

**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA**

MARCELA COSTA MEIRELLES

**UM SIMPLES MODELO SOC 2D PARA UMA DAS MAIORES FONTES DE DISTÚRBIOS
GEOMAGNÉTICOS: FLARES SOLARES**

**Rio de Janeiro
2012**

MARCELA COSTA MEIRELLES

Um simples modelo SOC 2D para uma das maiores fontes de distúrbios geomagnéticos: Flares Solares

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Programa de Graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do título de Graduado.

Orientador: Dr. Andrés Reinaldo Rodriguez Papa
Tecnologista Senior III – ON/MCTI
Professor Adjunto – UERJ

Rio de Janeiro
2012

MARCELA COSTA MEIRELLES

Um simples modelo SOC 2D para uma das maiores fontes de distúrbios geomagnéticos: Flares Solares

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Programa de Graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do título de Graduado.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Andrés Reinaldo Rodríguez Papa, ON e UERJ

Prof. Dr. Bruno Yann Nicolas Goutorbe, UFF

Prof. Dr. David Oliva Agüero, ON

Rio de Janeiro

2012

Aos meus pais,
Gerson e Isabel, e à minha avó, Lea André,
que sempre me deram muito apoio e companheirismo.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Andrés Reinaldo Rodriguez Papa, pela orientação, dedicação, oportunidades, amizade, e a confiança em mim depositada para a realização deste trabalho durante estes 3 anos.

À Universidade Federal Fluminense pela oportunidade de estudo e pelo apoio estrutural que me foi fornecido durante estes 4 anos e meio, proporcionando um ambiente agradável.

Aos meus amigos da graduação, Júlia Correa, Ricardo Teixeira, Lucas Rangel e Yan Borges pelo companheirismo, pela ajuda mútua e a linda amizade que construímos ao longo desses anos.

A todos os professores da graduação em geofísica da Universidade Federal Fluminense por terem compartilhado seus conhecimentos e experiências.

A todos os colegas da graduação em geofísica da Universidade Federal Fluminense, e aos colegas do mestrado e doutorado em geofísica e astronomia do Observatório Nacional.

À minha família pelos valores que me deram, me ensinando a importância do estudo, e por sempre acreditarem em mim, me dando força e muito amor.

E finalmente ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudo, o que permitiu a realização deste estudo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
RESUMO.....	x
ABSTRACT	xi
1 Introdução	1
2 Área de Estudo – Sol	2
2.1 Introdução	2
2.2 Características Gerais.....	2
2.3 Estrutura Interna do Sol	5
2.3.1 Núcleo.....	5
2.3.2 Zona Radiativa.....	5
2.3.3 Zona Convectiva	6
2.4 Estrutura Externa do Sol	6
2.4.1 Fotosfera.....	6
2.4.2 Cromosfera	7
2.4.3 Zona de Transição.....	7
2.4.4 Corona Solar.....	7
2.4.5 Vento Solar	8
3 Clima Espacial.....	9
3.1 Proeminência	9
3.2 Flares Solares	9
3.3 CME	10
3.4 CIR.....	10
3.5 SEP.....	10
4 Tempestade Magnética	11
5 Metodologia.....	14
5.1 Embasamento Teórico	14
5.2 Modelo I	16
5.2.1 Resultados Iniciais.....	18
5.3 Modelo II	25
5.3.1 Ruído Local (Tipo 1)	26
5.3.2 Ruído Global (Tipo 2).....	26

5.4 Resultados Finais.....	27
6 Conclusão	34
7 Referências Bibliográficas	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Figura 1: Diagrama das duas principais emissões solares, de massa. Fonte (Nat Gopalswamy, Kyoto Symposium 2007).....	12
Figura 2: Demonstração de como se comporta a nossa magnetosfera. Fonte: (Url: http://www.absoluteastronomy.com/topics/Geomagnetic_storm).	13
Figura 3: Superfície esférica do Sol representada por uma matriz $L \times L$	17
Figura 4: Função de distribuição para os valores das barreiras no estado estacionário.	19
Figura 5: Função de distribuição de atividades continuamente relacionadas acima de 0.7 no estado estacionário. Reta com uma inclinação de -1.22 e erro de 0.02.	20
Figura 6: Distribuição da duração dos flares no mínimo e máximo do ciclo solar. (Baiesi et al., 2006).	20
Figura 7: Função de distribuição para os valores das barreiras mais elevadas.	21
Figura 8: Valores consecutivos de uma única energia acumulada.....	22
Figura 9: Função de distribuição para o primeiro tempo de retorno. A inclinação da reta é -1.59 e seu erro é de 0.02.	23
Figura 10: Função de distribuição para as distâncias entre atividades consecutivas. A inclinação da reta é -3.21 e seu erro é de 0.05.....	24
Figura 11: Distribuição de frequência para distâncias euclidianas entre consecutivas mudanças nos nós.	27
Figura 12: Distribuição dos valores dos nós, barreiras, a 5 distintos níveis de ruído Tipo 1.	28
Figura 13: Distribuição dos valores dos nós, barreiras, a 5 distintos níveis de ruído Tipo 2.	29
Figura 14: Distribuição do tamanho das avalanches com ruído Tipo 1.	30
Figura 15: Distribuição do tamanho das avalanches com ruído Tipo 2.	30
Figura 16: Distribuição dos valores dos maiores nós no estado estacionário (triângulos pretos) sem ruído e também dos valores a três distintos níveis de ruído Tipo 1.	31
Figura 17: Somatório do valor absoluto da diferença entre bins equivalentes para a distribuição da fig.16.	32

Figura 18: Dependência no tempo dos valores mais elevados em um sistema 300x300.	33
Figura 19: Tempo para atingir o plateau em função do tamanho do sistema.....	34

RESUMO

Neste trabalho, exploramos as diferentes respostas de um modelo simples de criticalidade auto-organizada a partir da inserção de diferentes tipos de ruído, com o objetivo de entender em quais situações haverá, de maneira mais efetiva, a degradação da lei de potência da distribuição de tamanhos dos eventos.

O maior interesse seria entender esse comportamento e procurar maneiras para evitar que a energia acumulada represente um grande desafio, isso é, evitar que eventos catastróficos possam ser gerados como terremotos e tempestades magnéticas. Para isso, a geração de eventos menores com certa frequência seria a solução, dificultando que a energia se acumule ao ponto de gerar tais eventos.

Obtivemos leis de potências para a distribuição de distâncias entre atividades subseqüentes assim como para as avalanches, o que, junto com as leis de potências achadas para o primeiro tempo de retorno das próprias avalanches, serve como uma evidência de um estado crítico na base de tal fenômeno e, dado que nós não introduzimos um mecanismo de sintonização fina, de criticalidade auto-organizada. Comparamos os nossos resultados com leis de potências já encontradas por nosso grupo em distribuições de distúrbios geomagnéticos assim como com os dados experimentais da literatura atual para *solar flares*. Foi encontrado um bom grau de concordância e os resultados fazem parte de uma publicação (Meirelles et al., A simple 2D SOC model for one of the main sources of geomagnetic disturbances: Flares. Physics Letters. A, v. 374, p. 1024-1027, 2010).

Serão apresentados alguns resultados deste modelo 2D, sob o efeito de dois tipos de ruídos no estado estacionário alcançado pelo mesmo.

Palavras-chave: Lei de potência, tempestade geomagnética, criticalidade auto-organizada e ruído.

ABSTRACT

In this work we study the response to noise of a simple model of self-organized critically by inserting two different types of noise, with the aim of understanding how the degradation of power-laws in distribution functions of event sizes is most effectively obtained.

The major interest is to understand this behavior and find how to prevent the accumulated energy to represent a threat, in other words, to prevent the generation of catastrophic events such as earthquakes and magnetic storms. For this, the insertion of minor events can be a solution, not allowing the energy to accumulate to the point of generating such events.

We obtained power laws for the distribution of distances between successive events and also for the avalanches, which, together with the power laws found for the first return time of the same avalanches, serve as evidence for a critical state on the basis of such phenomenon and, since we didn't introduce a mechanism of fine tuning, of self-organized criticality. We compare our results with power laws already found by our group for the distributions of geomagnetic disturbances and, based on published experimental data, of solar flares. A really good concordance was found and the results are part of a publication (Meirelles et al., A simple 2D SOC model for one of the main sources of geomagnetic disturbances: Flares. *Physics Letters. A*, v. 374, p. 1024-1027, 2010).

The results of this 2D model will be presented using two types of noise in the stationary state reached by the model.

Keywords: Power law, geomagnetic storms, self-organized criticality and noise.

1 INTRODUÇÃO

O ser humano desde o início de sua existência tenta compreender o funcionamento de cada coisa pertencente à Terra. No começo essa busca pelo conhecimento foi gerada pela necessidade de sobrevivência básica, como o que deveria fazer para suportar o frio e construir abrigos para se proteger de animais. Ao longo do tempo certos questionamentos foram evoluindo assim como nós e passamos a ter a necessidade de criar modelos para compreender melhor o sistema no qual vivemos. Hoje em dia ainda nos encontramos nessa busca interminável pela sobrevivência, porém em outra escala de dimensão macro e micro: a vontade de construir objetos minúsculos a fim de salvar vidas em cirurgias extremamente delicadas ou, como de sobreviver à gigante Estrela Mãe que tanto nos possibilitou a vida mas que em um futuro geologicamente próximo nos trará incertezas sobre a nossa existência.

O desejo e a curiosidade por querer compreender melhor a estrela do nosso sistema solar e montarmos uma perspectiva do futuro de como a Terra reagirá às suas mudanças, nos levou a este trabalho.

A base para esse trabalho começou com um estudo feito por Per Bak, Chao Tang e Kurt Wiesenfeld (**BTW**), em 1987, que introduziu o conceito de criticalidade auto-organizada (SOC) em um sistema dinâmico: o modelo da pilha de areia. A ideia consiste em inserir grãos de areia em uma região plana. Com o decorrer do tempo esses grãos vão se acomodando gerando uma pilha. Em um dado instante, um grão, ao tocar a pilha, vai gerar um desmoronamento da mesma. Um único grão tem a capacidade de levar consigo mesmo outros muitos grãos, uma avalanche. Com isso, Eldredge et al em 1982 constaram que a pilha de areia possui um comportamento de equilíbrio entrecortado (*punctuated equilibrium*), onde períodos de calmaria são interrompidos por deslizamentos aleatórios.

Esses períodos de calmaria são atingidos após um longo tempo de não atividade no sistema, se tornando estável. Per Bak denominou esse efeito de *estado crítico*, que em qualquer momento ele poderia ser reconfigurado se tornando auto-organizado novamente após um longo período, gerando assim um ciclo. Esse sistema é contrário aos sistemas gaussianos nos quais a probabilidade decai exponencialmente com o tamanho do evento.

Em 1987, Per Bak e Kim Sneppen propuseram um modelo evolutivo, tendo como base as ideias evolutivas de Darwin, chamado de *modelo Bak-Sneppen (BS)*. Esse modelo estuda o comportamento das espécies em um ecossistema e suas interações em uma escala de tempo muito grande, onde as espécies menos adaptadas seriam eliminadas do sistema e outras sofreriam mutações. Este modelo foi originalmente introduzido para explicar as extinções catastróficas em massa durante a história da Terra.

Assim como na biologia, essas teorias podem ser abordadas em diversos outros tópicos, como na neurobiologia, sismologia, economia e como no caso a ser estudado aqui, no estudo de tempestades magnéticas.

Também fomos influenciados pela nossa curiosidade eterna e resolvemos estudar aquilo que mais nos gera incerteza, o Sol. Com o intuito de fazer uma análise comportamental de sua superfície, procuramos a partir de modelos, simular uma atividade solar gerada pelo campo magnético lá existente. Essa atividade seria o *flare solar*.

O intuito deste trabalho é poder estudar melhor a geração dos flares para, em um futuro próximo, explorar seu efeito nas tempestades, para que possamos melhor compreendê-las. A partir da criação de um modelo é possível analisar os resultados obtidos e tentar simular situações cada vez mais reais, podendo assim proporcionar um melhor monitoramento contínuo do clima espacial tornando-se necessário o estudo do funcionamento geral do Sol, suas estruturas, reações físico-nucleares e do estudo de sua interação com o meio interplanetário.

2 ÁREA DE ESTUDO – SOL

2.1 Introdução

Seria ele nosso aliado ou nosso inimigo? Muitas vezes nos deparamos com essa questão e quanto mais pensamos mais parece que nos afastamos da resposta. Grande parte do que temos hoje é devido a ele, ao calor que dele emana fazendo com que nosso planeta não seja um enorme rochedo gelado perdido no universo, permitindo o surgimento de vida neste gigante. Obviamente, nada disso existiria se ele não trabalhasse em conjunto com a força que o nosso planeta possui, o campo geomagnético.

Entretanto, mudanças no Sol são observadas e incertezas começam a ser geradas. Quem diria que essa estrela geradora de vida poderia um dia vir a acabar com sua própria cria?

No presente capítulo uma revisão bibliográfica será feita sobre as características gerais do Sol.

2.2 Características Gerais do Sol

O Sol é uma estrela esférica de gases quentes emanando radiação, de classe espectral G2 V, com idade $\sim 4.55 \times 10^6$ anos. Tendo um volume de $1.406 \times 10^{18} \text{ km}^3$ e massa de $1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$, com esse volume ele comportaria aproximadamente 1.300.300 Terras dentro dele.

Seus polos, que demoram ~ 27 dias para dar uma volta completa, giram mais devagar que o equador, que demora 24 dias. Esse é um dos motivos pelo qual o campo magnético é formado.

TABELA 1: Informações Gerais do Sol. Modificado de (Volker Bothmer, International Advanced School on Space Weather Modelling and Application, ICTP 2010).

Distância com a Terra	149.6 milhões de Km
Massa	1.989×10^{30} kg
Volume	1.412×10^{27} m ³
Densidade do núcleo	151300 kg m ⁻³
Densidade média	1409 kg m ⁻³
Pressão no núcleo	2.334×10^{11} bar
Pressão na superfície	0.0001 bar
Temperatura na superfície	5780 K
Idade	4.55 bilhões de anos
Tempo de vida	5 bilhões de anos
Produção de energia	3.9×10^{23} kW
Luminosidade	3.854×10^{26} J s ⁻¹
Composição química	92.1% Hidrogênio, 7.8% Hélio, 0.1% outros elementos
Sistema estelar mais próximo	Alpha-Centauri

2.3 Estrutura Interna do Sol

O interior do Sol é dividido em três regiões: núcleo, zona radiativa e zona convectiva, sendo elas diferenciadas pela densidade e temperatura. Essas regiões são invisíveis a olho nu e são estudadas com neutrinos, pois eles praticamente não interagem com quase nada.

2.3.1 Núcleo

O núcleo é a fonte de energia do Sol, tendo densidade e temperatura variáveis com 7×10^6 °C no limite com a zona radiativa e 15×10^6 °C no seu centro, gerando um ambiente propício para que reações nucleares ocorram.

Essas reações nucleares convertem a cada segundo 700 milhões de toneladas de hidrogênio em hélio, liberando luz, calor e radiação. Isso acontece porque em altas temperaturas a estrutura dos átomos é quebrada e suas partes constituintes, que são os prótons (carga positiva), elétrons (carga negativa) e nêutrons, liberadas, proporcionando assim a criação do plasma, termo introduzido por Irving Langmuir em 1928, que representa a ionização total de um gás. Essa ionização ocorre a partir do momento em que o gás se encontra com temperaturas altíssimas de tal forma que as colisões entre os átomos são suficientemente intensas a ponto de conseguir arrancar o elétron dele, ou até mesmo serem arrancados por campos elétricos ou radiações. Por ele ser rarefeito é muito difícil que os elétrons consigam se recombinar novamente.

2.3.2 Zona Radiativa

As fissões que ocorrem no núcleo liberam energias extremamente altas que percorrem o interior solar até chegar à camada mais exterior e o melhor meio de deslocar essa energia perto do núcleo é via radiação, em sua grande maioria, raios gamas, os fótons.

Essa região é a zona radiativa que se encontra circundante ao núcleo. Por possuir uma temperatura um pouco mais fria que a do núcleo, 2×10^6 °C, os átomos conseguem se manter intactos proporcionando uma absorção de radiação e

liberando-a depois de um certo tempo, como uma nova radiação. Por mais que eles viajem na velocidade da luz, os choques com outras partículas pré-existent acabam fazendo com que os fótons demorem aproximadamente um milhão de anos para sair desta zona, pois suas trajetórias acabam sendo interferidas gerando um movimento aleatório entre eles, não somente o de saída da camada.

2.3.3 Zona Convectiva

Após a energia ter sido liberada da zona radiativa os fótons penetrarão em uma nova camada, com características diferentes da anterior. A zona convectiva é bem mais fria, 5.427°C , resultando em átomos mais intactos, dificultando que o transporte mais eficaz de energia seja por radiação.

Devido a essa grande diferença de temperatura o plasma mais quente na parte superior da zona radiativa sobe enquanto o plasma mais frio afunda, gerando a zona convectiva. Nesta região as partículas são transferidas muito mais rapidamente, sendo esse o principal processo de transporte de energia até a superfície solar.

2.4 Estrutura Externa do Sol

A estrutura externa solar é compreendida pela fotosfera, a cromosfera e a corona solar, sendo estas as únicas regiões que se tornam visíveis, tendo como resultado de suas atividades a emissão constante do vento solar no meio interplanetário.

2.4.1 Fotosfera

É uma camada muito fina que faz parte da atmosfera solar de onde praticamente toda a luz que vemos é oriunda, tornando-a a camada mais conhecida, tendo uma temperatura de $\sim 3427^{\circ}\text{C}$.

Nela podem ser vistas manchas solares e grânulos. Os grânulos são oriundos do material quente que ascende da zona convectiva. A mistura de grânulos frios e quentes gera a imagem de granulação.

As manchas solares são regiões ativas com um campo magnético muito alto e temperaturas mais baixas em relação o seu redor, é por esse motivo que as vemos escuras. Geralmente elas são feitas por duas manchas, uma com campo magnético positivo e outra com campo magnético negativo.

2.4.2 Cromosfera

A cromosfera é localizada acima da fotosfera e possui uma espessura de ~ 2500 Km, com temperaturas variando de 6.000°C a 20.000 °C em sua parte mais alta. Geralmente não é vista, pois a luz emitida pela fotosfera bloqueia a nossa visão, mas ela pode ser vista quando há ocorrência de eclipses solares na forma de anéis de cores avermelhados devido à presença das linhas emitidas pelo hidrogênio, ou por erupções solares.

2.4.3 Zona de Transição

É uma região extremamente fina de ~100 Km que fica entre a cromosfera e a corona solar. A elevação da temperatura é absurdamente rápida, indo de 20.000 °C até 1×10^6 °C, ainda não sendo bem compreendido o porquê desta rápida elevação.

2.4.4 Corona Solar

É a região mais externa do Sol e muito fina, formada por três camadas: K-corona, F-corona e L-corona. Pode ser vista da Terra somente quando ocorre um eclipse total solar ou com telescópios com dispositivo coronógrafo. Devido a sua alta temperatura, de 1×10^6 °C podendo chegar a 2×10^6 °C, os gases se encontram altamente ionizados, plasmas que são continuamente emitidos para o espaço, conhecidos como vento solar.

Na corona solar existem os buracos coronais que são regiões menos densas e mais frias em comparação com sua área circundante. Quando esses buracos estão voltados para a Terra, a intensidade da incidência do vento solar aumenta.

2.4.5 Vento Solar

Milhões de toneladas de plasma são ejetadas para o espaço com uma velocidade de 400 km/s em momentos de calmaria no Sol, atingindo 1.700 km/s em períodos altamente perturbados (os ventos mais rápidos geralmente ocorrem nos mínimos solares). O vento lento possui uma densidade maior enquanto o rápido possui uma densidade mais baixa, entretanto ambos gastam a mesma energia.

Ao sair do Sol o vento solar viaja com uma velocidade supersônica, isso é, viaja mais rápido que as ondas nele, porém a partir de certa distância, da qual ainda não se sabe qual é o tamanho, o vento solar deixa de ser supersônico.

3 CLIMA ESPACIAL

O clima espacial é uma incógnita eterna, pois ele irá variar conforme a atividade de seus “habitantes”, se eles estão mais calmos ou se estão em períodos mais perturbados.

Ao longo do tempo as atividades solares provocam mudanças no seu plasma e conseqüentemente nas partículas ao seu redor assim como as mudanças ocasionadas por outras atividades interplanetárias. Essas mudanças inevitáveis se tornam controladoras do clima espacial que por sua vez nos afeta diretamente.

3.1 Proeminência

A proeminência é um filamento bem grande que se estende da superfície do Sol, fotosfera, até a porção mais externa, corona solar. Sendo composto essencialmente de hidrogênio e hélio em abundância e extremamente quente. Este filamento pode chegar a persistir por meses sem acontecer nada com ele, se mantendo intacto até que por algum motivo ele se torna instável, se rompendo e liberando uma enorme quantidade de material no espaço, as CME's.

3.2 Flare Solar

Flare pode ser definido como uma liberação repentina de energia, radiação eletromagnética, supostamente vinda da reconexão dos loops magnéticos na corona solar (Bershanskii, 2003). A chave para entender a formação dos flares solares está na compreensão das estruturas magnéticas do Sol. A liberação abrupta de energia é dada a partir do momento que as linhas de campo ao redor de uma mancha solar se enrolam, de tal forma chegando a se romperem, e gerando novas reconexões, liberando assim o material que elas carregam.

Existem dois tipos de flares: os graduais e os pontuais. Os pontuais ocorrem com uma frequência muito maior e geralmente aparecem perto do equador solar, já os graduais ocorrem mais nos polos e acabam provocando ejeção coronal de massa, pois os eventos tendem a durar dias enquanto o pontual dura horas ou até mesmo minutos, sendo eles oriundos do disco visível.

A partir de medições deste cisalhamento do campo magnético ao redor das manchas se faz possível a predição de diversos flares.

3.3 CME

CME é basicamente o nome dado a uma catastrófica expansão de uma parte da corona solar resultando na ejeção de uma enorme quantidade de material do Sol para o exterior, de aproximadamente 1 a 10 milhões de toneladas ejetadas, a uma alta velocidade de milhões de milhas/s. Ao longo do seu percurso o campo magnético se fortalece, a temperatura dos prótons no plasma diminui e a velocidade geralmente fica ~1000 Km/s, demorando de 2 a 4 dias para alcançar a Terra.

Dependendo do local em que ela ocorra no Sol pode ou não nos afetar, pois vai depender do ângulo com o qual ela sai em relação com a Terra, se ela está na nossa direção ou não.

As CMEs no meio interplanetário são chamadas de ICMEs e sua quantidade produzida vai depender da fase em que se encontra o ciclo solar (Webb, 1994), no máximo solar são ± 5 CMEs por dia.

3.5 CIR

A CIR, *Corotating Interaction Regions*, é uma estrutura interplanetária gerada quando a partir de um buraco coronal é extrudido um vento solar rápido que por sua vez acaba interagindo com um vento solar lento. Acredita-se que esta interação possa gerar uma tempestade magnética, pois o campo magnético e a temperatura dos prótons no plasma é alta na região do choque.

3.4 SEP

Toda essa liberação de energia na atmosfera solar, seja ela da maneira que for, acaba envolvendo diversos outros tipos de elementos como íons de ferro, magnésio, néon, carbono, nitrogênio e oxigênio, que ao sofrer uma aceleração para altas energias acabam se transformando em raios cósmicos.

4 TEMPESTADE MAGNÉTICA

O campo magnético da Terra é perturbado diariamente pelo IMF, campo magnético interplanetário, podendo ele ser oriundo do Sol ou de outra fonte interplanetária. Entretanto aquelas que são mais efetivas em perturbar o nosso campo geomagnético são as ejeções oriundas do Sol. Na figura 1 um diagrama das duas principais emissões solares, de massa (vento solar, CME e CIRs) e eletromagnética (flare solar e irradiação), seus efeitos e regiões que atingem. Os GCRs são os raios cósmicos galácticos.

Durante o máximo solar as CMEs são as principais responsáveis pelas variações do campo geomagnético (Burlaga et al, 1981) e durante o mínimo solar as CIRs ocorrem com mais frequência, havendo um predomínio dos buracos coronais .

Esta perturbação pode gerar uma tempestade geomagnética e a ocorrência ou não dela vai depender da velocidade (V_x) com que o flare solar se chocou com a magnetosfera e da componente vertical do campo magnético do vento, que deve estar contrário ao campo magnético da Terra, isso é, vertical para baixo (B_z negativo) por um bom tempo (Gonzalez, 1994). É raro, mas pode acontecer de sair um evento do Sol com um campo y e no meio do caminho virar um campo x devido à interação com outros eventos no meio interplanetário, como por exemplo, um feixe rápido. Esse encontro gera uma pressão, transformando-o.

O flare solar começa a perturbar o campo da Terra a partir do momento em que ele chega a uma região chamada de “cinturão de radiação” bem próximo às linhas do campo geomagnético onde as partículas carregadas ficam armazenadas. A Corrente de anel (RC) é gerada nessa região devido à movimentação dos íons e elétrons e sua variação provoca modificações no campo geomagnético. Quando o campo elétrico é forte o suficiente para fazer com que a corrente no RC aumente a um determinado valor, uma tempestade geomagnética é gerada.

A análise nessa região é feita pelo índice Dst (disturbance – storm time) que é um indicador de corrente no RC (Daglis et al, 1999) medidos na baixa latitude e sendo ele calculado a partir da variação horizontal do campo geomagnético em quatro observatórios próximos à linha do Equador. Índices de Dst maiores que -100nT são consideradas tempestades magnéticas intensas podendo chegar a menos de -300nT, que são geralmente associadas a CMEs. Outros fatores podem

variar o índice Dst como correntes de baixa latitude, devendo ser consideradas na análise da magnitude da tempestade.

Pode-se dizer que existem duas fases na caracterização da tempestade geomagnética: A fase principal no qual a energia do vento solar passa para o sistema magnetosfera-ionosfera e a fase de recuperação do campo da Terra, voltando à sua quietude. Na fase principal há um aumento da corrente no RC fazendo com que haja uma diminuição do índice Dst e durante a sua recuperação a corrente diminui.

Outra maneira de estudar a tempestade magnética, sem ser pelo índice Dst, é pelos os raios cósmicos. Quando eles encontram a atmosfera eles geram partículas de muons (partícula que Einstein usou na sua Teoria Relativista) e quando ocorre uma tempestade magnética os raios cósmicos diminuem. Por esse estudo ser feito na atmosfera, sai mais barato, porém a análise dos dados é mais difícil.

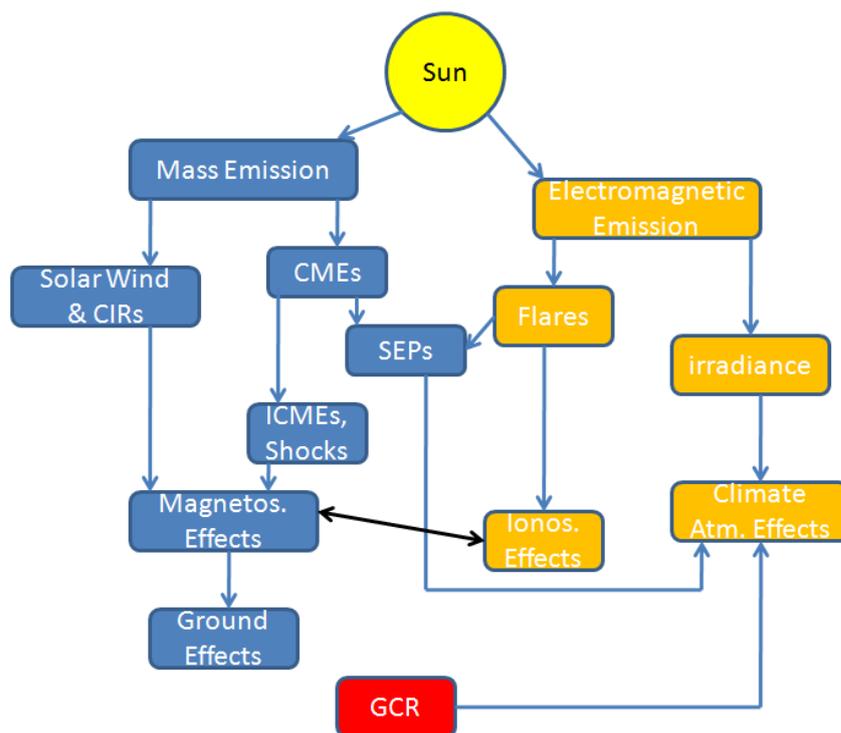


Figura 1: Diagrama das duas principais emissões solares, de massa. Fonte (Nat Gopalswamy, Kyoto Symposium 2007)

A perturbação então é dada pelo choque do plasma extraplanetário com a magnetosfera. Como os dois plasmas estão congelados, eles não se misturam, e é

por esse motivo que o vento solar confina a magnetosfera, dando aquele aspecto de uma cauda radial ao Sol. A penetração ocorre quando essa proteção falha, permitindo a passagem da energia das partículas do flare solar modificando o plasma e o campo magnético da magnetosfera. Logo, podemos dizer que a tempestade magnética é a resposta da magnetosfera aos fenômenos interplanetários.

Geralmente a penetração do campo externo ocorre na região frontal de choque e onde há o fechamento da cauda, conforme as setas vermelhas estão indicando na figura 2, nessas regiões onde a difusão é muito alta ocorre a reconexão magnética, permitindo que um plasma penetre no outro plasma, podendo chegar à ionosfera.

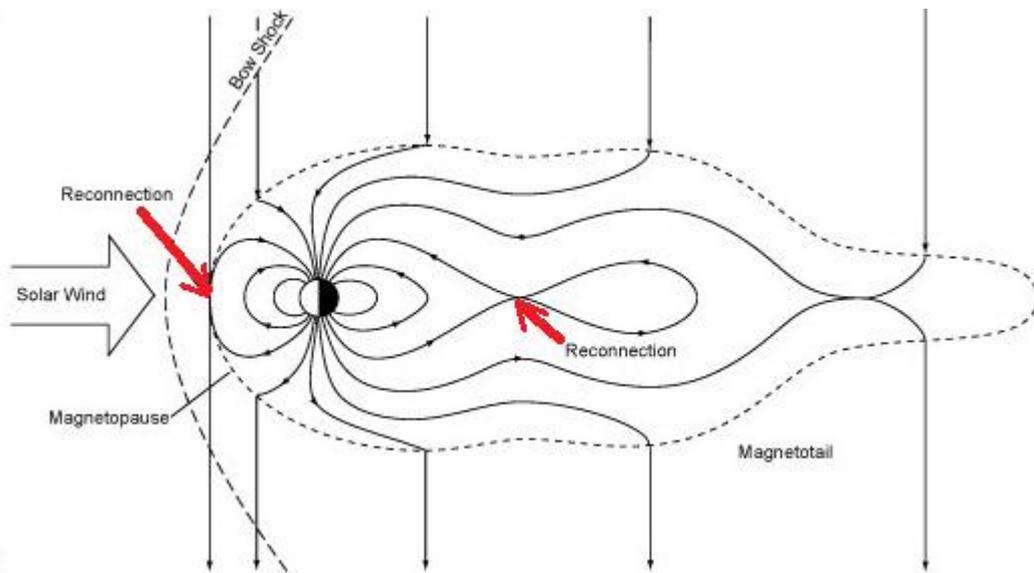


Figura 2: Demonstração de como se comporta a nossa magnetosfera.

Fonte: (Url:http://www.absoluteastronomy.com/topics/Geomagnetic_storm)

O choque de uma SEP acarreta em problemas no sistema espacial, aos passageiros em altas altitudes no avião e na atmosfera, enquanto um choque de uma tempestade magnética causa problemas no sistema espacial, magnetosfera, ionosfera, atmosfera e a Terra em si (solo).

5 METODOLOGIA

Tendo apresentado o mecanismo do Sol e suas estruturas, resolvemos nos focar nos *flares* solares e criar um modelo que simule a superfície do Sol. A ideia é simular os períodos de calma e turbulência para podermos assim entender melhor o seu comportamento, criando situações em que eventos de magnitude muito alta possam vir a ser evitados (como o incidente ocorrido em março de 1989 no Canadá no qual o Sol se encontrava em período de alta atividade, máximo solar).

O modelo foi criado por um algoritmo em Fortran 90 onde diversos resultados foram gerados com o intuito de analisar a resposta de cada um e ver se todos mantêm o mesmo caráter e o que fazer para que essa resposta seja alterada, isso é, que *flares* muito grandes (e as potenciais tempestades magnéticas intensas que eles possam provocar) não ocorram.

Há evidências experimentais de criticalidade auto-organizada em eventos solares já publicadas e é isso que procuramos encontrar nas repostas obtidas pelo nosso modelo, um simples modelo 2D de criticalidade auto organizada para *flares*.

5.1. Embasamento Teórico

O campo magnético que pode ser medido na superfície da Terra tem várias componentes principais: as de natureza interna (nas quais não estamos interessados no presente trabalho), as de natureza externa (em que vamos concentrar nossa atenção) e as de fontes atmosféricas (geralmente também impulsionadas por causas externas). Uma das mais intensas fontes de caráter externo é a atividade na superfície do Sol conhecida como *flares* solares.

A função de distribuição de energia dos *flares*, assim como a função de distribuição de fluxo e duração, segue leis de potência da forma:

$$f(E) = A.E^{-(1+\alpha)} \quad (1.1)$$

onde, $f(E)$ é a função de distribuição (a probabilidade de encontrar um *flare* com energia maior que E), A é uma constante de proporcionalidade e α é o coeficiente angular. Segundo Podlázov, 2002, para a energia $\alpha = 0,45$, para o fluxo $\alpha = 1,75$ e

para a duração $\alpha=0,6$. Entretanto, Yashiro et al, 2006, disseram que o expoente da distribuição irá depender da natureza do *flare*: com ejeção coronal de massa (CME) ou sem ejeção.

Ao aplicar a função logaritmo em cada lado da função encontraríamos uma equação linear da forma $y=ax+b$ da distribuição do evento. Sendo exatamente esta característica que estaremos procurando em nossos gráficos.

Ao contrário do que acontece nos chamados sistemas normais, onde as leis exponenciais são as distribuições usuais para o tamanho dos eventos, em sistemas que apresentam SOC (criticalidade auto-organizada) as distribuições do tamanho dos eventos são descritos por leis de potência. Do ponto de vista físico, a presença de leis de potência implica a possibilidade de ocorrência de eventos de grandes dimensões com probabilidade essencialmente diferente de zero.

Evidências experimentais de criticalidade auto-organizada (Bak, P., Tang, C., Wiesenfeld, K., 1987) em eventos de partículas solares foram recentemente publicadas por Xapsos et al, 2006. Eles usaram fluxos diários e mensais de prótons solares medidos pelos satélites IMP-8 e GOES durante um período de 28 anos a fim de demonstrar uma correlação de longo tempo dos eventos. Características fractais e funções de distribuição de leis de potência para magnitudes de fluxo e tempos de espera. A conclusão principal do trabalho foi que não é possível prever o tempo de ocorrência e a magnitude dos eventos das partículas solares dentro de limites curtos. Entretanto, a superfície do sol é um sistema suficientemente complexo que inclui diversos outros tipos de mecanismos que deixariam o problema da previsão com uma questão em aberto.

Provavelmente, as primeiras tentativas de modelar o comportamento dinâmico dos flares solares foram feitas por Lu e Hamilton, 1991, e Lu et. al., 1993. Eles modelaram a região ativa como uma rede cúbica com um campo magnético ligado a cada célula. Quando a diferença entre o campo de uma célula e o campo médio dos seus 6 vizinhos mais próximos excedessem um limite pré-definido, eles consideravam a célula como instável e a diferença era distribuída para as 7 células com alguma liberação de energia. O modelo evoluiu para um estado de criticalidade auto-organizada com funções de distribuição dos flares obedecendo a leis de potência com expoentes muito próximos dos verdadeiros.

Uma abordagem alternativa foi proposta por Podlazov e Osokin (2002). Eles introduziram um modelo de criticalidade auto-organizada bidimensional, 2D, de processos eruptivos baseados em um novo conceito: elementos magnéticos.

Sua abordagem permitiu descrever processos eruptivos na atmosfera solar com uma visão mais clara e simular mais facilmente suas propriedades básicas. O modelo produziu uma função de distribuição de lei de potência para a energia dos flares com boa concordância com as observações experimentais. Em poucas palavras, as regras para o modelo são: (i) a fixação de elementos magnéticos de sinais opostos e valores absolutos iguais a duas células aleatoriamente selecionadas, (ii) então, se a presença de elementos de sinais opostos acontecer na célula selecionada, um deles (mais uma vez selecionado aleatoriamente) é aniquilado com o elemento de entrada. O valor absoluto de aniquilação de elementos é reduzido a 1 (um) e se ele se tornar zero, é simplesmente aniquilado; (iii) esta aniquilação causa a simulação de uma onda de perturbação externa por tirar da célula todos os demais elementos e liberando-os em uma outra célula selecionada aleatoriamente entre seus 8 vizinhos mais próximos. Estas liberações podem causar novas aniquilações na célula modificada. As avalanches de aniquilações foram associadas aos flares e se em algum passo não houver mais nenhuma aniquilação, o modelo retorna para o primeiro passo (i), e assim por diante.

Uma das motivações para o presente trabalho é a conexão entre os eventos solares e as conexões do campo magnético com a Terra (Nitta, N.V., 2006) assim como as leis de potência já encontradas em funções de distribuição de campos geomagnéticos (Papa, A.R.R. et al., 2006 e 2008).

5.2 Modelo I

Aqui e agora nos beneficiamos com toda a experiência acumulada anteriormente. Entretanto, o modelo apresentado (gerado por mim e pelo grupo de pesquisa do Observatório Nacional) segue uma linha um tanto quanto distinta dos modelos apresentados.

No nosso modelo estamos simulando a superfície do Sol e suas estruturas magnéticas por uma matriz $L \times L$, onde diversos tamanhos de L foram testados com o intuito de observar o comportamento do sistema em proporções distintas, $L = 100$,

200 e 300. Dando-nos diferentes números de células, nós, em cada simulação de onde nós temos verificado para efeito de tamanho finito. Nós estamos explorando em conjuntos de pontos igualmente espaçados na superfície do Sol.

Em cada ponto desta matriz inicialmente atribuímos valores aleatórios entre 0 e 1, de unidade arbitrária, afim de simular a energia magnética acumulada em cada posição simulada da superfície do Sol.

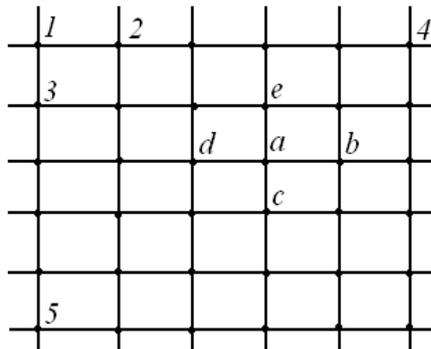


Figura 3: Superfície esférica do Sol representada por uma matriz $L \times L$.

A partir deste arranjo é que começamos a realizar as operações no nosso sistema quadrático onde condições periódicas de fronteiras foram usadas com o intuito de simular uma superfície essencialmente esférica por um toróide.

O primeiro e único passo é localizarmos a região mais propícia de acontecer uma explosão solar, flare, região essa que teria uma magnitude maior em relação às outras. Procuramos então na nossa matriz o maior valor em todo o sistema e assim que o encontrarmos mudamos ele, **a**, e seus quatro vizinhos mais próximos, **b**, **c**, **d** e **e** por outros novos valores aleatórios (Fig. 3). Com isso estaríamos simulando um fluxo de energia contínuo da superfície do Sol (esse é o motivo para escolhermos o valor mais elevado) e a reconexão de células vizinhas (a mudança da célula principal e de seus vizinhos). Ao mesmo tempo, a atribuição de novos valores aleatórios aos valores mais elevados e aos seus vizinhos, funciona como uma liberação contínua de energia do sistema.

Este processo é repetido diversas vezes (geralmente de 10^6 a 10^8 vezes) de modo a obter distribuições estacionárias para as quantidades que estamos interessados, e também para obter uma boa confiabilidade em nossos dados para uma análise estatística mais precisa.

Fazendo isso, o sistema alcançaria a criticalidade auto-organizada no qual após diversas alterações o sistema estaria suscetível a pequenas modificações, conforme demonstrado no modelo da pilha de areia.

Tendo sido ele construído desse jeito, nosso modelo se qualifica como um modelo Bak-Sneppen (Bak, P., Sneppen, K., 1993). O modelo Bak-Sneppen (BS) provavelmente é o modelo mais simples apresentando criticalidade auto-organizada, isto é, a tendência para um estado crítico estacionário sem a necessidade de uma sintonização fina.

O modelo BS é um modelo geral que tem encontrado aplicações em um largo de campos entre os quais podemos mencionar a evolução (Bak, P., Sneppen, K., 1993), cérebro (da Silva, L., 1998), o espectro dos raios cósmicos (Stenkin, Yu.V., 2005) e explosões de raios-X na superfície do Sol (Bershadskii, A, 2003).

Muitos esforços geofísicos têm sido dedicados a caracterizar o modelo Bak-Sneppen de diversos pontos de vista. Exemplos deles são: suas correlações de análise de flutuação (Ma, K., 2005), prejuízos espalhados sobre ele (Bakar, B., 2008), e seu comportamento sob uma redução próxima a dimensão zero.

Note que no modelo simplificado aqui apresentado não deve ser esperado uma descrição detalhada do sistema, mas apenas alguns detalhes e, em particular, a classe de comportamento universal exibida pelo sistema real do qual o modelo representa.

5.2.1 Resultados Iniciais

Começando com uma distribuição arbitrária das energias magnéticas acumuladas em cada célula, a atividade subsequente será completamente não correlacionada no tempo e espaço. Porém ao longo do tempo (e em conjunto a energia média acumulada decresce em consequência do processo de seleção e das mudanças dos valores mais elevados) será mais e mais provável que os vizinhos mais próximos sejam consecutivamente alterados.

Depois de um transiente o sistema atinge o estado estacionário caracterizado por uma distribuição de degrau para as energias acumuladas e um limiar E_c para a distribuição das maiores barreiras, conforme pode ser observado na figura 4.

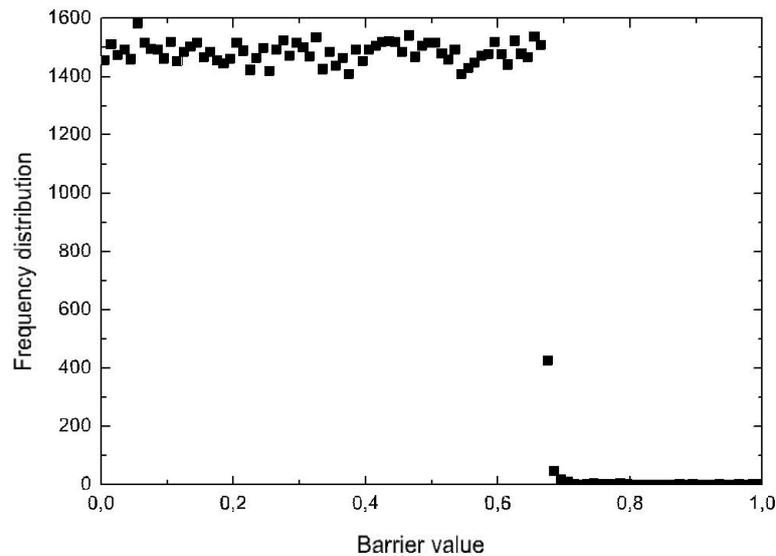


Figura 4: Função de distribuição para os valores das barreiras no estado estacionário. O ponto de valores de frequência de cerca de 400 ocorrências aparece em apenas um artefato do tamanho escolhido do bin (0.01), na verdade, todos os valores a cima de 0.67 são essencialmente zero.

A análise de maior importância é a análise das avalanches onde definimos o seu tamanho como sendo o número de atividades consecutivas acima de 0.7 relacionadas à mesma cadeia de mudanças de células ligadas através de um único agrupamento. Desta forma, um único elemento pode iniciar uma reação em cadeia (avalanche) que vai parar apenas quando todos os elementos apresentarem energias abaixo do limiar.

Figura 5 mostra a função de distribuição do tamanho das avalanches onde parece seguir uma lei de potência, reforçando a ideia de eventos correlacionados em geral e de um estado crítico em particular.

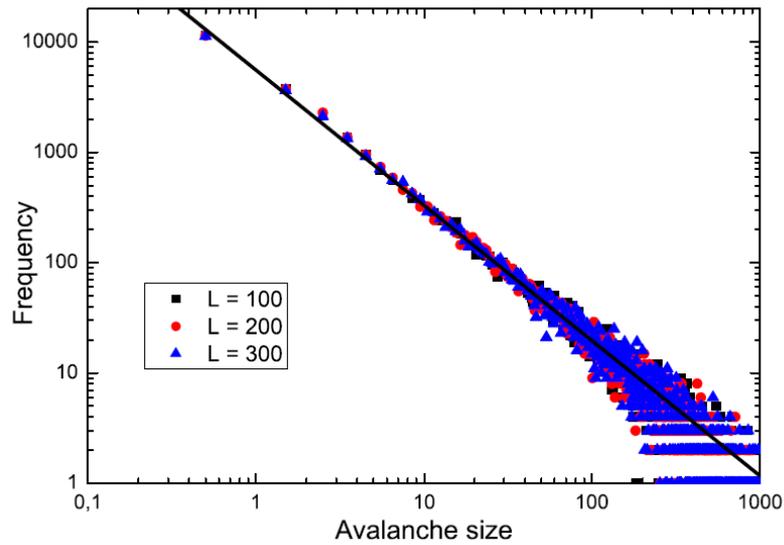


Figura 5: Função de distribuição de atividades continuamente relacionadas acima de 0.7 no estado estacionário. Retta com uma inclinação de -1.22 e erro de 0.02.

O resultado da figura 5 é o mais apropriado para ser comparado com os dados experimentais porque é aquele com o significado físico mais claramente observado. É análogo a duração dos flares, que é um dos estudos disponíveis mais detalhados experimentalmente. O valor da inclinação da linha reta é de -1.22 e este valor também pode ser comparado com resultados experimentais.

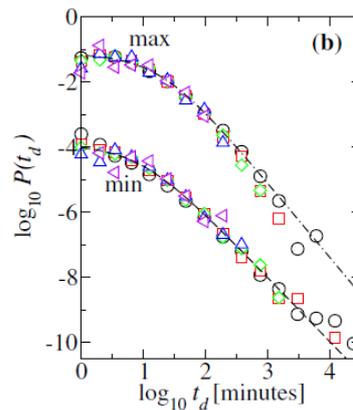


Figura 6: Distribuição da duração dos flares no mínimo e máximo do ciclo solar. (Baiesi et al., 2006)

Por exemplo, consideramos as caudas da figura 2 (b) do trabalho de Baiesi et al., 2006 (figura 6) e calculamos os valores de inclinação das caudas da função de distribuição de probabilidade de duração dos flares no máximo e mínimo solar, achando os resultados -1.3 e -1.0, respectivamente. Este intervalo inclui o valor de -1.22 encontrado na nossa simulação.

A distribuição das energias mais altas desaparece abaixo do limiar da criticalidade auto-organizada (Fig. 7).

Percebe-se que os valores iniciais mais altos no sistema estavam em torno de 1, isso é, no início das atividades solares do nosso marco zero. Após um milhão de iterações o maior valor cai para em torno de 0.65, devido à estatística de que os valores tendem a diminuir conforme ele é selecionado e trocado por valores aleatório entre 0 e 1.

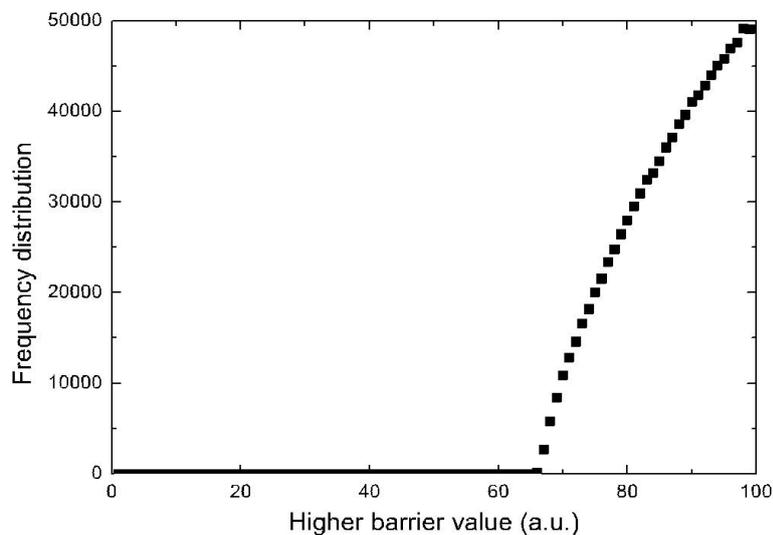


Figura 7: Função de distribuição para os valores das barreiras mais elevadas (valores do eixo horizontal multiplicados por 100 somente por estética).

Percebe-se que os valores iniciais mais altos no sistema estavam em torno de 1, isso é, no início das atividades solares do nosso marco zero. Após um milhão de iterações o maior valor cai para em torno de 0.65, devido à estatística de que os valores tendem a diminuir conforme ele é selecionado e trocado por valores aleatório entre 0 e 1.

Sabendo que toda célula possui a mesma característica logo, comportamentos semelhantes, a figura 8 mostra os valores consecutivos de uma célula arbitrariamente escolhida. Simulando como uma única região na superfície do Sol se comporta entre períodos de extrema atividade e períodos de calma após um milhão de iterações, isso é, um milhão de explosões solares, flares.

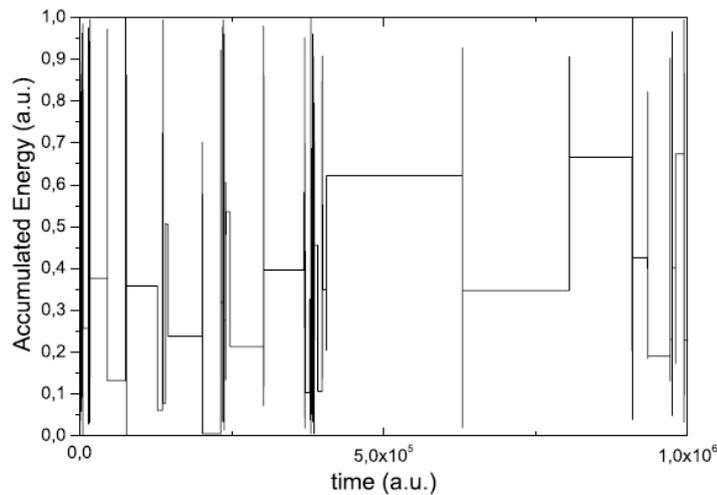


Figura 8: Valores consecutivos de uma única energia acumulada.

Se um período de grande atividade for expandido, a imagem parece ser da mesma forma apenas em outra escala de tempo (demonstrando um caráter fractal). O tempo decorrido entre uma mudança numa certa posição e a próxima mudança nesta mesma posição é chamado de primeiro tempo de retorno.

Na Figura 9 mostramos a função de distribuição para a probabilidade do primeiro tempo de retorno obtida pelo nosso modelo. Ela segue uma lei de potência com expoente -1.59 . Nós podemos comparar este valor com alguns resultados experimentais anteriores, como por exemplo, a figura 2 do trabalho de Arcangelis et al, 2006, que apresenta o intervalo de tempo t entre consecutivas explosões solares para o catálogo do GOES (Geostationary Operational Enviromental Satellite) ([Url:ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLARDATA/SOLARFLARES](ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLARDATA/SOLARFLARES)). Calculamos as inclinações das retas delimitadoras dos dados (que corresponde ao mínimo e ao máximo em um ciclo solar). Os resultados de Arcangelis et al,2006, foram -1.8 e -1.5 enquanto o nosso foi -1.59 , estando dentro deste intervalo. Este resultado também é muito próximo ao valor -1.51 encontrados na figura 4 do trabalho de Baiesi et al, 2006, para um mínimo solar.

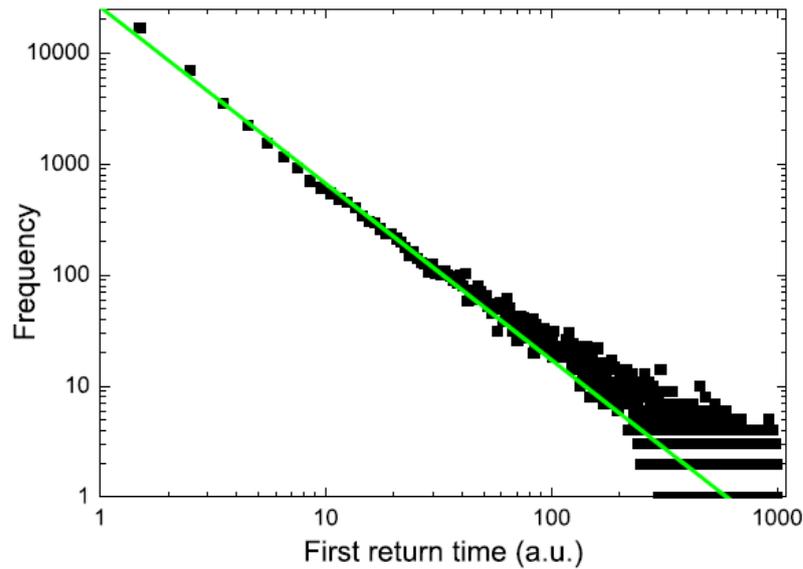


Figura 9: Função de distribuição para o primeiro tempo de retorno. A inclinação da reta é -1.59 e seu erro é de 0.02.

Como mencionado anteriormente, os eventos no estado estacionário também se tornam correlacionados no espaço. Mostramos na figura 10 a distribuição euclidiana de distância entre atividades subsequentes das células. Observa-se que erupções mais próximas umas das outras ocorrem com uma frequência maior do que aquelas mais distantes. Levando-nos ao princípio do fluxo contínuo de energia, onde a região proximal à zona de liberação de energia estaria mais suscetível à ocorrência de uma nova explosão. A linha reta que se segue é a impressão digital do estado crítico em que acreditamos que o sistema está simulando e sua inclinação é -3.21.

Tal como no resto das simulações os resultados não dependem das condições iniciais indicando assim que o estado crítico é um atrator global para a dinâmica, por isso é auto-organizado. Infelizmente, não encontramos resultados experimentais para comparar com estes resultados obtidos pela nossa simulação. Neste ponto vale ressaltar que as análises experimentais de funções de distribuição de probabilidade de quantidades físicas assim como o tempo de espera devem ser feitas com muito cuidado porque elas supostamente incluem dados que devem ser parcialmente extraídos de um lado do Sol que em alguns momentos não enfrenta a Terra. Deste modo, sua confiabilidade é comprometida pela falta de diversos eventos.

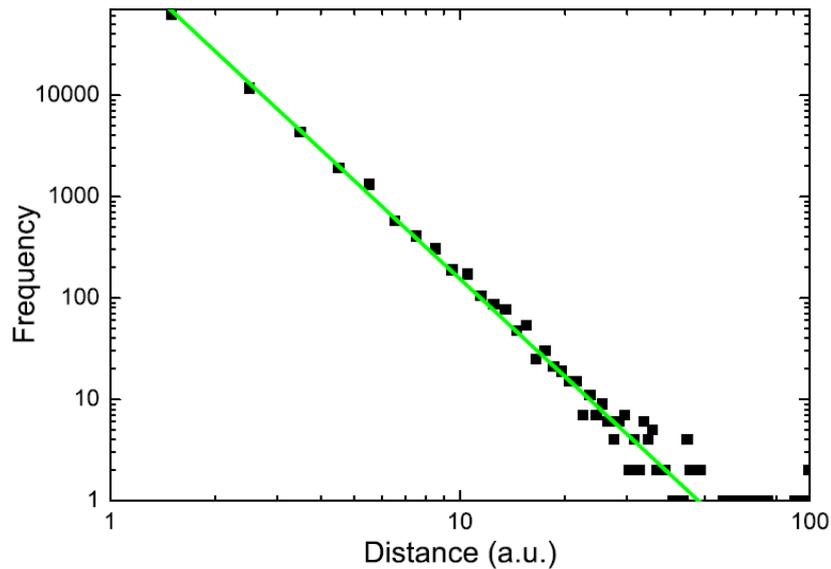


Figura 10: Função de distribuição para as distâncias entre atividades consecutivas. A inclinação da reta é -3.21 e seu erro é de 0.05.

Um problema semelhante está presente nas inversões do campo magnético do núcleo (Merril, R.T., 1988) onde extensivos estudos têm sido direcionados para resolver a possível incompletude de dados. Este não é o caso para quantidades físicas localmente determinadas (como a energia do flare ou sua duração) onde no pior caso nós temos metade dos dados possíveis e os dados faltosos não afetam a relevante função de distribuição de probabilidade.

Vale ressaltar que todos os resultados foram gerados considerando $L=100$, tendo visto que os resultados com $L=200$ e 300 chegavam ao mesmo resultado demorando somente um pouco mais para o sistema alcançar o estado estacionário.

Até agora nós obtivemos um único regime de lei de potência para cada simulação. No entanto, existem resultados anteriores que indicam a existência de diferentes regimes de lei de potência dependendo da existência de ejeção coronal de massa ou não (Espírito Santo, M. A., 2011). Há também resultados indicando a existência de um duplo regime de lei de potência na distribuição de frequência do período de tempo entre eventos de mesma intensidade para distúrbios geomagnéticos (Lindman, M., 2006). O fato notável é que a distribuição do duplo regime é uma curva contínua indicando um fenômeno único na base dos dois regimes.

Provavelmente existe um limite de energia que pode ser liberada sem CME e este limite deve ser bem próximo à energia mínima dos flares com relevantes CMEs

(que nos permite sua detecção). A introdução de um tempo morto para flares (ou seja, um tempo durante o qual não é possível ocorrer liberação de novos flares por causa dos danos causados na corona pela CME) provavelmente levaria a leis de potência só que com outros expoentes. No entanto, a inclusão de ambos os tipos de fenômeno em uma única simulação requer, necessariamente, modelos mais elaborados.

5.3 Modelo II

No modelo II vamos explorar a resposta do sistema à inserção de ruído com o objetivo de aprender as maneiras pelas quais a degradação da lei de potência é mais efetiva em funções de distribuição do tamanho dos eventos.

Introduzimos dois tipos de ruído na simulação: um ruído local (apenas de forma sistemática e aleatória mudando algumas barreiras com uma dada frequência) e um ruído global (mudando ligeiramente o valor de todas as barreiras com certa frequência).

O objetivo deste novo modelo é buscar por um método que permita desencadear eventos catastróficos antes que a energia acumulada se torne eficiente o suficiente para representar um desafio e causar danos maiores.

O desencadeamento de terremotos é uma questão de longa data e tem sido estudada sob vários pontos de vista, pelo desencadeamento e sincronização de deslizamento de vara (Chelidze, T., 2006), através da cumulativa liberação de tensão de Benioff (Kawada, Y., 2006), através do estudo da distribuição espacial e temporal de terremotos (German, V.I., 2006) (Corral, A., 2006) (Jonsdottir, K., 2006) (Lindman, M., 2006), através de uma série de tremores secundários (Ruiz, M., 2006) e muitos outros que incluem desde a meteorologia até terremotos engatilhados (Kraft, T., 2006) (Fischer, T., 2006). Na parte norte do Brasil foram relatados terremotos supostamente disparados por pocos e lagos artificiais.

Enquanto todos os trabalhos anteriores estudaram as formas naturais possíveis de desencadear terremotos, o presente trabalho é a primeira tentativa (ao melhor do nosso conhecimento) de propor ações voluntárias do homem a fazê-lo. No caso do terremoto fica mais fácil a visualização de como efetuar essas ações como, por exemplo, podemos gerar tremores de baixa magnitude a fim de evitar

terremotos catastróficos enquanto que a visualização de desencadeamento das altas acumulações de energia na superfície do Sol seja um pouco mais difícil, por agora, de se tornar real pelo ser humano.

Esta segunda metodologia envolve o estudo de características dinâmicas do sistema. Em particular, procuramos obter o tempo que leva para um sistema no estado de criticalidade auto-organizada se transformar em um sistema desordenado, e o tempo que leva para um sistema desordenado alcançar a criticalidade auto-organizada novamente. Em modelos mais realísticos (e em um sistema real) isso serviria para avaliar o tempo necessário, sob efeito de ruído, para o sistema abandonar o estado de criticalidade auto-organizada, isto é, quando nenhum evento extremamente destrutível seria esperado.

Para estudar a resposta dos sistemas à inserção de ruídos externos, foram introduzidos dois tipos. Vale ressaltar que todos os gráficos aqui presentes gerados para este modelo foram feitos com $L=300$, matriz 300×300 .

5.3.1 Ruído Local (Tipo 1)

O primeiro ruído a ser analisado, chamado de Tipo 1, quebra a regra de seleção (de escolher a barreira com o maior valor) a cada passo de tempo n (simulamos o sistema pra $n= 1, 10, 100, 1.000$ e 10.000) , que ao invés de selecionarmos o maior, selecionamos uma célula arbitrariamente e mudamos ele e seus quatro vizinhos mais próximos por novos valores aleatórios.

Com isso estaríamos simulando de forma mais realística o que realmente ocorre dizendo que não necessariamente a região que estaria mais propícia a ocorrer liberação energia irá liberar no momento esperado, pois outra região por algum outro motivo pode vir a liberar primeiro. No caso dos terremotos podemos dizer que se houver dinâmica de fluidos entre as camadas de sup-superfície um terremoto inesperado pode vir a acontecer.

5.3.2 Ruído Global (Tipo 2)

Este segundo ruído, chamado de Tipo 2, muda em uma pequena quantidade x todas as barreiras do sistema a cada número N de passos (mais uma vez

simulamos $N=1, 10, 100, 1.000$ e 10.000 e $-0.05 \geq x \leq 0.05$). Para cada barreira a ser mudada um valor de x é escolhido aleatoriamente dentro deste intervalo mencionado e somada a mesma, até todos os valores do sistema terem sido alterados. Após isso ter sido feito nós aplicamos a regra de seleção e atualização do sistema.

5.4 Resultados Finais

A priori realizamos alguns testes em modelo 1D no qual pode ser observada claramente a quebra da lei de potência do sistema. Só para ilustração, a figura 11 foi incluída a fim de demonstrar a destruição gradual da SOC na curva da distância entre atividades consecutiva a diferentes graus de ruído.

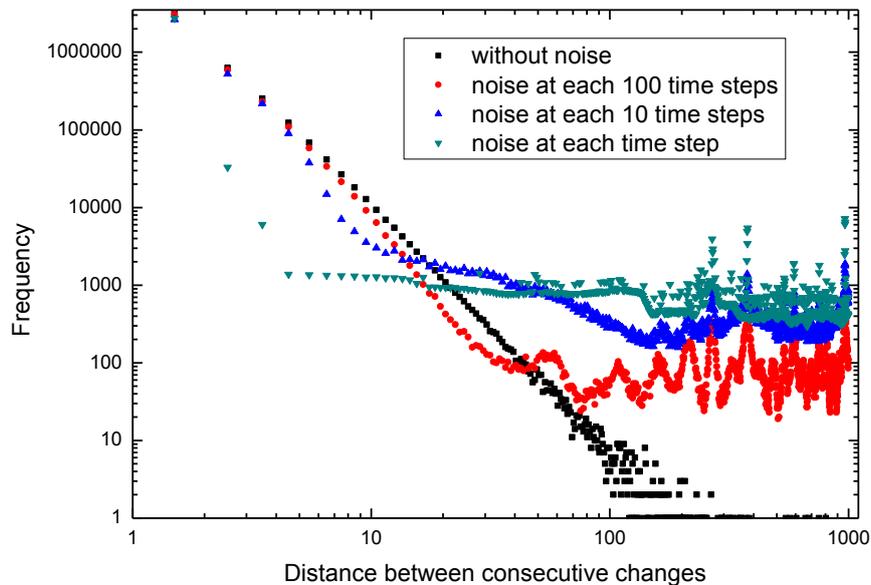


Figura 11: Distribuição de frequência para distâncias euclidianas entre consecutivas mudanças nos nós.

Note que a distribuição tende a um plateau quanto maior for a frequência de inserção do ruído, isto é, não existe mais uma lei de potência nem um estado crítico.

Agora se tratando do modelo 2D, diversas análises foram feitas em cima da distribuição final do sistema. Na figura 12 a característica final do sistema após o processo de seleção, distribuição de energia e inserção do ruído tipo 1 no meio fez com que ele mudasse de caráter nitidamente.

Percebe-se que quando o ruído é inserido a cada 10.000 passos a faixa intervalar dos valores dos nós fica entre de 0 a 7. Já com a inserção de ruído a cada

1 passo a faixa intervalar dos valores aumenta ficando entre 0 e 8.5, consequentemente fazendo com que a frequência de cada valor diminua conforme esta faixa aumenta. Mostrando que a lei que regia esse sistema foi alterada.

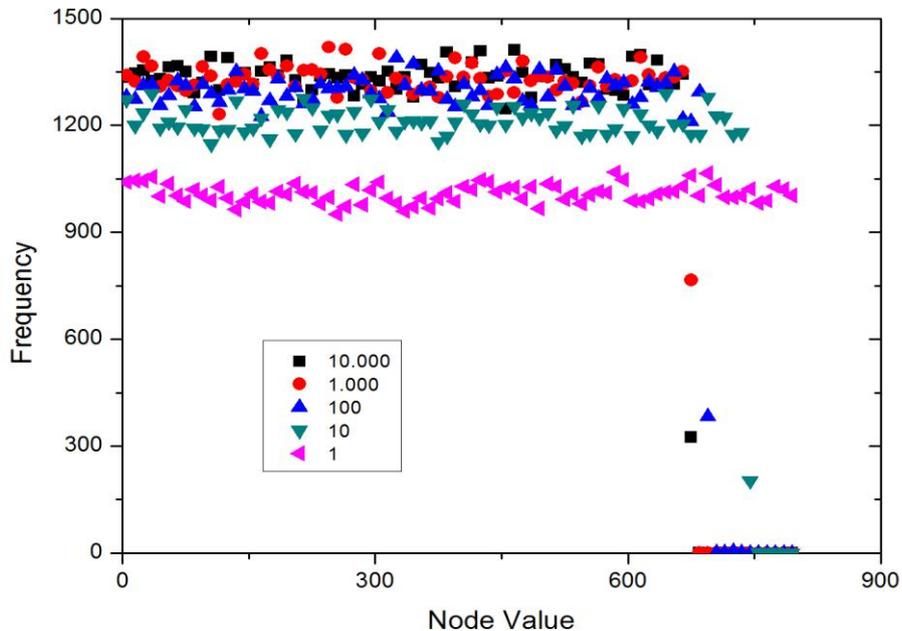


Figura 12: Distribuição dos valores dos nós, barreiras, a 5 distintos níveis de ruído Tipo 1.

Na figura seguinte, figura 13, foi feita a mesma análise só que com inserção do ruído Tipo 2. Percebe-se que o ruído Tipo 2, por ele ser de caráter global, destruí a lei que regia esse sistema de forma muito mais eficiente. Outra coisa que pode ser vista é que a quebra das curvas são mais suaves que no ruído de caráter local, pelo fato de estar mudando todos os valores tornando a distribuição mais suave.

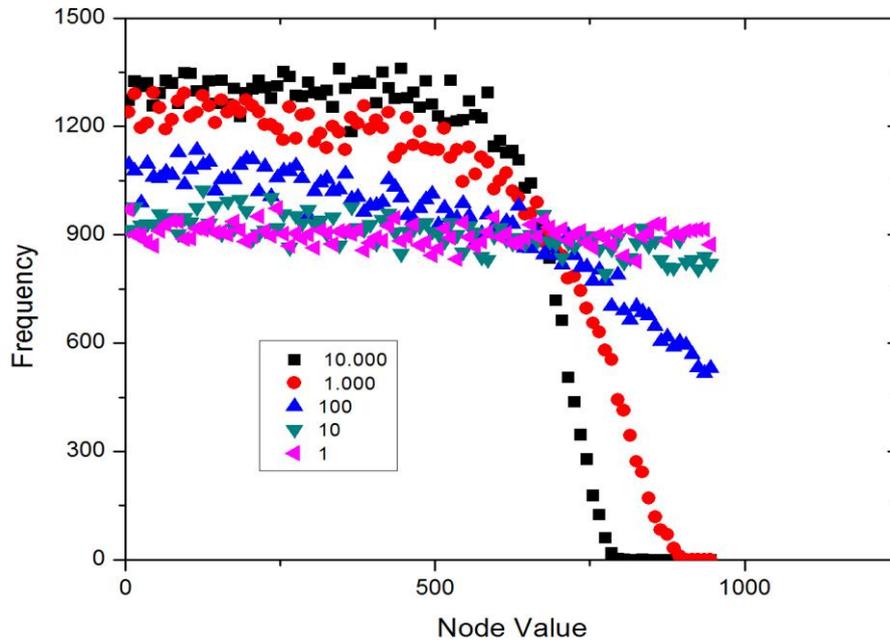


Figura 13: Distribuição dos valores dos nós, barreiras, a 5 distintos níveis de ruído Tipo 2.

Uma das análises mais importantes é a análise da distribuição da duração dos flares solares, as chamadas avalanches. Figuras 14 e 15 ilustram como a distribuição se comporta após a inserção do ruído Tipo 1 e Tipo 2, respectivamente.

Com o ruído tipo 1 percebe-se que ainda houve a criação de uma pequena lei de potência antes que a lei pudesse ser quebrada. O interessante é que os tamanhos das avalanches se mantiveram coerentes com seus respectivos níveis de ruído e que ao o inserir a cada mil passos não possibilitou que o sistema fosse afetado da maneira desejada. Logo, para o tipo 1 só conseguiríamos evitar eventos catastróficos perturbando o sistema a passos aproximadamente menores que mil.

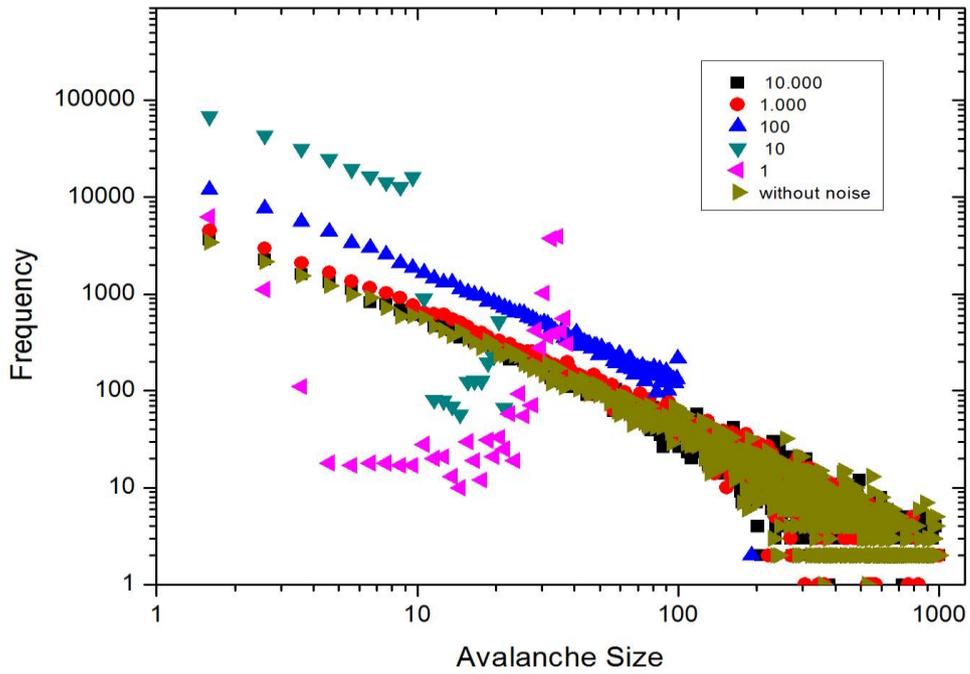


Figura 14: Distribuição do tamanho das avalanches com ruído Tipo 1.

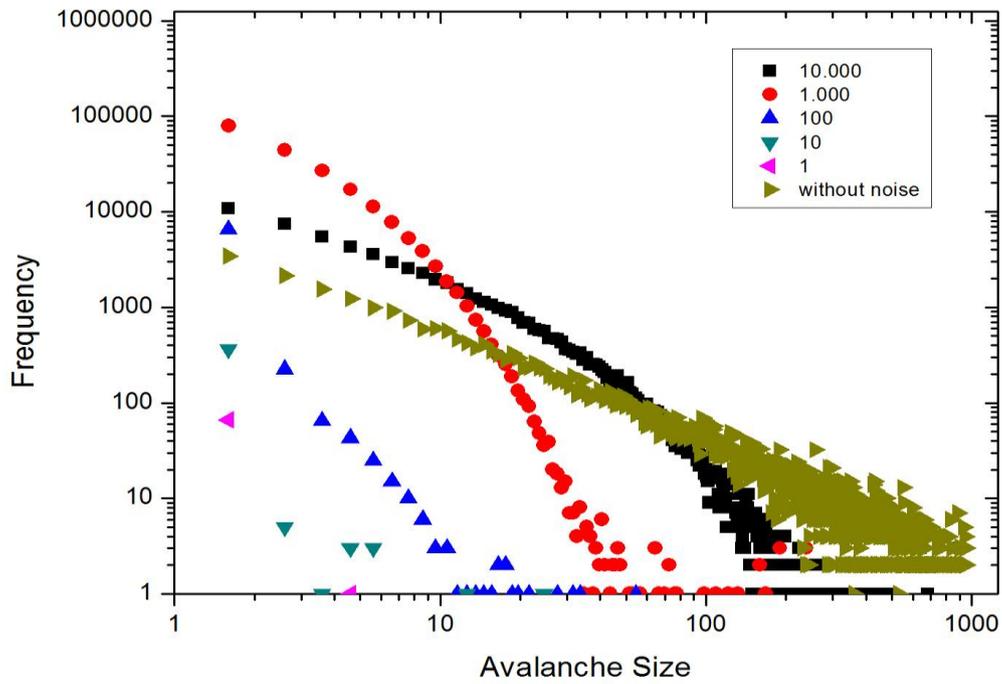


Figura 15: Distribuição do tamanho das avalanches com ruído Tipo 2.

Já o ruído global, tipo 2, mostrou de forma clara que ele é mais efetivo no que ele se propõe a fazer, destruir o estado SOC. Não vemos mais nenhuma pequena lei de potência ser criada como víamos no ruído local e o tamanho das avalanches foram reduzidos drasticamente, nitidamente observado nos passos $N=10$ e 100 .

Outra boa maneira de analisar o quanto estes ruídos são eficientes em destruir o regime, em taxas distintas, é analisar a distribuição dos maiores valores deste o período inicial até o período final. Na figura 16 a análise foi feita em cima destes maiores valores escolhidos para o processo de seleção e troca com inserção do ruído Tipo 1, novamente.

Como neste ruído a cada N passo escolhemos um nó aleatório para ser trocado, a tendência deste nó ser menor que 0.7 (que é valor escolhido no Modelo I) é muito maior do que um que esteja entre 0.7 e 0.1 seja escolhido. Por isso que a distribuição se desloca para cima conforme o número de passos N diminui.

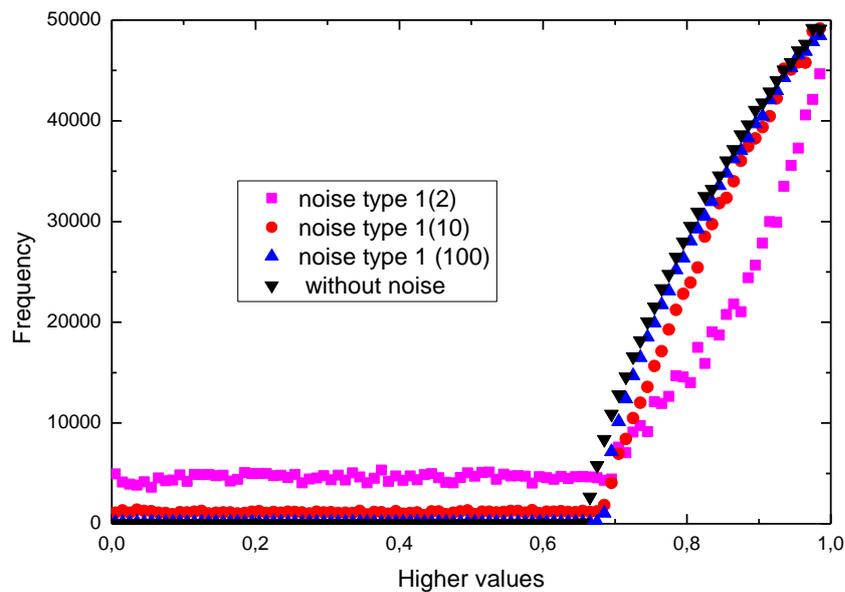


Figura 16: Distribuição dos valores dos maiores nós no estado estacionário (triângulos pretos) sem ruído e também dos valores a três distintos níveis de ruído Tipo 1.

Para comparação foi feita a diferença absoluta dos nós equivalentes da distribuição com ruído com a distribuição sem ruído (estacionária), e após isso foi feito o somatório dessas diferenças. Este processo foi feito para três tempos diferentes de inserção do ruído para podermos vê como a distribuição mudava com esses tempos. Observa-se na figura 17 que a diferença absoluta do sistema foi

maior com a inserção de ruído a cada $N=1$, de 650000 u.a. enquanto a cada $N=100$ foi quase 100000, podendo concluir que o ruído parece ser mais eficaz em taxas elevadas.

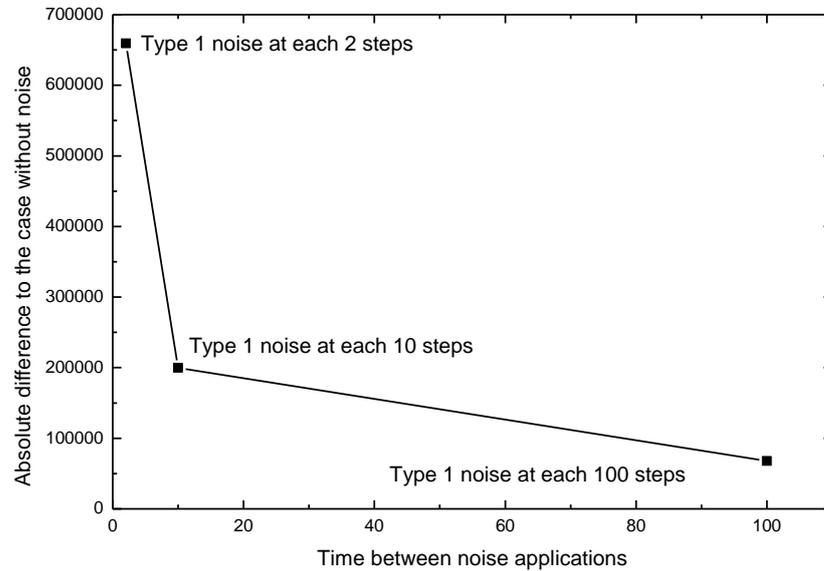


Figura 17: Somatório do valor absoluto da diferença entre bins equivalentes para a distribuição da fig.16.

Por fim, apresentamos na figura 18 a dependência no tempo dos valores mais elevados em um sistema 300×300 . A partir da intercepção da lei de potência (note que é um gráfico log-log) com a exploração do plateau, estima-se o tempo para atingir o estado estacionário para um determinado tamanho do sistema. A simulação começa com em um estado completamente desordenado.

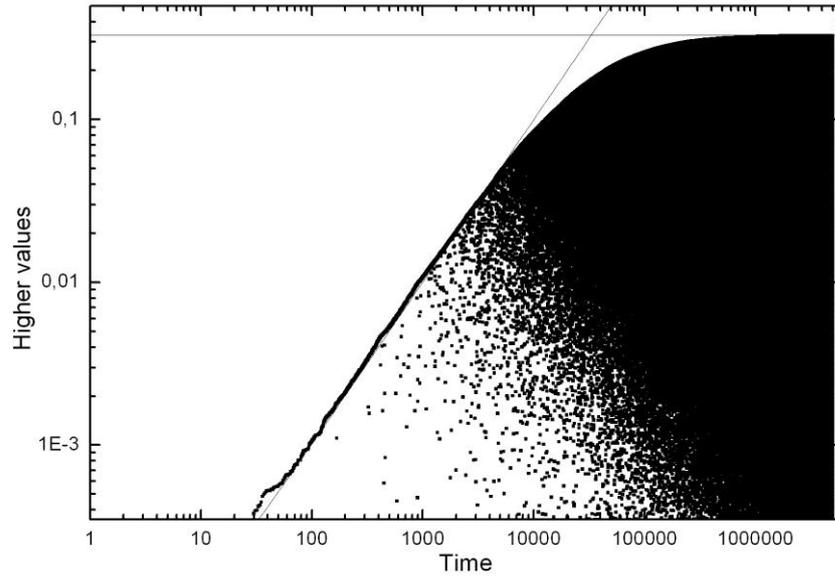


Figura 18: dependência no tempo dos valores mais elevados em um sistema 300x300.

Foram feitas diversas análises para diferentes tamanhos de sistema e os resultados do tempo t para o estado estacionário como uma função do tamanho então apresentados na figura 19, que traz uma estimativa para o tempo que o sistema precisa para se organizar ou desorganizar. Este poderia ser um importante fator em casos reais.

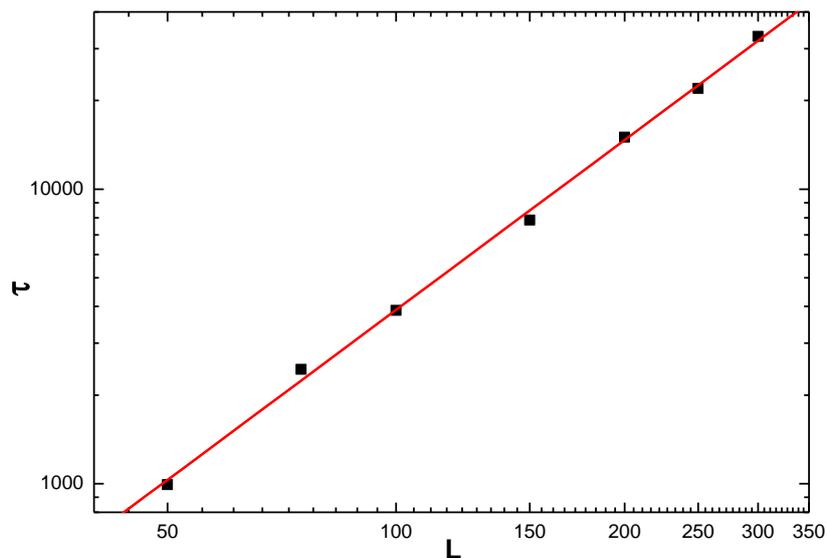


Figura 19: Tempo para atingir o plateau em função do tamanho do sistema.

6 CONCLUSÃO

Foi feita uma breve descrição das camadas solares e de seus processos, partindo da camada mais interna, o núcleo, até a camada mais externa a corona. Tendo como foco principal deste trabalho as atividades que acontecem na superfície do Sol a fim de dar uma ideia geral da única e tão importante estrela do nosso sistema solar.

A principal atividade que ocorre na superfície do Sol é o flare solar que dependendo da região de onde foi ejetado, de sua intensidade e disposição do campo magnético, irá afetar a Terra diretamente, perturbando a nossa magnetosfera.

Por esse motivo neste trabalho foi introduzido um modelo bidimensional de criticalidade auto-organizada para simular os flares solares que são uma das principais causas de distúrbios magnéticos na superfície da Terra. Foram obtidas distribuições de leis de potência para diversas quantidades relevantes, semelhantes a alguns resultados de trabalhos experimentais sobre flares. Isso implicaria que a superfície do Sol poderia estar em um estado crítico em que a maior possível “avalanche” é limitada somente pelo tamanho do sistema (isto é, o tamanho da superfície do Sol).

Foram introduzidos dois tipos de ruído no simples modelo SOC, um ruído mais local e um ruído global. Foi observado que em taxas suficientemente elevadas de inserção de ruído o estado crítico é praticamente destruído que é traduzido pela ausência de grandes acontecimentos destrutíveis, eventos catastróficos. Os ruídos pontuais por si só não destruíram a lei de potência com tanta eficiência quanto os ruídos globais, permitindo de tal forma que avalanches maiores pudessem ser geradas.

Não deve ser esperado que com um modelo simples, como o usado para ilustrar estes fatos, haja resultados detalhados. Entretanto, algum conhecimento em linhas gerais e metodologias a serem aplicadas em modelos mais detalhados, ou até mesmo em casos reais, foram obtidos. Modelos mais realistas devem incluir outros tipos de ruído, como por exemplo, ruídos locais simulados pela alteração local dos valores limites em algumas regiões do modelo simulado, a fim de simular diferentes características geológicas ao longo das falhas (no caso dos terremotos).

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAIESI, M., PACZUSKI, M. & STELLA, A.L. *Intensity Thresholds and the Statistics of the Temporal Occurrence of Solar Flares*. Physical Review Letters. v. 96. 051103, 2006

BAK, P. TANG, C. & WIESENFELD, K. *Self-organized criticality: an explanation of 1/f noise*. Physical Review Letters A. v. 59, pp. 381-384, 1987.

BAK, P. & SNEPPEN, K. *Punctuated equilibrium and criticality in a simple model of evolution*. Physical Review Letters. v. 71, pp. 4083, 1993.

BAKAR, B. & TIRNAKLI, U. *Damage spreading in 2-dimensional isotropic and anisotropic Bak-Sneppen models*. The European Physical Journal B. v. 62, issue 1, pp. 95-99, 2005.

BERSHADSKII, A. & SREENIVASAN, K.R. *Multiscale self-organized criticality and powerful X-ray flares*. The European Physical Journal B. v. 35, pp. 513 – 515, 2003

BURLAGA, L. F. et al. *Magnetic loop behind and Interplanetary shock: Voyager, Helios and IMP-8 observations*, Journal of Geophysical Research, v. 6, n. A8, pp. 6673-6684, 1981.

CHELIDZE, T. et al. *Triggering and synchronization of stick slip: Waiting times and frequency-energy distribution*. Tectonophysics. v. 424, pp.139-155, 2006.

CORRAL, A. *Dependence of earthquake recurrence times and independence of magnitudes on seismicity history*. Tectonophysics. v. 424, pp. 177-193, 2006.

DAGLIS, I. A et al. *The terrestrial ring current: Origin, formation, and decay*, Reviews of Geophysics. v. 37, nº.4, pp. 407–438, 1999

DaSILVA, L., PAPA, A.R.R. & de SOUZA, A.M.C. *Criticality in a simple model for brain functioning*. Physical Review Letters A. v.242, pp. 343-348, 1998.

DeARCANGELIS, L. et al. *Universality in Solar Flare and Earthquake Occurrence*. Physical Review Letters. v. 96, n°.5, 051102, 2006.

ELDREDGE, NILES & GOULD, S. J. *Punctuated equilibria: an alternative to phyletic gradualism*. "Models in paleobiology", edited by Schopf, TJM Freeman, Cooper & Co, San Francisco, pp. 82-115, 1972.

ESPIRITO SANTO, M. A. et al., 73rd EAGE **Conference** & Exhibition incorporating SPE EUROPEC **2011**, Vienna, v. 01.

FISCHER, T., KALENDA, P. & SKALSKY, L. *Weak tidal correlation of NW-Bohemia/Vogtland earthquake swarms*. Tectonophysics. v. 424, pp. 259-269, 2006.

GERMAN, V.I. *Unified scaling theory for distributions of temporal and spatial characteristics in seismology*. Tectonophysics. v. 424, pp. 167-175, 2006.

GONZALEZ, W. D. Et al. *What is a magnetic storm ?* Journal of Geophysical Research. v. 99, A4, 1994.

GOPALSWAMY, N., *Coronal mass ejections and space weather, Climate and Weather of the Sun-Earth System (CAWSES)*. Selected Papers from the 2007 Kyoto Symposium, 2007.

JONSDOTTIR, K. et al. *Modelling fundamental waiting time distributions for earthquake sequences*. Tectonophysics. v. 427, pp. 195-208, 2006.

KAWADA, Y. & NAGAHAMA, H. *Cumulative Benioff strain-release, modified Omori's law and transient behaviour of rocks*. Tectonophysics. v. 424, pp. 157-166, 2006.

KRAFT, T. et al. *Meteorological triggering of earthquake swarms at Mt. Hochstaufen, SE-Germany*. Tectonophysics. v. 424, pp. 245-258, 2006.

LANGMUIR, I. *Oscillations in ionized gases*. Proceedings of the National Academy of Sciences. U.S.A, v. 14, no. 8, pp. 627-637, 1928 .

LINDMAN, M. et al. *Physics of the Omori law: Inferences from inter-event time distributions and pore pressure diffusion modelling*. Tectonophysics. v. 424, pp. 209-222, 2006.

LU, E.T. & HAMILTON, R.J. *Avalanches of the distribution of solar flares*. Astrophysical Journal. v. 380, pp. L89, 1991.

LU, E.T. et al. *Solar flares and avalanches in driven dissipative systems*. Astrophysical Journal. v. 412, no.2 pp. 841-852, 1993

MA, K., YANG, C.B. & CAI, X. *Correlations in the Bak-Sneppen model from detrended fluctuation analysis*. Physica A, v. 357, issue 3-4, pp. 455-465, 2005.

MERRIL, R.T., McELHINNY, M.W. & McFADDEN, P.L. *The Magnetic Field of the Earth: Paleomagnetism, the Core, and the Deep Mantle*. 3rd ed., Academic Press, San Diego, 1998

NITTA, N.V. et al. N. *Solar sources of impulsive solar energetic particle events and their magnetic field connection to the earth*. The Astrophysical Journal. v. 650, pp. 438-450, 2006

PAPA, A.R.R., BARRETO, L.M. & SEIXAS, N.A.B. *Statistical study of magnetic disturbances at the Earth's surface*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. v. 68, pp. 930-936, 2006.

PAPA, A.R.R. & SOSMAN, L.P. *Statistical properties of geomagnetic measurements as a potential forecast tool for strong perturbations*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. v. 70, pp. 1102-1109, 2008.

PODLAZOV, A. V & OSOKIN, A. R. *Self-Organized Criticality Model of Solar Plasma Eruption Processes*. *Astrophysics and Space Science*. v. 282, no. 1, pp. 221-226, 2002.

RUIZ, M. et al. *Aftershocks Series Monitoring of the September 18, 2004 4.6 Lg Earthquake at the Western Pyrenees: a case of Reservoir-Triggered Seismicity*. *Tectonophysics*. v.424, pp. 223-243, 2006.

STENKIN, YU. V. *Two approaches to the cosmic ray "knee" problem and the experimental data*. *Proceeding 29th International Cosmic Ray Conference Pune*, pp. 1-4, 2005.

WEBB, D. F. & HOWARD, R. A. *The solar cycle variation of coronal mass ejections and the solar wind flux*. *Journal of Geophysical Research*. v. 99, pp. 4201-4220, 1994

XAPSO, M.A. et al. *Solar Particle Events and Self-Organized Criticality: Are Deterministic Predictions of Events Possible?* *IEEE Transactions on Nuclear Science*. v. 53, issue. 4, pp. 1839-1843, 2006.

YASHIRO, S. et al. *Different Power-Law Indices in the Frequency Distributions of Flares with and without Coronal Mass Ejections*. *Astrophysical Journal*. v. 650, pp. L143, 2006.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) - National Geophysical Data Center (NGDC). Disponível em:

<<ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR/SOLARFLARES>>. Acessado em 07/07/2009.

Absolute Astronomy. Disponível em:

<http://www.absoluteastronomy.com/topics/Geomagnetic_storm>, Acessado em 26/04/2012

