

AUTO-ORGANIZAÇÃO NA DINÂMICA DE SISTEMAS GRANULARES: UM ENFOQUE EXPERIMENTAL PARA SISTEMAS COMPLEXOS NO ENSINO DE ENGENHARIA

André A. B. Stavrakas – andreb.ufes@gmail.com

Jefferson Z. Moro – jeffeletrica@yahoo.com.br

Moisés R. N. Ribeiro – moises@ele.ufes.br

Universidade Federal do Espírito Santo, PET, Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico.

***Resumo:** Modelos lineares dominam o currículo dos cursos de graduação em Engenharia. Todavia, problemas práticos são, na sua maioria, de natureza não-linear. A força de atrito, por exemplo, é uma não-linearidade onipresente que é com frequência desprezada para viabilizar a modelagem matemática. Todavia, seu efeito pode ser determinante no comportamento de alguns sistemas reais. Este artigo apresenta um protótipo para visualização e estudo de sistemas complexos oriundos de características não-lineares na dinâmica de auto-organização de grãos de arroz. Um sistema mecânico de tambor rotatório, acoplado a um aparato de visão computacional de baixo custo, permite a medição dinâmica e contínua do ângulo crítico e do ângulo de acomodação das avalanches de arroz. Demonstra-se ainda de forma experimental que, paradoxalmente, tais sistemas podem ser linearizados pela adição de perturbação externa (ruído), abrindo assim possibilidades de aplicação de técnicas clássicas de controle sobre sistemas não-lineares.*

***Palavras-chave:** Sistemas não-lineares, auto-organização, linearização, ressonância estocástica.*

1 INTRODUÇÃO

Conteúdos estudados nos cursos de engenharia são, na sua maioria, fundados em modelagens lineares de sistemas e de dispositivos. Todavia, é de suma importância levar em consideração o comportamento não-linear o qual está presente na maioria dos sistemas reais em engenharia. O problema surge na dificuldade da modelagem e na complexidade das soluções matemáticas associadas a tais sistemas. Em cursos de pós-graduação os alunos têm acesso a tal conhecimento. Entretanto, durante a graduação a visão dos alunos é restrita à concepção de que todos os sistemas são, ou podem ser aproximados, por modelagens lineares. Modelagens lineares de problemas dos mais elementares, como sistemas massa mola, deixam de valer quando características (não-lineares) do mundo real, como o atrito, passam a ser consideradas (VIEIRA, 1995). Mais ainda, características dinâmicas desses sistemas produzem comportamentos que fogem completamente dos resultados esperados pela visão linear, como por exemplo, o comportamento caótico (LONNGREN, 1991).

A filosofia reducionista está por trás dessa metodologia de ensino. Estudam-se as partes (com modelos tratáveis matematicamente) e esperam que o somatório destas componha o todo. Em oposição a essa visão surgem os métodos holísticos que defendem que os sistemas devem ser entendidos como um todo, constituído de partes que são inseparáveis. Os avanços proporcionados pela filosofia reducionista não podem ser ignorados. Porém, esta visão já alcança um ponto de saturação e não consegue mais tratar sistemas cada vez mais complexos envolvidos na engenharia de sistemas. Por outro lado, os métodos holísticos têm um apelo didático (e até mesmo humanista), mas falta-lhes ainda um apelo prático do ponto de vista de encontrar soluções para problemas fora do campo meramente filosófico.

Uma solução de compromisso entre o modelo holístico e o reducionista é a Teoria de Sistemas Complexos (CARLSON & DOYLE, 2002). Neles o todo é também composto por partes como no modelo reducionista. Entretanto, a interação das partes (que possuem comportamentos simples mas geralmente não lineares) num sistema produz resultados extremamente complexos, ao quais contrastam com os modelos simples dos elementos que o compõem. Ao invés de tentar modelar os indivíduos que agregados representariam o todo, a abordagem da Teoria de Sistemas Complexos parte do comportamento agregado. Seu objetivo é tentar encontrar leis de comportamentos para os indivíduos. Estes agregados interagem de forma a produzir o comportamento do todo. Tal filosofia pode vir a se tornar necessária no exercício da profissão do engenheiro, e esse artigo vem tratar de um estudo de caso que pode ser utilizado como introdução aos sistemas complexos e dinâmicos que surgem da agregação de elementos que possuem comportamentos não lineares. O restante do artigo é organizado da seguinte forma. Na Sessão 2 uma breve fundamentação dos conceitos envolvidos é apresentada. O fenômeno do empilhamento é apresentado na Sessão 3. A definição da proposta e do protótipo encontram-se na Sessão 4. Os resultados preliminares obtidos com o protótipo são apresentados na Sessão 5. As considerações finais são feitas na Sessão 6.

2 FUNDAMENTAÇÃO

Modelos lineares são aqueles em que a resposta do sistema a um estímulo leva em consideração apenas os termos de baixa ordem de sua resposta real. Há duas razões para o uso desse modelo: i) os componentes de alta ordem (i.e., de grau dois em diante) são desprezíveis em comparação aos lineares, ou ii) a modelagem adotada não é capaz de lidar com tamanha complexidade. Portanto no segundo caso a modelagem linear pode vir a ter uma fraca correlação com o que ocorre na realidade. Pequenas variações na entrada desses sistemas podem vir a ser significativamente amplificadas pelas componentes de alta ordem que foram desprezadas pela modelagem linear. Pior ainda, quando os termos de alta ordem são relevantes em sistemas dinâmicos realimentados, inevitavelmente o comportamento real diverge muito do previsto por modelagens lineares. Muitas vezes ainda tais sistemas são integrados em grandes sistemas. Neste caso, se tentarmos considerar a influência das componentes de alta ordem no sistema, a modelagem pode tornar-se intratável (principalmente no modo analítico). Em outras palavras, o modelo pode vir a perder sua função, ao se tornar quase tão complexo quanto a própria realidade.

A visão da Teoria de Sistemas Complexos toma uma nova perspectiva para abordar o problema. Sua base está no pressuposto de que os sistemas são naturalmente formados por interações de elementos. Tais sistemas possuem realimentação, memória temporal (a influência dos estados anteriores é significativa) e são em geral não-lineares. O objetivo desse enfoque é encontrar as leis de comportamento dos indivíduos afim de representar o comportamento global do sistema. É interessante destacar que comportamentos não usuais são bem modelados pelo enfoque da Teoria de Sistemas Complexos. Dentre eles podemos citar o

aparecimento de comportamento Crítico em sistemas auto-organizados, comportamento Caótico e fenômenos de Ressonância Estocástica.

A Criticalidade em sistemas auto-organizados poderia ser definida como a fragilidade de uma solução encontrada para o problema de interação entre elementos de um sistema (RICKERS *et al*, 2000). Pequenas alterações em torno do ponto crítico podem provocar a transição para um outro estado no espaço das soluções, o qual pode estar muito distante da solução anterior (LONNGREN, 1991). A Ressonância Estocástica ocorre quando um dado nível de perturbação (ruído), ao invés de degradar o sistema, paradoxalmente melhora a resposta global do mesmo. Por exemplo, basta adicionar uma dada quantidade de ruído ao sinal senoidal que passa por um circuito não-linear para obter uma melhora na relação sinal ruído (HARMER & DAVIS, 2002).

3 FENÔMENO ESTUDADO

Vários fenômenos que presenciamos no cotidiano apresentam características que poderiam ser interpretadas pela Teoria de Sistemas Complexos. A força de atrito, por exemplo, é um efeito não-linear que pode facilmente levar sistemas mecânicos a comportamentos muito diferentes dos previstos pelos modelos lineares. O empilhamento de grãos é um sistema dinâmico não-linear onde a força de atrito entre os grãos auto-regula a altura da pilha. Avalanches dos mais variados tamanhos são observadas à medida que o peso excede a força de atrito estático máxima entre os grãos. Note que a auto-organização nesse problema leva à criticalidade, pois basta a adição de mais um grão à pilha para termos uma avalanche; esta irá reconfigurar a interação entre os grãos num outro estado de solução (equilíbrio). As novas avalanches, por sua vez, serão dependentes do estado de acomodação do deslocamento dos grãos do último desmoronamento, isto é, há forte dependência do estado anterior do sistema.

O comportamento dos grãos pode ser descrito por um modelo simples ilustrado na Figura 1. Suponha que a força de atrito estático entre grãos suporte o peso de até três grãos A Figura 1(a) ilustra o início do empilhamento. Enquanto o limite do atrito estático não é excedido, a altura da pilha cresce pela adição de novos grãos ao sistema como mostra a Figura 1 (b). Quando um quarto elemento é adicionado ao empilhamento sob análise, temos um desmoronamento na Figura 1(c). O transbordo servirá como entrada para os novos empilhamentos adjacentes, conforme mostra a Figura 1 (d). Essa reação em cadeia dá origem ao processo de avalanche à medida que encontra outras pilhas de grãos em estado crítico.

Note que a transição de fase entre os coeficientes de atrito estático e cinético é o fenômeno que provoca o comportamento complexo desse sistema dinâmico. Um modelo simples (na linha Teoria de Sistemas Complexos) que permite a simulação computacional do sistema ilustrado na Figura 1 encontra-se em (RICKERS *et al*, 2000).

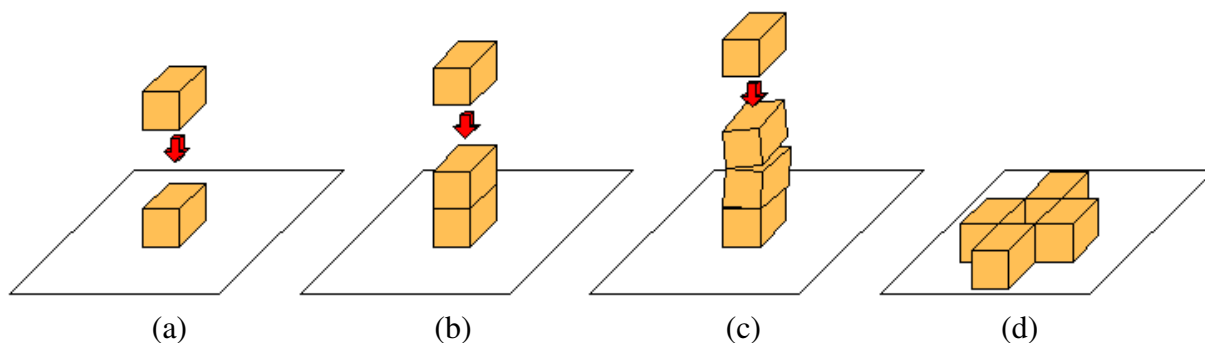


Figura 1 – Modelo de interação entre grãos. (a) Início do empilhamento. (b) Adição de mais um grão. (c) Iminência do desmoronamento. (d) Avalanche.

4 A PROPOSTA

Esse artigo propõe uma implementação experimental para a verificação e mensuração automatizada de tal dinâmica não-linear. Propomos ainda estudar uma forma de linearização do comportamento desse tipo de sistema. O protótipo desenvolvido pode ser uma ferramenta simples e eficiente para demonstração desses efeitos físicos aos alunos de graduação. Ao invés de utilizar uma pilha de grãos, a proposta usa um tambor giratório para o acondicionamento de grãos de arroz. O objetivo é a redução das dimensões envolvidas na análise desse problema. O ângulo que a interface arroz-ar faz com a horizontal torna-se a única dimensão a ser observada.

Colocamos o sistema em funcionamento ao impormos uma rotação com velocidade angular constante. Observa-se que a força de atrito tende a manter os grãos estacionários em relação ao tambor giratório. São observados apenas deslocamentos isolados de grãos. Todavia, tal situação perdura até que um dado ângulo crítico tenha sido alcançado. Nesse ponto temos um deslocamento maciço dos grãos, que rapidamente estacionam numa nova posição (nova solução de equilíbrio). A interface arroz-ar mantém-se praticamente retilínea durante todo o processo. Assim, o monitoramento da dinâmica temporal do ângulo da interface pode fornecer informações como: estabilidade do sistema, volume deslocado por avalanche, relação entre ângulos de acomodação (pós avalanche) e o próximo valor de ângulo crítico etc. Outra vantagem do sistema com tambor rotatório é que os experimentos podem ser reproduzidos *ad-infinitum*, permitindo a obtenção de longas séries temporais sem o esforço da reconfiguração do sistema para a repetição do experimento.

A tentativa de linearizar o sistema é baseada nos preceitos da Ressonância Estocástica (HARMER & DAVIS, 2002). Porém, no nosso caso, o ruído a ser adicionado é a uma vibração mecânica. Ele é inserido visando a suavização da transição de fase entre o atrito estático e o cinético. Desta forma, os grãos podem manter-se num estado onde a dinâmica granular passa a ser substituída por uma dinâmica fluida.

4.1 O protótipo

Para cumprir a proposta de estudo, um protótipo foi construído com a capacidade de inserir vibração (ruído) de forma controlada. Isso foi feito alinhando-se duas bobinas, uma acoplada mecanicamente ao eixo do tambor e outra fixa à plataforma. Esse mecanismo permite controlar tanto a intensidade quanto a frequência do ciclo de atração-repulsão em função da corrente elétrica fornecida às bobinas. O estudo para a localização empírica do ponto ótimo de operação, o qual minimiza o efeito não linear da transição de fase do atrito, é assim viabilizado. A fim de garantir que o movimento de rotação não sofra interferência do sistema de vibração, o conjunto tambor-eixo-polias foi afixado em um mancal especial que permite tanto o movimento de rotação quanto o de translação; o último causado pela repulsão e atração das bobinas (ver Figura 2). Já o movimento de rotação é realizado por um conjunto polia-motor DC, sendo o controle da velocidade feito por um sinal *Pulse Width Modulation* (PWM).

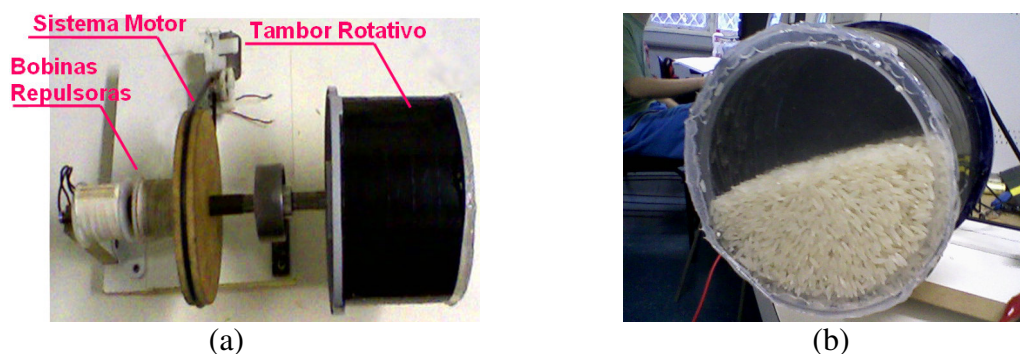


Figura 2 – Implementação do protótipo. (a) Visão superior. (b) Visão frontal

4.2 A medição do ângulo via visão computacional.

A medida do ângulo da interface arroz-ar (Figura 2(b)) não pode ser invasiva para não interferir no movimento e na dinâmica entre os grãos. Portanto, um sistema de visão computacional atende a esse requisito e possibilita a automação das medidas. Tal aparato foi implementado com sucesso a partir de uma *webcam* de baixa resolução 72 dpi (Clone modelo 11036) e o programa MATLAB 7.0. A Figura 3(a) mostra um *frame* do tambor rotatório onde a interface arroz-ar é visível pelo contraste entre o fundo preto do tambor e a cor branca do arroz. Tal contraste facilita o tratamento da imagem. Após a captura do *frame*, é feita uma distinção entre os níveis de intensidade luminosa da imagem. Com isso, são obtidas imagens monocromáticas como mostra a Figura 3(b). A partir desta é possível encontrar as coordenadas dos pontos da interface, como a imagem na Figura 3(c). De posse destes valores, uma reta pode ser ajustada sobre tais pontos a fim de encontrar o ângulo α . O processo é dinâmico, o que possibilita a obtenção de respostas a estímulos que viabilizam a realimentação do sistema. Experimentos, utilizando-se de um Pentium III 1GHz, mostraram que a aquisição e processamento das imagens facilmente atingem 3Hz. Tal frequência é bastante satisfatória uma vez que o tambor deve girar num velocidade angular máxima de 2 rpm (0.0333Hz) para não influenciar a dinâmica dos grãos.

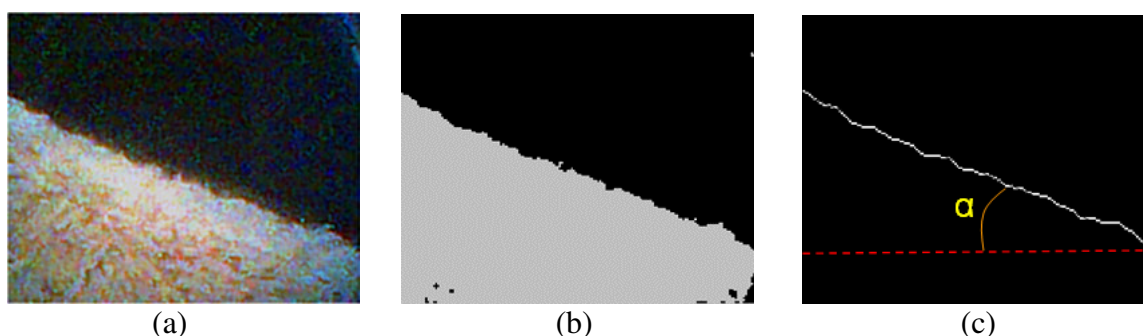


Figura 3- Sistema de visão computacional. (a) *Frame* da câmera. (b) Imagem em dois tons. (c) Ângulo da Interface arroz-ar.

5 RESULTADOS

Inicialmente o sistema foi usado para a medição do ângulo da interface arroz-ar na ausência de vibração. A Figura 4(a) traz um trecho representativo do comportamento da dinâmica do ângulo de interface. Note que os picos representam os ângulos críticos e os vales os ângulos de acomodação. As avalanches são as transições rápidas entre estes ângulos. As transições lentas são devidas ao incremento gradual de ângulo. Tais incrementos são resultantes da rotação do tambor; uma vez que os grãos permanecem estáticos em relação ao mesmo até que o ângulo crítico seja atingido. Deve-se observar que os valores dos ângulos críticos e de acomodação variam em cada avalanche. Lembre-se que tais valores são resultados da auto-organização dos grãos no tambor, a qual depende da configuração da acomodação da avalanche anterior e da força de atrito entre eles.

O controle do ângulo arroz-ar num determinado valor via atuação sobre a velocidade de rotação do tambor seria uma tarefa extremamente difícil em função do comportamento não-linear causado pelas avalanches. Além disso, há variabilidade dos valores dos ângulos máximo e mínimo da interface arroz-ar devido à auto-organização. A ressonância estocástica pode ser uma saída para a linearização desse sistema. A adição de energia mecânica para romper o atrito estático é feita pelas bobinas repulsoras. Os grãos armazenam tal energia na forma cinética. Assim o atrito cinético é predominante e a transição de fase, causadora da não-linearidade, é suprimida. Após a adição de uma dada quantidade (empiricamente determinada) de tal perturbação, reduz-se significativamente a faixa de variação dinâmica do ângulo como mostrado na Figura 4(b). Com isso, o processo de controle do ângulo em função da velocidade de rotação seria feito mais facilmente. A linearização foi alcançada pela adição de interferência, fato que é inconcebível na concepção de sistemas lineares. Podemos dizer que a dinâmica granular foi transformada numa dinâmica próxima a dos fluidos.

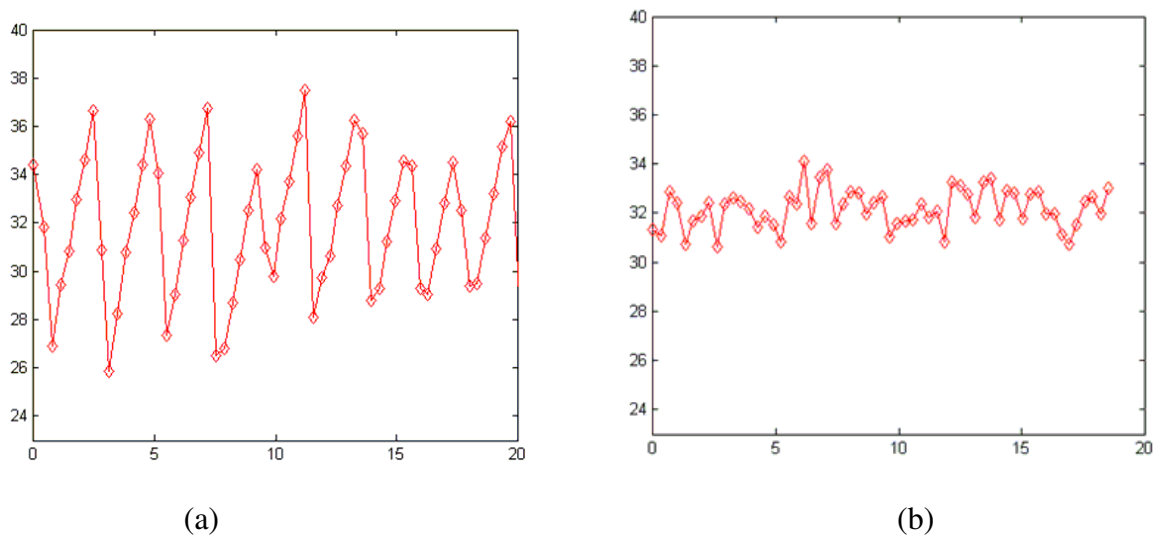


Figura 4 – Medições do ângulo (graus) vs. Tempo (s). (a) Sem vibração. (b) Com vibração.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De uma forma geral, o protótipo mostrou-se uma ferramenta útil para a visualização e o estudo de sistemas complexos, bem como para a sua caracterização e controle. Na sua forma atual, disciplinas como mecânica dos solos, fenômenos dos transportes, processos químicos de mistura de substâncias granulares (PRIGOZHIN & KALMAN, 1998) etc., podem utilizá-lo para demonstrações. Seu uso daria-se em disciplinas de laboratório e até mesmo no desenvolvimento de pesquisas. A principal contribuição do protótipo é viabilizar uma metodologia de baixo custo que permite ao aluno visualizar fenômenos físicos associados a efeitos decorrentes da não-linearidade, tais como a auto-organização e a criticalidade.

Trabalhos futuros envolverão a implementação de um sistema de controle automático do ângulo de inclinação da interface arroz-ar via atuação sobre a velocidade de rotação e a vibração. Tal incremento irá viabilizar o seu uso didático em disciplinas diretamente associadas à engenharia elétrica. O impacto no processo de ensino-aprendizagem em comparação com plantas de controle didáticas convencionais também será avaliado.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARLSON, M. ; DOYLE, J. Complexity and Robustness. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 19, Fevereiro de 2002, vol 99

HARMER, G. ; DAVIS, B. A Review of Stochastic Resonance: Circuits and Measurement. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 51, No 02 abril de 2002

LONNGREN, K. Notes to Accompany a Student Laboratory Experiment on Chaos. **IEEE Transaction on Education**, v.34, n.1, p. 123-128, 1991

RICKERS, P. ; THOMSEN, R. ; KRINK, T. **Applying Self-Organized Criticality to the Diffusion Model**. GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION CONFERENCE., Las Vegas, Nevada, USA, 2000.

PRIGOZHIN, L.; KALMAN, H. Radial mixing and segregation of a binary mixture in a rotating drum: Model and experiment. **Physical Review** , v.57, n.2, , p. 2073-2080, 1998

VIEIRA, M. d. S. Chaos in a simple spring-block system. **Physics Letters A**, v.198, n.5, , p. 407-414, 1995

SELF-ORGANIZATION IN THE DYNAMICS OF GRANULAR SYSTEMS: AN EXPERIMENTAL APPROACH FOR TEACHING COMPLEX SYSTEMS IN ENGINEERING

Abstract: *Linear models dominate the undergraduate Engineering curriculum. However, most of the practical problems are indeed non-linear by nature. Friction is one common source of non-linearities that is often ignored by linear modeling despite its massive influence. We propose a prototype for visualization and investigation of complex systems from non-linear dynamics in self-organized rice grains. A rotating drum along with a low cost computational vision system allow continuous measurement of critical and repose angles for rice grains avalanches. We experimentally demonstrate that, paradoxically, these systems can be linearized by adding external perturbation (noise) opening the possibility of applying classical automatic control techniques in this non-linear system.*

Key-words: *Non-linear systems, self-organization, linearization, stochastic resonance.*