Esta ocorrência é acompanhada normalmente por observação de “flares”.

Capítulo 5

O Ciclo solar

5.1- Introdução

As manchas continuam a ser um fenómeno largamente observado mas a sua origem e o seu mecanismo ainda não são totalmente compreendidos. Inicialmente as manchas eram consideradas como deformidades ou defeitos na superfície uniforme do Sol, outros interpretaram-nas como furacões, e outros como furos no disco solar. A visão recente das manchas é a de um fluxo de campo magnético que emerge através da superfície do Sol formando zonas com temperaturas diferentes e por isso de luminosidade também diferente.

Um aspecto intrigante das manchas é a sua variação cíclica de aproximadamente 11 anos no seu número médio anual, contadas cuidadosamente por Observatórios desde o início do século XVIII. Embora existam registos mais antigos, desde Galileu, a importância dada às manchas só se tornou relevante quando Heinrich Schwabe (1789-1875) descobriu que estas desapareciam e ressurgiam, com uma variação regular em número, num período aproximado de 10 anos. Mais tarde reconheceu-se que o período é de 11 anos e que a frequência das ocorrências dos fenómenos relacionados com a actividade flutuam também com períodos similares, nomeadamente o fluxo de energia em comprimentos de onda de rádio (10 cm), a emissão na linha de Ca II, o fluxo de raios cósmicos, a área total das manchas, a incidência das auroras boreais e outros ainda que acompanham o ciclo como as alterações da corona. O estudo do comportamento do ciclo solar torna-se assim importante pois os fenómenos de actividade do Sol interferem de um modo ou de outro no ambiente terrestre, na produção de carbono-14 e nas comunicações de rádio entre outros. O conceito de ciclo solar, mais tradicionalmente o ciclo das manchas, é definido com base na variação do número de manchas à superfície do Sol em função do tempo. No entanto e pelo facto de somente ser visível metade do Sol (para observações à superfície da Terra) a variação em causa é baseada no valor médio do número de manchas que é uniformizado pelo nº de Wolf, (R_z).

Mas a compreensão do ciclo solar não se confina ao estudo das manchas, estende-se a todos os outros fenómenos. No entanto, a exploração prática deste trabalho restringe-se unicamente ao estudo das manchas pelo facto de ser o de mais fácil observação, registo e exploração de resultados obtidos.

5.2- O campo magnético do Sol

O Sol exibe um campo magnético forte que é produzido pelo fluxo de partículas carregadas electricamente e presentes no plasma que o constitui. Se o Sol se comportasse como um íman perfeito, as linhas de força de campo magnético teriam uma configuração como mostra a Figura 5.1, nas linhas a tracejado que unem o pólo Norte ao pólo Sul, tal como se verifica para o campo magnético terrestre.

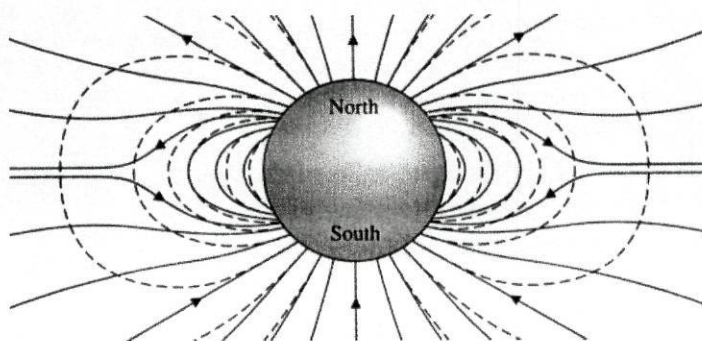


Figura 5.1 - esquema das linhas de campo magnético solar (a cheio) ; as linhas tracejadas representam o campo de um dipolo magnético perfeito (Carroll,1996)

No entanto, pelo facto de no Sol existir rotação diferencial as linhas de campo são arrastadas com velocidade cujo valor depende da latitude. A zona do equador é aquela onde a velocidade de rotação é maior e por isso vai torcer mais rapidamente as linhas de campo.

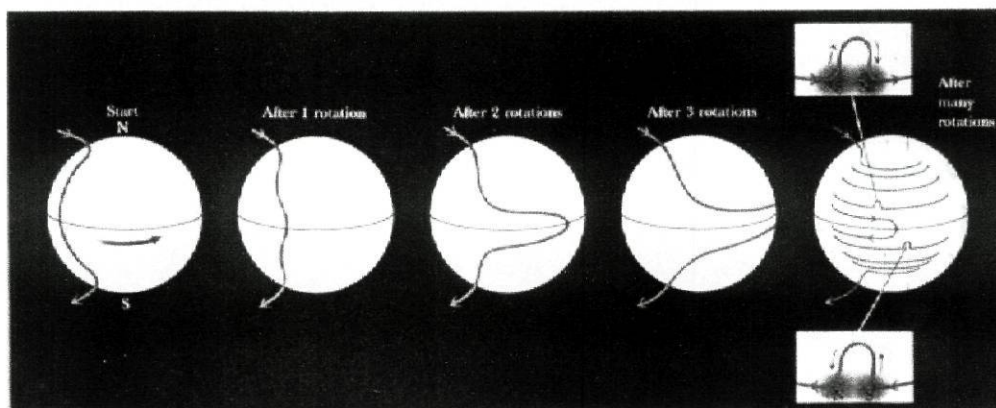


Figura 5.2 – esquema da torção das linhas de campo magnético solar ; destaque das linhas de campo que irrompem da superfície (Kaufmann, 1997)

Nas regiões próximas de 40° de latitude vai ocorrer uma concentração de campo magnético dando origem à elevação das linhas de força que arrastam o plasma do Sol acima da superfície formando arcos que ligam pontos de polaridade oposta. Se o gás fluir através destas linhas de campo poderá observar-se uma proeminência. Os pontos de apoio dos arcos também podem ser a origem de um par de manchas.

Esta teoria procura explicar a formação das manchas em pares, com polaridade oposta e justificar o aparecimento das manchas no início do ciclo em latitudes próximas dos 40° . À medida que o ciclo vai avançando no tempo as linhas de campo vão torcendo cada vez mais dando origem a mais pontos bipolares (ou manchas) que se aproximam do equador. Quando isso acontece vai haver inversão de polaridade magnética e inicia-se um novo ciclo, registando-se novamente a aparição de manchas nas latitudes em torno de 40° verificando-se o desaparecimento ou a degeneração das manchas próximas ao equador.

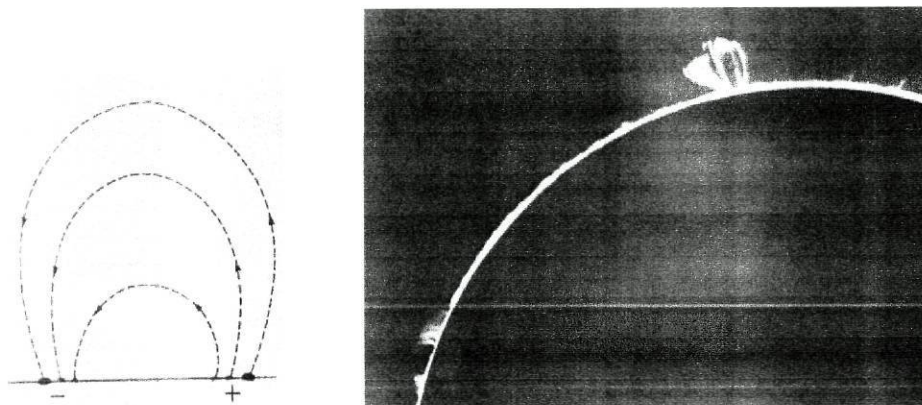


Figura 5.3 – esquema do arco numa zona bipolar e imagem do arco magnético
(Van Zyl,1996)

O estudo do campo magnético solar revelou também que muitas das estruturas que se observam na superfície do Sol têm comportamento cíclico com orientação magnética similar à das manchas: oposta em cada hemisfério e mantêm essa orientação ao longo dos 11 anos do ciclo findos os quais se invertem. Na Figura seguinte estão representadas as linhas de variação de número de fáculas polares (I), das proeminências (II) em cada um dos hemisférios e o número relativo das manchas (III) ao longo dos anos.

É de notar que o gráfico apresenta para as fáculas um comportamento simétrico em relação ao equador (a linha tracejada refere-se ao hemisfério Sul e a contínua ao Norte) o que também acontece com as proeminências e acompanham também o ciclo das manchas.

Quando o ciclo das manchas se dirige para um máximo as linhas das fáculas evidenciam valores diferentes de zero e para as proeminências a linha tende para um máximo.

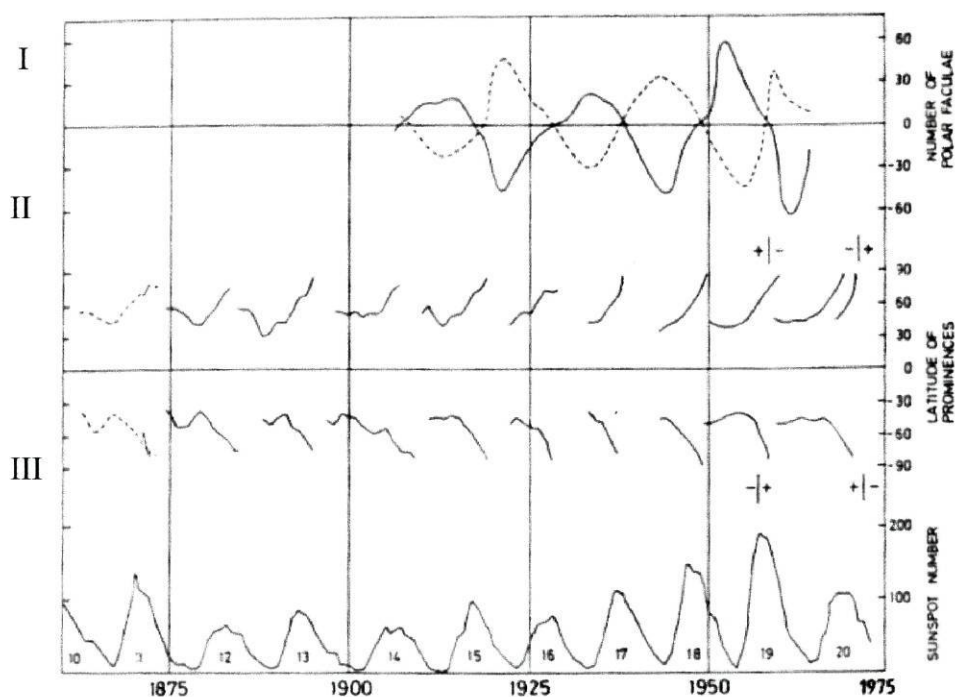


Figura 5.4 – variação do número de fáculas polares (I), das proeminências (II) e do número relativo das manchas (III) com o tempo (Stix, 1991)

Refira-se ainda a teoria de dínamo como uma tentativa de explicar o modo como o campo magnético solar é gerado e como evolui durante o ciclo solar. Esta teoria diz, em traços gerais, que o campo magnético do Sol é produzido por um “dínamo” magnético no interior do Sol proveniente do movimento de correntes eléctricas provenientes das partículas ionizadas que constituem o plasma solar. A observação de fluxos na superfície do Sol e supõe-se, no seu interior devido ao efeito da granulação, contribuem para a produção de campos magnéticos que por interacção deformam, alongam e flectem as suas linhas de força magnética dando origem aos denominados “efeito- Ω ” e “efeito- α ”.

O “efeito- Ω ” resulta da distensão em torno do Sol, por arrastamento, das linhas de força magnética devido à variação na taxa de rotação em função da latitude. No esquema A está representada uma linha de força, com orientação Norte-Sul e que, ao ser arrastada inicialmente no equador, vai torcendo formando uma espiral em torno do Sol. É designado por “efeito- Ω ” pelo facto da letra grega omega ser utilizada na Física para representar a velocidade de rotação.

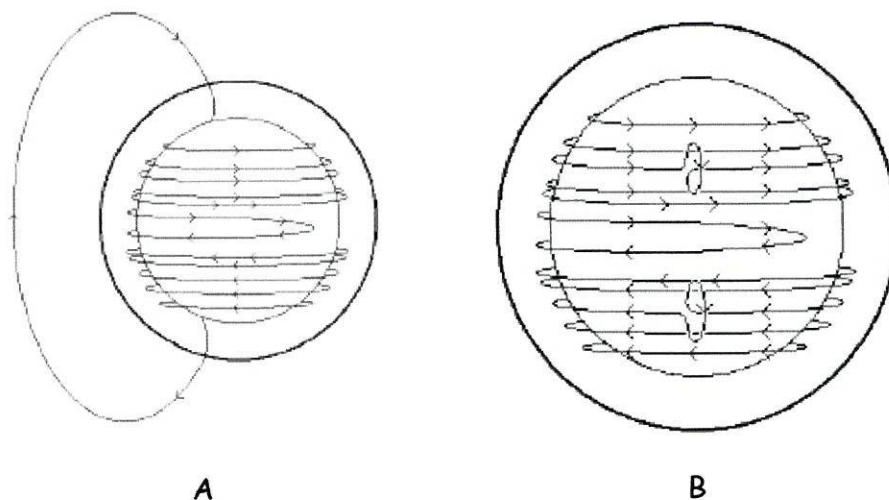


Figura 5.5 - esquema A: “efeito- Ω ” ; esquema B : “efeito- α ” (science.nasa.gov)

A torção das linhas de força magnética é causada pelo efeito de rotação do Sol e origina os arcos acima da superfície solar. A configuração do arco resultante da torção é algo semelhante à letra grega alfa, daí a denominação de “efeito- α ”. Este modelo fornece uma explicação possível, tal como o anterior, para a inversão dos campos magnéticos, a lei da polaridade para a existência de pares de manchas com polaridade oposta, o aparecimento e a migração das manchas em determinadas latitudes mas o mecanismo para a produção do campo magnético solar é ainda mal compreendido e explicado por este ou por outro modelo.

5.3-⁰Ciclo das manchas

O estudo feito por Heinrich Schawbe em 1843, a partir de registos anteriores, levou-o a concluir que o número de manchas na fotosfera sofria variações periódicas no tempo tendo estimado um período provável de 10 anos para a repetição do fenómeno. Mais tarde Rudolph Wolf introduziu o conhecido “nº de Wolf” (representado por R_z) como uma quantidade relativa de modo a minimizar erros de observação e a uniformizar os valores obtidos em locais diferentes, sendo este o indicador mais conhecido do ciclo solar.

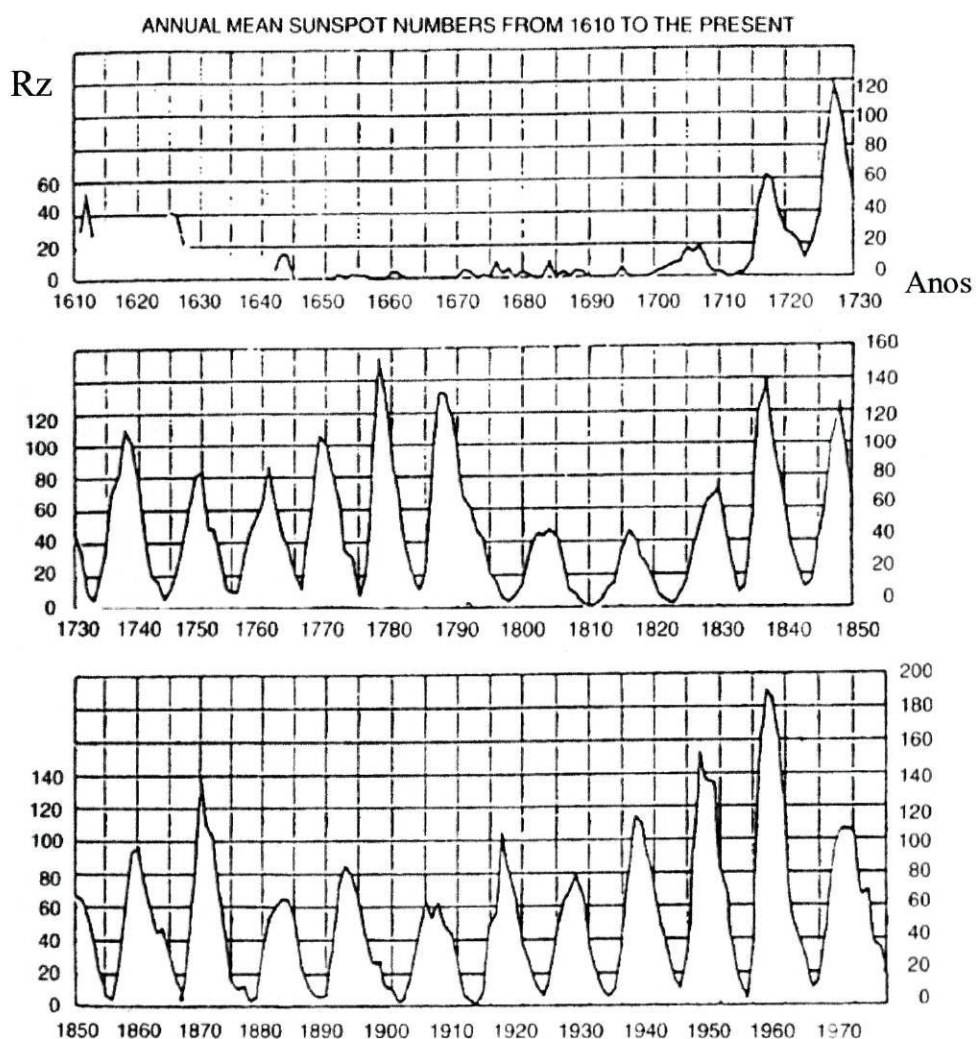


Figura 5.6 - média anual do número relativo de manchas do Observatório de Zurique (em ordenadas) em função do tempo (em abcissas) desde 1610 até 1970; (Wilson, 1994)

O número de Wolf é calculado por contagem do número total de manchas e pelo número de grupos tendo a seguinte expressão matemática :

$$R_z = K (10 g + f) \quad (2)$$

com: R_z – número de Wolf, g - número de grupos de manchas, f – número total de manchas e K – factor instrumental ou de redução. O valor para K depende não só do instrumento utilizado mas também do “seeing” e da acuidade do observador tendo um valor entre 0,6 e 1. Normalmente utiliza-se o valor 1 e, uma vez que o número de Wolf é proporcional ao valor calculado, o erro é sempre o mesmo e por isso não interfere nas conclusões. Pelo facto de cada grupo possuir uma média de 10 manchas foi introduzido esse factor na expressão.

O número de Wolf, usado em valores médios anuais, revelou que o ciclo das manchas se ajustava melhor a um período médio próximo de 11 anos. Concluiu-se também que o número máximo de manchas era alcançado em aproximadamente 4,6 anos e nos 6,4 anos seguintes se obtinha um número mínimo.

Desde o século XVIII que a variação do número médio de manchas tem sido regular em termos de ciclo ou seja, obtém-se um máximo seguido de um mínimo em períodos semelhantes. Entretanto, por um período de cerca de 70 anos (entre 1645 e 1715) conhecido por “mínimo de Maunder ” o Sol exibiu uma quase total ausência de manchas levando a supor que poderá existir, em simultâneo, um outro ciclo mais longo, que só poderá ser confirmado quando se reunirem dados observacionais suficientes. Podemos no entanto afirmar que o ciclo solar apresenta alguma irregularidade em relação à media do número de manchas anual, uma vez que esta parece aleatória, se observarmos em pormenor os picos que aparecem como resultado do valor médio anual (Figura 5.6). Estes picos podem revelar uma tendência cíclica (repetição de um valor médio muito baixo ou muito alto) ao fim de sete a oito ciclos, mais concretamente, ao fim de aproximadamente 80 anos.

Wolf iniciou a contagem dos ciclos em 1755 e, utilizando os registos que existiam na época para o cálculo do valor médio, convencionou que o período entre 1755 a 1766 seria o “ciclo 1” e todos os ciclos subsequentes foram numerados consecutivamente depois disso. O último máximo solar verificou-se entre 1989 e 1990 estando previsto para 2000-2001 a próxima ocorrência do máximo solar, correspondente ao máximo do ciclo 23.

Alguns factos observacionais sobre grupos de manchas bipolares mostram que a polaridade de todos os pontos principais (ou líderes) no hemisfério norte é a mesma e que no

início do novo ciclo ocorre uma inversão. O mesmo acontece no mesmo no hemisfério sul.

As leis de polaridade foram introduzidas por George Hale em 1925, após ter efectuado medições durante três ciclos consecutivos, considerando que : a orientação magnética das manchas líder e seguidora em grupos bipolares permanece a mesma em cada hemisfério ao longo do ciclo, os grupos bipolares possuem polaridade oposta relativamente ao hemisfério e a orientação magnética inverte no início do ciclo seguinte.

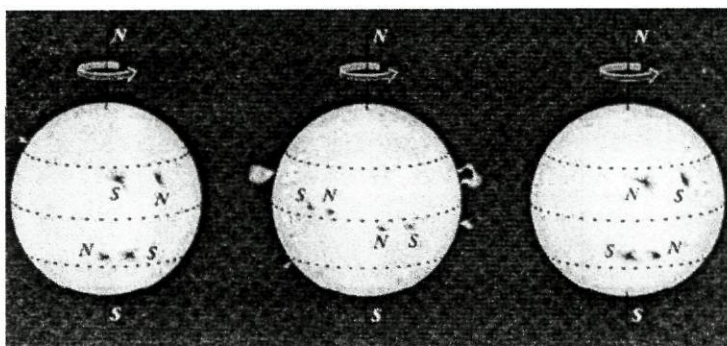


Figura 5.7- o esquema mostra a polaridade do par de manchas representando: I –início do ciclo ; II - o máximo; III- o início do ciclo seguinte (Monteiro,1998)

Uma outra característica é que a linha magnética central de um grupo bipolar é inclinada (valor típico de 10°) e a mancha líder está próxima do equador e mantém esta configuração ao longo do ciclo. As linhas mostram a migração das manchas com a latitude(ver Figura 5.8). Verifica-se que aproximadamente 97% dos grupos de manchas obedecem a esta lei, atribuindo-se às manchas que apresentam polaridade invertida a influência forte da actividade de uma “flare”.

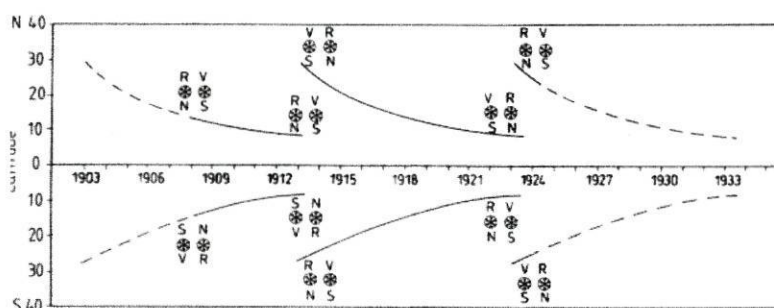


Figura 5.8 - regras da polaridade de Hale para as manchas: N-norte e S-sul (o V e R indicam o vermelho e o violeta respectivamente para o efeito de Zeeman), e a migração das manchas com a latitude ao longo do ciclo. (Stix, 1991)

A análise dos magnetogramas do Sol vem reforçar a ideia de que a polaridade ao longo de um ciclo de manchas se mantém havendo uma inversão do campo magnético e consequente polaridade na ocorrência do valor mínimo.

Verificou-se ainda que as manchas não só variam o seu número, mas também em localização, sendo esta variação feita também de uma forma cíclica. O registo da localização das manchas ao longo dos anos permitiu verificar que no começo de um novo ciclo de actividade as manchas aparecem em faixas de latitude próximas dos 40° e à medida que o ciclo avança as manchas dirigem-se para as faixas equatoriais. As faixas de latitude onde se registam a ocorrência de maior número de manchas localizam-se entre os 40° e os 10° , a Norte e a Sul. Os diagramas de borboleta, assim denominados pela sua aparência, permitem ainda verificar que a transição de um ciclo para outro não é brusca coexistindo as manchas do novo ciclo com as do anterior em fase de degeneração pela facto de existir uma ligeira sobreposição das “asas” do gráfico tal como se pode ver na Figura 5.9

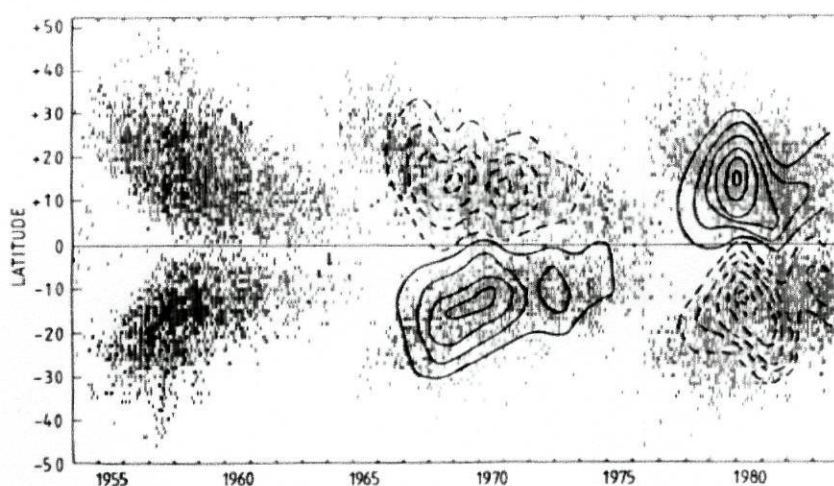


Figura 5.9 - magnetograma que exhibe os contornos do campo magnético sobreposto ao diagrama de borboleta obtido pelo Observatório de Wilson sendo a linha contínua a polaridade positiva e a tracejada a negativa (Stix, 1991)

O estudo do movimento das manchas na direcção Este-Oeste na superfície do Sol serviu para constatar que este possuía movimento de rotação em sentido directo e também uma variação de velocidade angular em função da latitude. Sendo a rotação do Sol claramente visível pelo movimento das manchas estas parecem movimentar-se, não em linha recta, mas em movimentos semi-elípticos pelo facto do eixo do Sol se encontrar ligeiramente inclinado relativamente à linha da eclíptica. Como resultado da rotação do Sol, da orientação do seu

eixo e do movimento anual da Terra, as posições do equador (e do eixo) solar estão sujeitas a variações temporais para um observador na superfície da Terra. Assim o plano do equador solar possui uma inclinação de $\pm 7,15^\circ$ com o plano da eclíptica. Esta inclinação é considerada positiva quando o eixo está inclinado para Este e negativa quando inclinado para Oeste.

A rotação do Sol é feita no sentido directo e coincide com a sentido de rotação da Terra pelo que demora 27,2753 dias, considerando uma rotação sinódica ou 25,380 dias para a rotação sideral. Estes valores são para faixas de latitude heliográfica de $\pm 16^\circ$. A localização das manchas é feita a partir das coordenadas heliográficas determinadas para cada uma (ou para cada grupo) e servem para identificar a mancha na rotação seguinte uma vez que só metade do Sol é visível e as manchas sofrem um processo de desenvolvimento e degradação.

A existência de um grande ou pequeno número de manchas fornece a indicação sobre os níveis de actividade solar sendo que o Sol apresenta-se pouco activo quando a sua superfície exhibir um número pequeno de manchas e o máximo de actividade é acompanhado por um grande número de manchas.

5.4- O ciclo magnético solar

O Sol apresenta um outro ciclo – o ciclo magnético solar – que se repete num intervalo de 22 anos e onde os pólos do Sol retomam a polaridade original. O ciclo das manchas repete-se ao fim de 11 anos mas como a polaridade magnética das manchas e do Sol é alternada retomam a mesma polaridade ao fim de dois ciclo de manchas consecutivos. O processo regenera continuamente o campo magnético solar que se inicia nos pólos magnéticos do Sol: enquanto o campo dos pólos originais vai desaparecendo, o campo torcido vai regenerando campos magnéticos de polaridade oposta. Ao repetir-se o mecanismo retomamos os campos originais de polaridade podendo afirmar assim que o Sol possui um ciclo de manchas com a duração de 11 anos e um ciclo magnético de 22 anos.

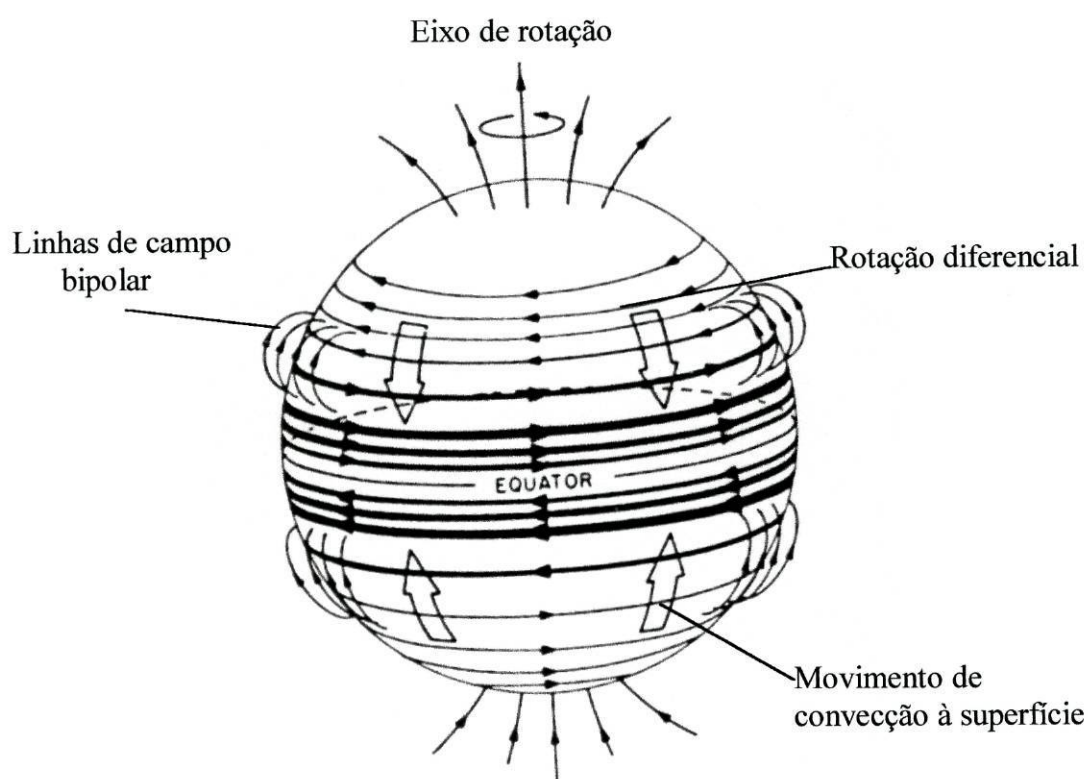


Figura 5.10 – esquema do modelo que representa a conjugação dos movimentos do plasma para dar origem ao campo magnético solar (Wilson, 1994)

Apesar da observação sistemática e prolongada no tempo ainda não existe uma teoria que seja capaz de explicar, de forma consistente, o ciclo magnético solar. Pensa-se que a origem do campo estará centrada no interior do Sol: na base da zona de convecção, o facto dos gases que constituem o plasma estarem ionizados associado aos movimentos de convecção e dos provenientes da própria rotação solar vai provocar o movimento de material carregado electricamente o que induz a criação de campo magnético. Este campo é suficiente para dar origem às manchas solares e outros fenómenos ligados com a actividade.

5.5 - Influência do ciclo solar na Terra

Os efeitos do ciclo solar são sentidos na Terra e no sistema solar. Um dos efeitos notórios é a modificação da configuração do campo-electromagnético que rodeia a Terra por interação com o vento solar que está intimamente ligado com os fenómenos de actividade solar, e, como consequência expõe mais ou menos a Terra aos efeitos dos raios cósmicos. A deformação nas linhas de campo magnético da Terra (a magnetosfera) estende-se até cerca de 10 raios da Terra (do lado do Sol) e alonga-se formando uma cauda até uma distância de 1.000 raios da Terra.

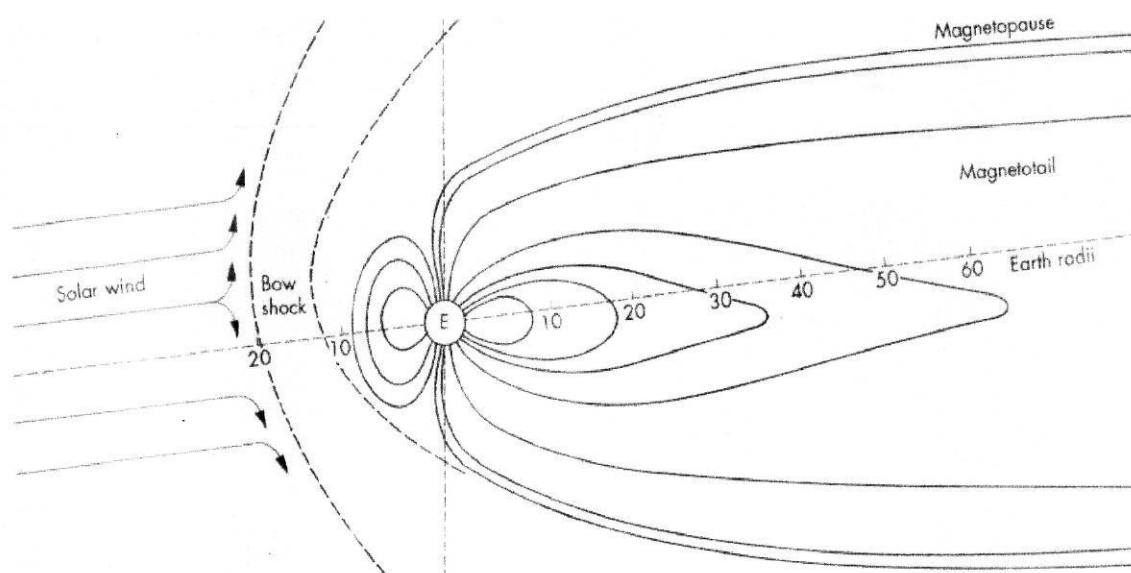


Figura 5.11 - esquema do efeito do vento solar na magnetosfera da Terra (Van Zyl, 1996)

As partículas que constituem o vento solar ao colidirem com as linhas de campo da magnetosfera originam uma “linha de choque” (designada por ‘bowshock’ na Figura 5.11) e transformam a sua energia cinética em calor aquecendo a região acima da alta atmosfera terrestre. Quando se trata de partículas provenientes de uma “flare” a quantidade de energia é maior provocando as denominadas tempestades magnéticas. Estas perturbações magnéticas causam distúrbios nas comunicações de rádio, estão na origem das auroras boreais e podem ainda causar danos nos satélites artificiais e que são cada vez mais de importância vital para o Homem. Durante o máximo de actividade do ciclo estas alterações são mais frequentes e

quase nulas quando se atingem mínimos de actividade, daí o interesse do estudo e da previsão da ocorrência dos fenómenos activos.

De importância a longo prazo é o efeito que a variação do fluxo de radiação total do sol, que atinge a Terra, poderá ter no clima à superfície. Intuitivamente poder-se-ia afirmar que quando o Sol está coberto com um grande número de manchas (ou seja, num máximo de actividade) a radiação emitida é menor e conseqüentemente o fluxo de energia que chega à Terra, também. No entanto, as medições feitas por satélite em 1980 mostraram que o fluxo de energia diminuiu até 1986 coincidindo com um mínimo no ciclo de manchas e que desde então se registou um aumento que se pode considerar constante (ao menos até 1990, data até onde o autor do livro – Wilson, 1994 - dispõe de dados). Mas se a amplitude do aumento de fluxo é menos de 1%, o que corresponde a uma variação na temperatura de 0,2 K e provavelmente as interacções serão não-lineares e os efeitos climatéricos ao longo de anos podem ser consideravelmente grandes. Aqui reside também uma explicação possível para a ocorrência da “mini época glacial” correspondente ao “mínimo de Maunder”.

Um outro indicador da actividade solar é a presença de carbono-14 (^{14}C) que é produzido por reacção de próton-neutrão com azoto (^{14}N) na atmosfera superior sendo os neutrões oriundos da fragmentação causada pelo impacto dos raios cósmicos. A relação entre a actividade solar e a recepção dos raios cósmicos na Terra é inversa : quando a actividade solar é elevada o fluxo de raios cósmicos é praticamente nulo o que dá origem a uma fraca produção de carbono-14. A actividade magnética dá origem a uma maior protecção da superfície terrestre por interacção do campo magnético solar, funcionando assim como um escudo contra a penetração dos raios cósmicos.

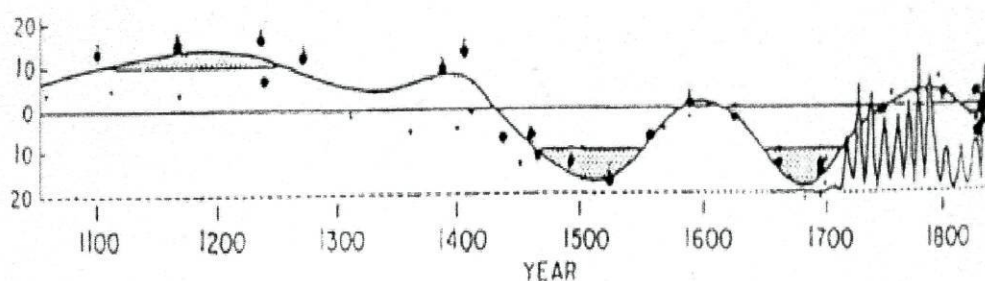


Figura 5.12 – variação da percentagem do carbono –14 com o valor respectivo de carbono-12 desde 1050 d.C., incluindo a variação anual de R_z em 1700. Da esquerda para a direita as zonas sombreadas representam o “Máximo Medieval”, o “Mínimo de Sporer e o “Mínimo de Maunder”(Wilson, 1994)

As plantas assimilam ao longo do tempo a quantidade de carbono-14 contido no dióxido de carbono atmosférico e preservam-no. Assim as árvores seculares podem dar um contributo no estudo da produção de carbono-14 uma vez conhecida a correlação entre a percentagem de carbono-12 (^{12}C) e de carbono-14 e o número de manchas, podendo-se estimar o grau de actividade solar para datas anteriores aos registos.

A presença do carbono-14 nos anéis das árvores revelaram a probabilidade da existência de um ciclo de 200 anos que poderão justificar o “mínimo de Maunder. Da correlação entre a quantidade de carbono-14 e carbono-12 baseado nos anéis das árvores foi traçado um gráfico (Figura 5.12) que serve de base à existência de períodos similares ao de Maunder, como o “mínimo de Sporer”, no século XVI e um “máximo Medieval” durante o século XIII.

Apesar destas correlações apontarem no sentido de uma outra periodicidade do ciclo solar é necessário recolher dados mais consistentes.

5.6 - Alteração da estrutura da corona solar com o ciclo solar

A forma da corona varia com o ciclo solar : perto do máximo de manchas, as características brilhantes denominadas “streamers” estendem-se para fora com direcção radial ; perto do mínimo de manchas os “streamers” encontram-se mais evidentes na região equatorial e as plumas polares são mais evidentes na zona dos pólos.

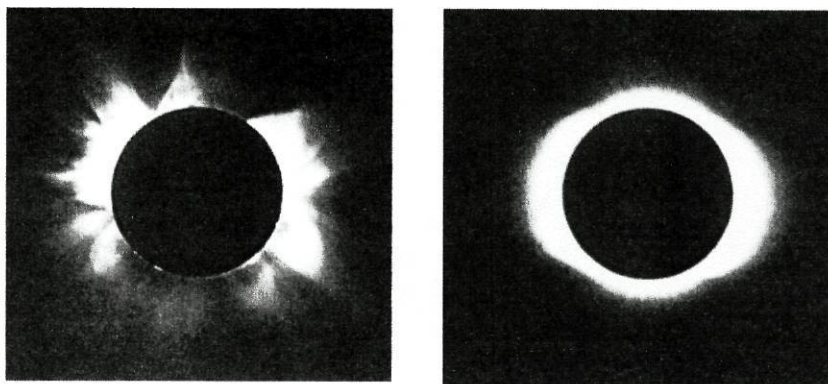


Figura 5.13 - a corona num eclipse em 1980, perto do máximo, à esquerda, e à direita, em 1945 perto de um mínimo onde a emissão coronal é reduzida (Stix, 1991)

A explicação destas observações prende-se com a configuração das linhas de campo magnético que no início do ciclo, altura em que o número de manchas é mínimo e a actividade a superfície do Sol possui mais zonas com linhas de campo abertas pelo que o plasma que é lançado no espaço está mais livre e flui sem grandes perturbações. Este facto está na origem do contorno regular e de pequena espessura observado em 1945 (Figura 5.13 à direita). Se pelo contrário, as linhas de campo magnético estão torcidas e entrelaçadas em zonas com linhas de campo fechadas, então o gás é aprisionado e forma bolsas de gás que submetido a uma alta temperatura é ejectado violentamente para o meio inter-estelar. Observa-se então no Sol uma estrutura pontiaguda, muito irregular e que se estende em torno do Sol (Figura 5.13 à esquerda).

Capítulo 6

A observação do Sol

6.1-Introdução

A observação do Sol é actualmente realizada com a ajuda de satélites de forma contínua e em diferentes comprimentos de onda. Muitos fenómenos foram observados, registados e estudados para melhorar o conhecimento e a compreensão dos mecanismos que regem o Sol. Muita informação está hoje disponível em bibliotecas, nos meios de comunicação e na rede global de informação que nos chega a casa por computador - a Internet. No entanto a observação do disco solar continua a ser uma actividade interessante e pode ser realizada com um simples telescópio, existindo ainda a possibilidade de se acoplar uma maquina fotográfica ou um C.C.D..

O registo da mudança de posição e da evolução das manchas solares, que são o indicador de actividade mais comum e mais fácil de observar, fornece um conjunto de informações que nos permitem obter resultados sobre a velocidade de rotação do Sol, a distribuição das manchas pelo disco solar, a inclinação do eixo de rotação e o grau de actividade pelo cálculo do número de Wolf. Recorrendo ao método fotográfico ou a uma fonte de imagens como as obtidas pelo SOHO (disponíveis na Internet) pode ainda medir-se o tamanho real das manchas (ou grupo de manchas) ou ainda proceder à sua classificação no que diz respeito ao seu tamanho e grau de desenvolvimento segundo um conjunto de características.

Torna-se difícil construir uma base de dados contínua no tempo ou seguir a evolução de uma dada mancha ou grupo de manchas, pelo facto de a observação astronómica realizada à superfície terrestre possuir uma forte limitação associada às condições atmosféricas. No entanto, a recolha de imagens é hoje feita, em simultâneo, em diferentes locais tornando possível a sua continuidade no tempo, sendo a informação compilada e analisada, de modo a uniformizar critérios, como no caso do número de Wolf. Neste trabalho de observação e análise recorreu-se também a imagens arquivadas para se obter uma sequência no desenvolvimento de um grupo de manchas.

6.2- Métodos de observação

Existem diversas formas para a observação do disco solar que podem ser visuais ou fotográficas. Nos processos visuais destacam-se o de projecção e o de transposição da imagem do Sol a partir do telescópio. No processo fotográfico são analisadas fotografias obtidas a partir da câmara fotográfica associada ao telescópio.

O método de projecção consiste em obter a imagem do Sol projectada num ecrã, colocado atrás do telescópio, coberto por um papel ou cartão branco. Nesse papel ou cartão deve existir um círculo desenhado com um sistema de eixos coordenados associado e centrado. A imagem projectada é “decalcada” no papel obtendo-se assim o registo da posição das manchas solares. Este processo necessita de um suporte para o ecrã de modo a mantê-lo sempre na mesma posição e o desenho das manchas deve ser feito num curto espaço de tempo para minimizar o aquecimento das peças ópticas. Há ainda a ter em conta as condições de luminosidade do local de modo a obter um bom contraste de luz na imagem. Uma forma de o melhorar consiste em colocar uma folha de papel no tubo da ocular como mostra o esquema da Figura 6.1.



Figura 6.1 – esquema da montagem para o método da projecção (Ferreira, 1999)

A objectiva pode ser munida de um diafragma para reduzir a área colectora de luz e evitar o aquecimento provocado pela concentração dos raios solares, especialmente em telescópios com mais de 50 mm de abertura. Este método é utilizado quer se disponha de um telescópio refractor ou reflector.

O método de transposição da imagem observada necessita de um telescópio munido de filtro e um papel com um círculo desenhado e dividido através de um sistema de eixos coordenados e centrados, tal como no método de projecção. O observador vai desenhando o aspecto das manchas e a sua localização na grelha. Deverá, sempre que possível realizar as observações no mesmo local.

Quer num método quer noutra a orientação do telescópio faz-se por rotação de modo a encontrar a menor sombra, no chão ou na parede próxima; isto significa que o telescópio está paralelo aos raios solares e o Sol encontra-se no eixo do telescópio, ou muito próximo dele. A altura do dia para minimizar os efeitos da atmosfera é a compreendida entre o fim da manhã e o início da tarde pois o Sol encontra-se na posição mais elevada em relação ao horizonte.

6.3- Contagem do número de manchas

O número de manchas ou “número de Wolf”, como já foi referido, é um indicador que pode ser obtido de forma simples e caracteriza o grau de actividade solar. Este número pretende verificar a frequência do aparecimento e desaparecimento das manchas ao longo do seu ciclo. Pode ser calculado pela equação de Wolf (ver Equação (2) Capítulo 4) e depende das variáveis k - factor instrumental ou de redução, g - número de grupos de manchas e f - número total de manchas.

Após a sua introdução, o número de Wolf foi obtido em condições diferentes das actuais e das do observador comum pelo que surgiu a necessidade de reduzir estas observações a uma escala uniforme daí o aparecimento do factor K na Equação (2), Capítulo 4. Os valores para o número de Wolf obtidos pelo observador que utiliza $K=1$, serão comparados e correlacionados com o número de Wolf de Zurique de modo a encontrar o seu valor real. Este valor vai depender de erros sistemáticos, minimizados pela correcção no valor de k , e por erros aleatórios que poderão ser limitados pelo número de observações realizadas.

O número de grupos de manchas, g , nem sempre é fácil de definir, especialmente quando se trata de grupos complexos e extensos que ocorrem em alturas de grande actividade. Por vezes o grupo divide-se ou funde-se com outras manchas próximas, podendo dar alguma incerteza na contagem do número de grupos. Assim para uniformizar tanto quanto possível a determinação do número de grupos podemos considerar o seguinte:

- 1- as manchas dentro de uma área de $5^\circ \times 5^\circ$, relativamente ao disco solar considerado, são contadas como um único grupo;
- 2- os grupos bipolares podem estender-se por uma distância superior a 20° . Assim duas manchas distanciadas até 15° são consideradas um grupo, se a mancha está próxima a um grande grupo é englobada nele, pois considera-se como uma parte que se dissociou.

Apesar destas considerações o modo de saber se se trata ou não de um grupo depende sempre do observador acontecendo o mesmo em relação ao número de manchas individuais. A mancha aparece inicialmente como poro e desenvolve-se ao longo do tempo como grupo bipolar, na maioria dos casos. Assim podemos definir mancha individual se possuir um diâmetro menor que 3 segundos de arco ou com tempo de vida superior a 30 minutos. De acordo com a classificação de McIntosh uma mancha tem no mínimo um tamanho de 2500km

(mais de 3 segundos de arco) o que garante que com boas condições atmosféricas possa ser vista com um telescópio de 2 polegadas. Muitas vezes uma região de penumbra contém diversos pontos de umbra separados por pontes claras.

Podem ser também enunciadas para as manchas alguns indicações de modo a uniformizar a sua contagem ao longo das observações, tais como:

- 1- cada umbra dentro de uma penumbra é contada como uma mancha;
- 2- só depois de completamente separados os pontos de umbra é que se contam como duas manchas.

A fórmula para a determinação do número de Wolf possui ainda um factor 10 associado ao número de grupos de manchas e a razão pela qual isso acontece é que durante um período de cerca de 20 anos a análise da relação do valor médio anual entre o número de Wolf e o do Observatório de Zurique foi de 12 ± 1 para o número de grupos considerados. Assim foi introduzido também o factor 10 como modo de uniformizar a contribuição do grupo no valor do número médio anual.

6.4- Classificação das manchas

As manchas e os grupos de manchas sofrem um processo de desenvolvimento ao longo do tempo que pode ser acompanhado por observação. Esta variação no aspecto ou nas características físicas mensuráveis, como a área e o brilho, deu origem à classificação das etapas provenientes da segmentação do processo. Existem várias classificações dependentes do modo como são analisadas as manchas e o seu desenvolvimento.

A classificação de Zurich distingue as manchas pelas configurações unipolares e bipolares, pelo tamanho e complexidade da mancha ou do grupo, pela umbra e pela presença ou ausência da penumbra (zona intermédia, entre a umbra e a superfície solar, de estrutura raiada). Utiliza letras de A até I com a seguinte descrição:

- * A : aparecimento de uma mancha única ou grupo de manchas sem penumbra e sem configuração bipolar evidente ;
- * B : aparecimento de um grupo de manchas sem penumbra. O grupo é dominado por duas manchas que marcam as duas polaridades magnéticas ou seja, o carácter bipolar é visível;
- * C : grupo de manchas bipolar e uma das manchas principais possui penumbra ;
- * D : grupo de manchas bipolar com as manchas principais a possuírem penumbra mas ainda se verifica a existência de manchas de estrutura simples (sem penumbra). Este grupo ocupa uma extensão menor que 10° na superfície do Sol;
- * E : grupo bipolar com uma extensão superior a 10° onde as manchas principais têm penumbra e frequentemente uma estrutura complexa. Existem ainda um grande número de manchas pequenas;
- * F : grupo muito grande e complexo, com estrutura bipolar com uma extensão acima de 15° na superfície do Sol ;
- * G : grupo bipolar com extensão superior a 10° onde se nota a ausência das manchas pequenas por deterioração das próprias manchas;
- * H : mancha unipolar com penumbra e de diâmetro total superior ou igual a $2,5^\circ$;
- * I : mancha unipolar com penumbra mas cujo diâmetro total é inferior a $2,5^\circ$.

Para muitos grupos de manchas a evolução termina após um ou alguns dias com o estado classificado como A ou B, sem desenvolvimento de penumbra, embora as manchas maiores a desenvolvam e aí o crescimento só termina nos estados C ou D, seguidos pelos

estados de deterioração G, H e I que levam ao desaparecimento das manchas. A classificação E e F pertence a grupos que se desenvolvem para lá dos estádios C e D podendo depois degenerar em G,H e I.

A classificação de McIntosh (1990), usada pelo NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) é uma adaptação da classificação de Zurique introduzida por Waldmeier (director do Observatório de Zurique entre 1945 e 1979).

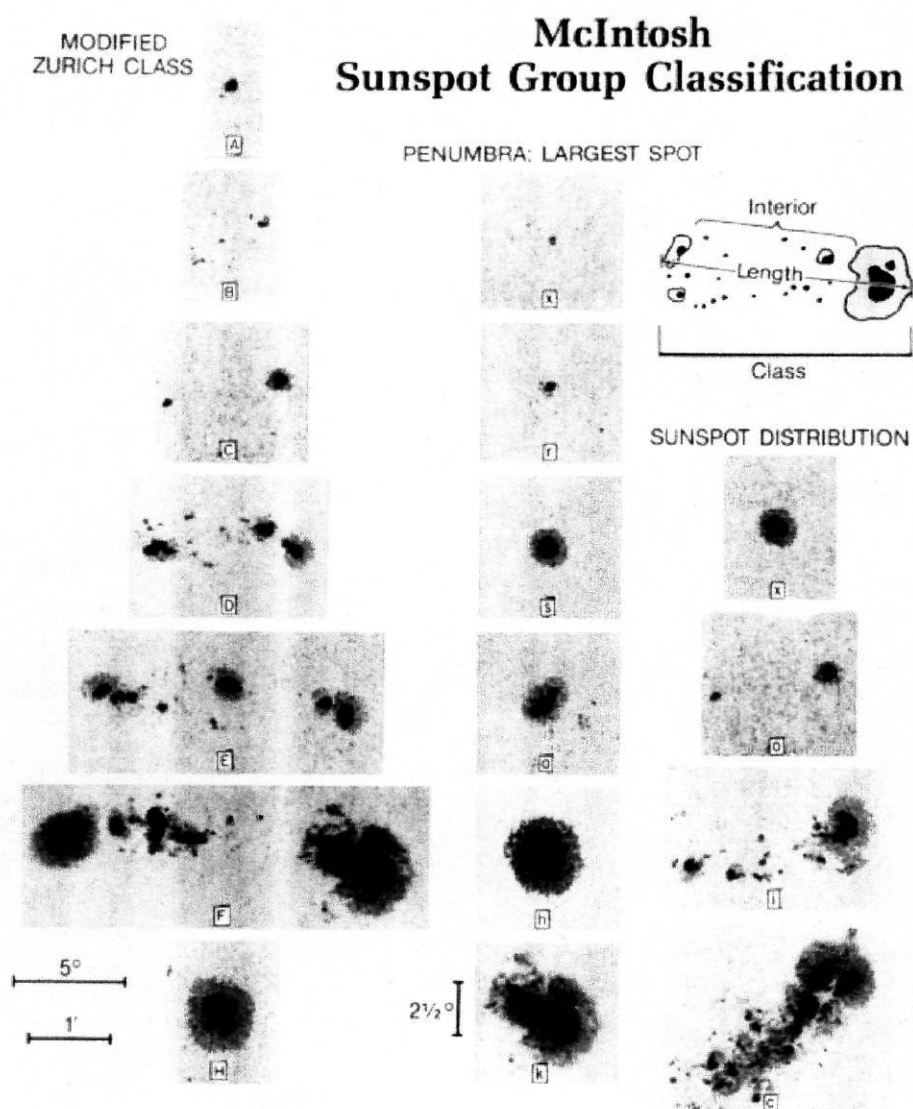


Figura 6.2 – esquema da classificação de Zurique, à esquerda, com a adaptação de McIntosh, à direita, e onde se podem ver o aspecto das manchas em cada estádio (Schmelz, 1992)

O NOAA é um centro que recebe e analisa relatórios de seis Observatórios diferentes de modo a construir a imagem solar com base na informação de cada região particular, incluindo o número de manchas, a área e a classificação, tendo em conta a época e os factores de observação.

A classificação de McIntosh introduz três letras sendo a primeira a mesma da taxinomia de Zurich, mas sem as classes G ou J que são englobadas em E ou F. A segunda letra (minúscula) indica a aparência da penumbra da mancha maior do grupo e tem as seguintes atribuições:

- x** - ausência de penumbra ;
- r** - limites irregulares da penumbra (largura com valores até 2000Km ou 0,2° no disco solar); penumbras mais brilhantes que o normal, penumbra de estrutura fina granular;
- s** - penumbras quase circulares com estrutura típica, dirigida para fora, com diâmetro de 2,5° (aproximadamente 30 000Km);
- a** - penumbras assimétricas ou complexas e diâmetro menor que 2,5°;
- h** - penumbra simétrica com diâmetro maior que 2,5°;
- k** - penumbra assimétrica mas com diâmetro maior que 2,5° medido no sentido Norte-Sul (se o diâmetro exceder 5°, pode-se supor que ambas as polaridades magnéticas ocorrem dentro da penumbra- grupo bipolar).

A terceira letra (também minúscula) indica a distribuição dos pontos dentro do grupo:

- x** - mancha individual;
- o** - distribuição aberta (a área entre a mancha líder e as manchas seguidoras está livre de manchas de tal modo que o grupo está claramente definido em termos de polaridade);
- c** - distribuição compacta ;
- i** - é o estágio intermédio entre a distribuição aberta e a compacta.

A Figura 6.2 mostra o aspecto das manchas e grupos de manchas típico de cada estágio, embora seja por vezes difícil de classificar uma determinada mancha ou grupo dentro destes dois esquemas. Apesar disso, a informação torna-se mais completa se for feita uma identificação usando esta classificação.

Capítulo 7

A observação do Sol de Janeiro a Julho do ano 2000

7.1- Introdução

As observações foram realizadas no Centro de Astrofísica da Universidade do Porto (C.A.U.P.) utilizando um telescópio reflector tipo Schmidt-Cassegrain com um diâmetro de espelho de 203,2mm (8 polegadas) e montagem equatorial. A ocular usada foi a de 25 mm utilizando-se e uma outra de 10 mm para ver em pormenor um grupo ou uma mancha. O telescópio possuía um filtro solar e a luneta de busca foi tapada como precaução.

A observação teve como objectivo registar periodicamente o aspecto da superfície do Sol, em luz visível, de modo a localizar a posição das manchas, identificar o seu percurso e efectuar a contagem do número dos grupos e número de manchas total. Serviu também para encontrar o eixo e o sentido de rotação do Sol. Foi realizada utilizando o método da transposição da imagem do Sol e a orientação do telescópio fez-se pelo processo da sombra mínima, focando-se depois a imagem (inicialmente no limbo e depois centrada na ocular).

Ao efectuar o desenho procurou-se manter a orientação relativa observador/telescópio ao longo de todas as observação e para isso o local escolhido foi sempre o mesmo, assim como a hora para a observação (sempre que possível). A periodicidade das observações teria sido de um registo de 4 em 4 dias, aproximadamente, entre os meses de Janeiro e Julho se não existisse a condicionante das condições climáticas. O registo dos dados recolhidos foi efectuado na Tabela C1 e os desenhos da imagem do Sol na grelha de observação A, em anexo. Paralelamente utilizaram-se as imagens de arquivo do Observatório do Hawaii, obtidas pela Internet que também permitem seguir o desenvolvimento das manchas e calcular a sua área.

Os resultados foram analisados para determinar o eixo, o sentido e a velocidade de rotação e verificar a ocorrência das latitudes preferenciais das manchas com a utilização da grelha B. O cálculo do número de Wolf diário foi efectuado com os valores registados na Tabela1, sendo ainda possível estimar o valor do factor de correcção. Procurou-se no final identificar algumas imagens recorrendo à classificação de McIntosh e determinar ainda a área real de algumas manchas.

7.2 – Determinação do número de Wolf

O cálculo do número de Wolf observado (R_{obs}) é efectuado com a seguinte relação matemática :

$$R_{\text{obs}} = K_{\text{obs}} (10 g + f) \quad (2)$$

onde K_{obs} é o factor instrumental ou de correcção correspondente ao observador, g representa o número de grupos e f corresponde ao número total de manchas. Considerando $K_{\text{obs}} = 1$ e os dados observacionais da Tabela C1, em anexo, obtêm-se os valores R_{obs} que são comparados com os valores do Nacional Oceanic Atmospheric Administration, Tabela C2, (também em anexo) para a mesma data e representados por R_Z na Tabela 7.1:

Data	R_{obs}	R_Z
03-Jan	52	54
07-Jan	50	85
10-Jan	55	65
17-Jan	73	131
20-Jan	80	95
24-Jan	68	80
17-Fev	70	109
22-Fev	60	100
24-Fev	75	123
15-Mar	85	103
20-Mar	100	150
06-Abr	86	108
04-Mai	50	66
10-Jul	150	201
12-Jul	130	186
17-Jul	160	224
18-Jul	180	228
21-Jul	180	231
27-Jul	80	126

Tabela 7.1– valores observacionais (R_{obs}) e valores (R_Z) compilados por Nacional Oceanic Atmospheric Administration (NOAA)

Os valores designados por R_z correspondem ao número de manchas diário oficial compilado pelo centro americano e a sua distribuição simultânea com o R_{obs} tem como resultado a Figura 7.1 .

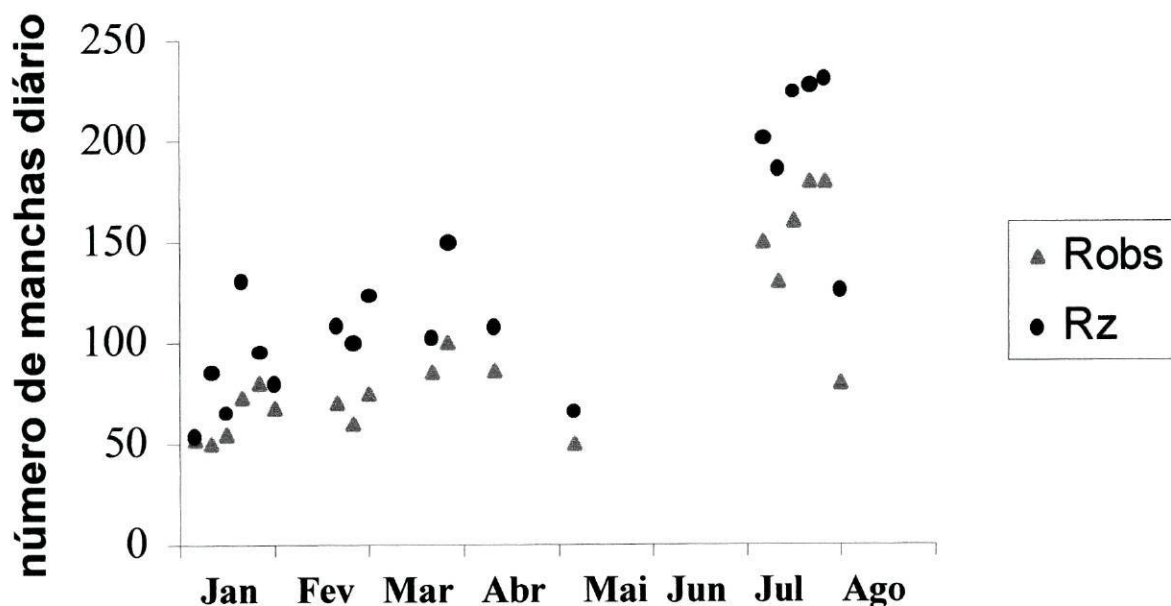


Figura 7.1 – gráfico obtido pela distribuição do número de Wolf diário calculado com os elementos de observação (R_{obs}) e com os fornecidos por NOAA (R_z) referidos à mesma data.

É de notar que no gráfico a ausência ou a escassez de valores para as manchas nos meses de Abril, Maio e Junho, predominantemente, corresponde apenas à não realização de observação e não à ausência efectiva de manchas.

Em relação ao numero de manchas diária podemos afirmar que aumenta com o tempo (salvo nos meses de Abril e Maio, que possuem muito poucas observações) .

Verifica-se também que os valores obtidos na observação são sempre menores que os fornecidos pela NOAA, resultantes da compilação dos valores dos diversos Observatórios que os registam em condições observacionais também diferentes. O factor que se prende com erros sistemáticos e com as condições de observação é, como anteriormente referido, o valor de K_{obs} que é estimado, em valor médio, pela proporção entre o R_{obs} e o R_z .

Assim calculando a razão entre esses dois valores (Figura 7.1) obtém-se para K_{obs} o valor de 1,45 como valor médio de correção a introduzir nos cálculos do número de Wolf para novas observações, nas mesmas condições do trabalho desenvolvido.

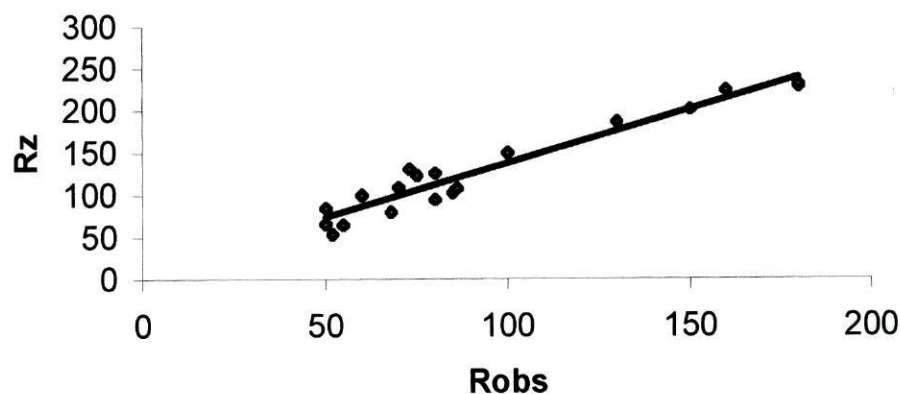


Figura 7.2 – gráfico da distribuição de R_z em função de R_{obs} e linha de ajuste

Calculando o valor médio do número de manchas observado (R_{obs}) e o valor médio do número de manchas oficial (R_z) no intervalo em que decorreu a observação obtém-se:

- valor médio $R_{obs} = 97$, corrigindo com o factor K_{obs} , $R_{obs}^* = 140$
- valor médio $R_z = 130$

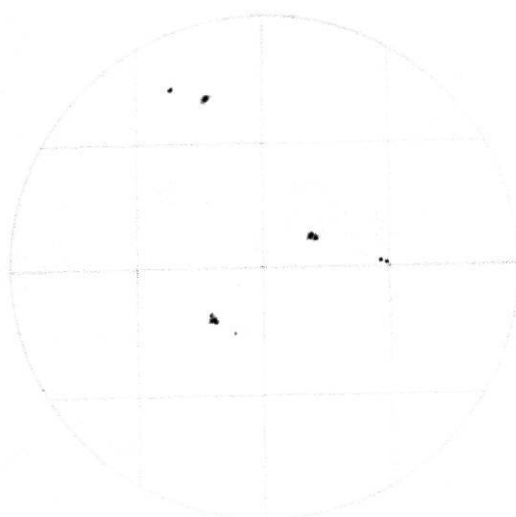
Comparando o valor obtido no trabalho de observação, depois de corrigido pelo factor K , com o valor médio oficial pode concluir-se que o erro na observação, em termo de contagem do número de manchas e grupos é cerca de 7%.

7.3 - Determinação do sentido e eixo de rotação

Após as primeiras observações os desenhos são analisados de modo a identificar a mudança de posição de uma mancha fácil de reconhecer. A linha de união entre duas posições obtidas no plano do papel e correspondentes ao intervalo de tempo que separa as observações, representa uma linha paralela ao plano equador solar ou seja, perpendicular ao eixo de rotação. O sentido da mudança de posição da mancha é igual ao sentido de rotação do Sol e a orientação é feita de acordo com os pontos cardeais.

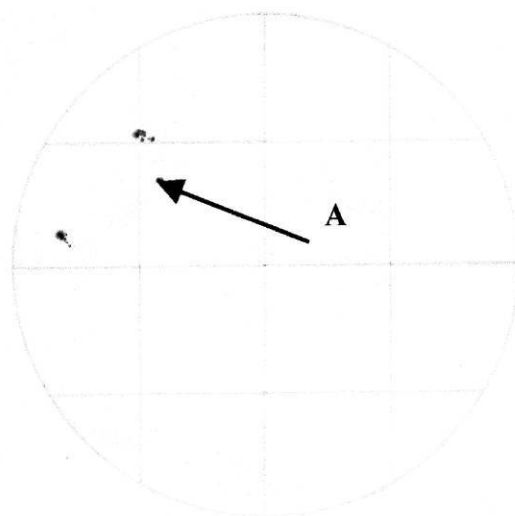
Na Figura estão representados em escala reduzida os desenhos e a linha de união entre a mancha que se reconhece entre o dia 3 e o dia 7 de Janeiro.

Data : 3 / 01 / 2000
Hora: 16 h



Local: C.A.U.P.
Telescópio: Celestron ; ocular de 25mm
Observador: Oliveri Rodrigo

Data : 7 / 01 / 2000
Hora: 14 h 30 -



Local: C.A.U.P.
Telescópio: Celestron ; ocular de 25mm
Observador: Oliveri Rodrigo

Figura 7.3 - desenhos elaborados nas observações do dia 3 de Janeiro, pelas 16 horas, e dia 7 de Janeiro, pelas 14 horas e 30 minutos, no Centro de Astrofísica da Universidade do Porto. O ponto assinalado por A indica a posição anterior.

A determinação dos eixos de orientação (vertical e horizontal) é feita utilizando a coordenadas geográficas, representando assim a conhecida Rosa dos Ventos. Na vertical é indicada a direcção Norte-Sul e na linha perpendicular (na horizontal) a direcção Este-Oeste.

Pelo facto de estarmos a utilizar um telescópio é necessário ter em atenção o efeito óptico dos espelhos e lentes. O telescópio possui 2 espelhos curvos (o primário e o secundário) e a lente da ocular. Há ainda um terceiro espelho plano que melhora a posição de observação, tornando-a mais cómoda. Em termos ópticos os raios de luz vão sofrer três desvios em torno de um eixo de simetria horizontal, três desvios em torno de um eixo de simetria vertical e um desvio a 90° que depende da posição relativa entre o espelho plano e o eixo do telescópio. A rosa dos ventos e a imagem registada está exemplificada na Figura 7.4 permitindo assim indicar o sentido de rotação do Sol e a direcção relativa do eixo.

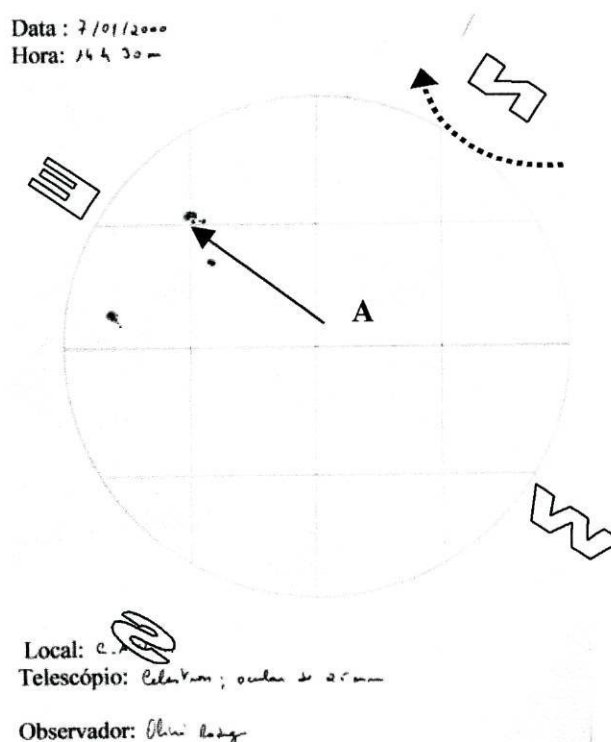


Figura 7.4 – orientação do sistema de eixos com o efeito de simetria horizontal

Pode verificar-se que, rodando o desenho em torno do eixo de simetria vertical, a rotação real das manchas se faz no sentido directo (contrário ao sentido dos ponteiros do relógio) e é coincidente com o da Terra. A linha é traçada com a ajuda da grelha B, por sobreposição dos desenhos, que é rodada até alinhar as posições consecutivas da mancha com um dos “paralelos” dessa mesma grelha.

O resultado é verificado para as outras observações embora o valor da inclinação do

eixo não seja constante. A posição do eixo do Sol vai variar de acordo com o movimento anual aparente do Sol ao longo do plano da eclíptica, com o seu movimento próprio de rotação e com a posição do observador.

Após obtermos a posição do eixo e conseqüentemente a posição do equador solar é possível determinar a latitude heliográfica. Esta coordenada vai servir para verificar a distribuição das manchas na superfície solar e calcular a velocidade de rotação em faixas de latitude onde haja a ocorrência de manchas.

7.4- Distribuição das manchas com a latitude

Verifica-se que o aparecimento das manchas na superfície do Sol faz-se em faixas de latitude preferenciais. Os dados observacionais foram distribuídos em função da latitude, em intervalos de 9° aproximadamente e de acordo com a grelha B, que serviu para a análise dos desenhos. Essa distribuição encontra-se registada na Tabela C3, em anexo, e os valores dispostos na Figura 7.5.

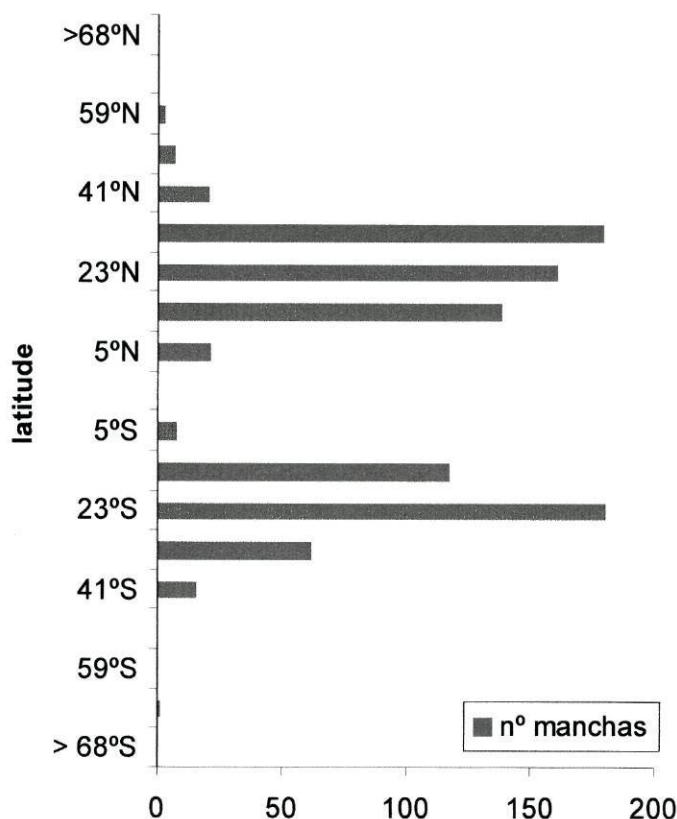


Figura 7.5 – distribuição das manchas por faixas de latitude heliográfica com 9° de amplitude

Pela representação gráfica da distribuição das manchas verifica-se que para latitudes elevadas não se verifica a ocorrência de manchas. Os registos efectuados na faixa de $5^\circ\text{N} - 5^\circ\text{S}$ em torno do equador, podem ter sido resultado do erro de escala, uma vez que as manchas não são observadas perto do equador (o máximo que se aproximam é de 7°). O mesmo tipo de erro pode explicar as manchas em latitudes superiores a 40° . Pode ainda verificar-se que existe uma certa simetria no número e na distribuição das manchas em relação ao equador.

7.5 - Determinação da velocidade de rotação

Para determinar a velocidade de rotação das manchas, depois de identificar e seguir o percurso de uma dada mancha é necessário medir o espaço percorrido, obtido de dois registos consecutivos e que são rodados de modo a fazer coincidir o eixo da grelha A com o da grelha B no intervalo de tempo conhecido (dado pela data e hora de observação). O intervalo de tempo é convertido em dias sendo a velocidade de rotação média calculada por :

$$\omega_m = \Delta s / \Delta t \quad (3)$$

Nesta fórmula, a velocidade ω é medida em angulo de rotação por dia, Δs representa a medida do arco em graus e Δt é o intervalo de tempo em dias, correspondente à mudança de posição Δs .

Analisados os desenhos obtiveram-se os resultados da Tabela C4 e Tabela C5, em anexo, onde se registou a velocidade angular por dia e em função da latitude. O gráfico da Figura 7.6 mostra a variação de velocidade angular que diminui com o aumento de latitude, quer no hemisfério Norte quer no Sul.

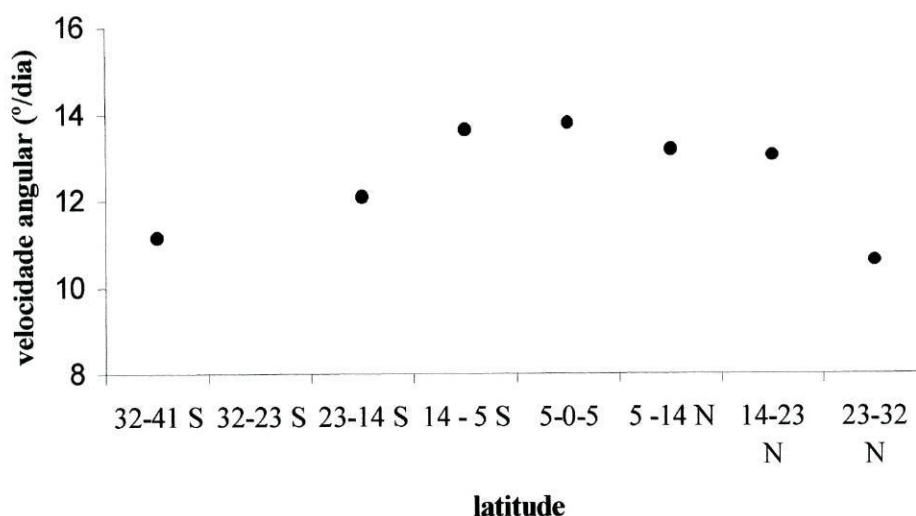


Figura 7.6 – velocidade angular média, em graus por dia, registada ao longo das diferentes observações e distribuída pela latitude heliográfica

Os valores obtidos foram convertidos em período de rotação e distribuem-se pela superfície do Sol (em termos de latitude) como ilustra a Figura 7.7.

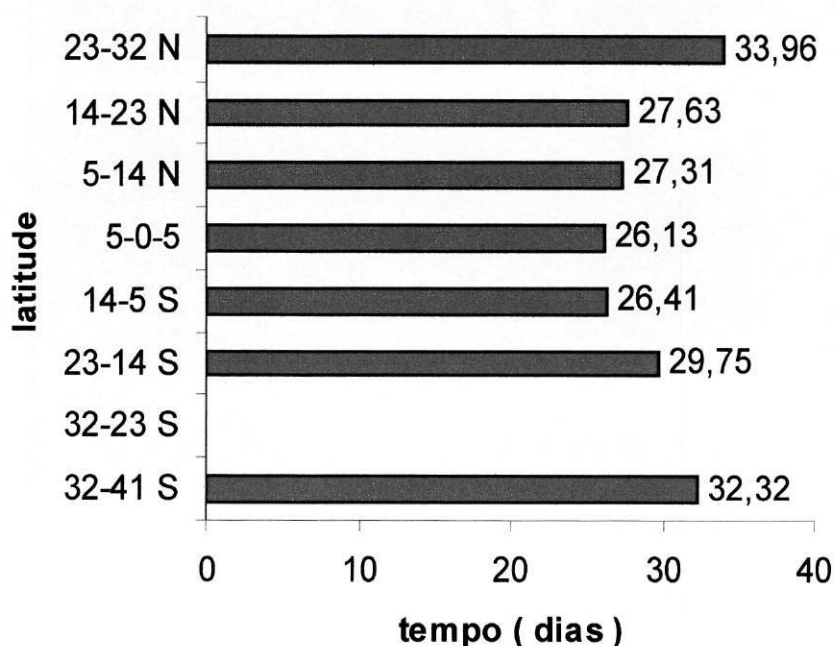


Figura 7.7 – período de rotação médio do Sol, em função da latitude

No gráfico a latitude entre 32-23 ° S não está representada pelo facto de não ter sido possível identificar o percurso de manchas situadas nessa faixa de latitude nos desenhos, ao longo das observações. O valor de latitude entre 41-32 °S foi resultado de apenas um par de valores. No entanto podemos concluir que o período de rotação (ou a velocidade de rotação) do Sol não é constante e aumenta com a latitude : possui o valor mínimo na faixa equatorial.

Considerando para a grelha A um erro de 0,25 na menor divisão, ou seja, um valor de 11,25° ao qual é adicionado o erro cometido pela introdução da grelha B de leitura. Para esta última grelha considera-se o erro de 0,5 da menor divisão uma vez que a escala é mais apertada e corresponde a 4,5°. O erro é também calculado apenas numa dimensão porque a grelha roda de modo a alinhar as posições consecutivas das manchas. Adicionando os dois valores $11,25^\circ + 4,5^\circ$ obtém-se 15,75° para o erro máximo de leitura.

Assim sendo, o período de rotação médio calculado a partir destes valores é de 29,1 dias e proporcionalmente, o erro estimado é 1,3 dias. Conclui-se então que o resultado da observação relativamente ao período de rotação médio é de $29,1 \pm 1,3$ dias.

7.6 –A evolução e classificação das manchas

O aspecto das manchas varia com o tempo só sendo possível segui-las ao longo de um ciclo pelas coordenadas heliográficas. Dos registos obtidos pela transposição da imagem do Sol pode ver-se o desenho de algumas manchas na Figura 7.8. A Figura 7.9 ilustra a evolução de um grupo de manchas recortadas como pormenor das imagens do Observatório do Hawaii.



Figura 7.8 – desenhos do pormenor de um grupo de manchas obtidos com uma ocular de 35mm em 4 de Setembro (esquerda) e 10 de Julho (direita)

Os desenhos que reproduzem o pormenor de um grupo de manchas são efectuados com uma ocular de maior ampliação e que também serve para a contagem do número de manchas que constitui o grupo. Estes desenhos quando efectuados em dias consecutivos também são capazes de relatar a evolução de um grupo ou manchas.

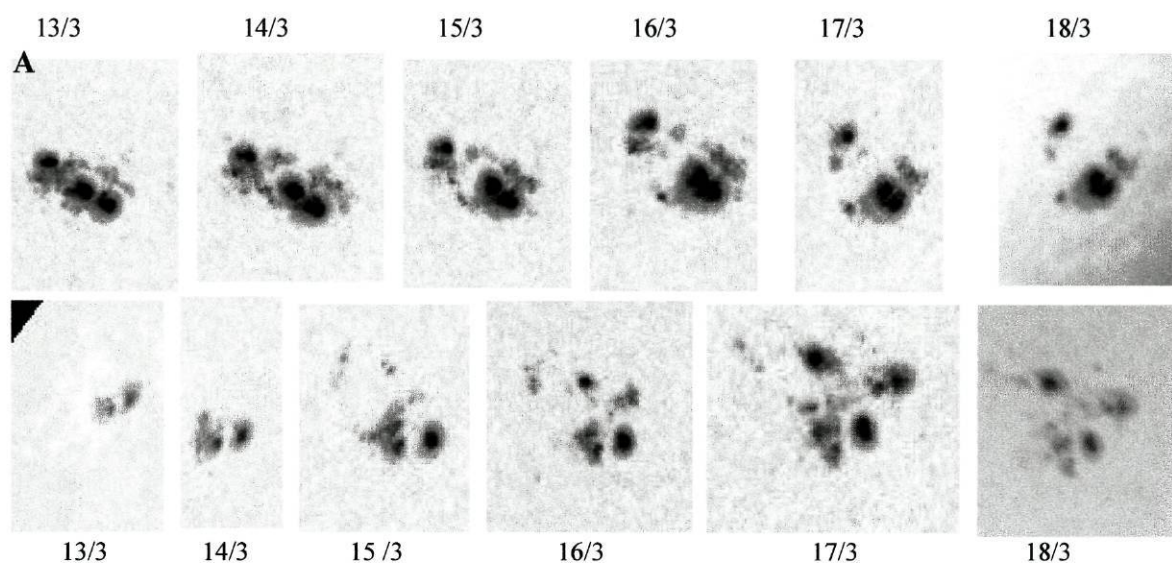


Figura 7.9 - imagens do pormenor de dois grupos de manchas “A” e “B” numa sequência entre os dias 13 e 18 de Março de 2000 (Arquivo do Observatório do Hawaii)

Na Figura 7.9 pode distinguir-se a mudança de aspecto do grupo de manchas “A” que possui um sistema de manchas inicialmente com a mesma penumbra e que ao fim de algum tempo o grupo bipolar afasta-se e individualiza-se. Na sequência de imagens “B” temos inicialmente um grupo bipolar com umbra e penumbra distintas; numa das manchas vai ocorrer o desenvolvimento de outras manchas mais pequenas que se estendem por entre o par inicial.

Com as imagens obtidas por fotografia ou com os desenhos executados aquando da observação do Sol, é possível identificar as manchas ou o grupo de manchas de acordo com a classificação de McIntosh.

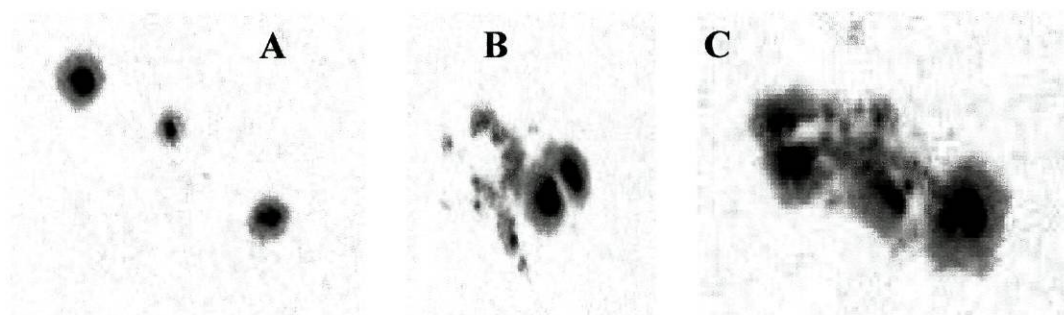


Figura 7.10 – Pormenor de várias manchas exibidas na superfície do Sol no dia 22 de Fevereiro de 2000 (Arquivo do Observatório do Hawaii)

A imagem “A” mostra um conjunto de manchas individuais unipolares com penumbra quase circular que podem ter a classificação de: Hsx. Na imagem “B” aparecem manchas com polaridade visível, bipolar, e penumbra ainda comum, que se estende para albergar manchas muito pequenas. Trata-se então de um grupo que pode ter a classificação correspondente a: Dho. Em “C” temos um grupo de estrutura complexa com penumbra assimétrica e distribuição intermédia entre a aberta e a compacta a que corresponde a classificação: Eki.

A classificação das manchas, tal como já foi referido, torna-se por vezes difícil de aplicar uma vez que as manchas apresentam configurações variadas, dentro da mesma descrição. No entanto o sistema de classificação apenas pretende fornecer alguns elementos em termos de aspecto e dimensão relativa das manchas observadas.

7.7- A área das manchas

Dispondo de imagens do Sol podemos estudar o percurso, o aspecto, a localização e o desenvolvimento das manchas e é também possível calcular, utilizando a regra de proporcionalidade directa, a área de uma mancha ou de um grupo de manchas. Sabendo que o raio do Sol é de $6,96 \times 10^8$ m, mede-se o diâmetro da imagem do Sol na Figura e a extensão da mancha.

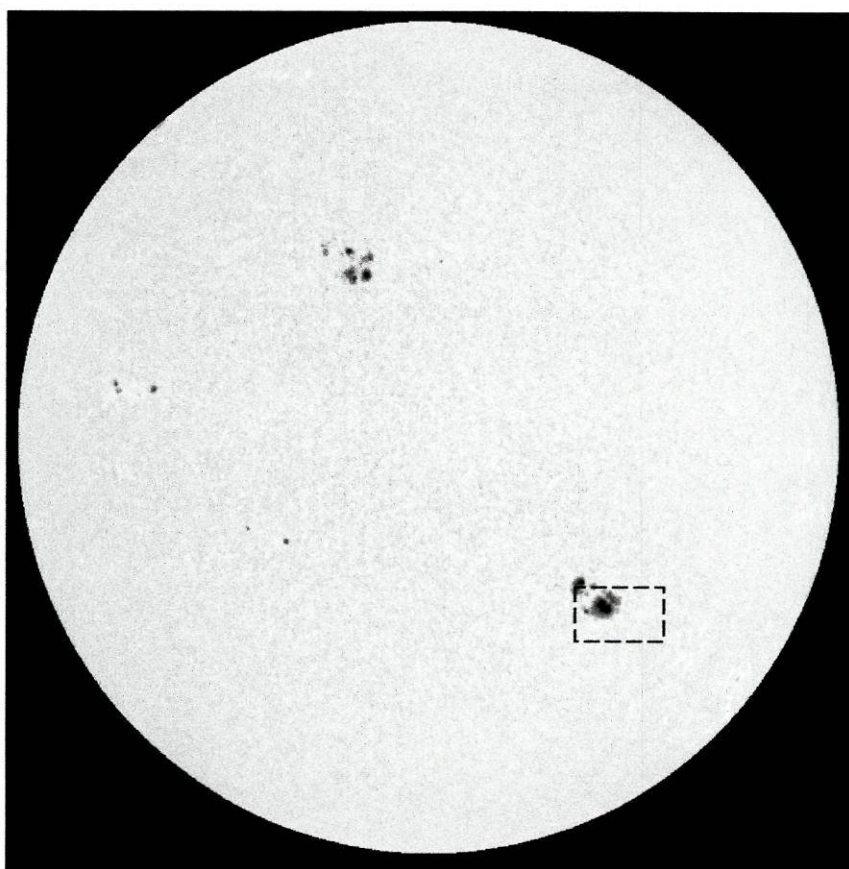


Figura 7.11 – imagem do Sol correspondente ao dia 16 de Março de 2000, retirada dos arquivos do Observatório de Hawaii

O diâmetro do Sol na Figura 7.11 é de 0,11 m e o diâmetro do grupo de manchas assinalado pelo caixilho é de 3 mm ou seja de 0,003 m. Pela regra da proporcionalidade, a dimensão desse grupo de manchas é de 37 963 636,36 m ou seja de 37 963,7 Km, o que corresponde a cerca de 3 diâmetros terrestres. Este cálculo pode ser aplicado a uma mancha desde que esta possua uma dimensão mensurável, na imagem que é utilizada. Estes cálculos são efectuados no plano não considerando por isso a esfericidade da superfície.

7.8 – Considerações finais

O trabalho de observação possui algumas condicionantes como o método de recolha, registo de dados e as condições climatéricas, que podem inviabilizar a continuidade no tempo.

Neste trabalho a temporização para efectuar as observações foi definida com base no valor médio para a rotação do Sol, cerca de 30 dias, pelo que se realizariam duas observações por semana. Tal não aconteceu devido a más condições climatéricas. Esta falta de sequência não permitiu, em alguns casos, seguir o percurso das manchas por ser difícil de as identificar ou porque já tinham percorrido a superfície visível do Sol, contribuindo no entanto para a contagem do número de manchas diário.

O registo gráfico por transposição do aspecto da superfície do Sol para o papel foi o método escolhido por ser mais acessível em termos de materiais - é apenas necessário o telescópio, o filtro e papel - e por desenvolver a apetência pela observação na busca de pormenores. Além disso a transposição da imagem para o papel permite melhorar a noção de distribuição espacial, observar as manchas com detalhe e efectuar a contagem dispondo de mais tempo. O método por projecção necessita de condições particulares em termos de luminosidade (um bom contraste luz – sombra) para identificar a posição das manchas, caso contrário, torna-se difícil o seu registo, além de que deve ser realizada num curto espaço de tempo para evitar o aquecimento do equipamento óptico do telescópio.

A grelha utilizada para os registos foi elaborada com a introdução de uma escala linear porque a transposição gráfica da imagem já tem em conta a esfericidade ao localizar as manchas. No desenho das manchas considerou-se uma ou outra particularidade, utilizando a ocular de maior ampliação.

Para determinar a velocidade de rotação das manchas, depois de identificar e seguir o percurso de uma dada mancha foi necessário medir a mudança de posição efectuada na superfície esférica do Sol, no intervalo de tempo conhecido pela data e hora de observação. Com a finalidade de minimizar os erros utilizou-se uma grelha esférica sobre a grelha de observação para se efectuarem as medições de mudança de posição e de latitude. Esta grelha também foi útil para, em casos de dúvida, definir a contagem em termos de grupo ou manchas isoladas pela verificação do seu afastamento relativo.

Quanto aos resultados, estão de certo modo concordante com os valores atribuídos para o Sol, existindo algum desfasamento pontual. Tal facto fica a deve-se ao pequeno número de

registos : em cerca de 6 meses (180 dias) o número de observações previstas foi de 48 mas apenas se concretizaram 19, cerca de 40% (e mesmo, assim alguns só contribuíram para a contagem do número total de manchas diárias). A maior ou menor inclinação do eixo de rotação é indicada pela mudança de posição aparente das manchas (que é por isso linear) e é afectada pelo erro de transposição da imagem. Não esquecer que a posição observada do eixo de rotação depende também da posição do observador, do dia do ano e hora de observação. O erro cometido na determinação do eixo de rotação, e conseqüentemente na localização da linha do equador heliográfico, vai reflectir-se na distribuição espacial das manchas em termos de latitude explicando o registo na faixa de latitudes inferior a 7°.

Apesar de tudo os objectivos do trabalho foram concretizados mostrando-se conclusivos quanto ao modo de executar e registar os dados observacionais, tornando possível a análise não só em termos do número de manchas, do sentido e do eixo de rotação, mas também a verificação da rotação diferencial com a distribuição das manchas pela latitude, do desenvolvimento e mudança de aspecto das manchas. A utilização de outras fontes de informação como complemento do trabalho vem demonstrar que pode ser uma forma de contornar as condições físicas de observação quer por falta de instrumentação quer por deficientes condições climatéricas.

Capítulo 8

Conclusão

O Ciclo Solar tem por base a análise dos registos efectuados ao longo do tempo e terá continuidade nos registos futuros, com a particularidade de constituírem também uma forma de verificação das previsões baseadas na regularidade do ciclo. Poderão os registos futuros servir também para inferir outras particularidades do ciclo como a ocorrência de um período similar ao mínimo de Maunder.

Sendo este um trabalho de observação e registo de dados, em particular do número de manchas diário, seria interessante dar continuidade no tempo e verificar que, no que diz respeito ao Ciclo Solar, nos encontramos efectivamente num período de grande actividade (ou próximo) e, por comparação com os valores que mais tarde se irão obter, nos aproximarmos do final do ciclo (previsto para o ano de 2006).

Os resultados deste trabalho de observação podem ser também obtidos por análise idêntica das imagens recolhidas em tempo real pela sonda SOHO e divulgadas na Internet. Os valores são afectados apenas pelo erro de leitura (por utilização da grelha B) uma vez que a recolha dos registos é feita directamente. O mesmo aconteceria com a utilização da câmara fotográfica ou um C.C.D..

A contagem do número de manchas também é possível de ser efectuada, ainda que de modo limitado, ficando reduzida à contagem apenas das manchas maiores e dos grupos. O número diário de manchas terá um valor menor, relativamente ao real, mas passível de correcção pelo factor K.

De um modo ou de outro poder-se-á construir uma base de dados, seguindo de perto o desenrolar do ciclo, tendo ainda o objectivo de dar continuidade ao trabalho de observação do Sol.

Este tipo de trabalho pode ser também desenvolvido como forma de motivação e divulgação do estudo não só do Sol mas dos outros astros que nos rodeiam.

APÊNDICES

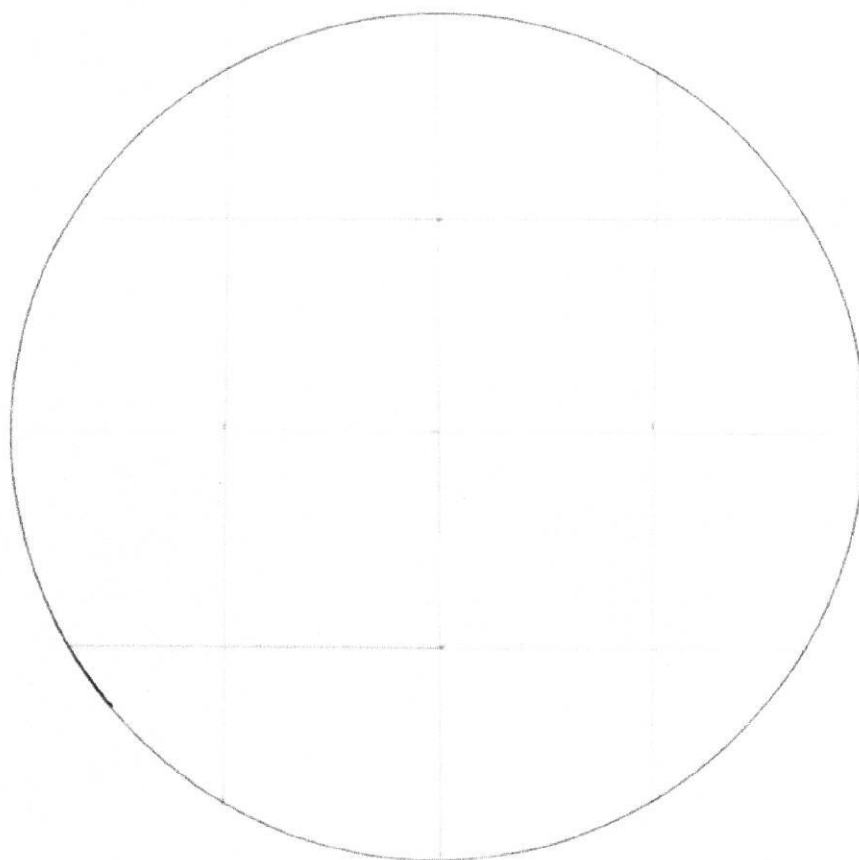
Apêndice A

Grelhas de Observação

Grelha A

Data :

Hora:



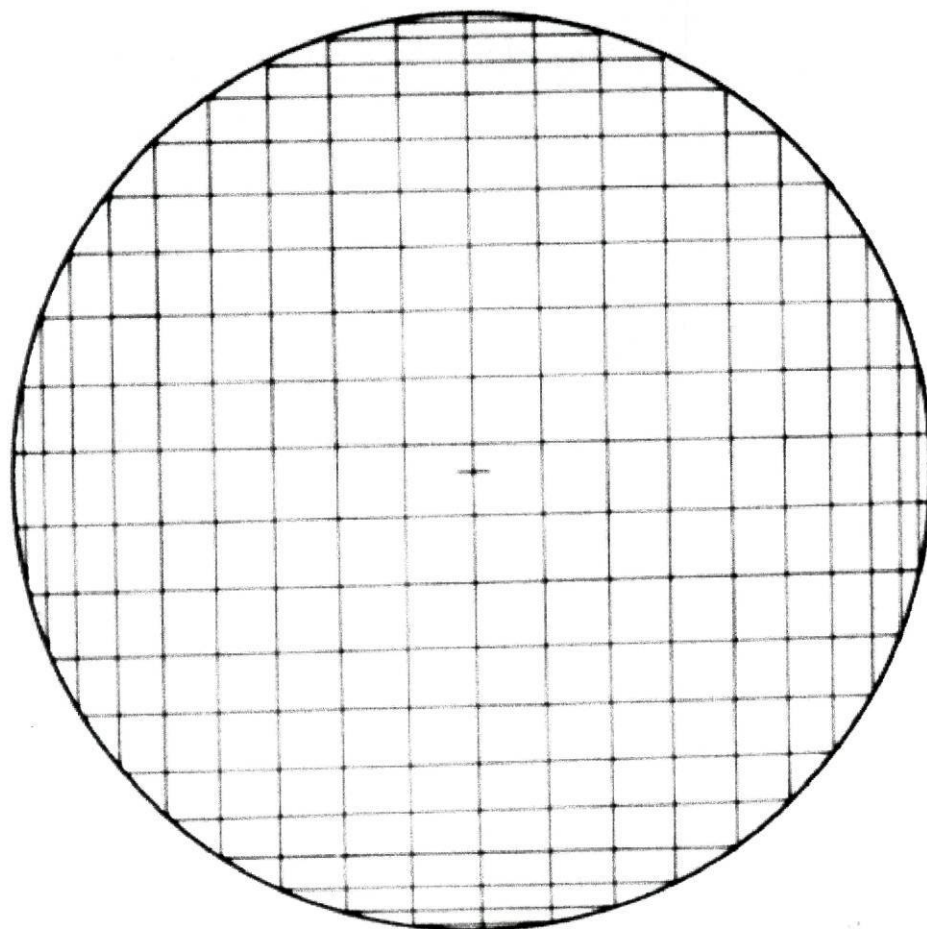
Local:

Telescópio:

Observador:

É constituída por um círculo de 12 cm de diâmetro e um sistema de eixos cartesianos, centrado e dividido em espaços de 45°. Consta ainda o local de observação, a hora e data, a instrumentação utilizada e o nome do observador. Foi construída pelo autor do trabalho.

Grelha B

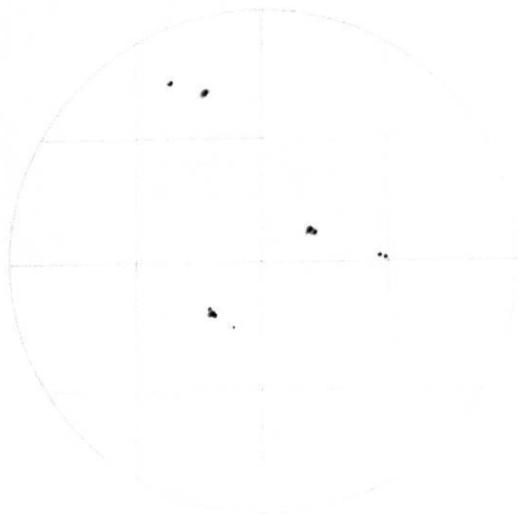


A grelha B possui os eixos coordenados com divisões de 9° , entre em linha de conta com a esfericidade da superfície do Sol e é utilizada como instrumento auxiliar para medir a distância, em graus, da mudança de posição das manchas. Foi retirada de “Introdução à astronomia e às observações astronómicas”, de Máximo Ferreira, 5ª Edição (1999)

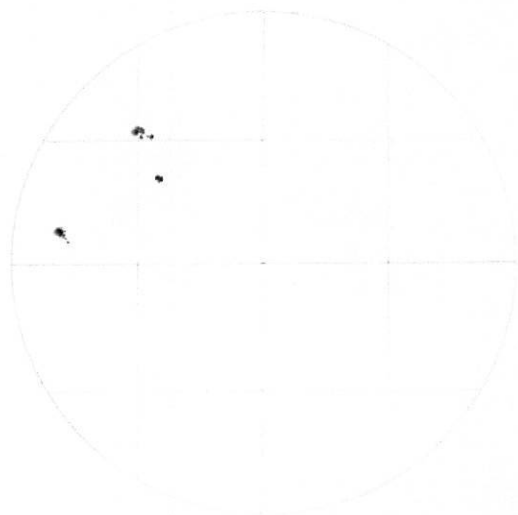
Apêndice B

Registos da observação do Sol

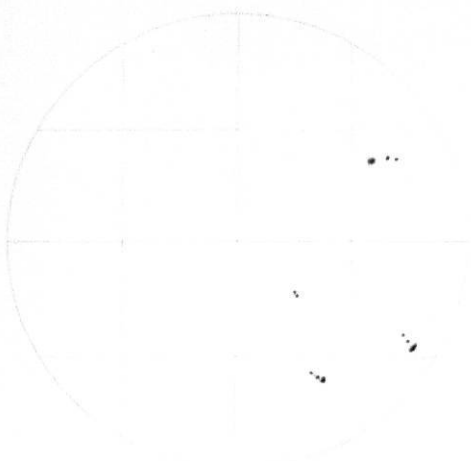
Data : 3 / 04 / 2000
Hora : 16 h



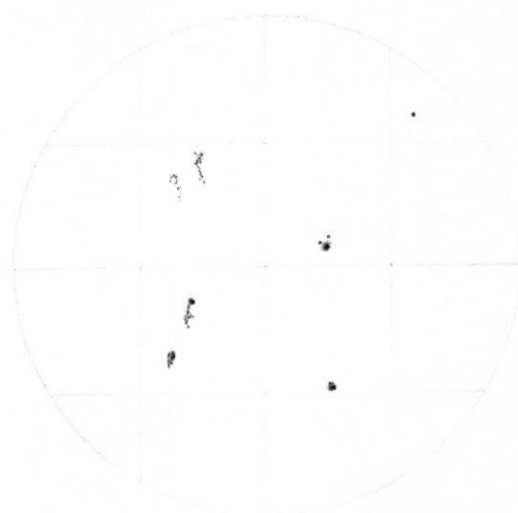
Data : 7 / 01 / 2000
Hora : 14 h 30 m



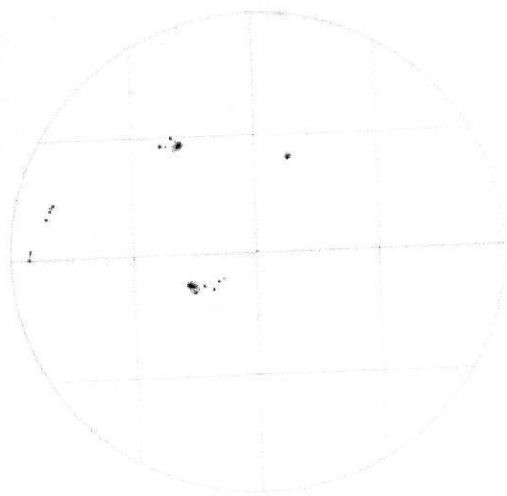
Data : 10 / 04 / 2000
Hora : 15 h



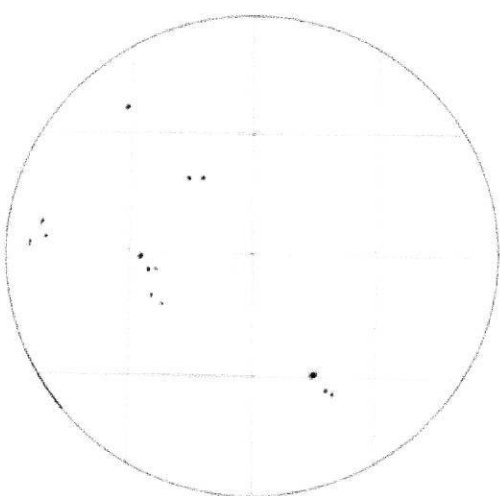
Data : 17 / 01 / 2000
Hora : 14 h 30 m



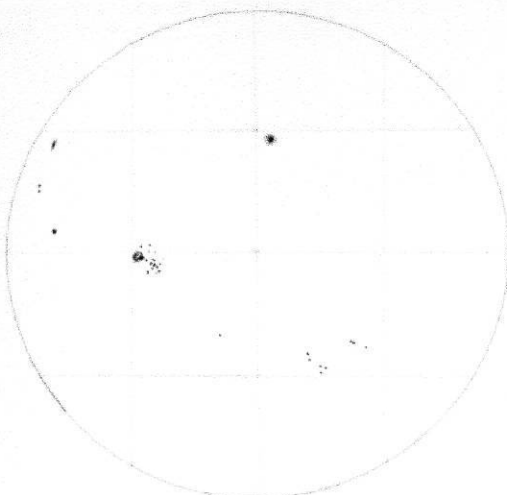
Data : 20/01/2000
Hora: 16 h



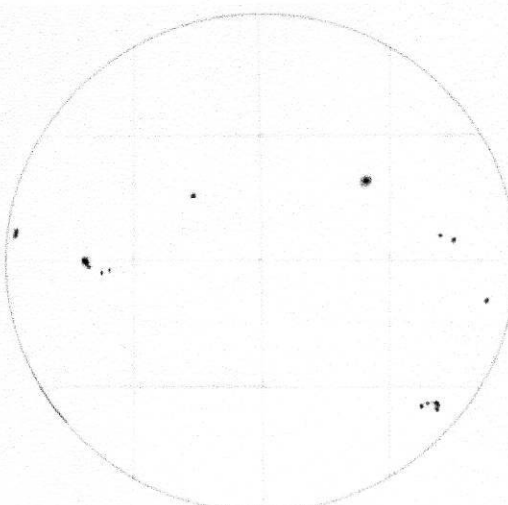
Data : 24/01/2000
Hora: 15 h 15 m



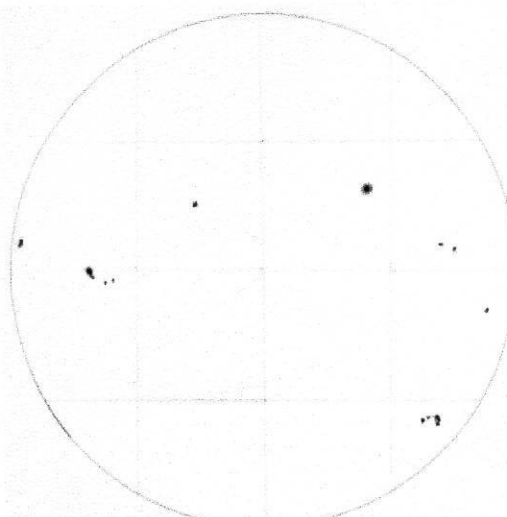
Data : 17/02/2000
Hora: 14 h 15 m



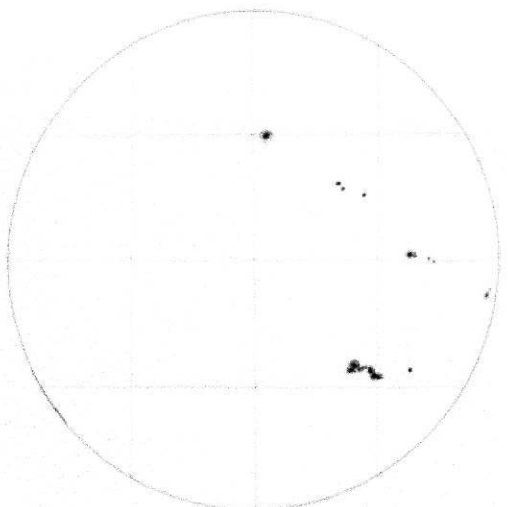
Data : 22/02/2000
Hora: 16 h



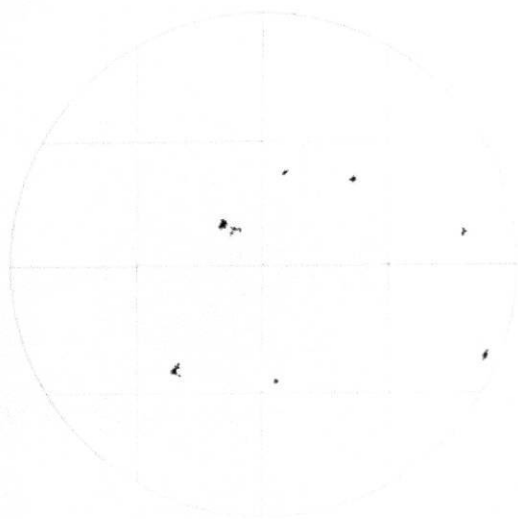
Data : 22/02/2000
Hora: 16 h



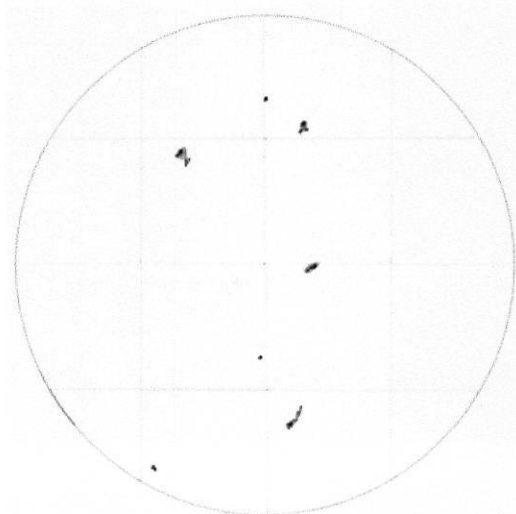
Data : 24/02/2000
Hora: 15 h



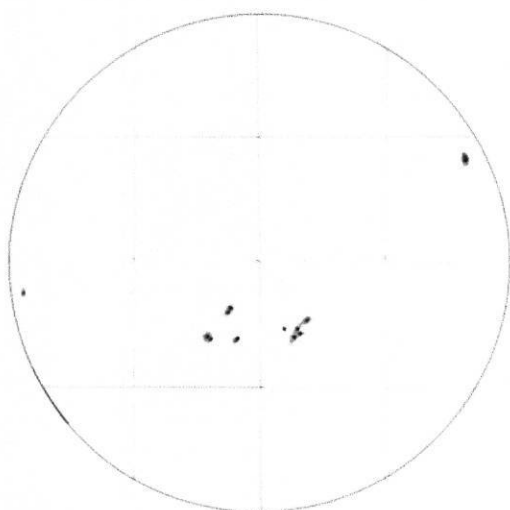
Data : 20/03/2000
Hora: 14h



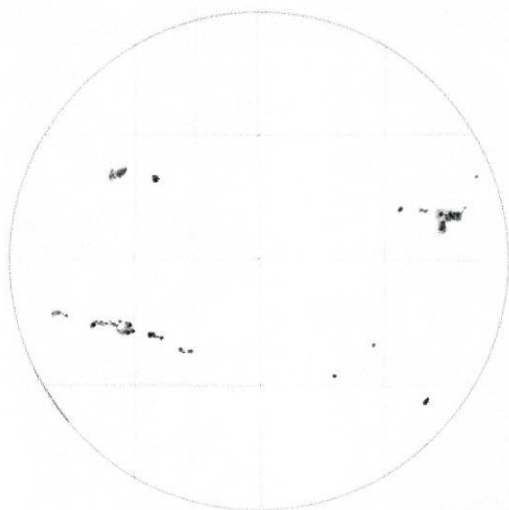
Data : 6/04/2000
Hora: 15h 30m



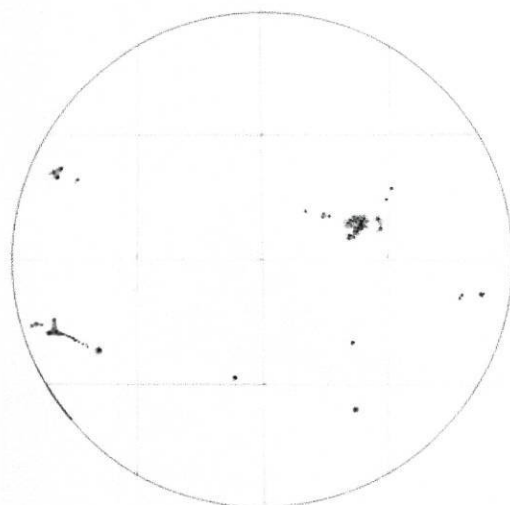
Data : 4/05/2000
Hora: 15h 45m



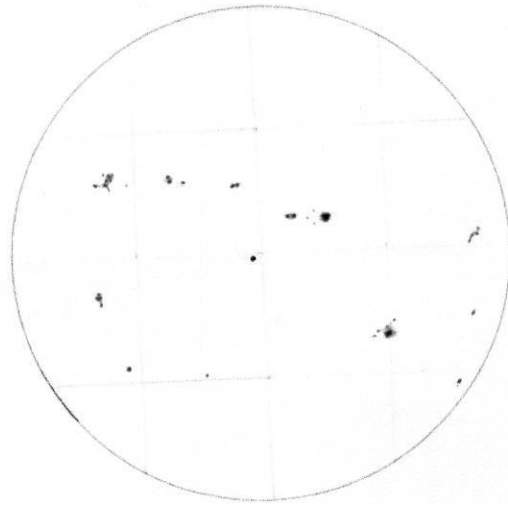
Data : 10/07/2000
Hora: 15h 30m



Data : 12/07/2000
Hora: 16h

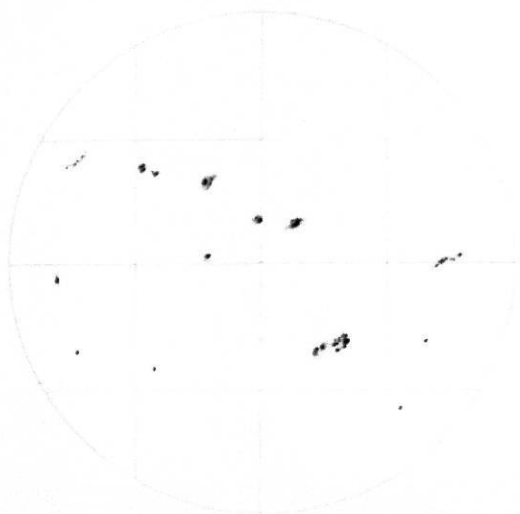


Data : 17/07/2000
Hora: 15h 30m



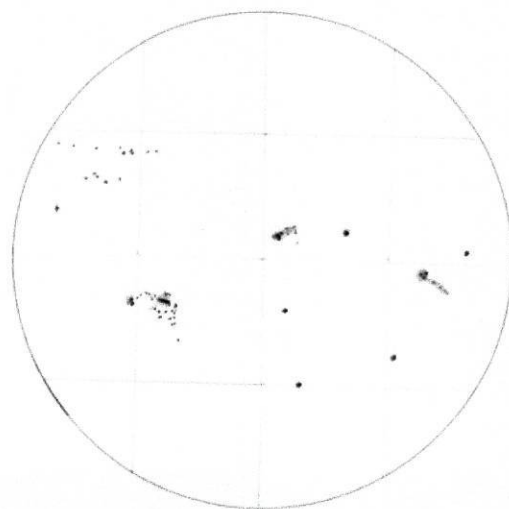
Data : 18/07/2000

Hora: 15h



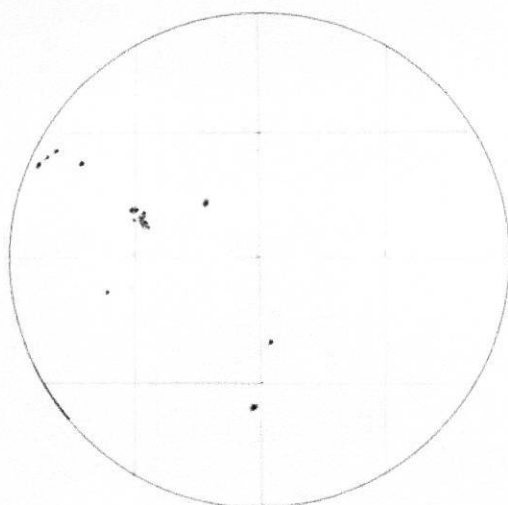
Data : 21/07/2000

Hora: 16h 30m



Data : 27/07/2000

Hora: 16.00h



Apêndice C

Tabelas

Tabela C.1 - Registo do número de manchas e grupos observados

Data dia / mês / ano	Hora (Horas/ minutos)	Número de grupos (g)	Número total de manchas (f)
03/01/2000	16h 00m	4	12
07/01/2000	14h 30m	3	20
10/01/2000	15h 00m	4	15
17/01/2000	14h 30m	5	49
20/01/2000	16h 00m	4	36
24/01/2000	15h 15m	5	17
17/02/2000	14h 15m	4	32
22/02/2000	16h 00m	4	20
24/02/2000	15h 00m	5	25
15/03/2000	15h 30m	5	39
20/03/2000	14h 00m	7	33
06/04/2000	15h 00m	5	36
04/05/2000	15h 15m	3	15
10/07/2000	15h 30m	5	98
12/07/2000	16h 00m	5	74
17/07/2000	15h 30m	9	64
18/07/2000	15h 00m	10	74
21/07/2000	16h 30m	8	96
27/07/2000	15h 00m	6	28

**Tabela C.2 - Registo do número diário de manchas compilado
por NOAA em 29/8/2000, referido ao ano 2000**

DAILY SUNSPOT NUMBERS 2000												
Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Yr Day
48	71	138	187	91	85	145						2000 01
51	64	130	193	80	79	132						2000 02
54	81	114	177	76	75	124						2000 03
64	99	113	164	66	101	114						2000 04
73	104	113	129	71	95	127						2000 05
85	136	129	108	50	99	154						2000 06
85	130	155	94	52	105	177						2000 07
75	128	145	100	64	120	177						2000 08
76	109	146	108	99	122	179						2000 09
65	122	137	102	120	119	201						2000 10
90	114	127	96	133	151	202						2000 11
134	113	122	107	133	147	186						2000 12
153	108	121	118	161	156	194						2000 13
164	119	115	114	180	171	164						2000 14
157	118	103	105	205	158	148						2000 15
163	131	100	98	189	142	197						2000 16
131	109	95	110	170	139	224						2000 17
120	104	101	94	161	147	228						2000 18
114	89	126	103	158	145	246						2000 19
95	76	150	121	180	159	241						2000 20
88	92	148	128	163	147	231						2000 21
84	100	156	145	143	127	216						2000 22
82	95	182	170	132	124	199						2000 23
80	123	188	160	134	119	171						2000 24
85	131	185	151	109	111	167						2000 25
77	144	170	136	117	129	133						2000 26
70	150	155	118	106	138	126						2000 27
60	151	169	124	124	115	120						2000 28
61	162	148	100	117	109	113						2000 29
51		148	100	93	114	112						2000 30
58		164		67		93						2000 31
90.1	112.9	138.5	125.3	120.8	124.9	169.1						

Values are preliminary after Mar 00.

Tabela C.3 - Distribuição do número de manchas com a latitude

Data	Latitude																	f	
	Norte									Sul									
	\geq 68	68 a 59	59 a 50	50 a 41	41 a 32	32 a 23	23 a 14	14 a 5	5 a 0	0 a 5	5 a 14	14 a 23	23 a 32	32 a 41	41 a 50	50 a 59	59 a 68	\geq 68	
03/01	0	0	0	0	0	3	4	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	12
07/01	0	0	0	0	0	0	10	2	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	20
10/01	0	0	3	1	1	0	0	0	0	5	0	6	0	0	0	0	0	0	15
17/01	0	1	0	0	0	0	8	10	0	0	0	20	10	0	0	0	0	0	49
20/01	0	0	0	0	0	1	12	0	0	0	5	15	3	0	0	0	0	0	36
24/01	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	12	2	0	0	0	0	0	17
17/02	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	20	10	0	0	0	0	0	0	32
22/02	0	0	0	0	0	3	1	1	0	0	5	10	0	0	0	0	0	0	20
24/02	0	0	0	0	0	5	7	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	25
15/03	0	0	0	0	0	1	0	15	0	01	20	0	2	0	0	0	0	0	39
20/03	0	0	0	0	0	5	2	12	0	2	0	0	12	0	0	0	0	0	33
06/04	0	0	0	4	4	0	12	0	5	0	0	1	0	12	0	0	2	0	36
04/05	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	8	5	0	0	0	0	0	0	15
10/07	0	0	0	0	0	1	45	15	0	0	0	34	2	1	0	0	0	0	98
12/07	0	0	0	0	0	1	25	15	5	0	0	2	25	1	0	0	0	0	74
17/07	0	0	0	0	0	0	10	30	1	0	15	6	0	2	0	0	0	0	64
18/07	0	0	0	0	0	0	25	25	1	0	5	15	3	0	0	0	0	0	74
21/07	0	0	0	0	0	0	13	15	10	0	26	31	1	0	0	0	0	0	96
27/07	0	0	0	0	0	0	5	18	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	28
Total	0	1	3	7	7	21	180	161	22	8	118	181	62	16	0	0	2	0	783

Tabela C.4 – Mudança de posição (em graus) das manchas ao longo do tempo e em função da latitude

		Variação de posição(em graus) em função da latitude e no intervalo de tempo Δt (h)														
Data	Latitude	3/1	7/1	17/1	20/1	17/2	22/2	24/2	15/3	20/3	10/7	12/7	17/7	18/7	21/7	27/7
32-23 N		----		----		----	22,5°		----		22,5°	----	9°		----	----
23-14 N		----		40,5°		----	----		----		----	63°		----	----	----
14-5 N		54°		----		----	----		56,3°		27°	----	13,5°		45°	33,8°
5-0-5		----		----		----	----		----		----	----	13,5°		----	----
5-14 S		----		----		----	24,8°		----		27°	----	13,5°		45°	----
14-23 S		49,5°		42,3°		63°	----		----		----	----	9°		----	31,5°
23-32 S		----		----		----	----		----		----	----	----		----	----
32-41 S		----		----		----	----		----		22,5°	----	----		----	----
Δt (h)		3,94		3,06		5,09	1,96		4,94		2,02	4,92	0,98		3,06	5,94

Tabela C.5 – velocidade angular (em graus por dia) das manchas em função da latitude

		Velocidade angular															
Data	Latitude	3/1	7/1	17/1	20/1	17/2	22/2	24/2	15/3	20/3	10/7	12/7	17/7	18/7	21/7	27/7	Veloc. média
32-23 N		----		----		----	11,48		----		11,14	----	9,18		----	----	10,6
23-14 N		----		13,24		----	----		----		----	12,81		----	----	----	13,03
14-5 N		13,71		----		----	----		11,40		13,37	----	13,78		14,71	12,12	13,18
5-0-5		----		----		----	----		----		----	----	13,78		----	----	13,78
5-14 S		----		----		----	12,65		----		13,37	----	13,78		14,71	----	13,63
14-23 S		12,56		13,82		12,38	----		----		----	----	9,18		----	12,5	12,10
23-32 S		----		----		----	----		----		----	----	----		----	----	----
32-41 S		----		----		----	----		----		11,14	----	----		----	----	11,14
Δt (h)		3,94		3,06		5,09	1,96		4,94		2,02	4,92	0,98		3,06	5,94	

Glossário

Adiabático – diz-se de um processo termodinâmico durante o qual não se efectuam trocas de calor com o exterior.

Altura – amplitude do arco do círculo vertical compreendido entre a linha do horizonte e o objecto celeste.

Ano solar tropical – corresponde ao tempo decorrido entre duas passagens aparentes consecutivas do Sol pelo ponto equinocial de Março, ou seja, pelo ponto vernal e possui a duração de 365 dias, 5 horas, 48 minutos e 46 segundos.

Astrofísica - ramo da Ciência que aplica as leis da física aos corpos celestes e possui como objecto de estudo o Universo.

Atmosfera solar – camada de gases rarefeitos acima da superfície que se considera ser a linha que delimita o disco solar e que é constituída por fotosfera, cromosfera e corona (ver Cap.3, pág.30).

Aurora – brilho constituído por faixas e arcos coloridos, que aparece no céu e é observado da superfície terrestre em latitudes extremas: boreal (do lado do Norte) e austral (do lado do Sul). É produzida quando o vento solar atinge as camadas altas da atmosfera terrestre.

Buracos coronais – correspondem a regiões de campo magnético na corona onde as linhas de campo magnético se encontram abertas e deixam que as partículas que constituem o vento solar se escapem facilmente (ver Cap. 3, pág.37)

Campo magnético – região de influência de um ímã ou corpo semelhante ou de uma corrente eléctrica (cargas em movimento)(verCap.5; pág 52)

Ciclo de Saros – de duração aproximada de 18 anos e 11 dias foi determinado pela repetição periódica dos eclipses segundo uma certa ordem e sucessão; para se repetir um eclipse do mesmo tipo é necessário que se verifiquem duas condições: a realização de um número inteiro de revoluções lunares em relação ao mesmo nodo da orbita e no fim desse período a Lua tem de se encontrar na mesma fase. Um ciclo de eclipses terá um número inteiro de meses dracônicos (espaço de tempo que medeia o retorno ao mesmo nodo) e de meses sinódicos (espaço de tempo que medeia o retorno à mesma fase).

Ciclo metónico – ciclo com duração de 235 meses solares correspondendo exactamente a 19 anos e 7 meses.

Ciclo solar – é um período de aproximadamente 11anos e que corresponde ao período de tempo entre dois mínimos no número médio anual de manchas solares e onde se registam variações na actividade do Sol (ver Cap.5, pág.61)

Convecção – é um processo de transferência de energia causado pelo movimento ascendente/descendente de um fluido que transporta energia das regiões quentes (menos densas) para as mais frias (mais densas).(ver Cap. 3; pág. 29)

Corona - camada rarefeita, de elevada temperatura. É a mais exterior da atmosfera solar (ver Cap.3, pág.37).

Coronógrafo – aparelho que se utiliza para estudar as alterações da corona, fora dos períodos de eclipse solar.

Cromosfera – camada transparente da atmosfera solar compreendida entre a fotosfera e a corona, apresentando menor densidade e temperatura mais elevada do que a fotosfera (ver Cap.3, pág.34)

Declinação – distância angular (a norte ou a sul) dos objectos celestes em relação ao equador celeste.

Dia solar médio- é a média anual das durações do dia solar verdadeiro ao qual foi atribuída o valor de 24 horas (calculado pelo tempo solar médio) e que marca o ritmo dos relógios vulgares. É a duração do dia cívil.

Dia solar verdadeiro – tempo que decorre entre duas passagens superiores consecutivas do Sol no mesmo semi-meridiano.

Diagrama de Hertzsprung- Russel – é um gráfico que representa a classificação das estrelas de acordo com a sua classe espectral (ou de temperatura efectiva) em função da luminosidade/magnitude absoluta. As propriedades físicas de cada estrela estão relacionadas com a posição no diagrama e a sua evolução pode ser descrita pela mudança de posição no diagrama ao longo do tempo.

Dínamo – criação de um campo magnético pelo movimento de cargas eléctricas.

Eclipse – ocultação parcial ou total de um astro pela interposição de outro entre ele e o observador.

Eclíptica – circunferência de círculo máximo da esfera celeste que o Sol parece descrever no seu movimento anual aparente à volta da Terra e cujo plano forma com o plano do equador celeste um ângulo diedro de $23^{\circ} 27' 30''$.

Efeito Doppler - a mudança aparente na frequência ou comprimento de onda da radiação devido ao movimento relativo entre a fonte e o observador .

Efeito de Wilson – refere-se à alteração de aspecto das manchas provocado pelo movimento de rotação do Sol e pelo facto de ser um corpo esférico (ver Cap. 4, pág.59)

Efemérides – conjugação dos astros como o Sol, a Lua e os planetas, de modo a originar fenómenos tidos na antiguidade como anormais, sendo exemplo os eclipses solares ou lunares e que eram interpretados como sinais dos deuses.

Equação de Wolf – é a relação matemática estabelecida para determinar o número de manchas solares e que permite estudar a evolução do ciclo solar (ver Cap. 5, pág.67).

Equinócio – momento em que o Sol, no seu movimento anual aparente, atinge um dos pontos (equinociais) definidos pela intersecção da linha da eclíptica com a linha do equador.

Espectro-heliógrafo- aparelho destinado a estudar o espectro proveniente do Sol; é constituído por um colimador, um prisma e uma câmara fotográfica, que possibilita o registo do espectro nas regiões do visível, ultra violeta e também no infra-vermelho.

Espectroscopia – estudo das radiações luminosas através dos espectros formados por separação da luz nas suas diversas componentes com diferentes comprimentos de onda.

Filamentos – são as linhas escuras e sinuosas observadas no disco solar e que correspondem a proeminências sobre o disco solar. São escuras devido ao contraste entre a forte luminosidade do disco, causada pela sua alta temperatura, e a baixa luminosidade da proeminência, devido à temperatura mais baixa (ver Cap.4, pág.48).

“Flare” - “relâmpago” repentino e transitório que corresponde a uma ejeção de massa e que se estende na região acima da superfície solar (ver Cap.4; pág. 52).

Fotosfera – região mais interior da atmosfera solar, de pequena espessura, que emite a maior parte do calor e da luz. É formada por grânulos brilhantes separados por interstícios menos luminosos (ver Cap.3, pág.30).

Função de Planck – função que relaciona a intensidade de radiação emitida por um absorvedor (e re-emissor) perfeito (corpo negro) a uma dada temperatura em função da correspondente frequência de emissão. As estrelas são muito aproximadamente corpos negros.

Heliosismologia – estudo do interior do Sol com base na análise das vibrações que são sentidas na sua superfície(ver Cap.3; pág. 25)

Hidrostático – refere-se ao estudo do equilíbrio de forças exercidas numa massa fluída em repouso.

Ionosfera - região exterior da atmosfera terrestre, a partir dos 80 Km de altitude, fortemente ionizada.

Latitude – é uma das coordenadas terrestres, que corresponde à medida do arco de meridiano compreendido entre o equador (origem da coordenada) e o paralelo de lugar a que diz respeito, para Norte ou para Sul.

Limbo – é o nome dado ao limite ou bordo do disco solar.

Longitude- é uma das coordenadas terrestres, que corresponde à amplitude do arco do equador ou do paralelo compreendido entre o semi-meridiano de referência e o semi-meridiano considerado, para Este ou Oeste.

Lunação – são as fases da lua em número de quatro: Lua Nova é o primeiro quarto de lunação; começa com a conjunção e durante os seus sete dias o satélite é pouco visível da Terra; Crescente é a lunação seguinte durante a qual aumenta, para a Terra, a porção visível da Lua; segue-se a Lua Cheia, período no qual a Lua é vista em toda a sua plenitude. O último quarto de lunação em um mês é o Minguante onde a superfície da Lua visível vai diminuindo até voltar à conjunção, ao princípio de um novo mês lunar.

Magnetosfera - local no espaço onde se faz sentir o efeito do campo magnético terrestre .

Manchas solares – são pontos escuros observados na superfície do Sol que correspondem a regiões mais frias da fotosfera e resultam da inibição do fluxo de energia, associado à convecção, e provocada por campos magnéticos intensos. São um dos melhores indicadores da actividade solar (ver Cap.4, pág.57).

Megalítico – é relativo aos monumentos pré-históricos que foram construídos com grandes pedras.

Mínimo de Maunder – é o período correspondente à ausência total ou quase total do registo de manchas solares e que coincide com um arrefecimento anormal e prolongado da temperatura à superfície da Terra e que foi constatado por Maunder no seu estudo sobre as manchas solares. É também coincidente com a designada “mini-época glacial” que estará relacionada com a baixa actividade solar.

Neutrino – partícula subatómica sem carga eléctrica e massa muito pequena, produzida nas reacções de fusão nuclear no interior do Sol.

Penumbra – zona periférica da mancha solar, mais brilhante que a zona central mas mais escura que a fotosfera(ver Cap.4;pág.57)

Pínula – é uma das lâminas metálicas colocadas nas extremidades da régua móvel do astrolábio, que tem ao meio uma fenda por onde passam os raios visuais para estabelecer os alinhamentos.

“Plages” – nome dado às regiões activas e brilhantes localizadas na cromosfera em torno de um par de manchas solares(ver Cap. 4 ; Pág. 55)

Proeminências – material suspenso, muito acima da fotosfera, aprisionado pelas linhas de campo magnético, normalmente associado a pares de manchas solares e que se visualizam no limbo solar. Quando a sua observação se faz contra o disco solar aparecem como linhas escuras e designam-se por filamentos (ver Cap.4; pág. 48)

Raios cósmicos – são radiações constituídas por núcleos atómicos (na sua maioria protões) e que atingem a atmosfera terrestre a alta velocidade.

Radio- astronomia – ramo da astronomia que estuda o Universo e os corpos celestes com base na recepção d radiação de baixa frequência (ou elevado comprimento de onda) emitida pelos corpos celestes.

Reconexão magnética – diz-se da conexão repentina das linhas do campo magnético com polaridade oposta. É também um processo que liberta a energia armazenada no campo magnético.

Revolução sinódica – o intervalo do tempo de uma configuração similar entre a Lua e Sol (por exemplo, entre uma Lua cheia e a seguinte). Tem a duração aproximada de 29,5 dias.

Rotação diferencial – diz-se da rotação de um objecto não rígido onde o movimento se faz de tal forma que zonas adjacentes possuem velocidade de rotação diferente(ver Cap.3; pág.25)

Sequência principal – linha diagonal do diagrama de Hertzsprung- Russel e que corresponde ao tempo de vida médio no desenvolvimento das estrelas.

Solstício - corresponde ao ponto mais alto (ou mais afastado) do Sol, relativamente à linha do equador, no seu movimento anual aparente.

Termonuclear – energia proveniente das reacções de fusão nuclear entre núcleos. Tais reacções só podem ocorrer a elevadas temperaturas (acima de cerca de 10 milhões de graus) e são altamente eficientes na produção de energia.

Tipo espectral – é uma forma de classificar as estrelas tendo como base as cores e as riscas detectadas no seu espectro. É comum dividir- se em sete grupos ou classes principais (O,B,A,F,G,K,M) e cada uma delas é subdividido em dez sub-classes (de 0 a 9).

Umbra – parte central da mancha solar, muito escura, que pode ser limitada pela penumbra (ver Cap.4; pág. 57)

Vento solar – fluxo contínuo de plasma , átomos e moléculas ionizados devido á elevada temperatura, que são libertadas pelo Sol ao longo das linhas de campo magnético que o conduzem ao meio interplanetário (ver Cap. 3; pág. 40)

Bibliografia

- Allen, C. W.; “ Astrophysical Quantities ” ; The Athlone Press, London & Atlantic Highlands (1973)
- Beck; Hilbrecht; Reinsch; Völker, “ Solar Astronomy Handbook ”, Willmann-Bell, Inc. (1995)
- Böhm-Vitense, Erik; “ Introduction to Stellar astrophysics ”, Vol.I, Cambridge University Press (1989)
- Bumba, V. and Kleczenk, J. ; “ Basic mechanisms of. solar activity ”, D. Reidel Publishing Company (1976)
- Carroll, Bradley and Ostlie, Dale A. ; “ Modern Astrophysics ”, Addison-Wesley Publishing Company Inc (1996)
- Donato, Hernâni. “História do calendário”, Edições Prisma Brasil (1985)
- Ferreira, Maximo; Almeida, Guilherme, “ Introdução à astronomia e às observações astronómicas” ; Plátano, Edições Técnicas, 5ª Edição (1999)
- Kaler, James B.; “ Astronomy ” ; Harper Colins College Publishers (1994)
- Karttunen, H. ; Kroger, P. ; “ Fundamental Astronomy ” ; Ed. Springer (1996)
- Kaufmann, William J. ; “ Universe ” ; W.H. Freeman and Company, New York, 5ª Edição, (1997)
- Krupp, Edwin ; “ As antigas civilizações”; Edições Brasil (1978)
- Lang, Kenneth R. ; “ Soho Reveals the secrets of the sun” ; Scientific American (1998)

-
- Masini, Giancarlo; “ A Astronomia ”, Circulo de Leitores (1979)
- Monteiro, Mário João ; “ O Sol ”; Apontamentos (1998)
- Parker, E. ; “ Interplanetary Dynamical Processes” , Interscience Publishers Inc. (1963)
- Priest, Eric R.; “ Solar Magnetohydrodynamics ” ; D. Reidel Publishing Company (1987)
- Schmelz, Joan T. ; “ The Sun : A Laboratory for Astrophysics” ; Nato ASI Series (1992)
- Stix, Michael ; “ The Sun ” Astronomy and Astrophysics Library, 2ª Edição (1991)
- Stumpff, Karl; “ Astronomie” ; Ficher Bucherei KG (1985)
- Van Zyl, J.E., “ Unveiling the Universe”; Ed. Springer (1996)
- Sturrock, P. A. ; T.E. Holzer; D.M. Mihalas, and R. K. Ulrich ; “ Physics of the Sun ”,
Vol. I : The Solar Interior, Geophysics and Astrophysics Monographs (1989)
- Whitfield, Peter ; “ The mapping of the heavens ”, Pomegranate Artbooks. San Francisco in
association with the British Library (1995)
- Wilson, Peter ; “ Solar and Stellar Activity Cycles ”, Cambridge Astrophysics Series (1994)
- Zeilik, Harold ; “ The Evolving Universe “ ; John & Sons, Inc, 7ª Edição (1994)
- Zirin, Harold ; “ Astrophysics of the Sun ”, Cambridge University Press (1989)

Páginas de consulta na Internet

science.nasa.gov/

sohowww.nascom.gov/

solar.physics.montana.edu/yypop/index.html

umbra.nascom.nasa.gov/

woac.ct.astro.it/sole/

www.sunspotcycle.com/

www.astro.oma.be/SIDC/

www.astro.oma.be-SIDC/

www.bbso.njit.edu/

www.gea.org.br/sol/

www.gea.org.br/sol/

www.hao.ucar.edu/

www.sel.noaa.gov/info/Cycle23.html

www.solar.ifa.hawaii.edu/MWLT/archive.html

www.sunspots.noao.edu/live/index.html