

Ocorrência e Solução/Prevenção de Desvios de Segurança no Trabalho, Acidentes no Trabalho e Lesões Baseado num Modelo de Dinâmica de Sistemas

Renato Saraiva Lima da Silva (UFF) renato.saraiva.lima@gmail.com

RESUMO: A abordagem da dinâmica de sistemas tem larga aplicação nas empresas e em estudos de gestão dos negócios, porém, a segurança do trabalho não costuma utilizar esses conceitos para o entendimento dos processos de ocorrência e solução/prevenção de desvios de segurança no trabalho, acidentes no trabalho, lesões e lesões incapacitantes e fatais. Este artigo propõe aplicar este instrumental nesta área estratégica das empresas, desenvolvendo um modelo utilizando a técnica de dinâmica de sistemas que permite qualificar os contribuintes positivos e negativos nestes quatro diferentes fluxos, utilizando-se o software Vensim®. A metodologia provou ser útil ao abordar tantas variáveis sob perspectiva dinâmica ao introduzir novas possibilidades teórico-instrumentais que podem ser utilizadas na tomada de decisão para definição de ações e investimentos.

Palavras-chave: Lesões Graves e Fatais (*SIF - Serious Injuries and Fatalities*); Potencial de Lesões Graves e Fatais (*PSIF - Potential Serious Injuries and Fatalities*); Prevenção; Modelagem de Dinâmica de Sistemas.

Keywords: Serious and Fatal Injuries (SFI); Potential for Serious and Fatal Injuries (PSFI); Prevention; System Dynamics Modeling

1. INTRODUÇÃO

Apesar das reduções significativas nas taxas gerais de acidentes de trabalho ao longo dos últimos anos, em muitas organizações as reduções nos níveis de eventos fatais e graves não seguiram o mesmo ritmo (SMARTLAB, 2024; U.S. BUREAU OF LABOR STATISTICS, 2024; EUROPEAN AGENCY FOR SAFETY AND HEALTH AT WORK, 2024). Isso leva a várias questões:

- O modelo de segurança tradicional é limitado na sua aplicação? Perdeu a sua utilidade, especialmente em relação às lesões graves e fatais?
- Deveríamos pensar de forma diferente sobre a prevenção de lesões graves e fatais?
- Que abordagem devemos adotar para a prevenção de lesões graves?

Internamente, nas organizações, os acidentes de trabalho são frequentemente atribuídos a “algo de errado que o trabalhador fez” denominado de “erro humano” e as ações se concentram, na maioria das vezes, em corrigir o comportamento do trabalhador (DEKKER, 2014). Consequentemente, enquanto o trabalhador assume a responsabilidade pelo motivo da falha, as verdadeiras causas do acidente permanecem desconhecidas e sem solução. Embora seja muito mais fácil culpar o trabalhador pelo seu “erro”, insistir na busca de como rever e aprimorar o processo de trabalho para que não permita que tal erro possa acontecer é a forma mais eficaz de resolver o problema de gestão do risco (REASON, 2002).

Uma reavaliação do pensamento na filosofia da gestão da Segurança do Trabalho está reexaminando alguns desses conceitos, questionando a maneira como os líderes têm definido a forma de gerenciar as expectativas para as suas organizações e considerando as contribuições valiosas da linha de frente, pois, os trabalhadores são quem melhor entendem os processos de trabalho e detêm o poder de decisão final em relação aos riscos. Nesse contexto, o conceito de que a ocorrência das lesões graves e fatais é proveniente do acúmulo de desvios, quase acidentes e acidentes de menor gravidade – de acordo com o conceito tradicional da Segurança do Trabalho – vem sendo um dos pontos significantes de discussão entre os profissionais da área. Para compreendermos melhor este cenário, este estudo procurará realizar uma modelagem de dinâmica de sistemas relacionando e ligando as variáveis mais relevantes ao tema. Em adição a isso, destaca-se o uso da análise Prisma como método de revisão sistemática tendo a identificação de documentos sobre o tema informado e sua caracterização quanto às palavras-chave, periódicos, autores, países e grupos temáticos.

Para atender a essa proposta, o artigo foi dividido nas seguintes seções: uma introdução na seção 1, seguida do referencial teórico, onde foi realizada uma breve dissertação sobre o porquê esse conceito tradicional da Segurança do Trabalho vem sendo criticado/revisto, na seção 2. Na seção 3, foi realizada uma revisão bibliográfica acerca do tema na plataforma Scopus. A metodologia adotada para a elaboração da pesquisa é vista na seção 4. Na seção 5, temos a apresentação dos resultados obtidos nesta pesquisa. Por fim, na seção 6 temos as conclusões e na seção 7 a bibliografia utilizada.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Acidentes e lesões no trabalho

2.1.1. Problema antigo, paradigma antigo

Heinrich *et al.* (1980) descreveu, pela primeira vez, a relação proporcional entre os tipos de lesões, em 1931. Desde então, essa relação – desenhada em um triângulo ou pirâmide – tem sido entendida e defendida como um padrão imutável, que afirma que há uma relação inversa entre frequência e gravidade, ou seja, quanto mais grave a lesão, menos frequente ela é (Figura 1).

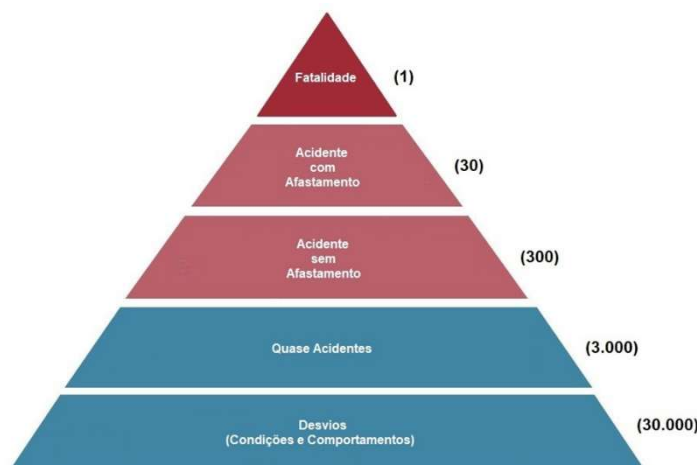


Figura 1 - Triângulo da Segurança (Baseado em Heinrich, 1980)
Fonte: Autor (2024)

Seria um erro grave desconsiderar o fato de que eventos frequentes de baixa gravidade indicam potencial para eventos de alta gravidade: um ambiente que frequentemente gera eventos de baixa gravidade possui problemas de sistemas, ambientais, físicos, culturais, psicológicos e de liderança, entre outros, que podem – e eventualmente irão – gerar eventos de alta gravidade também. Portanto, a conclusão lógica é que se você reduzir lesões menores em 20%, pode esperar uma redução de 20% em lesões maiores.

A excelência em segurança estaria diretamente relacionada à eficácia com que a organização controla a exposição a perigos na interface de trabalho, a configuração que define a interação do trabalhador com a tecnologia. Mas as exposições ocorrem de várias maneiras; podem ser uma condição, decisão, comportamento, atividade, padrão cultural, processo ou sistema (ou a falta dele). As exposições também variam no nível de risco que representam. O triângulo da segurança torna-se, então, insatisfatório como o único guia para a prevenção de lesões graves e fatais (*SIF* - *Serious Injuries and Fatalities*) porque tem uma tendência a limitar nosso pensamento e nos embalar em uma falsa sensação de segurança.

Por exemplo, baixas taxas de lesões podem mascarar a presença de exposições de alto potencial. Desenvolver uma estratégia eficaz para prevenir eventos de lesões graves e fatais requer uma nova estrutura que leve em conta a variedade de tipos e intensidades de exposições no local de trabalho e que forneça às organizações a capacidade de lidar com elas adequadamente.

2.1.2. Problema antigo, paradigma atual

Segundo Busch (2022), o triângulo de segurança em particular levou a vários problemas na prevenção eficaz de eventos de lesões graves e fatais:

- Falta de priorização aos desvios e quase acidentes que têm o potencial para eventos SIF: não distinguir o potencial para lesões graves em meio aos desvios tem levado muitas organizações a tratar todos os desvios menos graves e quase acidentes igualmente, o que significa que uma exposição com um potencial de baixa gravidade recebe a mesma atenção que uma exposição com um potencial de alta gravidade.
- Priorização maior em ocorrências triviais: como as organizações não conseguem perceber a melhoria na gravidade, muitas levam a relação inversa como regra e aplicam uma abordagem "mais é mais" tentando melhorar a segurança concentrando-se em todas as exposições e se preocupando com eventos triviais.
- Classificação “criativa” de lesões: pensar em lesões – e após o acidente ter acontecido – como o principal motivo ou indicador a ser estudado pode levar as organizações a categorizar lesões de forma criativa (por exemplo, *first aid* ou primeiros socorros, *medical treatment* ou tratamento médico, *restricted work* ou trabalho restrito, entre outros).
- Perda de credibilidade: tomar o paradigma do triângulo de segurança como verdade absoluta, ao invés de avaliar e reagir ao cenário real de exposição, pode aumentar a distância entre a gerência de uma organização e seus trabalhadores. Num caso extremo, essa situação pode levar ao cinismo, pois, eles percebem que os esforços de segurança não correspondem à realidade.
- Falta geral de compreensão em relação à prevenção de eventos SIF: confiar em uma visão simplista demais em relação às causas dos acidentes limita a capacidade de uma organização

de distinguir aquelas exposições que representam a maior ameaça à vida de seus trabalhadores.

Esses elementos podem estar presentes por muitos anos antes de se combinarem com as circunstâncias locais e falhas ativas para penetrar nas camadas de defesas do sistema. Como diz Conklin (2012), um acidente pode ser definido como uma combinação inesperada de variabilidade normal. No caso de lesões graves e fatais são amplamente definidos como um acontecimento de lesão que altera ou ameaça a vida e por serem raros, acabam dificultando seu tratamento preventivo.

Em 2011, o grupo de estudo da Behavioral Science Technology & ORC Mercer Worldwide (ExxonMobil, Potash Corp., Shell, BHP Billiton, Cargill, Archer Daniels Midland Company e Maersk) estudou uma ampla gama de casos de fatalidades e concluiu que o triângulo da segurança não é preditivo. A redução das lesões na parte inferior do triângulo (lesões leves) não garante uma redução das lesões graves e fatais na parte superior do triângulo, representando somente 21% da base do triângulo (Figura 2).

“Em 2011, o grupo de estudo da Behavioral Science Technology & ORC Mercer Worldwide divulgou descobertas mostrando que as causas e correlatos das lesões graves e fatais são normalmente diferentes daqueles de lesões menos graves, e o potencial SIF é baixo para cerca de 79 por cento das lesões não SIF. Cerca de 20 por cento das lesões registráveis têm potencial para ser SIF ” (Thomas Krause, Ph.D. e fundador da Behavioral Science Technology)

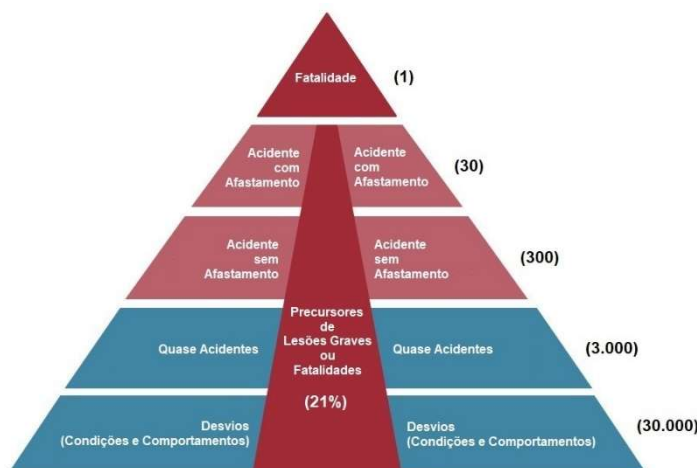


Figura 2 - Triângulo da Segurança Revisado
(Baseado em BST - Behavioral Science Technology & ORC Mercer Worldwide, 2011)
Fonte: Autor (2024)

Sob esse novo paradigma, mais foco é alocado para reduzir a taxa de lesões graves e fatais, em oposição à redução da contagem de todos as lesões.

Segundo Parikh *et al.* (2024), o maior desafio para a redução da taxa de lesões graves e fatais é a identificação adequada do risco antes da materialização e a principal razão é que as empresas, geralmente, se concentram apenas em incidentes onde as lesões graves e fatais (*SIF - Serious Injuries and Fatalities*) ocorreram, de forma reativa, e incidentes que causaram lesões leves,

mas tinham o potencial de fazê-lo passar despercebidos. Identificar esses incidentes potencialmente causadores (ou precursores) de lesões graves e fatais (*PSIF - Potential Serious Injuries and Fatalities*) permitiria que as empresas trabalhassem na identificação de riscos críticos e tomassem medidas para preveni-los antes de acontecerem. No entanto, identificar PSIF exige que todos os processos sejam analisados individualmente por especialistas quanto às questões operacionais, sob a ótica da Segurança no Trabalho e Segurança de Processo, sendo, portanto, um investimento bastante significativo, que geralmente não é acessível, especialmente para pequenas e médias empresas.

Além disso, diante de um diagnóstico de PSIF, como tomar a decisão de quais investimentos priorizar e quais investimentos mitigar com ações de Engenharia, administrativa e proteção pessoal do trabalhador até que possa realizar o investimento em toda a amplitude e necessidade.

O Campbell Institute (2018) desenvolveu um trabalho explicando que lesões graves e fatais são definidas como eventos onde existem 3 fatores:

- 1) Envolvem uma situação ou atividade de trabalho de alto risco;
- 2) As barreiras críticas ou controles de gestão necessários para proteger os trabalhadores nessas situações estão ausentes;
- 3) É provável que ocorra uma fatalidade ou lesão grave se essas condições anteriores forem tratadas como habituais e aceitas pelos trabalhadores e liderança em geral.

O Campbell Institute (2020), também indica maneiras de iniciar um programa de detecção e correção de potenciais de lesões graves e fatais:

- Fazer uma compilação dos últimos acidentes sérios e eventualmente fatais ocorridos em um período de tempo (5 a 10 anos); desta compilação fazer um filtro dos contextos-chave causadores dos acidentes.
- A partir deste levantamento, criar procedimentos práticos e objetivos derivados dos estudos de pré-investigação de situações teóricas e reais, sendo que nestas últimas devem ser incluídos os trabalhadores para informar quais atividades entendem ser as mais perigosas em seus pontos de vista.
- Estabelecer treinamento de todos os envolvidos, incluindo trabalhadores terceirizados, com abordagem pedagógica adequada à maximização de retenção do conteúdo.
- Fazer uma ampla divulgação dos pontos principais de cada discussão suportado com bom plano de comunicação.
- Iniciar um programa de inspeção para monitorar a efetividade das práticas e elaborar um indicador proativo de medição do que está dando certo – não do que está dando errado, como de costume –, reforçando este ponto.
- Identificar da mesma forma os PSIF e SIF ocorridos como acima e aplicar a metodologia para analisar como algo foi feito, como algo é feito ou como algo poderia ser feito, a fim de produzir uma representação dele em uma confiável sistemática usando um formato bem definido, as chaves de decisão e ações críticas.
- Realizar estudo para incorporar defesas e capacidades para evitar tais condições danosas no processo através de procedimentos ou barreiras tecnológicas.

Um excelente exemplo desta metodologia é o *Functional Resonance Analysis Method (FRAM)*, desenvolvido por Hollnagel (2012; 2017). A base da FRAM é a descrição das funções (atividades) que compõem um trabalho ou um processo. A descrição começa pelas próprias funções (atividades), e não pela forma como elas são ordenadas ou relacionadas. Os relacionamentos são especificados indiretamente por meio das descrições dos aspectos das funções. O termo técnico comum para essas relações são acoplamentos. A caracterização da variabilidade (desvios e falhas) em um modelo FRAM é o ponto de partida para entender como as funções podem ser interconectadas e como isso pode levar a resultados inesperados, e especialmente no caso de potenciais de lesões graves e fatais proporciona com mais exatidão a identificação dos protos frágeis de decisão e possibilidade de inserção de medidas de controle e preventivas para evitar em erros e suas consequências.

“Precisamos encarar o fato de que o mundo não pode ser explicado por modelos de causa e efeito. Incidentes e acidentes não acontecem apenas de maneira linear, eles também incluem fenômenos emergentes decorrentes da complexidade do sistema em geral” (Erik Hollnagel).

As novas visões da Segurança no Trabalho não são uma ruptura com os métodos tradicionais, mas, uma ponte onde as ciências humanas e exatas são inseridas no mesmo contexto da avaliação dos fatores humanos e organizacionais.

2.2. Conceitos e premissas básicas da dinâmica de sistemas

Durante os últimos 60 anos, o uso da metodologia conhecida como dinâmica de sistemas vem crescendo substancialmente, sendo aplicada a problemas da gestão, economia, ciências ambientais, fenômenos sociais e educação, contudo, os conhecimentos não são utilizados na segurança do trabalho no Brasil.

Os primeiros trabalhos sobre dinâmica de sistemas procuraram modelar o comportamento de sistemas retroalimentados em sistemas sócio-técnico-econômicos, ao argumentar sobre a importância da retroalimentação de informações para a tomada de decisão. Assim, a principal premissa da dinâmica de sistemas refere-se à importância da estrutura do sistema – dos elementos físicos, das regras de decisão e de suas inter-relações – para explicar o comportamento do sistema em estudo.

Forrester (2013) concluiu que a principal causa para a flutuação da cadeia de suprimentos da General Electric era a estrutura de tomada de decisão, em relação, principalmente, às decisões sobre o ponto de reposição de estoques e à defasagem entre essas decisões e os impactos na cadeia.

Sterman (1989), com base no chamado “jogo da cerveja”, observou que os jogadores costumam usar heurísticas (capacidade de descobrir e inventar) subótimas para facilitar a tomada de decisão, levando, também, a resultados subótimos. Concluiu, portanto, que a estrutura interna do sistema – a cadeia de suprimentos e as regras de decisão dos gestores – explicavam o comportamento do sistema – o desempenho caracterizado por períodos de excesso de estoque e por períodos de falta de estoque. Esta visão endógena é particular da dinâmica de sistemas.

A segunda premissa da dinâmica de sistemas está relacionada com o fenômeno da acumulação, isto é, as respostas do sistema às ações dos tomadores de decisão apresentam-se na forma da acumulação ou redução de matéria, energia ou informação. Exemplos de estoques – a representação utilizada na dinâmica de sistemas para a acumulação – na gestão de operações são diversos, desde os estoques de produto acabado e produto em processo, até o estoque de mão de obra disponível, o estoque de pedidos na lista de espera e o estoque de matéria prima (STERMAN, 2000; GRÖSSLE *et al.*, 2008). Desta forma, para a dinâmica de sistemas, os estoques representam o estado do sistema num determinado momento.

Os estoques respondem às mudanças em fluxos de entrada e saída, pois, eles – os estoques – somente podem mudar de nível a partir das mudanças nos valores dos fluxos de entrada e saída. A importância dos estoques e, portanto, dos fluxos, para a dinâmica de sistemas se dá no sentido de oferecer uma visão temporal para o sistema em estudo, pois, os estoques conseguem capturar a memória do sistema, em outras palavras, sem mudanças nos fluxos de entrada e saída, o valor ou nível do estoque permaneceria constante. Um exemplo disso é o modelo desenvolvido por Fiddaman (2002), no qual o autor demonstra que, mesmo com uma redução das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, a quantidade acumulada de CO₂ permaneceria inalterada, pois, na linguagem de dinâmica de sistemas, com esse tipo de política, estaria se alterando apenas o fluxo de entrada (as emissões de CO₂) e não o fluxo de saída (a dissipação do CO₂ na atmosfera), deixando, portanto, o estoque (o nível de CO₂ na atmosfera) constante.

Por outro lado, a dinâmica de sistemas assume que existem vários estoques dentro de sistemas sócio-técnico-econômicos, e que estes influenciam uns aos outros – por meio dos seus fluxos – de forma dinâmica. Esta característica refere-se à terceira premissa da dinâmica de sistemas, os processos de realimentação ou feedback, ou seja, que toda ação ou decisão eventualmente produz uma reação do sistema sob aquela ação ou decisão inicial, alterando, portanto, o estado do sistema em estudo. Para a dinâmica de sistemas, tais processos de realimentação são representados por malhas (ou ciclos), as quais podem ser negativas (orientadas a uma meta) ou positivas (de reforço).

Uma malha negativa produz uma resposta do sistema na forma de estabilização (ou ajuste a uma meta). Um exemplo da área de gestão de operações é o balanceamento de uma linha de produção (GRÖSSLE *et al.*, 2008). Já, uma malha positiva produz uma resposta do sistema na forma de crescimento reforçado. Um exemplo da área de gestão de operações é a difusão de novos produtos num determinado mercado (STERMAN *et al.*, 2015), na medida em que mais usuários adquirem o produto, maior será o efeito multiplicador do boca-a-boca e maior será a taxa de difusão do produto. Sistemas sócio-técnico-econômicos são formados por mais de uma malha de realimentação. De fato, a literatura de dinâmica de sistemas é clara em afirmar que os comportamentos complexos observados em sistemas reais são produto da interação de várias malhas de realimentação, tanto positivas quanto negativas.

Por fim, a quarta e última premissa da dinâmica de sistemas é o efeito da defasagem temporal ou atraso. Tal efeito refere-se ao fato de existir uma defasagem entre as decisões e os resultados dessas decisões, afetando de forma dinâmica ao comportamento do sistema. Exemplos deste tipo de fenômeno na gestão de operações podem ser observados na ampliação da capacidade produtiva, que apresenta um atraso entre o momento que se decide ampliar a capacidade e o

momento em que a capacidade efetivamente é ampliada, devido ao tempo de processamento do pedido, tempo de transporte, tempo de instalação e configuração.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a coleta de dados, utilizou-se a técnica de revisão sistemática da literatura. Esta técnica foi escolhida por sua capacidade de identificar, avaliar e interpretar todas as pesquisas relevantes disponíveis sobre um determinado tópico, garantindo a inclusão de evidências de alta qualidade e a redução de vieses.

A importância da aplicação de técnicas de prospecção de cenários para identificação de informações estratégicas e para a definição de prioridades das organizações é uma constante nos últimos anos, pois a tomada de decisão é uma atividade complexa, destas dependem a sobrevivência das organizações em um ambiente competitivo (ARAÚJO e CASIMIRO, 2020). O processo de revisão sistemática foi conduzido seguindo as recomendações do PRISMA (*Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). O PRISMA (2024) é um conjunto mínimo de itens baseado em evidências que visa ajudar autores científicos a relatar uma ampla gama de revisões sistemáticas e meta-análises, se concentrando nas maneiras pelas quais os autores podem garantir um relato transparente e completo desse tipo de pesquisa. Ele oferece a replicabilidade de uma revisão sistemática da literatura. Os pesquisadores precisam descobrir os objetivos de pesquisa que respondam à questão da pesquisa, declarar as palavras-chave, um conjunto de critérios de exclusão e inclusão. Na fase de revisão, os artigos relevantes foram pesquisados e os irrelevantes foram removidos. Os artigos foram analisados de acordo com algumas categorias predefinidas.

Portanto, a metodologia aplicada nesta pesquisa, que combina revisão sistemática, uso de PRISMA, abordagem quali-quantitativa e análise bibliométrica, proporcionou uma base sólida e rigorosa para a exploração e descrição dos documentos relevantes ao tema estudado.

De acordo com a recomendação PRISMA, delimitou-se a pesquisa em um intervalo de tempo de 15 anos, de 2009 a 2024. Esta pesquisa foi realizada dia 15/11/2024, no banco de dados de resumos e citações Scopus com os termos: “*Serious Injuries and Fatalities*” or “*Lost Time Accident*” or “*Non Lost Time Accident*” or “*Safety Management*” and “*System Dynamics*”, tendo sido encontrados 115 artigos.

A partir dos 117 documentos encontrados na pesquisa inicial, o autor realizou uma avaliação qualitativa, através da leitura dos *Abstracts*, relacionando-os ao tema deste estudo, gerando uma relação final com 71 trabalhos.

Na Tabela 1 constam os 54 artigos que obtiveram citações de acordo com os resultados obtidos na plataforma Scopus.

“Sistemas Sustentáveis na Gestão Ambiental: Inovação e Governança de Dados como Foco Estratégico.”
João Pessoa, Paraíba, Brasil – 27 a 29 de maio de 2026.

Tabela 1 - Títulos, periódicos, ano de publicação e número de citações

Nº	AUTORES	TÍTULO	LOCAL DA PUBLICAÇÃO	ANO	CITAÇÕES
1	Shin, M., Lee, H.-S., Park, M., Moon, M., Han, S.	A system dynamics approach for modeling construction workers' safety attitudes and behaviors	Accident Analysis and Prevention, 68, pp. 95–105	2014	246
2	Mohaghegh, Z., Kazemi, R., Mosleh, A.	Incorporating organizational factors into Probabilistic Risk Assessment (PRA) of complex socio-technical systems: A hybrid technique formalization	Reliability Engineering and System Safety, 94(5), pp. 1000–1018	2009	224
3	Han, S., Saba, F., Lee, S., Mohamed, Y., Peña-Mora, F.	Toward an understanding of the impact of production pressure on safety performance in construction operations	Accident Analysis and Prevention, 68, pp. 106–116	2014	146
4	Guo, B.H.W., Yiu, T.W., González, V.A.	Identifying behaviour patterns of construction safety using system archetypes	Accident Analysis and Prevention, 80, pp. 125–141	2015	93
5	Yu, K., Cao, Q., Xie, C., Qu, N., Zhou, L.	Analysis of intervention strategies for coal miners' unsafe behaviors based on analytic network process and system dynamics	Safety Science, 118, pp. 145–157	2019	81
6	Goh, Y.M., Love, P.E.D., Stagbouer, G., Annesley, C.	Dynamics of safety performance and culture: A group model building approach	Accident Analysis and Prevention, 48, pp. 118–125	2012	75
7	Karwowski, W.	A review of human factors challenges of complex adaptive systems: Discovering and understanding chaos in human performance	Human Factors, 54(6), pp. 983–995	2012	68
8	Goh, Y.M., Askar Ali, M.J.	A hybrid simulation approach for integrating safety behavior into construction planning: An earthmoving case study	Accident Analysis and Prevention, 93, pp. 310–318	2016	65
9	Mohammadi, A., Tavakolan, M.	Modeling the effects of production pressure on safety performance in construction projects using system dynamics	Journal of Safety Research, 71, pp. 273–284	2019	42
10	Wu, X., Yuan, H., Wang, G., Li, S., Wu, G.	Impacts of lean construction on safety systems: A system dynamics approach	International Journal of Environmental Research and Public Health, 16(2), 221	2019	41
11	Mohammadi, A., Tavakolan, M., Khosravi, Y.	Developing safety archetypes of construction industry at project level using system dynamics	Journal of Safety Research, 67, pp. 17–26	2018	36
12	Mohammadi, A., Tavakolan, M.	Identifying safety archetypes of construction workers using system dynamics and content analysis	Safety Science, 129, 104831	2020	32
13	Di Nardo, M., Madonna, M., Murino, T., Castagna, F.	Modelling a safety management system using system dynamics at the Bhopal incident	Applied Sciences (Switzerland), 10(3), 903	2020	29
14	Kontogiannis, T.	A systems perspective of managing error recovery and tactical re-planning of operating teams in safety critical domains	Journal of Safety Research, 42(2), pp. 73–85	2011	29
15	Gou, X., Liu, H., Qiang, Y., ... Wang, Z., Wang, H.	In-depth analysis on safety and security research based on system dynamics: A bibliometric mapping approach-based study	Safety Science, 147, 105617	2022	27
16	Ma, H., Wu, Z., Chang, P.	Social impacts on hazard perception of construction workers: A system dynamics model analysis	Safety Science, 138, 105240	2021	26
17	Zhang, Y., Yi, X., Li, S., Qiu, H.	Evolutionary game of government safety supervision for prefabricated building construction using system dynamics	Engineering, Construction and Architectural Management, 30(7), pp. 2947–2968	2023	22
18	Gong, S., Gao, X., Li, Z., Chen, L.	Developing a dynamic supervision mechanism to improve construction safety investment supervision efficiency in China: Theoretical simulation of evolutionary game process	International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(7), 3594	2021	20
19	Qayoom, A., H.W. Hadikusumo, B.	Multilevel safety culture affecting organization safety performance: a system dynamic approach	Engineering, Construction and Architectural Management, 26(10), pp. 2326–2346	2019	20
20	Kontogiannis, T.	A contemporary view of organizational safety: Variability and interactions of organizational processes	Cognition, Technology and Work, 12(4), pp. 231–249	2010	19
21	Zhang, Y., Wang, S.-X., Yao, J.-T., Tong, R.-P.	The impact of behavior safety management system on coal mine work safety: A system dynamics model of quadripartite evolutionary game	Resources Policy, 82, 103497	2023	18
22	Di Nardo, M., Madonna, M., Santillo, L.C.	Safety management system: A system dynamics approach to manage risks in a process plant	International Review on Modelling and Simulations, 9(4), pp. 256–264	2016	17
23	Wang, L., Cao, Q., Han, C., Song, J., Qu, N.	Group dynamics analysis and the correction of coal miners' unsafe behaviors	Archives of Environmental and Occupational Health, 76(4), pp. 188–209	2021	12
24	Mohammad, M.Z., Hadikusumo, B.H.W.	A Model of Integrated Multilevel Safety Intervention Practices in Malaysian Construction Industry	Procedia Engineering, 171, pp. 396–404	2017	12
25	Han, S.U., Lee, S.H., Peña-Mora, F.	System dynamics modeling of a safety culture based on resilience engineering	Construction Research Congress 2010: Innovation for Reshaping Construction Practice - Proceedings of the 2010 Construction Research Congress, pp. 389–397	2010	12
26	Xu, S., Zhang, M., Xia, B., Liu, J.	Exploring construction workers' attitudinal ambivalence: a system dynamics approach	Engineering, Construction and Architectural Management, 30(2), pp. 671–696	2023	9
27	Ni, G., Lv, L., Wang, S., ... Fang, Y., Liu, Q.	Formation Mechanism and Dynamic Evolution Laws About Unsafe Behavior of New Generation of Construction Workers Based on China's Construction Industry: Application of Grounded Theory and System Dynamics	Frontiers in Psychology, 13, 888060	2022	9

Fonte: Autor (2004)

“Sistemas Sustentáveis na Gestão Ambiental: Inovação e Governança de Dados como Foco Estratégico.”
João Pessoa, Paraíba, Brasil – 27 a 29 de maio de 2026.

Tabela 1 - Títulos, periódicos, ano de publicação e número de citações (continuação)

Nº	AUTORES	TÍTULO	LOCAL DA PUBLICAÇÃO	ANO	CITAÇÕES
28	Ma, L., Ma, X., Zhang, J., Yang, Q., Wei, K.	A methodology for dynamic assessment of laboratory safety by sem-sd	International Journal of Environmental Research and Public Health, 18(12), 6545	2021	9
29	Sun, J., Wang, H., Chen, J.	Decision-making of port enterprise safety investment based on system dynamics	Processes, 8(10), pp. 1–17, 1235	2020	9
30	Zhang, M., Yu, D., Wang, T., Xu, C.	Coupling Analysis of Tunnel Construction Safety Risks Based on N-K Model and SD Causality Diagram	Buildings, 13(4), 1081	2023	8
31	Bastan, M., Baraftabi, L.A., Groesser, S., Sheikahmadi, F.	Analysis of development policies in occupational health and safety management system: A system dynamics approach	Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 2018(JUL), pp. 61–64	2018	8
32	Zhang, Y., Xing, X., Antwi-Afari, M.F., Wu, M.	Safety Risk Estimation of Construction Project Based on Energy Transfer Model and System Dynamics: A Case Study of Collapse Accident in China	International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(21), 14386	2022	7
33	Su, W., Gao, X., Jiang, Y., Li, J.	Developing a construction safety standard system to enhance safety supervision efficiency in China: A theoretical simulation of the evolutionary game process	Sustainability (Switzerland), 13(23), 13364	2021	7
34	Liu, K., Liu, Y., Kou, Y.	Study on construction safety management in megaprojects from the perspective of resilient governance	Safety Science, 173, 106442	2024	6
35	Huang, J., Wu, Y., Han, Y., ... Gao, G., Chen, H.	An evolutionary game-theoretic analysis of construction workers' unsafe behavior: Considering incentive and risk loss	Frontiers in Public Health, 10, 991994	2022	6
36	Boukas, D., Kontogiannis, T.	A system dynamics approach in modeling organizational tradeoffs in safety management	Human Factors and Ergonomics In Manufacturing, 29(5), pp. 389–404	2019	6
37	He, G.	Study on simulation of safety management level in coal mine based on system dynamics	Xitong Fangzhen Xuebao / Journal of System Simulation, 22(8), pp. 2013–2017	2010	6
38	He, G.	Simulation analysis of coal mine safety management based on system dynamics	Energy Procedia, 5, pp. 270–274	2011	5
39	Zhou, M., Chen, X., He, L., Ouedraogo, F.A.K.	Dual-Attitude Decision-Making Processes of Construction Worker Safety Behaviors: A Simulation-Based Approach	International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(21), 14413	2022	4
40	Guo, B.H.W., Yiu, T.W., González, V.A., Goh, Y.M.	Developing a generic and aggregate model of system dynamics for construction safety	Civil Engineering and Environmental Systems, 35(1–4), pp. 6–21	2018	4
41	Jiang, Z., Fang, D.	Confidence building of a system dynamics model on the causation of construction workers' unsafe behaviors	Construction Research Congress 2014: Construction in a Global Network - Proceedings of the 2014 Construction Research Congress, pp. 80–89	2014	4
42	Bouloiz, H., Garbolino, E.	system dynamics applied to the human, technical and organizational factors of industrial safety	Advanced Sciences and Technologies for Security Applications, pp. 93–106	2019	3
43	Li, W., Zhou, L., Hao, J., ... Liu, P., Feng, R.	Dynamic simulation and control strategy exploration of the unsafe behavior of coal mine employees	Resources Policy, 86, 104067	2023	2
44	Cao, Z., Zhu, J., Tang, B., Chen, T.	System dynamics simulation of occupational health and safety management causal model based on NetLogo	Heliyon, 9(8), e18752	2023	2
45	Zhu, Y., Li, C., Li, L., ... Yang, Y., Zhang, G.	Dynamic assessment and system dynamics simulation of safety risk in whole life cycle of coal mine	Environmental Science and Pollution Research, 30(23), pp. 64154–64167	2023	2
46	Xie, X., Hu, J., Fu, G., ... Huang, L., Shen, S.	Investigation of Unsafe Acts Influence Law Based on System Dynamics Simulation: Thoughts on Behavior Mechanism and Safety Control	International Journal of Environmental Research and Public Health, 20(6), 4733	2023	2
47	Mo, J., Cui, L.	Influence of psychological flexibility on safety behavior of railroad construction workers in high altitude areas	Journal of Railway Science and Engineering, 20(11), pp. 4377–4388	2023	2
48	Dadashi Haji, M., Behnam, B.	An automated BIM and system dynamics tool for assessing safety leading indicators in construction projects	International Journal of Building Pathology and Adaptation	2023	2
49	Carter, N., Mansouri, M.	Safety Management Complexity: A Systems Thinking Approach	ISSE 2022 - 2022 8th IEEE International Symposium on Systems Engineering, Conference Proceedings	2022	2
50	Zhou, J., Fang, J., Hou, Y.	Stakeholders' Effect on Construction Safety Management Based on a System Dynamics Model	ICCREM 2014: Smart Construction and Management in the Context of New Technology - Proceedings of the 2014 International Conference on Construction and Real Estate Management, pp. 868–874	2014	2
51	Mayo-Alvarez, L., Del-Aguila-Arcentales, S., Alvarez-Risco, A.	Innovation using dynamic balanced scorecard design as an industrial safety management system in a company in the mining metallurgical sector	Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity, 10(3), 100362	2024	1
52	Park, Y., Park, D.J.	System dynamics approach for assessing the performance of safety management systems in petrochemical plants	Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 90, 105324	2024	1
53	Balaji, P.	Design an optimum safety policy for personnel safety management - A system dynamic approach	AIP Conference Proceedings, 1618, pp. 791–794	2014	1
54	Chen, J., Yang, Y.J., Cao, Q.G.	Analysis and application about coal mine system dynamics model based on non-linear regression	Applied Mechanics and Materials, 675-677, pp. 1473–1478	2014	1

Fonte: Autor (2004)

Dentre esses 54 artigos, 3 se destacam pelo expressivo número de citações, muito superior ao resultado dos demais.

O mais citado foi o artigo com o título *“A system dynamics approach for modeling construction workers' safety attitudes and behaviors”*, dos pesquisadores Mingyu Shin, Hyun-Soo Lee, Moonseo Park, Myunggi Moon e Sangwon Han. Neste trabalho, os autores procuraram desenvolver um modelo baseado em dinâmica de sistemas dos processos mentais dos trabalhadores da construção que pode ajudar a analisar os mecanismos de *feedback* e a dinâmica resultante em relação às atitudes de segurança e comportamentos seguros dos trabalhadores. O modelo desenvolvido foi aplicado para examinar a eficácia de três políticas de melhoria de segurança: incentivos para comportamentos seguros e maiores níveis de comunicação e imersão em acidentes. A aplicação do modelo verificou o forte potencial do modelo desenvolvido para fornecer uma melhor compreensão de como eliminar atos inseguros e funcionar como um banco de testes robusto para avaliar a eficácia de programas de segurança ou sessões de treinamento antes de sua implementação.

O segundo mais citado foi o artigo intitulado *“Incorporating organizational factors into Probabilistic Risk Assessment (PRA) of complex socio-technical systems: A hybrid technique formalization”*, dos autores Zahra Mohaghegh, Reza Kazemi e Ali Mosleh. Neste estudo, foi realizada uma pesquisa com o objetivo principal de estender as estruturas de modelagem de Avaliação de Risco Probabilística para incluir os efeitos de fatores organizacionais como as causas mais profundas e fundamentais de acidentes e incidentes, sendo proposta uma metodologia para selecionar técnicas candidatas apropriadas e sua integração na forma de uma abordagem “híbrida”. Em seguida, foi dado um exemplo por meio de uma integração de Dinâmica de Sistemas, Rede de Crenças Bayesianas, Diagrama de Sequência de Eventos e Árvore de Falhas para demonstrar a viabilidade e o valor das técnicas híbridas. A abordagem híbrida proposta integrou perspectivas de modelagem determinística e probabilística e forneceu uma ferramenta flexível de gerenciamento de risco para sistemas sócio-técnicos complexos.

O terceiro foi o artigo *“Toward an understanding of the impact of production pressure on safety performance in construction operations”*, escrito por SangUk Han, Farzaneh Saba, SangHyun Lee, Yasser Mohamed e Feniosky Peña-Mora. Aqui foi examinada como a pressão de produção se relaciona com o desempenho de segurança ao longo do tempo, identificando seus processos de feedback. Um diagrama de *loop* causal conceitual foi criado para identificar a relação entre o cronograma e os desempenhos de qualidade e os componentes relacionados a um programa de segurança. Foi feito, também, um estudo de caso para investigar essa relação com a ocorrência de acidentes com o uso de dados coletados de um canteiro de obras; este estudo de caso foi usado para construir um modelo de Dinâmica de Sistemas. O modelo de Dinâmica de Sistemas foi, então, validado por meio de análise estatística de desigualdade. A análise de sensibilidade e as técnicas de triagem estatística permitiram, ainda, uma avaliação do impacto dos componentes gerenciais na ocorrência de acidentes. Os resultados do estudo de caso indicaram que atrasos no cronograma e retrabalho são os fatores críticos que afetam a ocorrência de acidentes para o projeto monitorado.

Ainda, do total de 71 artigos, 17 deles não obtiveram citações. Estes artigos constam da Tabela 2.

Tabela 2 - Artigos não citados

Nº	AUTORES	TÍTULO	LOCAL DA PUBLICAÇÃO	ANO
1	Chinda, T.	The dynamic model of the cyclical style of safety management	Managing it in Construction/Managing Construction for Tomorrow, pp. 811–818	2009
2	Wu, P., Chen, H., Long, R.	Notice of Retraction: Effect of safety management on compliance	2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce, AIMSEC 2011 - Proceedings, pp. 2992–2995, 6010386	2011
3	Wu, P., Chen, H., Long, R.-Y.	Effect of management safety enforcement on safety performance	2011 IEEE 18th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, IE and EM 2011, (PART 2), pp. 1236–1240, 6035379	2011
4	Liu, Y.J., Tian, Z.C., Huang, D.M.	System dynamics model of coalmine safety management	Applied Mechanics and Materials, 353-354, pp. 2381–2384	2013
5	Zhang, D.-F., Duanmu, J.-S., Lian, W.-X., Liu, D., Zhang, Y.	Aviation maintenance safety culture safety management mechanism based on system dynamics simulation	Advanced Materials Research, 765-767, pp. 3285–3290	2013
6	Chen, J., Yang, Y., Cao, Q.	Coal mine safety influence factors causality analysis and function relationship construction based on system dynamics	Taishan Academic Forum - Project on Mine Disaster Prevention and Control, pp. 375–380	2014
7	Lim, H.-K., Kim, H., Jang, T.-I., Lee, Y.H.	A protocol for developing a quantitative index for human error prevention	New Ergonomics Perspective - Selected Papers of the 10th Pan-Pacific Conference on Ergonomics, pp. 63–70	2015
8	Li, Y., Li, Y., Zhao, J.	A System Thinking Analysis Approach for Construction Workplace Safety in China: An Example of a Simulation Model at a Site	ICCREM 2016: BIM Application and Offsite Construction - Proceedings of the 2016 International Conference on Construction and Real Estate Management, pp. 351–361	2016
9	Han, S., Lee, S., Peña-Mora, F.	Framework for a resilience system in safety management: A simulation and visualization approach	EG-ICE 2010 - 17th International Workshop on Intelligent Computing in Engineering	2019
10	Kontogiannis, T., Boukas, D.	A system dynamics approach in modeling business processes in safety management and production	Total Safety and the Productivity Challenge, pp. 85–102	2019
11	Ajayeoba, A.O., Adebisi, K.A., Raheem, W.A., Fajobi, M.O., Musa, A.I.	System Dynamic: An Intelligent Decision-Support System for Manufacturing Safety Intervention Program Management	Automation and Innovation with Computational Techniques for Futuristic Smart, Safe and Sustainable Manufacturing Processes, pp. 315–338	2023
12	Realyvásquez Vargas, A., Satapathy, S., García Alcaraz, J.L.	Automation and Innovation with Computational Techniques for Futuristic Smart, Safe and Sustainable Manufacturing Processes	Automation and Innovation with Computational Techniques for Futuristic Smart, Safe and Sustainable Manufacturing Processes, pp. 1–359	2023
13	Feng, R., Zhang, Z., Li, Z., Meng, G., Liu, J.	Building a Sustainable Future: Enhancing Construction Safety through Macro-Level Analysis	Sustainability (Switzerland), 16(17), 7706	2024
14	Kajumulo, K., Matindana, J., Mohamed, F.	Modelling of Safety Performance in Building Construction Projects Using System Dynamics Approach in Tanzania	Safety, 10(3), 57	2024
15	Kajumulo, K., Matindana, J., Mohamed, F.	Modelling of Safety Performance in Building Construction Projects Using System Dynamics Approach in Tanzania	Safety, 10(3), 57	2024
16	Küçük, İ., Yağimli, M., Işıktas, İ.	Modeling the Effects of Safety Culture Affecting Safety Performance on Occupational Accidents with System Dynamics	International Journal of Computational and Experimental Science and Engineering, 10(3), pp. 403–419	2024
17	Muntasir Nishat, M., Renolen Borkenhagen, I., Sveen Olsen, J., Rauzy, A.	Investigating on Combining System Dynamics and Machine Learning for Predicting Safety Performance in Construction Projects	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1389(1), 012034	2024

Fonte: Autor (2004)

4. METODOLOGIA

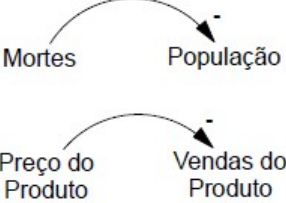
A dinâmica de sistemas auxilia à descoberta das principais causas sistêmicas dos comportamentos indesejados relacionados ao problema sendo analisado. Para isto, a dinâmica de sistemas, com base nas quatro premissas anteriormente descritas, utiliza duas formas de modelamento para compreender a estrutura física e institucional do sistema em estudo, uma qualitativa, conhecida como diagramas de enlace causal (*Causal Loop Diagrams - CLD*) e uma quantitativa, conhecida como diagramas de estoque e fluxo (*Stock and Flow Diagrams - SFD*).

4.1. Diagramas de enlace causal (CLD)

Os CLD servem para identificar e descrever as malhas (ou ciclos) de realimentação. O objetivo do uso do CLD é identificar as principais malhas, tanto negativas quanto positivas, que afetam

o comportamento do sistema. Para isto, utilizam uma notação específica para representar as relações de causa e efeito entre os elementos ou variáveis do sistema, conforme o Quadro 1. Cada relação X-Y é diagramada para identificar possíveis malhas fechadas (ou de realimentação).

Quadro 1 - Polaridades: interpretação, representação matemática e exemplos

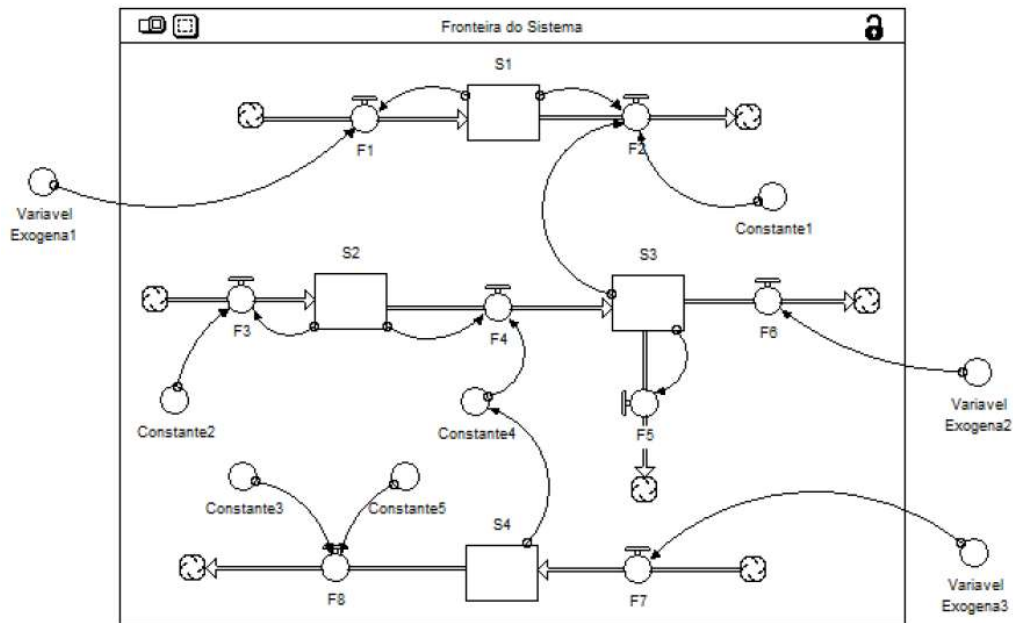
SÍMBOLOS	INTERPRETAÇÃO	REPRESENTAÇÃO MATEMÁTICA	EXEMPLOS
	Se X incrementa (reduz), então Y incrementa (reduz)	$\frac{\partial Y}{\partial X} > 0$	
	Se X Incrementa (reduz), então Y reduz (incrementa)	$\frac{\partial Y}{\partial X} < 0$	

Fonte: Sterman (2000)

4.2. Diagramas de estoque e fluxo (SFD)

Os SFD baseiam-se na matemática diferencial e na construção de sistemas de equações diferenciais que são resolvidos com a ajuda de softwares de programação visual para modelagem de dinâmica de sistemas como o STELLA (*Systems Thinking, Experimental Learning Laboratory with Animation*)®, da Isee Systems, e o Vensim®, da Ventana Systems. Os sistemas de equações – que os softwares resolvem com base a métodos numéricos – são compostos por variáveis que representam a acumulação no sistema (os estoques mencionados anteriormente), os fluxos (que alimentam e vazam os estoques) e variáveis auxiliares. Matematicamente, o estoque representa a resolução de uma equação diferencial dentro do sistema de equações. Desta forma, a ordem do sistema de equações diferenciais dependerá do número de estoques no sistema. Por exemplo, o sistema da Figura 3 apresenta quatro estoques, portanto representa um sistema de equações diferenciais de quarta ordem.

Figura 3 - Exemplo de um modelo de estoques e fluxos



Fonte: Adaptado de Sterman (2000)

O sistema de equações diferenciais da Figura 3 apresenta inter-relações não-lineares entre as diferentes variáveis de estoque, por exemplo, para o Estoque S1, as equações seriam:

$$\frac{dS1}{dt} = F1 - F2$$

Onde: $F1 = f(S1, \text{Variável Exógena1})$
 $F2 = f(S1, S3, \text{Constante1})$

Assim, o estoque S1 depende das variáveis de fluxo F1 e F2. Por sua vez, a variável de fluxo F1 depende do nível da própria variável S1 (no tempo $t - 1$) bem como da variável exógena 1.

Por outro lado, a variável de fluxo F2 depende também do nível de S1 (tempo $t-1$), do nível da variável de estoque S3 (tempo $t - 1$), e do valor da Constante1. Por convenção, as variáveis de fluxo de entrada são representadas como positivas, e as variáveis de fluxo de saída como negativas.

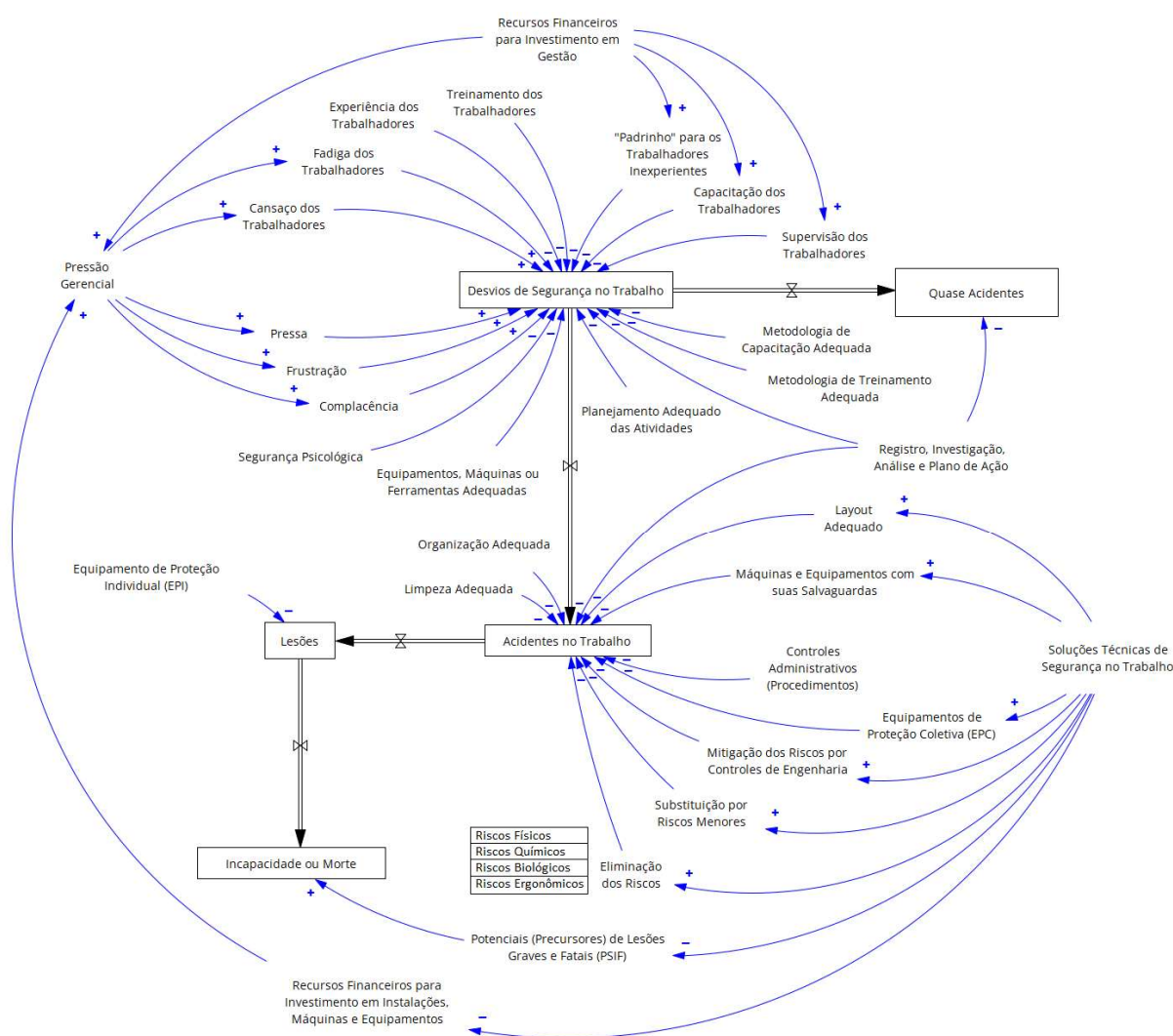
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a realização da avaliação do modelo de dinâmica de sistemas, foram definidos pelo autor 4 estoques com seus fluxos correspondentes:

- Ocorrência de desvios de segurança no trabalho;
- Ocorrência de acidentes no trabalho;
- Ocorrência de lesões;
- Ocorrência de lesões incapacitantes e fatais.

Para cada um destes fluxos foram estabelecidas as relações entre eles e indicados os principais fatores hipotéticos de entrada (ocorrência) e saída (solução/prevenção). Após isso, fatores exógenos ao sistema, mas que possuem influência direta nos seus resultados foram estabelecidos juntamente com suas linhas de fluxos de incremento ou redução, resultando na representação mostrada na Figura 4, elaborada utilizando o software Vensim®. A agregação desses dados foi conduzida segundo as sugestões de Amaral (2012).

Figura 4 - Fatores contribuintes para a ocorrência e solução/prevenção de desvios de segurança no trabalho, acidentes no trabalho, lesões e lesões incapacitantes e fatais



Fonte: Autor (2024)

Os resultados visuais e estruturais do modelo reforçam a insuficiência do Triângulo da Segurança Tradicional como único guia para a prevenção. Historicamente, a crença de que a redução de acidentes leves resultaria automaticamente na redução de fatalidades mascarou o potencial das exposições de alto risco.

A simulação dinâmica corrobora a tese de que acidentes não ocorrem de maneira puramente linear. O modelo evidencia que as lesões graves e fatais derivam de situações em que barreiras



críticas estão ausentes em atividades de alto risco. Dessa forma, a identificação dos Potenciais de Lesões Graves e Fatais (PSIF) atua como um regulador (malha de realimentação) fundamental no sistema, permitindo que as empresas ajam nos riscos críticos antes da sua materialização.

Por fim, o mapeamento sistêmico desvia o foco da tradicional responsabilização do "erro humano". Ao invés de culpabilizar o trabalhador, o modelo expõe as falhas latentes nos processos e nas decisões gerenciais. Assim, a abordagem desenvolvida provou fornecer uma visão holística e integrada das variáveis, atuando como um direcionador estratégico. Ele permite aos tomadores de decisão simular onde os investimentos – seja em engenharia, treinamento ou controles administrativos – terão o maior impacto de mitigação, equilibrando os recursos da empresa em prol de uma operação genuinamente segura.

6. CONCLUSÕES

O processo de modelagem de dinâmica de sistemas foi fundamental para o entendimento de como os processos de ocorrência e solução/prevenção de desvios de segurança no trabalho, acidentes no trabalho, lesões e lesões incapacitantes e fatais acontecem. O processo serve como um direcionador de decisões no sentido de equilibrar as ações e investimentos naquilo que for necessidade urgente da empresa, considerando o bom uso dos recursos, buscando-se o equilíbrio para ter como resultado uma operação segura.

A abordagem da pesquisa deste trabalho considerou que um modelo de dinâmica de sistemas fosse uma alternativa de ferramenta computacional que possibilitasse um entendimento sistêmico e integrado das variáveis envolvidas no processo, compartilhando o modelo com os tomadores de decisão, mostrando que a dinâmica de sistema fornece uma visão holística do processo apresentado.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, J. A. A. *Desvendando Sistemas*. São Paulo: Edição do Autor, 2012.

ARAÚJO, W. J.; CASIMIRO, A. H. T. *Cenários Prospectivos: Revisão Sistemática na Lisa, Emerald, Scopus e Web of Science*. Revista Digital de Biblioteconomia e Ciência da Informação, Campinas, SP, v.18, p.1-22, 2020.

BEHAVIORAL SCIENCE TECHNOLOGY & ORC MERCER WORLDWIDE. *Serious Injuries & Fatalities (SIF) Study*. 2011.

BUSCH, K. *Preventing Industrial Accidents: Reappraising H. W. Heinrich - More than Triangles and Dominoes*. Abingdon, UK: Routledge, 2022.

CAMPBELL INSTITUTE. *Serious Injury and Fatality Prevention: Perspectives and Practices*. Illinois: National Safety Council, 2018.

_____. *Designing Strategy for Serious Injury and Fatality Prevention*. Illinois: National Safety Council, 2020.

CONKLIN, T. *Pre-Accident Investigations: An Introduction to Organizational Safety*. Florida: CRC Press, 2012.

DEKKER, S. *Safety Differently: Human Factors for a New Era*. Florida: CRC Press, 2014.



“Sistemas Sustentáveis na Gestão Ambiental: Inovação e Governança de Dados como Foco Estratégico.”

João Pessoa, Paraíba, Brasil – 27 a 29 de maio de 2026.

EUROPEAN AGENCY FOR SAFETY AND HEALTH AT WORK. *OSH Barometer - Data Visualisation Tool*. Disponível em: <https://osha.europa.eu/en>. Acesso em: 10/11/2024.

FIDDAMAN, T. S. *Exploring Policy Options with a Behavioral Climate - Economy Model*. System Dynamics Review, v. 18, n. 2, p.p. 243-267, 2002.

FORRESTER, J. W. *Industrial Dynamics*. Eastford: Martino Fine Books, 2013.

GRÖSSLE, A.; THUN, J. H.; MILLING, P. M. *System Dynamics as a Structural Theory in Operations Management*. Production and Operations Management, v. 17, n. 3, p.p. 373-384, 2008.

HAN, S.; SABA, F.; LEE, S.; MOHAMED, Y.; PEÑA-MORA, F. Toward an understanding of the impact of production pressure on safety performance in construction operations. Accident Analysis & Prevention, v. 68, p.p. 106-116, July 2014.

HEINRICH, H. W.; PETERSEN, D.; ROOS, N. *Industrial Accident Prevention*. New York: McGraw-Hill, 1980.

HOLLNAGEL, E. *FRAM: The Functional Resonance Analysis Method: Modelling Complex Socio-technical Systems*. Florida: CRC Press, 2012.

HOLLNAGEL, E. *Safety-II in Practice: Developing the Resilience Potentials*. Abingdon, UK: Routledge, 2017.

MOHAGHEGH, Z.; KAZEMI, R.; MOSLEH, A. *Incorporating organizational factors into Probabilistic Risk Assessment (PRA) of complex socio-technical systems: a hybrid technique formalization*. Reliability Engineering & System Safety, v. 94, i. 5, p.p. 1000-1018, May 2009.

PARIKH, P.; PENFIELD, J.; JUAIRE, M. *Automatic Identification of Incidents Involving Potential Serious Injuries and Fatalities (PSIF)*. Scientific Reports, v. 14, art. 8091, 2024.

PRISMA STATEMENT. Disponível em: <https://www.prisma-statement.org/>. Acesso em: 05/11/2024.

REASON, J. *Human Error*. New York: Cambridge University Press, 2002.

SCOPUS. Disponível em: <https://www.elsevier.com/products/scopus>. Acesso em: 15/11/2024.

SHIN, M.; LEE, H.; PARK, M.; MOON, M.; HAN, S. *A system dynamics approach for modeling construction workers' safety attitudes and behaviors*. Accident Analysis & Prevention, v. 68, p.p. 95-105, July 2014.

SMARTLAB. *Observatório de Saúde e Segurança no Trabalho*. Brasil. Disponível em: <https://smartlabbr.org/sst>. Acesso em: 10/11/2024.

STERMAN, J. D. *Modeling Managerial Behavior: Misperceptions of Feedback in a Dynamic Decision Making Experiment*. Management Science, v. 35, n. 3, p.p. 321-339, 1989.

_____. *Business Dynamics. Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston: Mc Graw Hill Higher Education, 2000.

STERMAN, J. D.; OLIVA, R.; LINDERMAN, K.; BENDOLY, E. *System Dynamics Perspectives and Modeling Opportunities for Research on Operations Management*. Journal of Operations Management, v.v. 39-40, p.p. 1-5, 2015.

U.S. BUREAU OF LABOR STATISTICS. Washington, DC, USA. Disponível em: <https://www.bls.gov/>. Acesso em: 10/11/2024.

VENSIM. Industrial Strength Simulation Software to Improve the Performance of Real Systems. Disponível em: <https://vensim.com/>. Acesso em: 10/11/2024.