

Artigo Técnico

Análise de acidente ambiental: estudo de caso usando o Método de Análise da Ressonância Funcional

*Environmental disaster analysis: case study
using the Functional Resonance Analysis Method*

Leticia Canal Vieira^{1*}, Tarcisio Abreu Saurin²

RESUMO

ABSTRACT

A caracterização dos sistemas ambientais como lineares e previsíveis vem sendo questionada constantemente, uma vez que é insuficiente para explicar eventos e mudanças dramáticas. Nesse sentido, a abordagem da complexidade constitui uma alternativa aos modelos analíticos tradicionais. Neste artigo, é analisado o caso de um acidente ambiental em que houve elevada mortalidade de peixes no Rio do Sinos, Rio Grande do Sul, no ano de 2006. O caso foi reinterpretado por meio do Método de Análise da Ressonância Funcional (*Functional Resonance Analysis Method* - FRAM), o qual vem sendo usado para investigação de acidentes em sistemas sociotécnicos complexos. O presente estudo representa a primeira aplicação de tal método na análise de acidente em sistema socioecológico. Por intermédio do FRAM, observou-se que as saídas do sistema no momento do acidente eram as mesmas que seriam encontradas em uma situação normal. O que difere, no caso do acidente, é a magnitude dessas saídas e a sua simultaneidade temporal, o que levou à amplificação e à ressonância da variabilidade da saída de cada função. São propostas ações que visam à prevenção de acidentes similares com base no FRAM, bem como é discutida a utilidade desse método no contexto de sistemas socioecológicos.

The characterization of environmental systems as linear and predictable has been questioned, once it is not sufficient to explain events and dramatic changes. In these sense, the complexity approach is an alternative to traditional analytical models. In this work, an environmental disaster occurred in 2006, involving death of fishes in Rio dos Sinos, Rio Grande do Sul, Brazil, is addressed. The case was re-analyzed using the Functional Resonance Analysis Method (FRAM), which currently has been used for investigation of accidents in complex socio-technical systems. This is the first application of FRAM in a socio-ecological system. FRAM allowed the observation that system's outputs encountered in the disaster moment are the same founded in a normal situation, the difference was the magnitude of these outputs in each function. Actions are proposed aiming to prevent similar disasters, based on the FRAM, and a discussion regarding the utility of this method in socio-ecological systems is approached.

Palavras-chave: sistemas socioecológicos; gestão ambiental; variabilidade; Método de Análise da Ressonância Funcional.

Keywords: socio-ecological systems; environmental management; variability; Functional Resonance Analysis Method.

INTRODUÇÃO

A teoria da complexidade aborda sistemas que estão em constante mudança e nos quais a tradicional abordagem de causa-efeito tem limitações (BURNES, 2005). Situações de não linearidade, incerteza e, em alguns casos, geradoras de mudanças dramáticas podem ser percebidas atualmente nos ecossistemas ambientais, fazendo com que seja abandonada a sua caracterização linear e previsível, adotando-se a visão da complexidade (FOLKE

& ROCKSTRÖM, 2009). Essas situações não lineares estão relacionadas com a existência de sistemas socioecológicos, em que ocorre a interação do homem com componentes naturais, surgindo então a necessidade de avaliar os impactos que o ser humano gera nos ecossistemas, bem como os efeitos que esse meio impactado apresenta para a sociedade (LIU *et al.*, 2007).

Fica evidente a necessidade de uma nova abordagem que enxergue o homem como parte do meio ambiente, envolto e dependente das

¹PhD Candidate (Griffith University) - Brisbane (QLD), Australia.

²Professor Associado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul- Porto Alegre (RS), Brasil.

*Autor correspondente: leticiacvieira@gmail.com

Recebido: 12/03/15 - Aceito: 13/02/17 - Reg. ABES: 147114

dinâmicas dos ecossistemas. As teorias, as políticas e os modelos voltados aos sistemas ambientais, na sua maioria, foram muitas vezes desenvolvidos ignorando as interações que podem ocorrer em escalas espaciais e temporais, ou seja, negligenciando a complexidade e não estando preparados para sistemas socioecológicos (FOLKE & ROCKSTRÖM, 2009). A corrente da ecologia que viu a necessidade de reconhecer as interdependências e os *feedbacks* entre o desenvolvimento dos ecossistemas e as dinâmicas sociais acabou por adotar a perspectiva da resiliência (FOLKE, 2006; CARPENTER *et al.*, 2001). O desenvolvimento da resiliência é extremamente importante para que se evitem acidentes e mudanças profundas no funcionamento de sistemas socioecológicos.

A perspectiva teórica usada para analisar um acidente influencia a natureza das ações de controle adotadas. Ao pensar em intervenções em um sistema, são estabelecidas hipóteses sobre o seu funcionamento, o que tem implicações para definir medidas de controle (STROEBEL *et al.*, 2005). Como Hale e Borys (2013, p. 223) destacam, “a abordagem que utilizamos para definir o que será monitorado pode acabar por expandir ou limitar o que vemos e o que aprendemos”. Isso demonstra a importância de analisar sistemas socioecológicos de forma compatível com a sua natureza complexa.

Quando são abordados sistemas complexos sociotécnicos, que compreendem a interação humano-máquina, os acidentes ocorridos podem ser classificados como acidentes sistêmicos. O que distingue esses acidentes é o fato de que ocorrem múltiplas falhas que interagem de uma forma não prevista (PERROW, 1984). Isso significa que não existe uma causa raiz para esses acidentes, pois ocorrem interações de estados e eventos que existem apenas em certo momento (HOLLNAGEL, 2012).

No caso de acidentes em sistema socioecológico, naturalmente considerado complexo, o mesmo pode ocorrer, sendo que este artigo parte desse pressuposto. Em ambas as tipologias de sistema, para que seja possível reconhecer padrões que podem levar a acidentes, por se tratarem de sistemas com características emergentes, é necessário adotar pensamento não linear (GLASER *et al.*, 2012).

Para Duit *et al.* (2010), os modelos analíticos e as ferramentas metodológicas tradicionais, que são utilizados para a análise do meio ambiente, como a modelagem baseada em agentes, não condizem com a complexidade. Esses autores destacam que esses modelos são governados por relações lineares e relações probabilísticas, que nem sempre resultam na melhor representação de sistemas complexos, uma vez que processos não lineares são ignorados, enquanto a complexidade considera propriedades emergentes. Propriedades emergentes surgem de interações entre diversas variáveis, possuindo características únicas que não são observadas quando as variáveis são analisadas separadamente (CILLIERS, 1998). Esse fenômeno pode ser desejável ou não (BUCHLI & SANTINI, 2005); e, mesmo que não possa ser totalmente controlado, até certo ponto, pode ser influenciado.

Neste artigo, é abordado um acidente em um sistema socioecológico envolvendo elevada mortalidade de peixes, ocorrido no Rio do

Sinos, Rio Grande do Sul, no ano de 2006. O rio recebia cargas poluidoras das mais diversas fontes e estava sujeito às mudanças climatológicas, inserido, então, em um sistema complexo.

Considerando o exposto, o caso foi analisado por meio do espectro da complexidade e utilizando-se do Método de Análise da Ressonância Funcional (*Functional Resonance Analysis Method* – FRAM). Usualmente, o FRAM é utilizado para a análise de sistemas sociotécnicos (BELMONTE *et al.*, 2011; WOLTJER, 2006; CARVALHO, 2011), mas neste artigo ele será empregado em um sistema socioecológico.

O FUNCTIONAL RESSONANCE ANALYSIS METHOD

O FRAM é um método que tem por objetivo entender como os sistemas realmente funcionam e como a variabilidade se propaga entre as suas funções, visando a desenvolver sistemas mais resilientes (CARVALHO, 2011). De acordo com Hollnagel (2012), o FRAM é baseado em quatro princípios:

1. princípio da equivalência (de sucesso e falhas): a suposição de que diferentes tipos de consequências não necessitam de diferentes tipos de causas, mas a mesma explicação pode ser usada em muitos — se não todos — casos;
2. princípio de ajustes aproximados: a suposição de que as pessoas continuamente ajustam o que elas fazem para que as ações combinem com as condições;
3. princípio da emergência: por terem uma causa específica e identificável, nem todos os resultados podem ser explicados;
4. princípio da ressonância: nos casos em que não é possível, ou razoável, basear explicações no princípio da causa-efeito, a ressonância funcional pode ser usada para descrever iterações não lineares e resultados.

Hollnagel (2012) define a ressonância funcional como um resultado detectável que emerge de interações não intencionais da variabilidade normal de sinais múltiplos. A ressonância funcional fornece um meio de entender resultados que são não causais (emergentes) e não lineares (desproporcionais), de forma que torne a previsão e o controle possíveis.

DESENVOLVENDO A RESILIÊNCIA EM SISTEMAS COMPLEXOS

Os sistemas complexos possuem elevada capacidade de adaptação diante da variabilidade. Tal capacidade é usualmente designada como resiliência. O conceito de resiliência se desenvolveu em diferentes disciplinas e é considerado o elo entre a implementação de metas de sustentabilidade e a adaptação a mudanças climáticas, oferecendo um campo transdisciplinar de pesquisa de grande importância para a sociedade (HASSLER & KOHLER, 2014).

Norris *et al.* (2008) apontam que os autores que definem a resiliência possuem um consenso entre dois aspectos: a resiliência é uma

capacidade em desenvolvimento constante, e não apenas um resultado; e resiliência está muito mais associada à adaptabilidade do que à estabilidade.

A Ecologia define resiliência como “a capacidade de um sistema de passar por choques enquanto retém as mesmas funções, estruturas, *feedbacks* e, dessa forma, identidade” (WALKER *et al.*, 2006, p. 13). Já a Engenharia de Resiliência a define como a “habilidade para prever, reconhecer, adaptar-se e absorver variações, mudanças, perturbações, rupturas e surpresas” (HOLLNAGEL & FUJITA, 2013, p. 13). É possível perceber que a visão da Ecologia está focada na persistência e robustez, enquanto a Engenharia de Resiliência se preocupa com a recuperação e a constância (FOLKE, 2006). Ao considerarmos sistemas socioecológicos, essas características podem ser todas necessárias e contribuir para a sua qualidade, uma vez que estamos lidando com a componente humana e o meio ambiente. Dessa forma, no contexto socioecológico, a resiliência deve ser entendida como uma capacidade de adaptação, transformação, aprendizado e inovação (FOLKE, 2006).

Buscando uma definição de resiliência adequada para os sistemas socioecológicos, Carpenter *et al.* (2001) estabelecem três propriedades que a resumem: a quantidade de mudança extrínseca pela qual um sistema pode passar e reter os mesmos controles em estrutura e funções; o grau em que um sistema é capaz de se auto-organizar; e o grau em que um sistema pode construir a capacidade de aprender e adaptar-se.

Quando consideramos sistemas socioecológicos, a componente humana é a que apresenta maior capacidade de gerar alterações tanto positivas quanto negativas, sendo isso suportado pela crença de que estamos em um período no qual os impactos gerados pelo homem são tão importantes quanto os processos naturais, o Antropoceno (CORLETT, 2015). Atualmente, o homem tem atuado, em maior parte, como responsável pela perda de resiliência em sistemas e gerador de mudanças em regimes (FOLKE, 2006). A partir disso, é interessante que exista uma preocupação em desenvolver capacidades que permitam à componente humana uma contribuição positiva. Segundo Hollnagel e Fujita (2013), os princípios que tornam um sistema resiliente apresentam-se como características desejáveis em sistemas socioecológicos. Eles estão ligados à capacidade de resposta, de monitoramento, de aprendizado e de antecipação:

1. capacidade de resposta: responder de maneira rápida e efetiva às condições esperadas ou inesperadas, seja implementando um sistema preparado de respostas ou ajustando o funcionamento diário. Essa capacidade também implica em sustentar a resposta até que o controle da situação seja obtido novamente;
2. monitoramento: monitorar aquilo que é, ou pode se tornar, uma mudança ou perturbação no futuro próximo, cobrindo tanto o que acontece no meio ambiente quanto o que acontece no próprio sistema;

3. aprendizado: aprender com a experiência, em particular aprender as lições corretas da experiência correta, tanto nos casos de sucesso quanto de falha;
4. antecipação: antecipar o desenvolvimento de ameaças e oportunidades no futuro distante, como: potenciais mudanças, novas necessidades, maiores demandas e restrições.

MÉTODO

Escolha e descrição do acidente

O acidente tratado no artigo envolveu mortalidade de peixes ocorrida no Rio do Sinos, Rio Grande do Sul, no dia 7 de outubro de 2006. A justificativa para a escolha desse evento é a de que a causa do acidente não foi passível de imediata e clara identificação, como ocorre em alguns acidentes ambientais, não se tratando de uma liberação de efluente ou composto tóxico no rio de forma pontual. Vários agentes estavam envolvidos no acidente e estavam latentes no sistema há vários anos.

A descrição do acidente se baseou no relatório divulgado pelo órgão ambiental responsável do Estado do Rio Grande do Sul, a Fundação Estadual de Proteção Ambiental (FEPAM), presente no Plano de Bacia do Rio dos Sinos (PRÓ-SINOS, 2014). O relatório foi emitido por um engenheiro químico e biólogos, que coletaram amostras de água em diversos pontos do rio e observaram dados históricos presentes na rede de monitoramento da FEPAM e no relatório anual do Departamento Estadual de Recursos Hídricos. Além disso, também foram observadas notícias referentes ao ocorrido publicadas pela mídia.

Construção do *Functional Resonance Analysis Method*

De acordo com Hollnagel (2012), a descrição do sistema, por meio do FRAM, envolve detalhar funções e aspectos (Figura 1). Funções são os meios utilizados para atingir um determinado resultado. Os aspectos caracterizam seis dimensões das funções, sendo eles: entrada (*input*), saída (*output*), pré-condições, recursos, controle e tempo. Nem todas as funções necessitam ser descritas por todos os aspectos, porém, os aspectos de entrada e saída devem ao menos ser descritos para todas as funções. Os aspectos são o estado ou o resultado de algo, mas não uma atividade.

No caso deste estudo, o FRAM foi utilizado para uma análise retrospectiva, em que é formulada uma implementação (*instantiation*) que descreve os acoplamentos entre as funções no momento do acidente. A análise de uma implementação inclui as seguintes etapas (HOLLNAGEL, 2012):

1. definir o propósito da análise do FRAM;
2. identificar e descrever as funções;

3. identificar a variabilidade;
4. identificar a agregação de variabilidade;
5. identificar consequências da análise.

Assim, o FRAM teve como objetivo analisar o acidente ocorrido no Rio dos Sinos e limitou-se ao ecossistema do rio e às funções que ali acontecem para que seja mantido o seu funcionamento. Foram considerados elementos externos derivados da ação humana aqueles constatados pelo relatório da FEPAM, não sendo consideradas outras interferências que poderiam ocorrer em uma bacia hidrográfica. A construção do FRAM é voltada apenas para a situação específica do acidente na etapa 4, quando é feita a agregação de variabilidade.

O FRAM foi construído com o *software FRAM Model Visualiser* (disponível gratuitamente em www.functionalresonance.com) e houve, posteriormente, uma pequena adaptação na representação gráfica do FRAM, sendo acrescentada a descrição de todos os aspectos das funções envolvidas no sistema. Na sua forma original, o FRAM permite apenas que se visualize a função e seus acoplamentos com as demais funções.

Para a proposição de melhorias a partir do FRAM, foram consideradas as quatro habilidades de sistemas resilientes anteriormente apresentadas. Buscou-se, dessa forma, encontrar soluções mais eficientes para a redução de ocorrências como essas.

RESULTADOS

Descrição do acidente

O relatório da FEPAM (PRÓ-SINOS, 2014) descreve o acidente ocorrido no dia 7 de outubro de 2006. Às 18 h, o Serviço de Emergência da FEPAM recebe as primeiras informações relativas à presença de peixes mortos no Rio dos Sinos. A estiagem dos anos de 2005 e 2006 já havia provocado declínio na qualidade das águas da Bacia dos Sinos e reduzido a quantidade de oxigênio dissolvido.

No dia seguinte, devido à continuidade dos relatos de peixes mortos, a FEPAM acionou o Serviço de Emergência Ambiental, para que se deslocasse até Sapucaia do Sul. Foram identificadas sete localidades com a presença de peixes mortos, todas nos limites do município de São Leopoldo. Foi levantada a suspeita de irregularidade do efluente lançado por uma empresa de papel em São Leopoldo, o que poderia ter alterado as propriedades da água. Amostras foram coletadas para posterior análise. No mesmo dia, também se identificou a presença de lançamento significativo de esgoto não tratado do município de São Leopoldo, gerando uma nova pluma poluidora. A Figura 2 apresenta a imagem área registrando a pluma poluidora da indústria de papel e a pluma poluidora devido ao descarte de esgoto doméstico.

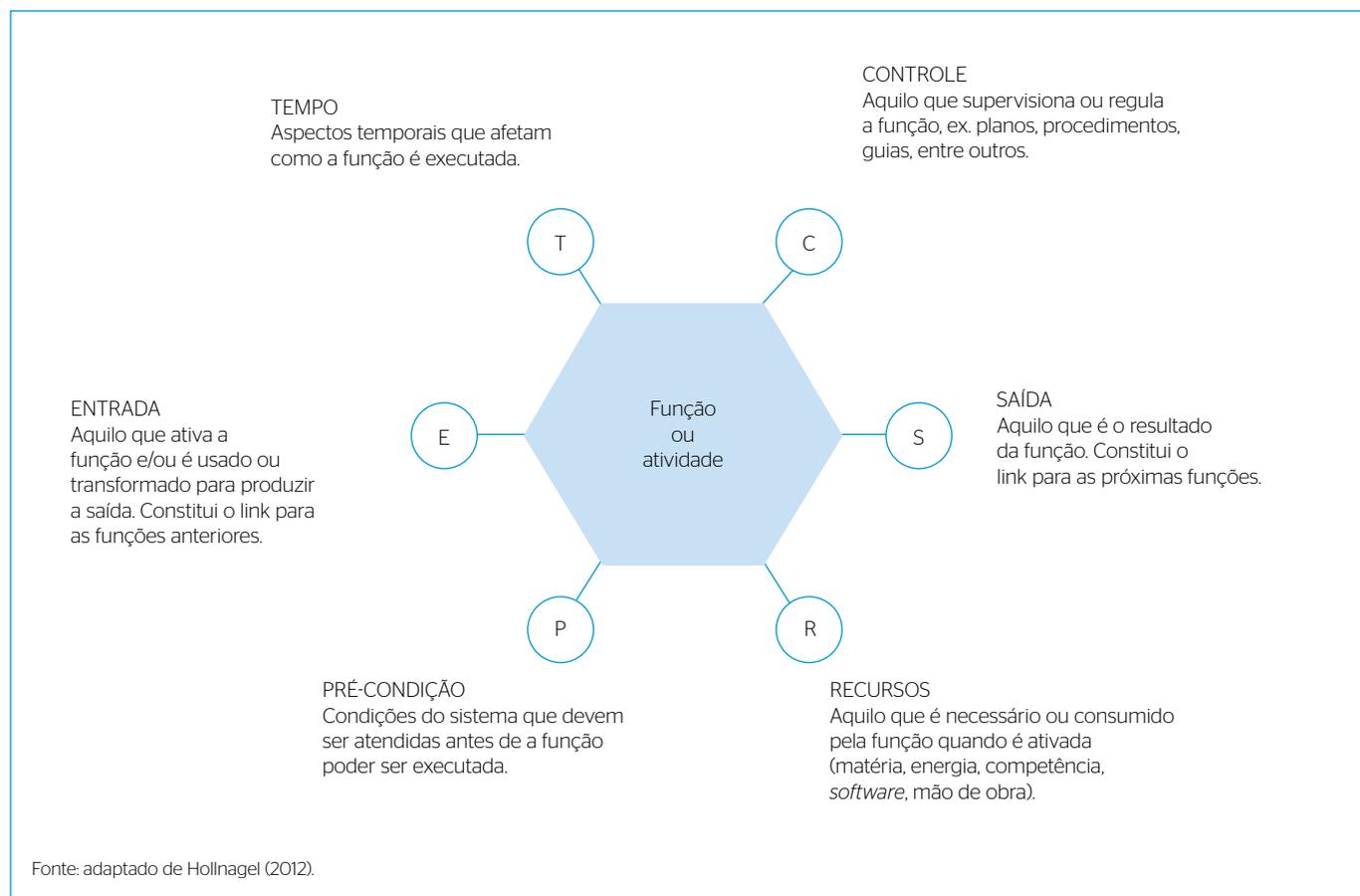


Figura 1 - Aspectos de cada função ou atividade do *Functional Resonance Analysis Method*.

O órgão ambiental estadual constatou que a causa da mortandade dos peixes foi a falta de oxigênio dissolvido, causada pelo excesso de lançamento de carga orgânica no rio, com predominância doméstica. Além disso, cinco empresas, de diferentes municípios localizados nas margens do rio, foram autuadas pelo descumprimento de normas ambientais, sendo essas consideradas contribuintes para o acidente. A Figura 3 demonstra a proporção do acidente, que matou quase 100 t de peixes (CARTA MAIOR, 2006).

As 32 prefeituras localizadas na Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos foram notificadas para encontrar soluções para o esgoto doméstico que era descartado no rio, sendo concedido prazo de 180 dias para que os municípios apresentassem uma proposta de Plano de Saneamento. Foi também determinada a redução em 30% da vazão licenciada de todas as atividades industriais situadas na sub-bacia do Arroio Portão, pertencente à bacia do Rio dos Sinos. Um indicativo da complexidade desse acidente é que as medidas adotadas não foram suficientes e novos episódios de mortandade de peixes ocorreram no mesmo local (NASCIMENTO & NAIME, 2009), porém em menor escala.

Construção e análise do *Functional Resonance Analysis Method*

Identificação das funções e descrição da variabilidade

Como primeira etapa do FRAM, foram identificadas e descritas as funções, bem como a variabilidade potencial das saídas de cada função (Quadro 1), sem vinculação a nenhum cenário em particular. A variabilidade potencial da saída foi estimada em relação ao tempo e à precisão (HOLLNAGEL, 2012), com base no conhecimento técnico dos autores.

Agregação da variabilidade considerando o cenário do acidente

O Quadro 2 apresenta quais funções propagaram a variabilidade da sua saída para outra função, demonstrando em quais aspectos a função

seguinte será afetada, consistindo na análise de variabilidade agregada. Os aspectos possíveis de serem afetados pelas saídas são: entrada, tempo, condição, controle e recurso. Para melhor visualização, foram suprimidos os aspectos que não foram afetados pela variabilidade.

A partir da realização da etapa anterior, foi possível determinar os acoplamentos entre as funções e obter a representação gráfica do evento. A Figura 4 apresenta o FRAM construído para o acidente. Os círculos ao redor da sigla do aspecto indicam que seria necessária a definição de outras funções para explicar a origem desses aspectos. O Quadro 3 apresenta um exemplo de tabela descritiva para uma função, sendo que o *software FRAM Model Visualizer* permite gerar tabelas para cada uma das funções.

Para a maioria das funções identificadas, a entrada consistiu no despejo de efluentes e de esgoto doméstico. Essa é uma característica que demonstra como o acidente ocorreu em uma situação de normalidade. O despejo de efluentes e esgoto, tratados ou não, é uma entrada sempre presente para as funções do rio, porém, devido à convergência de outros fatores ou mesmo à variabilidade dessa entrada, a capacidade do sistema foi extrapolada, gerando, conseqüentemente, um acidente.



Fonte: PRÓ-SINOS (2014).

Figura 3 - Peixes mortos no acidente do Rio dos Sinos.



Fonte: PRÓ-SINOS (2014).



Figura 2 - Pluma poluidora da indústria de papel (A) descarte de esgoto doméstico da cidade de São Leopoldo (B).

Quadro 1 – Identificação da variabilidade potencial das saídas.

Função	Saída	Variabilidade da saída
Sedimentar partículas	Partículas sedimentadas	Em relação ao tempo: muito tarde – devido a grande quantidade de partículas despejadas, o rio demora mais para realizar a sedimentação. Em relação à precisão: impreciso – pode haver ainda muitas partículas suspensas.
Carrear poluentes	Poluentes carreados	Em relação ao tempo: muito tarde – os poluentes podem demorar mais para serem carreados devido aos baixos índices de chuva. Em relação à precisão: aceitável – o fluxo do rio tende a ser sempre o mesmo.
Diluir poluentes	Poluentes diluídos	Em relação ao tempo: muito tarde – devido a maior quantidade de carga que é despejada, o rio precisa de mais tempo para diluir os poluentes. Em relação à precisão: impreciso – as concentrações podem ficar acima do desejado, bem como o menor índice de chuvas pode dificultar a diluição.
Reproduzir microrganismos	Microrganismos reproduzidos	Em relação ao tempo: muito tarde – o ambiente com altas cargas orgânicas e pouco oxigênio pode ser inadequado para a reprodução dos microrganismos. Em relação à precisão: impreciso – a menor penetração de luz solar pode dificultar a produção de oxigênio pelas algas, além de que, alguns dos poluentes despejados podem ser tóxicos, alterando a reprodução dos microrganismos.
Dissolver oxigênio	Oxigênio dissolvido	Em relação ao tempo: muito tarde – dissolver oxigênio é um processo que o rio sempre realiza, porém, se não existir oxigênio, pode resultar em atraso. Em relação à precisão: impreciso – a baixa produção de oxigênio pelas algas pode resultar em menores concentrações de oxigênio dissolvido.
Reproduzir peixes	Peixes reproduzidos	Em relação ao tempo: pode não ocorrer em caso de poluição extrema. Em relação à precisão: impreciso – o cenário desfavorável em que o rio se encontra faz com que não ocorra a reprodução de peixes e sim sua mortalidade.

Quadro 2 – Análise de variabilidade agregada.

A variabilidade da saída da função:	Sedimentar partículas
Propagou-se para a função:	Reproduzir microrganismos
Afetando um ou mais dos aspectos abaixo:	
<i>Entrada</i>	Se a sedimentação de partículas ocorrer muito tarde e/ou de forma imprecisa, isso irá diminuir a penetração solar, dificultando a reprodução de alguns microrganismos, especialmente algas.
A variabilidade da saída da função:	Carrear poluentes
Propagou-se para a função:	Reproduzir microrganismos
Afetando um ou mais dos aspectos abaixo:	
<i>Entrada</i>	Se os poluentes forem carreados muito tarde, pode resultar na diminuição da penetração solar dificultando a reprodução de alguns microrganismos, especialmente algas.
A variabilidade da saída da função:	Diluir poluentes
Propagou-se para a função:	Reproduzir microrganismos
Afetando um ou mais dos aspectos abaixo:	
<i>Controle</i>	A diluição dos poluentes pode ocorrer muito tarde e/ou de forma imprecisa, a concentração dos poluentes será o que vai determinar a toxicidade para os microrganismos.
A variabilidade da saída da função:	Reproduzir microrganismos
Propagou-se para a função:	Dissolver oxigênio e reproduzir peixes
Afetando um ou mais dos aspectos abaixo:	
<i>Entrada</i>	A reprodução dos microrganismos pode ocorrer muito tarde e/ou de forma imprecisa. A não produção de oxigênio pelos microrganismos (algas) pode reduzir o oxigênio disponível no rio, que é necessário como entrada para as funções dissolver oxigênio e reproduzir peixes.
A variabilidade da saída da função:	Dissolver oxigênio
Propagou-se para a função:	Reproduzir microrganismos e reproduzir peixes.
Afetando um ou mais dos aspectos abaixo:	
<i>Entrada</i>	A dissolução do oxigênio é imprecisa, pois é necessário que ele esteja presente para que ocorra sua dissolução. Isso não ocorrendo, a reprodução dos peixes será prejudicada.
<i>Precondição</i>	A dissolução do oxigênio é imprecisa, pois é necessário que ele esteja presente para que ocorra sua dissolução. Para a reprodução de alguns microrganismos é necessária a existência de oxigênio dissolvido.

“reproduzir peixes”. Nota-se que o bom desempenho dessa função está ligado com o de todas as outras, direta ou indiretamente. Porém, os fatores externos que podem alterar o desempenho da função são o despejo de efluentes e esgoto doméstico e a quantidade de chuvas. No caso do acidente, sabe-se que era um período de estiagem prolongada (PRÓ-SINOS, 2014), mas não se pode atribuir a esse fator isolado a causa do acidente.

Em um regime de chuvas normal, a entrada relacionada aos despejos provavelmente não geraria alterações perceptíveis, mas isso não significa que o ecossistema estivesse livre de pressão e contaminações. Dentro desse sistema socioecológico, o fator que pode ser mais diretamente e facilmente controlado pelo homem é o despejo de cargas poluentes, um dos fatores que mais influenciam nas funções e geram alterações. Torna-se clara a possibilidade de, apenas com uma gestão adequada, evitar que ocorram novos acidentes.

Considerando o exposto, no próximo item serão avaliadas as possibilidades de gerar aumento de resiliência no sistema, monitorando e mitigando a variabilidade que pode ocorrer.

Sugestões de formas para monitorar e mitigar a variabilidade

Dois pontos surgem da observação do FRAM como uma forma de evitar acidentes:

1. a necessidade da existência de planos de saneamento municipal, proporcionando o tratamento de esgoto para todos os habitantes;

2. a necessidade de monitoramento, tendo em vista saber quando os seus limites são extrapolados.

Além disso, a gestão de recursos hídricos deve considerar que os ecossistemas já foram alterados. O efluente descartado no Rio dos Sinos dificilmente vai encontrar um rio estável, com água fresca e que não está sofrendo nenhum tipo de pressão ambiental. Existe a necessidade de uma abordagem de gestão adaptativa, com monitoramento constante para que se perceba a necessidade de mudança na abordagem a tempo de evitar que ocorram novos acidentes ambientais.

Não é possível afirmar que seria o caso de mudar os parâmetros exigidos pela legislação, pois é sabido que, em alguns casos, ela não estava sendo cumprida no momento do acidente. Os efluentes industriais não estavam todos dentro dos padrões. Porém, no caso dos efluentes domésticos, pode-se pensar na necessidade de uma maior regulamentação e no estabelecimento de limites para os seus padrões de lançamento.

Considerando-se os atributos que tornam um sistema resiliente e observando-se o que foi apresentado pelo FRAM, é possível definir medidas que poderiam ser adotadas, de forma a evitar novos acidentes ambientais como o aqui descrito. A Figura 5 apresenta as medidas relacionadas com os atributos da resiliência.

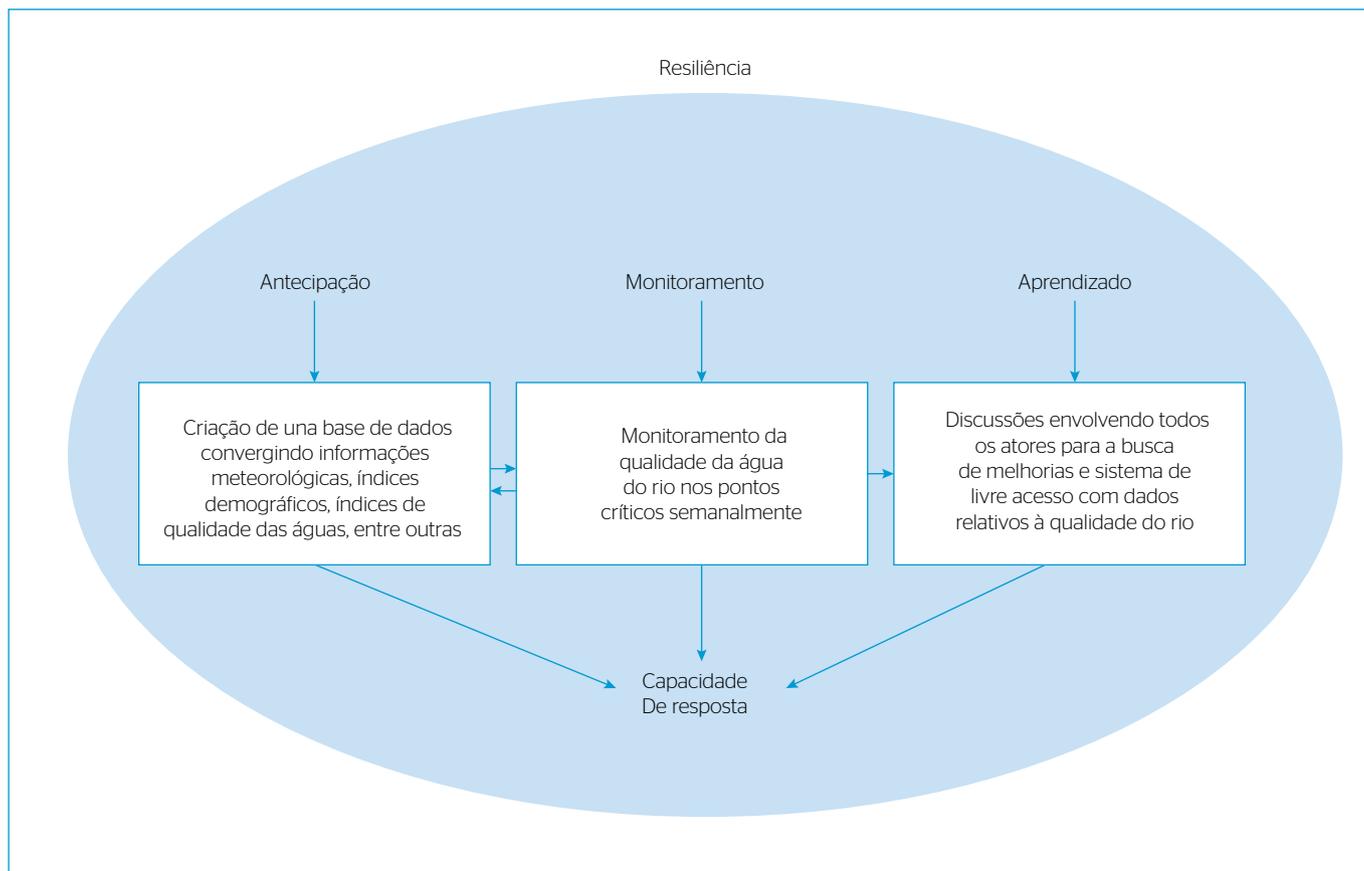


Figura 5 - Medidas relacionadas com os atributos de um sistema resiliente.

A criação de uma base de dados convergindo informações relevantes pode facilitar a detecção de casos em que o rio pode vir a ser sobrecarregado. Como exemplos, pode-se mencionar a identificação da necessidade de aumentar o sistema de coleta e tratamento de esgoto, devido ao crescimento populacional; a limitação do despejo de efluente (mesmo que tratado) de indústrias, devido à sobrecarga; e a diminuição da qualidade da água, devido a períodos de estiagem, fazendo com que seja necessária a redução do descarte de efluentes no rio.

O monitoramento da qualidade da água é feito atualmente com frequência mensal na região do Sinos; uma opção seria aumentar a frequência desse monitoramento nos pontos mais críticos, realizando-se coletas semanais. Dessa forma, variações poderiam ser detectadas mais claramente e o banco de dados mencionado anteriormente seria mais bem alimentado. A criação do banco de dados também atua como uma forma de monitoramento de fatores externos, porém, os demais dados necessários já estão disponíveis com uma frequência possivelmente adequada. Walker *et al.* (2006) apontam para a necessidade de instituições que monitorem e respondam às mudanças ambientais e sociais que possam vir a ser detectadas, para que seja possível constatar a convergência entre os componentes sociais e ecológicos.

Quanto ao aprendizado, em casos como o relatado é interessante que a discussão sobre as ações que precisam ser tomadas para que acidentes não ocorram novamente não seja exclusiva do órgão regulador. O envolvimento das prefeituras e empresas, no exemplo deste caso, também é relevante, pois deve-se buscar entender o motivo pelo qual elas não estão atendendo aos padrões ambientais. Caso contrário, uma mera imposição pode não gerar o efeito esperado, não resultando em uma melhora em longo prazo. Além disso, pode ser estudada a possibilidade da existência de um sistema de livre acesso com os dados sobre a qualidade do rio, demonstrando a sua situação atual. Essa prática promoveria a educação ambiental e demonstraria a responsabilidade de todos na manutenção da qualidade das águas.

Walker *et al.* (2006) afirmam que para que um sistema sociotécnico mantenha-se equilibrado é necessário investir em inovação e competências, que os atores estejam de acordo quanto a qual direção tomar e que se tenha acesso a capital natural, recursos financeiros e infraestrutura.

A integração de conceitos de sistemas sociotécnicos em sistemas socioecológicos

Quando se pensa em situações que relacionam o homem com o meio ambiente, a resiliência acaba por ser atribuída muito mais ao meio ambiente do que ao homem. Nesse tipo de sistema, a atuação do homem muitas vezes se resume apenas a gerar entradas, como no presente caso, descartando esgoto e efluentes. São geradas perturbações no sistema, das quais não se conhece a dimensão e as alterações resultantes. Os ecossistemas possuem muitas ligações, sendo difícil prever o resultado que uma alteração antrópica vai gerar.

Surge então a necessidade de que o ser humano se enxergue dentro desse sistema e seja responsável pela sua qualidade. É importante

que se compreenda como os ecossistemas funcionam, possibilitando ao homem adaptar-se e tornar-se realmente parte desse sistema, e não ser apenas um mero gerador de perturbações. Esta é a ideia dos pesquisadores que trabalham com o conceito de sistemas socioecológicos: as ações humanas não devem ser vistas como sistemas separados com objetivos e trajetórias conflitantes com o meio ambiente, e sim como parte integrante de um mesmo sistema (COTE & NIGHTINGALE, 2012).

Dessa forma, o homem deixa de ser apenas um utilizador dos recursos e se torna parte do sistema, buscando a sua sustentabilidade e respeitando os seus limites. Destaca-se, então, a importância de se pensar no conceito da Engenharia de Resiliência também em sistemas socioecológicos, pois o homem possui a capacidade de monitorar, aprender, responder e se antecipar a situações extremas. O meio ambiente apenas se recupera dessas situações ou as absorve, mas não consegue prevenir-se. No momento em que o homem buscar contribuir da sua forma para o aumento da resiliência dos ecossistemas, a qualidade ambiental do nosso planeta será aumentada e, consequentemente, haverá melhora na qualidade de vida do homem.

As intervenções humanas não devem ser vistas apenas como uma forma de diminuir a resiliência ecológica, mas também como uma oportunidade para atuar como um agente de mudança que não somente mantém, mas também aumenta a resiliência desses sistemas. A visão da adaptabilidade em sistemas socioecológicos já reconhece que o homem tem um forte papel em promover melhorias e que a sua capacidade de gerir a resiliência será o fator determinante para manter o sistema funcionando no regime desejado (WALKER *et al.*, 2006).

Isso se relaciona com o paradigma atual de desenvolvimento sustentável, apresentado na Figura 6, que mostra uma economia que serve

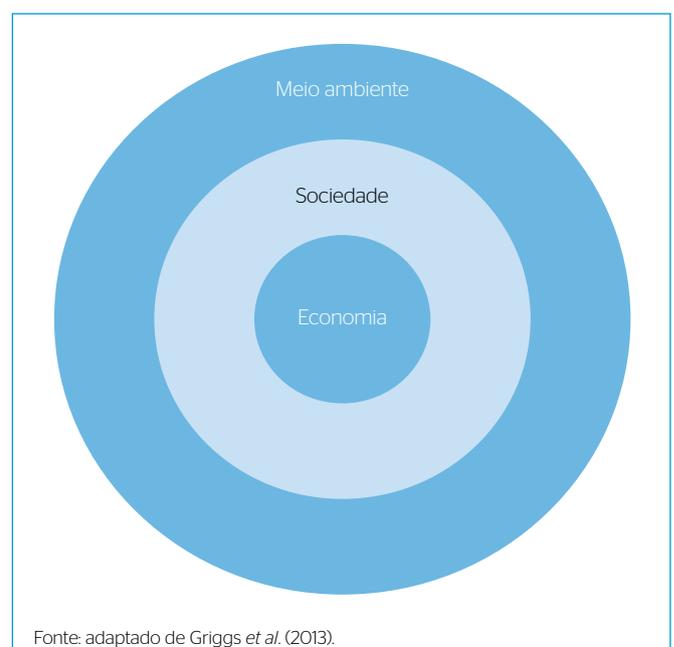


Figura 6 - Paradigma atual de desenvolvimento sustentável.

à sociedade, respeitando os sistemas ambientais (GRIGGS *et al.*, 2013). O meio ambiente permeia todas as ações e será o limitante para o crescimento ou desenvolvimento das sociedades. O reconhecimento da dependência do homem diante dos sistemas socioecológicos é a única forma de promover o desenvolvimento sustentável. E, uma vez que o homem se enxerga como parte desses sistemas, passa a usar sua competência para promover um ambiente saudável. A resiliência tem um papel importante em ajudar a mudar o foco da disponibilidade quantitativa de recursos para a ideia de quais opções de resposta estão disponíveis (COTE & NIGHTINGALE, 2012).

CONCLUSÕES

O uso do FRAM para a análise de acidentes ambientais se mostrou positivo, uma vez que permite que se tenha uma visão diferenciada e sejam identificados fatores que normalmente não seriam quando se tem como única preocupação identificar o culpado por um acidente ambiental. Devido à complexidade dos ecossistemas, existem casos em que a busca por um culpado pode negligenciar situações reais que também precisam de atenção com o intuito de manter a qualidade desse sistema.

Foi possível observar que as funções do momento do acidente são as mesmas de uma situação normal, o que o causou foi a variabilidade dessas funções, que estava no momento no caso de pior cenário. Isso demonstra que acidentes ambientais podem, por vezes, ser observados com a visão de “acidente normal” e existe a necessidade de se adotar uma abordagem diferenciada nesses casos.

Além disso, foi constatado que os princípios do FRAM, apesar de terem sido pensados para sistemas sociotécnicos, se encaixam na realidade dos sistemas socioecológicos. Como exemplos, podemos citar que a mesma entrada “descarte de esgoto doméstico e efluente” gerou diferentes respostas, indo de encontro com o princípio da equivalência e também com o princípio da emergência, pois o resultado da mortalidade de peixes tem sua causa distribuída de forma difusa, sendo emergente de vários fatores.

A observância dos atributos relacionados com a visão da Engenharia de Resiliência também se faz importante, sendo necessária a busca da resiliência para os sistemas. Ações como a criação de um banco de dados integrado, o monitoramento com frequência adequada, a discussão entre atores, proporcionando o seu envolvimento, e a preocupação com a educação ambiental podem evitar que ocorram acidentes.

Essa análise não teve a pretensão de esgotar todas as funções componentes de um sistema socioecológico complexo, como o caso do Rio dos Sinos, porém, mesmo assim, foi possível observar que os sistemas naturais possuem uma complexidade que pode muitas vezes fugir à compreensão e à previsão do homem, de forma que depender da sua capacidade de resiliência e transformação para absorver as alterações provocadas pode ser uma atitude arriscada. A melhor abordagem a ser considerada é a adoção do homem como o principal responsável por agregar resiliência nesses sistemas, uma vez que ele possui ferramentas de controle e possibilidade de tomar decisões e ações mais rápidas e eficazes. Como mencionado, isso demonstra a necessidade de uma mudança de paradigma, onde o homem é visto como parte desse sistema e não apenas como o seu explorador.

REFERÊNCIAS

- BELMONTE, F.; SCHÖN, W.; HEURLEY, L.; CAPEL, R. (2011) Interdisciplinary safety analysis of complex socio-technological systems based on the functional resonance accident model: An application to railway traffic supervision. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 96, n. 2, p. 237-249. DOI: 10.1016/j.res.2010.09.006
- BUCHLI, J.; SANTINI, C.C. (2005) *Complexity engineering: harnessing emergent phenomena as opportunities for engineering*. Santa Fé: Santa Fe Institute.
- BURNES, B. (2005) Complexity theories and organizational change. *International Journal of Management Reviews*, v. 7, n. 2, p. 73-90. DOI: 10.1111/j.1468-2370.2005.00107.x
- CARPENTER, S.; WALKER, B.; ANDERIES, J.M.; ABEL, N. (2001) From metaphor to measurement: resilience of what to what? *Ecosystems*, v. 4, n. 8, p. 765-781. DOI: 10.1007/s10021-001-0045-9
- CARTA MAIOR, 2006. *Desastre ambiental mata quase 100 toneladas de peixes*. Disponível em: <<https://www.cartamaior.com.br/?/Editoria/Meio-Ambiente/Desastre-ambiental-mata-quase-100-toneladas-de-peixes/3/12055>>. Acesso em: 4 fev. 2018.
- CARVALHO, P.V. R. (2011) The use of Functional Resonance Analysis Method (FRAM) in a mid-air collision to understand some characteristics of the air traffic management system resilience. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 96, n. 11, p. 1482-1498. DOI: 10.1016/j.res.2011.05.009
- CILLIERS, P. (1998) *Complexity and Postmodernism: Understanding Complex Systems*. Londres: Routledge.
- CONSÓRCIO PÚBLICO DE SANEAMENTO BÁSICO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOS SINOS (PRÓ-SINOS). *Plano de Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos*. Disponível em: <<http://www.consorcioprosinos.com.br/planos-e-acoeps/plano-de-bacia>>. Acesso em: 15 nov. 2014.

- CORLETT, R.T. (2015) The Anthropocene concept in ecology and conservation. *Trends in Ecology & Evolution*, v. 30, n. 1, p. 36-41. DOI: 10.1016/j.tree.2014.10.007
- COTE, M.; NIGHTINGALE, A.J. (2012) Resilience thinking meets social theory Situating social change in socio-ecological systems (SES) research. *Progress in Human Geography*, v. 36, n. 4, p. 475-489. <https://doi.org/10.1177/0309132511425708>
- DUIT, A.; GALAZ, V.; ECKERBERG, K.; EBBESSON, J. (2010) Governance, complexity, and resilience. *Global Environmental Change*, v. 20, n. 3, p. 363-368. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.04.006>
- FOLKE, C. (2006) Resilience: the emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, v. 16, n. 3, p. 253-267. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002>
- FOLKE, C.; ROCKSTRÖM, J. (2009) Turbulent times. *Global Environmental Change*, v. 19, n. 1, p. 1-3.
- GLASER, M.; KRAUSE, G.; RATTER, B.M.W.; WELP, M. (Orgs.). (2012) *Human-nature interactions in the Anthropocene: potentials of social-ecological systems analysis*. Londres: Routledge.
- GRIGGS, D.; STAFFORD-SMITH, M.; GAFFNEY, O.; ROCKSTRÖM, J.; ÖHMAN, M.C.; SHYAMSUNDAR, P.; STEFFEN, W.; GLASER, G.; KANIE, N.; NOBLE, I. (2013) Sustainable development goals for people and planet. *Nature*, v. 495, p. 305-307. DOI: 10.1038/495305a
- HALE, A.; BORYS, D. (2013) Working to rule or working safely? Part 2: The management of safety rules and procedures. *Safety Science*, v. 55, p. 222-231. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.05.013>
- HASSLER, U.; KOHLER, N. (2014) Resilience in the built environment. *Building Research & Information*, v. 42, n. 2, p. 119-129. <https://doi.org/10.1080/09613218.2014.873593>
- HOLLNAGEL, E. (2012) *FRAM: the functional resonance analysis method: modelling complex socio-technical systems*. Farnham: Ashgate Publishing.
- HOLLNAGEL, E.; FUJITA, Y. (2013) The Fukushima disaster-systemic failures as the lack of resilience. *Nuclear Engineering and Technology*, v. 45, n. 1, p. 13-20. <https://doi.org/10.5516/NET.03.2011.078>
- LIU, J.; DIETZ, T.; CARPENTER, S.R.; ALBERTI, M.; FOLKE, C.; MORAN, E.; PELL, A.N.; DEADMAN, P.; KRATZ, T.; LUBCHENCO, J.; OSTROM, E.; OUYANG, Z.; PROVENCHER, W.; REDMAN, C.L.; SCHNEIDER, S.H.; TAYLOR, W.W. (2007) Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, v. 317, n. 5844, p. 1513-1516. DOI: 10.1126/science.1144004
- NASCIMENTO, C.A. do; NAIME, R. (2009) Panorama do uso, distribuição e contaminação das águas superficiais no Arroio Pampa na bacia do Rio dos Sinos. *Estudos Tecnológicos em Engenharia*, v. 5, n. 1, p. 101-120. DOI: 10.4013/ete.2009.51.08
- NORRIS, F.H.; STEVENS, S.P.; PFEFFERBAUM, B.; WYCHE, K.F.; PFEFFERBAUM, R.L. (2008) Community resilience as a metaphor, theory, set of capacities, and strategy for disaster readiness. *American Journal of Community Psychology*, v. 41, n. 1-2, p. 127-150. DOI: 10.1007/s10464-007-9156-6
- PERROW, C. (1984) *Normal accidents: Living with high-risk technologies*. Princeton: Princeton University Press.
- STROEBEL, C.K.; MCDANIEL JR., R.R.; CRABTREE, B.F.; MILLER, W.L.; NUTTING, P.A.; STANGE, K.C. (2005) How complexity science can inform a reflective process for improvement in primary care practices. *Joint Commission Journal on Quality and Patient Safety*, v. 31, n. 8, p. 438-446. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1553-7250\(05\)31057-9](https://doi.org/10.1016/S1553-7250(05)31057-9)
- WALKER, B.; GUNDERSON, L.; KINZIG, A.; FOLKE, C.; CARPENTER, S.; SCHULTZ, L. (2006) A handful of heuristics and some propositions for understanding resilience in social-ecological systems. *Ecology and Society*, v. 11, n. 1, p. 13. <https://doi.org/10.5751/ES-01530-110113>
- WOLTJER, R. (2006) A systemic functional resonance analysis of the Alaska Airlines flight 261 accident. *Human Factors and Economic Aspects on Safety*, p. 83.