



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Marcelo Praxedes Larrea Ilhanez

**Avaliação de Indicadores de Segurança em Indústrias de Alto Risco
no Contexto da Engenharia de Resiliência: Uma Revisão
Sistemática da Literatura**

Rio de Janeiro

2023

Marcelo Praxedes Larrea Ilhanez

**Avaliação de Indicadores de Segurança em Indústrias de Alto Risco
no Contexto da Engenharia de Resiliência: Uma Revisão
Sistemática da Literatura**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Ambiental, ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saúde Ambiental e Trabalho

Orientador: Elmo Rodrigues da Silva D.Sc
Coorientadora: Karoline Pinheiro Frankenfeld, D.Sc.

Rio de Janeiro

2023

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/ REDE SIRIUS/ CTC/B

S729a Ilhanez, Marcelo Praxedes Larrea
Avaliação de Indicadores de Segurança em Indústrias
de Alto Risco no Contexto da Engenharia de Resiliência:
Uma Revisão Sistemática da Literatura /Marcelo Praxedes
Larrea Ilhanez. – 2023. 157f.

Orientador: Prof. Dr. Elmo Rodrigues da Silva
Coorientadora: Dr. Karoline Pinheiro Frankenfeld,
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) –
Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

1. Instituição Estadual de Ensino – Avaliação. 2.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 3. Resiliência. I.
Silva, Elmo Rodrigues da. II. Frankenfeld, Karoline Pinheiro.
III. Título.

CDU

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial deste, desde que citada a fonte.


MARCELO PRAXEDES LARREA ILHANEZ

Assinatura

Data

Marcelo Praxedes Larrea Ilhanez

**Avaliação de Indicadores de Segurança em Indústrias de Alto Risco no
Contexto da Engenharia de Resiliência: Uma Revisão Sistemática da Literatura**

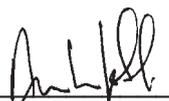
Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental – Saúde Ambiental e Trabalho.

Aprovado em:

Banca Examinadora:



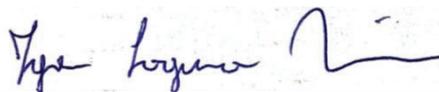
Prof. Dr. Elmo Rodrigues da Silva. (Orientador)
Faculdade de Engenharia – UERJ



Dra. Karoline Pinheiro Frankenfeld (Coorientadora)
General Electric do Brasil



Prof. Dr. Ubirajara Aluizio de Oliveira Mattos
Faculdade de Engenharia – UERJ



Dr. Igor Laguna Vieira
Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN

Rio de Janeiro

2023

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos meus familiares, em especial aos meus pais e minha esposa, sem eles este projeto não seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade do Estado do Rio de Janeiro, por transformar minha busca pelo conhecimento neste projeto de pesquisa. Agradeço aos colegas de turma, principalmente aqueles cujo trabalho desempenhado em equipe possibilitou o surgimento deste tema no qual me debrucei.

Um especial agradecimento aos meus professores: orientador Elmo Rodrigues da Silva, coorientadora Karoline Frankenfeld e o professor Ubirajara Aluizio de Oliveira Mattos. Agradeço a estes professores por todos os ensinamentos e pela troca de conhecimento durante a elaboração deste projeto.

“A ciência hoje é raramente realizada por gênios solitários, por pessoas que trabalham sozinhas e sem ajuda. Em vez disso, a ciência é muito parecida com uma indústria, em que temos grandes colaborações, ótimas equipes, muitos recursos e suporte.”

Brian Keatin

RESUMO

ILHANEZ, Marcelo Praxedes Larrea. *Assessment of Safety Indicators in High-Risk Industries within the Resilience Engineering Context: A Systematic Literature Review*. 2023. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Medir o desempenho da segurança tem sido um desafio para a gestão de organizações produtivas, em particular no contexto da tradicional da Engenharia de Segurança. Como resposta a esse desafio, a Engenharia de Resiliência surgiu como um modelo alternativo nesse campo, sobretudo no que diz respeito à alerta e resposta precoce de acidentes de grandes proporções provocados por organizações que lidam com alto risco tecnológico. Este estudo tem como objetivo discutir e analisar métodos qualitativos e quantitativos para identificar o potencial de resiliência na gestão de segurança e subsidiar novas pesquisas sobre engenharia de resiliência aplicada à gestão de desempenho de segurança em indústrias com altos riscos tecnológicos. Trata-se de um estudo de revisão sistemática da literatura nos últimos dez anos, contados a partir de 2012. Os resultados forneceram uma análise crítica dos métodos selecionados que apontaram os potenciais Indicadores de Resiliência na gestão da segurança em organizações definidas como Sistemas Sociotécnicos Complexos. Os métodos qualitativos indicaram um melhor caminho para as organizações de alta complexidade do que os modelos analíticos lineares, pois esses possuem como uma de suas desvantagens, a dificuldade para avaliar a resiliência das organizações, por tratar-se de um fenômeno multidimensional. Constatou-se que poucos estudos quantitativos selecionados tiveram o objetivo de medir sistemicamente as quatro dimensões principais da resiliência em organizações (antecipação, resposta, monitoramento e aprendizagem). Como limitações da pesquisa, tem-se uma possível perda de informações que podem ocorrer devido aos estudos excluídos na revisão da literatura. Outra dificuldade diz respeito à diversidade de definições da resiliência e da Engenharia de Resiliência, sem haver um consenso, sobretudo por ser uma área relativamente nova e que envolve uma visão multidisciplinar dos processos e estudos que utilizam diferentes métodos e instrumentos analíticos. Espera-se contribuir com o avanço do conhecimento na área da gestão de segurança em organizações de alto risco tecnológico. Recomenda-se para estudos futuros analisar práticas bem-sucedidas para antecipar incidentes ou recuperar a normalidade operacional após a sua ocorrência, considerando-se a capacidade de resiliência dos Sistemas Sociotécnicos Complexos.

Palavras-chave: Engenharia de Resiliência, Indicadores de Segurança, Alto Risco Tecnológico, Sistemas Complexos, Métodos.

ABSTRACT

ILHANEZ, Marcelo Praxedes Larrea. Avaliação de Indicadores de Segurança em Indústrias de Alto Risco no Contexto da Engenharia de Resiliência: Uma Revisão Sistemática da Literatura. 2023. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Measuring safety performance has been a challenge for the management of productive organizations, particularly in the traditional context of Safety Engineering. As a response to this challenge, Resilience Engineering emerged as an alternative model, especially regarding early warning and response to large-scale accidents caused by organizations that deal with high technological risk. This study aims to discuss and analyze qualitative and quantitative methods to identify the potential for resilience in safety management and support new research on resilience engineering applied to safety performance management in industries with high technological risks. This is a systematic literature review study over the last ten years, starting in 2012. The results provided a critical analysis of the selected methods that pointed out potential Resilience Indicators in safety management in organizations defined as Complex Sociotechnical Systems. Qualitative methods indicated a better path for highly complex organizations than linear analytical models, as one of their disadvantages is the difficulty in assessing the resilience of organizations, as it is a multidimensional phenomenon. It was found that few selected quantitative studies aimed to systemically measure the four main dimensions of resilience in organizations (anticipation, response, monitoring, and learning). As a limitation of the research, there is a possible loss of information that may occur due to studies excluded from the literature review. Another difficulty concerns the diversity of definitions of resilience and Resilience Engineering, without there being a consensus, especially because it is a relatively new area and involves a multidisciplinary view of processes and studies that use different analytical methods and instruments. It is expected to contribute to the advancement of knowledge in safety management in organizations with high technological risk. It is recommended for future studies to analyze successful practices to anticipate incidents or recover operational normality after their occurrence, considering the resilience capacity of Complex Sociotechnical Systems.

Keywords: Resilience Engineering, Safety Indicators, High Technological Risk, Complex Systems, Methods.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Histórico dos acidentes e evolução dos métodos-modelos teóricos.....	34
Figura 2 – Visão das defesas - técnica Bow tie de análise dos riscos.....	40
Figura 3 - Migração para os limites do desempenho aceitável.....	42
Figura 4 – Percurso Metodológico da pesquisa	61
Figura 5 – Fluxo do processo de triagem com base na metodologia PRISMA.....	66
Figura 6 – Forestplot para cada variável comum dos ESTUDOS.....	86
Figura 7 - Abordagem preliminar para aplicar a estrutura da escala.....	99
Figura 8 – Visualização do processo coleta construções de outras visualizações	106
Figura 9 – Diagrama de estado representando as principais etapas do caso do aeroporto de Arlanda e seus gatilhos.....	107
Figura 10 – Composição dos Padrões de Resiliência dos Indicadores de Resiliência candidatos.....	107

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição dos estudos nos últimos 10 anos.....	67
Gráfico 2 – Avaliação média da resiliência realizada pelos sete trabalhadores.....	84
Gráfico 3 - Perfil com o potencial de monitorar com base no gráfico radar no Mês 4	118
Gráfico 4 – Perfil com o potencial de monitorar com base no gráfico radar no Mês 8	118
Gráfico 5 - Mês 8, avaliação do status do potencial com suas metas.....	120

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Grandes acidentes ocorridos no Brasil.....	27
Quadro 2 – Definições de Resiliência.....	28
Quadro 3– Definições de Engenharia de Resiliência (ER).....	299
Quadro 4 – Transição do pensamento de segurança do modernismo do século XX para a uma nova era em segurança e fatores humanos.....	46
Quadro 5 - Principais atributos dos Sistemas Sociotécnicos Complexos.....	50
Quadro 6 – Propriedades da Engenharia de Resiliência como base para indicadores.....	57
Quadro 7 – Classificação dos estudos quantitativos selecionados.....	68
Quadro 8 – Classificação dos estudos qualitativos selecionados.....	69
Quadro 9 – Processos com acoplamento justo x acoplamento frouxo.....	70
Quadro 10– Seleção dos temas e atributos dos indicadores.....	80
Quadro 11 - Resumo dos estudos incluídos na pesquisa e atributos dos indicadores quantitativos	90
Quadro 12 – Princípios de resiliência, capacidades e indicadores de potencial (+) positivo e (-) Negativo do estudo de caso Arlanda.....	103
Quadro 13 – Matriz de construtos arquitetônicos	105
Quadro 14 – Síntese dos estudos qualitativos incluídos na pesquisa.....	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Cada atributo recebeu o número “p” de perguntas.....	74
Tabela 2 - Resultado do ACP em relação aos indicadores.....	77
Tabela 3 - Ordem dos indicadores baseados na ACP (Análise de Componentes Principais).....	77
Tabela 4 - Matriz de distância para indicadores por Taxonomia Numérica.....	78
Tabela 5 - Ranking dos indicadores (Taxonomia numérica)	78
Tabela 6 - Números fuzzy na avaliação dos graus de atendimento dos indicadores	83
Tabela 7 - Valores médios do grau de atendimento ao padrão de resiliência.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACC – *Area Control Center*

ACCs – *Air Command and Controls*

ACP – *Análise de Componentes Principais*

AHP – *Analytic Hierarchy Process*

AI – *Artificial Intelligence*

ANSP – *Air Navigation Service Provider*

ATC – *Air Traffic Control Center*

ATCO – *Air Traffic Controller Offices*

ATM – *Air Traffic Management*

CETESB – *Companhia Estadual de Tecnologia de Saneamento Básico e Controle de Poluição das Águas*

COVID 19 – *Coronavirus Disease 2019*

EA – *Enterprise Architecture*

ER- *Engenharia de Resiliência*

EIA – *Estudo de Impacto Ambiental*

EURCONTROL – *European Organization for the Safety of Air Navigation*

FNQ – *Fundação Nacional da Qualidade*

FST – *Fuzzy Set Theory*

FTA – *Fault Tree Analysis*

GA – *Go Around*

HAZOP – *Hazard and Operability Studies*

HOP – *Human and Organizational Performance*

HRO – *High Reliability Organizations*

ICAO – *International Civil Aviation Organization*

ICBM – *Intercontinental Ballistic Missile*

INEA – *Instituto Estadual do Ambiente*

JBI – *Joanna Briggs Institute*

UML – *Unified Modeling Language*

PCA – *Principal Component Analysis*

RAG – *Resilience Assessment Grid*

RE – *Resilience Engineering*

REA – *Resilience Engineering Association*

REWI – *Resilience based Early Warning Indicators*

RIMA – *Relatório de Impacto Ambiental*

SESAR – *Single European Sky ATM Research*

SPM – *Systemic Potential Management*

SSC – *Sistemas Sociotécnicos Complexos*

STAMP – *Systems-Theoretic Accident Modeling and Process*

TN – *Taxonomia Numérica*

TWRs – *Air Traffic Control Tower*

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	18
1	ANTECEDENTES DO DEBATE SOBRE A SEGURANÇA NO CONTEXTO DA ENGENHARIA DE RESILIÊNCIA	24
1.1	Diferentes conceitos sobre resiliência e Engenharia de Resiliência e a sua importância para a saúde e segurança do trabalho	28
1.2	Surgimento da Engenharia de Resiliência como Paradigma para a Gestão da Segurança	33
1.3	A Teoria da Complexidade	47
1.3.1	Sistemas Sociotécnicos Complexos.....	49
1.4	A Capacidade de Monitorar dos Sistemas Resilientes	50
1.4.1	O Conceito de Indicador.....	51
1.4.2	Os Indicadores de Segurança e a Engenharia de Resiliência.....	53
1.5	Metanálise com o uso do coeficiente Alpha de Cronbach	58
2	METODOLOGIA	60
2.1	Caracterização da pesquisa	60
2.1.1	Etapas da pesquisa	61
2.1.2	Critérios de Elegibilidade.....	62
2.1.3	Levantamento de Dados	63
2.1.4	Instrumento utilizado para organização do fluxo de informações da pesquisa	64
2.1.5	Seleção dos estudos para análise.....	65
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
3.1	Seleção e classificação dos estudos quantitativos e qualitativos	67
3.2	Síntese das características dos estudos em diferentes setores industriais considerados como Sistemas Sociotécnicos Complexos ...	69
3.3	Resultados Individuais dos Estudos Quantitativos	71
3.4	Estudos quantitativos com os métodos detalhados	73
3.4.1	Síntese dos Resultados dos Estudos Quantitativos (Metanálise)	85
3.5	Resultados Individuais dos Estudos Qualitativos	92
3.6	Estudos qualitativos e seus métodos detalhados	97
3.6.1	Síntese dos Resultados dos Estudos Qualitativos	121

CONSIDERAÇÕES FINAIS	126
REFERÊNCIAS.....	128
APÊNDICE A – LISTA DE ESTUDOS QUANTITATIVOS E QUALITATIVOS SELECIONADOS PARA A PESQUISA.....	138
APÊNDICE B – RESUMO DOS ESTUDOS EXCLUÍDOS	144
APÊNDICE C – PLANILHA DO LEVANTAMENTO BIBLIOMÉTRICO.....	145
APÊNDICE D - ANÁLISE DO RISCO DE VIÉS.....	146
ANEXO A – PROTOCOLO DE REGISTRO DA PESQUISA.....	150
ANEXO B – QUESTIONÁRIOS DO ESTUDO DE HOLLNAGEL ET AL. (2021)	155

INTRODUÇÃO

- **Contexto da Pesquisa**

Nas últimas décadas, os eventos adversos vistos como acidentes ampliados ocorrido em organizações em todo o mundo, têm provocado impactos ambientais de grandes proporções, com danos às comunidades vizinhas e à saúde e segurança dos seus trabalhadores. Exemplos disso não faltam, como o acidente de Bhopal na Índia (1984), o desastre da Usina Nuclear de Chernobyl na Ucrânia (1986), o vazamento de petróleo do navio Exxon Valdez, no Alaska (1989), o rompimento da barragem de rejeitos da Vale do Rio Doce em Brumadinho (2019), entre tantos outros.

Diante desse contexto, os gestores de organizações, os seus sistemas de governança e a sociedade em geral, vêm se preocupando com o impacto global que pode ser provocado pelas novas tecnologias. Desta forma, as diferentes escolas da administração reconhecem a relevância dessa temática, apontando a necessidade da medição de desempenho das organizações por meio de ferramentas de gerenciamento para o monitoramento e controle para prevenir tais eventos.

De forma geral, as organizações tentam medir seu desempenho em segurança, tanto em termos ocupacionais (que afeta o trabalhador), como em termos de processos (que afeta comunidades vizinhas e o meio ambiente), sendo que duas ferramentas são utilizadas de forma complementar para medir esse desempenho. A primeira delas adota, entre outras medidas: indicadores associados ao desempenho na linha de frente (*sharp end*) relatórios de quase acidente e desvios. Na maioria das aplicações são evidenciados entre oito e doze fatores do trabalho ou tarefa que encapsulam as contribuições dominantes para os problemas de desempenho. A segunda ferramenta é baseada em modelos de eficácia organizacional que se concentram nos processos centrais pelos quais uma organização cumpre sua missão, (HOLLNAGEL *et al.* 2006).

Muitas dessas organizações, ou sistemas sociotécnicos, possuem o desenvolvimento do trabalho organizacional de forma complexa, considerando a interação existente entre as pessoas com a tecnologia no interior dos locais de

trabalho onde operam. Tais sistemas também se referem à interação entre as complexas infraestruturas da sociedade e ao comportamento humano (LONG, 2013).

Eles também podem ser definidos como redes interconectadas de pessoas e tecnologias que funcionam para atingir um objetivo comum (PERROW, 1984). Nesse sentido, a própria sociedade, e a maioria de suas subestruturas, podem também ser vistos como Sistemas Sociotécnicos Complexos - SSC (LONG, 2013).

E para lidar com as situações complexas adversas que podem ocorrer nas organizações, elas devem desenvolver a capacidade de monitorar o seu estado atual, prever possíveis desvios, reagir a perturbações esperadas ou inesperadas e aprender com os sinais de fraqueza do sistema e com os incidentes do passado. Em termos gerais, uma forma de reforçar a sua segurança é desenvolvendo sua capacidade para detectar riscos, lidar com a variabilidade e a incerteza (COOK; RENDER; WOODS, 2000). Esses são alguns dos pressupostos que deram base para uma nova área dentro da gestão da segurança - a Engenharia de Resiliência (ER).

A definição da resiliência bem como a de ER tem sido um desafio para os pesquisadores diante da grande diversidade de conceitos relacionados a esse tema. Woods (2003), por exemplo, considerando as diferentes percepções sobre os fatores de risco que podem provocar falhas em sistemas complexos, seja relativo ao desempenho humano ou de natureza organizacional, afirma que a ER pode fornecer ferramentas de engenharia de sistemas que possibilitam a gerência de tais fatores de forma proativa.

Para esta dissertação, foi adotada a seguinte definição da Associação Internacional de Engenharia de Resiliência (REA - *Resilience Engineering Association*):

A Engenharia de Resiliência adota uma perspectiva transdisciplinar que se concentra no desenvolvimento de teorias e práticas necessárias para permitir que sistemas e organizações sociotécnicas complexas continuem as operações e forneçam serviços essenciais diante de situações esperadas, tensas ou inesperadas. A Engenharia de Resiliência lida com complexidade, não linearidade, interdependências, emergência, estruturas sociais formais e informais, ameaças e oportunidades que se originam de falhas e sucessos passados, atuais ou potenciais, com o objetivo de entender, projetar e implementar sistemas resilientes e operações (REA, 2023, s/p.).

Para Hollnagel *et al.* (2021), quando a resiliência se tornou parte da discussão sobre segurança, ela foi definida como: “a capacidade intrínseca de uma organização (sistema) de manter ou recuperar um estado dinamicamente estável que lhe permita continuar as operações após um grande acidente e/ou na presença de um *stress*

contínuo”. Isto refletia a tradição de justapor dois estados: um de funcionamento estável e o outro em que um sistema falhou. Seguindo o legado deste pensamento, a definição também se limitou a considerar a situação de ameaça, risco ou *stress*.

Dez anos após a publicação do primeiro livro *Resilience Engineering: Concepts and Precepts*, a definição de resiliência mudou para:

A capacidade de ter sucesso sob condições variadas, de modo que o número de resultados pretendidos e aceitáveis (em outras palavras, atividades cotidianas que vão bem) seja o mais alto possível. (HOLLNAGEL *et al.*, 2021, p.8).

• Problema da Pesquisa

Nos estudos preliminares desta pesquisa, buscou-se entender como se manifesta o fenômeno da resiliência em organizações por meio dos sistemas de medição de desempenho em segurança sob a ótica da ER.

Um dos problemas que se identifica na literatura diz respeito às diferentes visões de autores de como classificar se as organizações são resilientes ou não. Hollnagel, Woods e Leveson (2012), por exemplo, consideram ser possível apenas medir o potencial de resiliência das organizações, mas não a própria resiliência. Para Hollnagel (2013), a expressão “*the four cornerstones of resilience*” (os quatro pilares da resiliência) descreve as capacidades essenciais que caracterizam um sistema resiliente como: monitoramento, antecipação, resposta e aprendizagem. Ou seja, a resiliência não seria uma propriedade ou qualidade de um sistema, portanto, não é algo que possa ser medido ou gerenciado por conta própria (HOLLNAGEL *et al.* 2021).

Righi, Saurin e Wachs (2015), por meio de revisão da literatura, analisaram 237 estudos, no período de 2006 até 2014, com o propósito de desenvolver uma agenda de pesquisa sobre os diferentes conceitos que envolvem a resiliência e a Engenharia de Resiliência. Como resultado, eles propuseram os seguintes temas de pesquisa: identificação e classificação da resiliência; indicadores como ferramenta de gerenciamento de segurança com base na Engenharia de Resiliência; análise de acidentes; avaliação de riscos; treinamento e capacitação.

Cabe destacar que as mudanças na definição do conceito de ER, desde 2006, serviram para ampliar o conceito do desempenho resiliente para além da capacidade de se recuperar de ameaças e tensões, bem como responder adequadamente as perturbações, identificando oportunidades para se prevenir de eventos futuros.

Resiliência, sob essa perspectiva, trata do desempenho dos sistemas em geral, não apenas sobre como eles permanecem seguros (HOLLNAGEL *et al.*, 2021).

Peñaloza *et al.* (2020) avaliaram sistemas de medição de desempenho em segurança buscando identificar se a ER oferece uma nova perspectiva e se os conceitos desta disciplina têm sido postos em prática. Os resultados mostraram, ainda que de forma preliminar, que as premissas da ER vêm sendo utilizadas para definição de sistemas de indicadores de desempenho em segurança.

Ranasinghe *et al.* (2020) exploraram quais indicadores de ER são considerados importantes para a gestão da segurança e para o desenvolvimento e avaliação de um ambiente de trabalho resiliente, em particular com relação à construção civil. Eles identificaram quatro indicadores comumente usados que possuem relacionamento com a ER: comprometimento da alta administração; conscientização; aprendizado; e flexibilidade.

Em relação aos indicadores de segurança, a ER visa proporcionar uma melhor compreensão do funcionamento das organizações para melhorar sua capacidade de antecipar condições adversas e benéficas e de agir com eficácia. Muitos artigos conceituais sobre modelos e indicadores foram publicados. Ainda assim, os desenvolvimentos nessa área são incipientes e há necessidade de ferramentas práticas, incluindo evidências de seus benefícios apoiadas em dados empíricos.

- **Motivação para Realização da Pesquisa**

Ao longo das duas últimas décadas venho atuando como profissional na área de Segurança, Meio ambiente e Saúde. Durante este período, que se iniciou em 2004, acumulei experiências tendo atuado em cargos de liderança (coordenação, gerência etc.) em diversos tipos de indústrias de alto risco. Durante minha carreira sempre fui curioso e procurei entender as causas dos grandes acidentes, porém, observei que havia esgotado todas as tentativas e métodos tradicionais que respondessem as minhas perguntas.

Com o passar do tempo, debruçado sobre estas questões, pude perceber que já não era mais possível utilizar tais abordagens para entender e dar conta dos problemas de alta complexidade, de modo que me interessei em analisar os motivos das diversas interrupções e dos grandes acidentes que ocorrem nos Sistemas

Sociotécnicos Complexos por meio do estudo da Engenharia de Resiliência, o que me levou a buscar as respostas às minhas indagações propondo esta temática de pesquisa, a qual apresento agora nesta dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

- **Questão da pesquisa**

Como identificar e analisar o potencial de resiliência de organizações que operam e lidam com alto risco tecnológico por meio de indicadores de segurança criados com base na Engenharia de Resiliência?

- **Objetivo Geral**

Este estudo tem como objetivo discutir e analisar métodos qualitativos e quantitativos para identificar o potencial de resiliência na gestão de segurança e subsidiar novas pesquisas sobre engenharia de resiliência aplicada à gestão de desempenho de segurança em indústrias com altos riscos tecnológicos.

- **Objetivos Específicos**

- Caracterizar as organizações que funcionam como Sistemas Sociotécnicos Complexos em suas operações, à luz da Engenharia de Resiliência;
- Identificar os métodos qualitativos e quantitativos para avaliação ou mensuração do potencial de resiliência no desempenho da segurança operacional em indústrias de alto risco tecnológico;
- Apontar as dificuldades, lacunas e oportunidades na prospecção dos Indicadores do potencial de Resiliência aplicados na avaliação e no monitoramento do desempenho da gestão da segurança dessas indústrias;
- Analisar os resultados e apontar os métodos mais adequados para essa avaliação e monitoramento dessas organizações de alta complexidade operacional.

- **Estrutura da Pesquisa**

Esta dissertação compreende de uma introdução, em que é apresentado o contexto geral do tema da pesquisa, seguida da sua problematização, das questões de pesquisa e dos seus objetivos.

O primeiro capítulo traz a revisão da literatura com as discussões teóricas acerca dos principais pontos abordados, como Resiliência, Engenharia de Resiliência, Sistemas Sociotécnicos Complexos e Métodos Qualitativos e Quantitativos com definição de Indicadores para medir o desempenho da segurança em organizações produtivas.

O segundo capítulo aborda a metodologia de pesquisa, seguida dos resultados, da sua discussão e das considerações finais. E, por fim, são apresentados, como complementos, os Apêndices e os Anexos utilizados.

1 ANTECEDENTES DO DEBATE SOBRE A SEGURANÇA NO CONTEXTO DA ENGENHARIA DE RESILIÊNCIA

É fato que ao longo do tempo os sistemas de gestão em segurança possuíram um enfoque centralizador baseado no modelo Taylorista e ortodoxo. Por longas décadas foram utilizados os conceitos de “cultura de segurança” e “comportamento seguro”. Um exemplo disso foi com os grandes acidentes ocorridos nos anos oitenta e noventa do Séc. XX, cujas causas eram imputadas ao “comportamento inseguro” ou “erro humano” (DEKKER, 2019).

A abordagem da segurança sob o viés da teoria comportamental nasceu da busca por evitar ou prevenir a falha humana. Portanto, fazia-se necessária a busca por uma disciplina operacional que garantisse as operações dentro do estado normal, ou seja, sem a ocorrência de comportamentos inseguros, desvios ou ainda o que consideravam anomalias. Desta forma, foram desenvolvidas ferramentas de gestão para se medir o desempenho em segurança, considerando-se que uma organização sem incidentes, desvios, comportamentos inseguros ou anormalidades tendem a alcançar “zero acidentes”.

É importante salientar que, ao se quantificar os acidentes segundo tais critérios, corre-se o risco de os dados levantados não representarem de forma fidedigna tais acidentes e de ocorrer uma simplificação ou manipulação na sua análise. Isso explica o porquê em alguns exemplos de eventos, apesar de estarem precedidos de indicadores dentro da meta esperada, não garantiram a segurança das operações por não retratarem a realidade operacional, sendo tabulados apenas os eventos indesejados, o que na realidade não garantiu a segurança ou se traduziu em uma falsa sensação de segurança (HOPKINS; MASLEN, 2019).

Diversos estudiosos da escola mais centralizadora e modernista da gestão em segurança (DEKKER, 2019) observaram, ao longo do Séc. XX, a ocorrência de uma série de falhas e acidentes de grandes proporções com grande impacto ao meio ambiente e à segurança, o que, de certa forma, colocaria em questão o uso dos modelos tradicionais da gestão da segurança.

Le Coze (2019) destaca a importância do livro publicado pelo sociólogo britânico Barry A. Turner: *Man-made Disasters* (TURNER, 1978) que apontava o papel

do aspecto social na causalidade dos acidentes. Por meio da comparação de relatórios de investigações de acidentes de grande porte e desastres industriais, Turner chegou à conclusão de que seria melhor buscar entender os desastres como um problema sociotécnico, o qual envolve processos sociais, organizacionais e técnicos interagindo para produzir os fenômenos a serem estudados. Le Coze (2019) considera que não se deu muita importância à essas recomendações. Contudo, posteriormente, pesquisadores passaram a incorporar tais considerações de Turner na busca de uma explicação mais ampliada sobre as causas dos acidentes organizacionais.

Segundo ainda Le Coze (2019), os engenheiros de resiliência que surgiram argumentavam que estavam dedicados a ajudar pessoas e organizações a lidar com a complexidade, conforme abordada pelos estudiosos da escola Rasmussiana (RASMUSSEN; SVENUNG, 2000).

David Woods, professor da Universidade de Ohio (EUA), estudou a integração humana com sistemas automatizados e inteligentes, além das investigações feitas sobre acidentes na aviação, energia nuclear, medicina intensiva, resposta a crises, operações militares, interrupções de serviços digitais críticos e operações espaciais. Ele começou a desenvolver a ER de 2000 a 2003 como parte da resposta a vários acidentes da NASA (IEEE, 2023).

Em seu depoimento ao Senado dos Estados Unidos, Woods afirmou que a complexidade seria uma fonte de risco. No entanto, ao invés de concluir que tal complexidade precisasse ser evitada, ou seus riscos associados aceitos, a ER passaria a representar uma postura otimista e sua agenda deveria desenvolver maneiras de controlar ou gerenciar as capacidades adaptativas de um sistema com base em evidências (WOODS; BRANLAT, 2011). Em suma, a promessa feita pelos estudiosos da ER é de que a resiliência fosse projetada em estruturas e processos organizacionais (LE COZE, 2019).

Por fim, com o surgimento das teorias e novas abordagens propostas pela ER sob a gestão da segurança, seus principais autores propõem uma abordagem diferente da abordagem tradicional da Engenharia de Segurança, de forma complementar, a fim de suprir as lacunas do que foi proposto até então.

Do ponto de vista dos acidentes ocorridos no Brasil, o governo estabeleceu alguns marcos regulatórios apresentados a seguir, embora esses não tenham sido suficientes para impedir os grandes acidentes.

1.1 Acidentes Tecnológicos no Brasil

No Brasil, a preocupação com grandes acidentes tecnológicos se deu devido às ocorrências nos anos 1970 e 1980. Dois grandes acidentes foram marcantes para a criação de um setor específico para acidentes envolvendo produtos químicos. O primeiro ocorreu em 1975, logo após a criação da Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (Feema/RJ), quando houve um dos maiores acidentes envolvendo derramamento de óleo já registrado no Brasil: cerca de seis milhões de litros de petróleo cru foram derramados acidentalmente pelo cargueiro iraniano *Tarik Ibn Ziyad* na Baía de Guanabara, gerando consequências desastrosas para o meio ambiente. A inexperiência por parte das autoridades e da sociedade para lidar com a situação, somada à recém-criação da Feema, evidenciou o despreparo do Rio de Janeiro para solucionar os problemas envolvendo acidentes dessa natureza e magnitude (INEA, 2018).

Em 1984, o rompimento de um duto de gasolina seguido de incêndio em Cubatão causou cerca de quinhentas vítimas, dos quais noventa e três fatais. Na ocasião se iniciou uma conscientização a respeito da vulnerabilidade desse polo petroquímico. A sua localização era propícia aos deslizamentos das encostas da Serra do Mar, podendo ocasionar a destruição de fábricas próximas e a liberação de produtos tóxicos e inflamáveis, o que, por sua vez, poderia colocar novamente em risco a população local (CETESB, 2023).

A fim de conter esses e outros acidentes, surgiram importantes leis no país, como a exigência de estudo de impacto ambiental (EIA), um instrumento previsto na Política Nacional de Meio Ambiente (Lei Federal nº 6.938, de 31 de agosto de 1981). Esta lei, regulamentada pelo Decreto nº 88.315, de 1983, estabeleceu critérios básicos a serem seguidos para a realização do EIA. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Resolução 001/86, instituiu a obrigatoriedade de realização do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e do respectivo Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) para o licenciamento de atividades modificadoras do meio ambiente. Os

Estudos de Análise de Riscos passaram a ser incorporados nesse processo para determinados tipos de empreendimentos, de forma que, além dos aspectos relacionados com a poluição crônica, também a prevenção de acidentes maiores passou a ser contemplada no processo de licenciamento.

Apesar da existência desses marcos regulatórios brasileiros, eles não impediram a ocorrência de inúmeros exemplos de acidentes tecnológicos de grandes proporções que causaram danos ambientais, à saúde e à segurança dos trabalhadores e as comunidades vizinhas, conforme apresentado no quadro 1.

Quadro 1 – Grandes acidentes ocorridos no Brasil.

Grandes Acidentes no Brasil	
1984	Cubatão – SP: o rompimento de duto de gasolina da Petrobras na favela de Socó provocou incêndio, matando 93 pessoas, além do vazamento de 700 mil litros de combustível no meio ambiente.
1987	Goiânia: o acidente radioativo com uma cápsula contendo Cloreto de Césio retirada de um aparelho de radioterapia abandonado contaminou 243 pessoas, muitas delas crianças que pintaram o corpo com o pó fluorescente.
2000	O derramamento de 1.292 milhões de litros de petróleo na Baía de Guanabara (RJ). Vazamento de 7.250 litros no litoral de São Sebastião (SP). 4 milhões de óleo cru vazados pela refinaria em Araucária (PR).
2003	Brasil: o rompimento da barragem de rejeitos Indústria Cataguazes (MG) lançou 1,2 bilhões de litros de substâncias no rio Pomba, atingindo o rio Paraíba do Sul. Destruição do ecossistema; mortandade de animais; escassez de água.
2015	Brasil (Mariana – MG): o rompimento da barragem de Fundão, da empresa Samarco, provocou uma onda de lama tóxica de mais de dez metros de altura. 60 milhões de metros submergiram milhares de pessoas e cidades, além de comprometer seriamente o meio ambiente.
2019	Brasil (Brumadinho - MG): o rompimento da barragem de contenção de rejeitos de minério de ferro da empresa Vale S.A provocou severos impactos socioambientais com 249 mortes e 21 pessoas desaparecidas.
2019	O derramamento de petróleo cru em mais de 2.000 km do litoral do Nordeste e Sudeste contaminou praias, recifes, corais e mangues, com impactos sobre a biodiversidade marinha, o turismo, a economia local e a população.

Fonte: Castro *et al.* 2020.

Como resposta aos acidentes ampliados que ocorreram no mundo, diferentemente da visão tradicional da Engenharia de Segurança, surgiram novas teorias incorporando os diferentes conceitos de Resiliência para buscar entender os contextos que levaram a tais acidentes e oferecendo as bases teóricas da ER, conforme será abordado a seguir.

1.1 Diferentes conceitos sobre resiliência e Engenharia de Resiliência e a sua importância para a saúde e segurança do trabalho

A Resiliência e a Engenharia de Resiliência possuem diversos conceitos que foram sistematizados no Quadro 2 e 3, a seguir.

Quadro 2 – Definições de Resiliência

AUTORES	DEFINIÇÕES
Grotberg (1997)	“Resiliência é uma capacidade universal que permite a uma pessoa, grupo ou comunidade prevenir, minimizar ou superar os efeitos danosos da adversidade”.
Wildavsky (1980)	“Resiliência é a capacidade de lidar com perigos imprevistos depois que eles se manifestam, aprendendo a se recuperar”.
Woods (2009)	“Resiliência, como uma forma de capacidade adaptativa, é o potencial de um sistema para ação adaptativa no futuro quando as informações variam, as condições mudam ou novos tipos de eventos ocorrem, qualquer um dos quais desafia a viabilidade de adaptações, modelos ou suposições anteriores”.
Hollnagel (2006)	“Resiliência é a capacidade intrínseca de um sistema de ajustar seu funcionamento antes, durante ou após mudanças e distúrbios, de modo que possa sustentar as operações necessárias mesmo após um grande acidente ou na presença de estresse contínuo”.
Woods (2015)	“Quatro dimensões do conceito de resiliência são identificadas: “(1) resiliência como rebote do trauma e retorno ao equilíbrio; (2) resiliência como sinônimo de robustez; (3) resiliência como o oposto de fragilidade, ou seja, como extensibilidade graciosa quando a surpresa desafia os limites; (4) resiliência como arquiteturas de rede que podem sustentar a capacidade de adaptação a surpresas futuras à medida que as condições evoluem”.
Hale e Heijer (2006)	“Característica de gerenciar as atividades da organização para antecipar e contornar ameaças à sua existência e objetivos primários”.
Leveson et al. (2006)	“Entendem a resiliência como a capacidade de um sistema de prevenir ou se adaptar a mudanças nas condições, a fim de preservar seu controle sobre uma propriedade do sistema.
Jackson (2010)	“Capacidade de evitar, sobreviver e se recuperar de interrupções”.
Hollnagel (2011)	“A capacidade intrínseca de um sistema para ajustar seu funcionamento antes, durante ou após mudanças e distúrbios, de modo que possa sustentar as operações necessárias sob condições esperadas e inesperadas”.
Patriarca (2018)	“A resiliência em larga escala pode ser definida como uma propriedade do sistema que confere a capacidade de permanecer intacto e funcional, apesar da presença de ameaças”.

Fonte: Extraído de Righi, Saurin e Wachs, 2015.

Quadro 3 – Definições de Engenharia de Resiliência (ER)

AUTORES	DEFINIÇÕES
Woods e Hollnagel (2006)	“A ER é um paradigma que se concentra em como ajudar as pessoas a lidar com a complexidade sob pressão para alcançar o sucesso”.
Hollnagel e Woods (2006)	“A ER visa aumentar a capacidade de um sistema sociotécnico complexo de se adaptar ou absorver perturbações, interrupções e mudanças”.
Fairbanks et al. (2014)	“A ER é o projeto e construção deliberada de sistemas que têm a capacidade de resiliência”.
Resilience Engineering Association (2022)	“A ER adota uma perspectiva transdisciplinar que se concentra no desenvolvimento de teorias e práticas necessárias para permitir que sistemas e organizações sociotécnicas complexas continuem as operações e forneçam serviços essenciais diante de situações esperadas, tensas ou inesperadas. A Engenharia de Resiliência lida com complexidade, não linearidade, interdependências, emergência, estruturas sociais formais e informais, ameaças e oportunidades que se originam de falhas e sucessos passados, atuais ou potenciais, com o objetivo de entender, projetar e implementar sistemas resilientes e operações”.
Anderson et al. (2013)	“A ER representa uma mudança filosófica na ciência da segurança. É uma abordagem proativa que se centra na necessidade de as organizações se adaptarem às mudanças do meio em que se inserem, apoiando os trabalhadores numa adaptação segura quando necessário”.

Fonte: Extraído de Righi, Saurin e Wachs, 2015.

Cook (1998) destaca que os executantes dos sistemas de produção trabalham para produzir o produto desejado e para evitar acidentes, ou seja, os operadores humanos possuem papéis duplos nessa operação. Assim, essa qualidade dinâmica das operações dos sistemas e o balanceamento das demandas de produção contra a possibilidade de falha incipiente é inevitável. Raramente, as pessoas externas ao processo reconhecem a dualidade nas ações dos operadores. Em tempos sem acidentes, o papel da produção é enfatizado, mas após os acidentes, o papel da defesa contra a falha é que passa a ser enfatizado. Em ambos os momentos, a visão dos que estão de fora é de interpretar mal o engajamento simultâneo do operador que possui ambas as funções.

A visão tradicional da segurança ignora esse papel duplo dos operadores e tende a aplicar ferramentas de controle em uma abordagem cartesiana. E isso pode tornar-se uma fonte a mais de estresse, gerando um grande impacto na saúde dos trabalhadores. Contrariamente a essa visão, a ER pode representar um caminho para o bem-estar dos trabalhadores no sentido de aumentar as capacidades positivas e projetar sistemas de gestão baseados nos cinco princípios propostos de HOP – *Human And Organizational Performance* – HOP (CONKLIN, 2019), a saber:

- i) **as pessoas cometem erros:** é uma parte normal do ser humano e um fenômeno operacional que acontece todo o tempo. Projetar sistemas que possam suportar erros evita lesões;

- ii) **a culpa não resolve nada:** os líderes dessa corrente de pensamento há muito sabem sobre a natureza corrosiva da culpa, mas ainda é uma reação comum aos incidentes no local de trabalho;
- iii) **o contexto orienta o comportamento:** o contexto e as circunstâncias que formam o cenário de um evento, como fadiga, demanda de produção ou equipamentos em modo degradados ou quebrados;
- iv) **aprender e melhorar:** todo o objetivo de analisar lesões no local de trabalho é evitar que elas aconteçam novamente, mas muitas organizações veem os mesmos tipos de lesões repetidamente;
- v) **como os líderes respondem às questões relacionadas a falha:** O que acontece em sua organização quando as coisas dão errado? O fracasso é visto como uma oportunidade ou um precursor de um abalo organizacional?

A ER também enfatiza a compreensão de como o sucesso é obtido e como as pessoas e organizações aprendem e se adaptam criando um ambiente de segurança em locais perigosos (SAURIN *et al.* 2013). E, com a existência de *trade-offs* e múltiplos objetivos, torna-se bastante nítido, portanto, que esses novos conceitos trazidos pela ER mostram uma cultura justa, pautada na dignidade do trabalhador em seu local de trabalho. Segundo o princípio da racionalidade local, proposta por Dekker (2017), nenhum trabalhador sai de casa planejando machucar-se. Portanto, deve-se analisar e colocar sobre a mesa todo o contexto nos quais o trabalho era executado durante a investigação de um acidente ou doença ocupacional.

Por fim, Dekker (2014), em sua obra *Safety Differently: Human Factors for a New Era*, a partir das experiências e percepções do trabalho das pessoas que estão diretamente envolvidas nas atividades laborais, considerando que elas sabem o que precisa ser feito para melhorar a saúde, a segurança e a eficiência produtiva, propõe que tais trabalhadores não sejam vistos como um problema a ser controlado, mas uma solução para ser aproveitada. Isso implica em respeitar a dignidade dos trabalhadores envolvidos nas operações e buscar uma solução mais participativa.

Na visão clássica da segurança, o fator humano é propenso a erros ou é visto como “máquinas” falíveis. Frequentemente, o objetivo de uma investigação de

acidente, segundo essa visão, era de encontrar a "falha humana" responsável pela causa principal (ou mesmo a "causa raiz" ou o evento inicial). Nesse posicionamento hegemônico de "caça às bruxas", a falha humana se deu, sobretudo, nas décadas de 1970 e 1980, por ocasião dos grandes acidentes.

Na década de 1990 surgiu outra visão mais crítica sobre a questão da "falha humana", percebendo-se que ela não era mais sustentável e que o peso dado aos fatores ou condições de desempenho no trabalho poderia "forçar" as pessoas a falharem, ou seja, a nova visão considerava que a "falha" seria, sobretudo, um produto das condições e pressões do trabalho (HOLLNAGEL, 2016).

Já neste século, com o aumento da complexidade das sociedades e a progressivas complexidades das organizações, a visão única e simples da "falha humana" não conseguia explicar alguns eventos indesejáveis. Isso levou ao reconhecimento, fortemente apoiado pela ER, de que fracassos e sucessos têm a mesma fonte: a "variabilidade".

O conceito de *Safety-II* assume explicitamente que os sistemas funcionam porque as pessoas são capazes de ajustar o que fazem para corresponder às condições de trabalho. As pessoas aprendem a identificar e superar falhas de *design* e falhas funcionais porque conseguem reconhecer as exigências reais e ajustar o seu desempenho em conformidade, e porque interpretam e aplicam procedimentos que se adaptam às condições. As pessoas também podem detectar e corrigir quando algo dá errado ou quando está prestes a dar errado, para que possam intervir antes que a situação piore seriamente. O resultado disso é a variabilidade do desempenho, não no sentido negativo, onde a variabilidade é vista como um desvio de alguma norma ou padrão, mas no sentido positivo, onde a variabilidade representa os ajustes que são a base da segurança e da produtividade (HOLLNAGEL, 2014b).

Assume-se aqui, como estratégia de aproximação do trabalho imaginado com o trabalho real, que a melhor maneira de fazer as coisas é proporcionando maior liberdade (conceito *Safety II*) para que os vários grupos dentro das empresas tomem as suas próprias decisões, em vez do uso puro e simples de comandos e controles diretos (conceito *Safety I*) (HOLLNAGEL, 2014b). Um dos exemplos desses métodos mais participativos se encontra na prática de *learning teams* (times de aprendizagem).

Essa é uma prática que tem o objetivo de reunir trabalhadores que sabem como o trabalho é verdadeiramente realizado e que podem ajudar a organização e seus

líderes a entender o trabalho real, bem como, o porquê uma operação deu errado ou quase deu errado e até mesmo incorporar práticas bem-sucedidas. A prática de *learning teams* pode apoiar na identificação de algum transtorno operacional ou uma perda de qualidade (EDWARDS; BAKER, 2020).

São pessoas (trabalhadores) que entendem como o trabalho é verdadeiramente realizado e não como ele é planejado apenas ou imaginado, pois mesmo após um planejamento bem realizado, os operadores estão sempre se ajustando. O trabalho planejado ou imaginado nunca é totalmente igual ao trabalho real e os operadores estão sempre fazendo regulações para vencer limitações e ocorrências inesperadas (variabilidades) (EDWARDS; BAKER, 2020).

A abordagem da ER contribuiu para a saúde do trabalhador no atual período de nova revolução industrial de grandes transformações em que a tecnologia tende a desumanizar o trabalho, bem como a negligenciar a capacidade adaptativa dos SSC. E, como consequência, constata-se a desumanização e a desvalorização do trabalho proveniente neste período denominado pejorativamente de ‘uberização’ da economia. Na visão de Bauman (2001), vivemos em um contexto em que as relações sociais, econômicas e de produção são frágeis, fugazes e maleáveis, como líquido.

Da mesma forma que o carvão e o motor a vapor promoveram uma série de danos à saúde dos trabalhadores no Século XIX, principalmente os trabalhadores de nas minas de carvão, na atualidade, as novas ferramentas tecnológicas, como a *internet* e a Inteligência Artificial, trouxeram um novo ciclo de desafio para a gestão da saúde e segurança no trabalho. Por outro lado, neta era já se observa que o uso experimental dessas tecnologias pode ocasionar eventos em função de alguns erros de “*design*”, como, por exemplo, na morte de uma pessoa que foi atropelada por um veículo guiado por aplicativo de “uber autônomo” operado por computador que ocorreu em 2018, na cidade de Tempe, no estado americano do Arizona.

Nesse sentido, a ER pode continuar contribuindo para o trabalho humano, promovendo a capacidade adaptativa dos sistemas homem-máquina e a organização-meio ambiente com o objetivo de prevenir grandes acidentes e suportar as adversidades impostas aos sistemas produtivos.

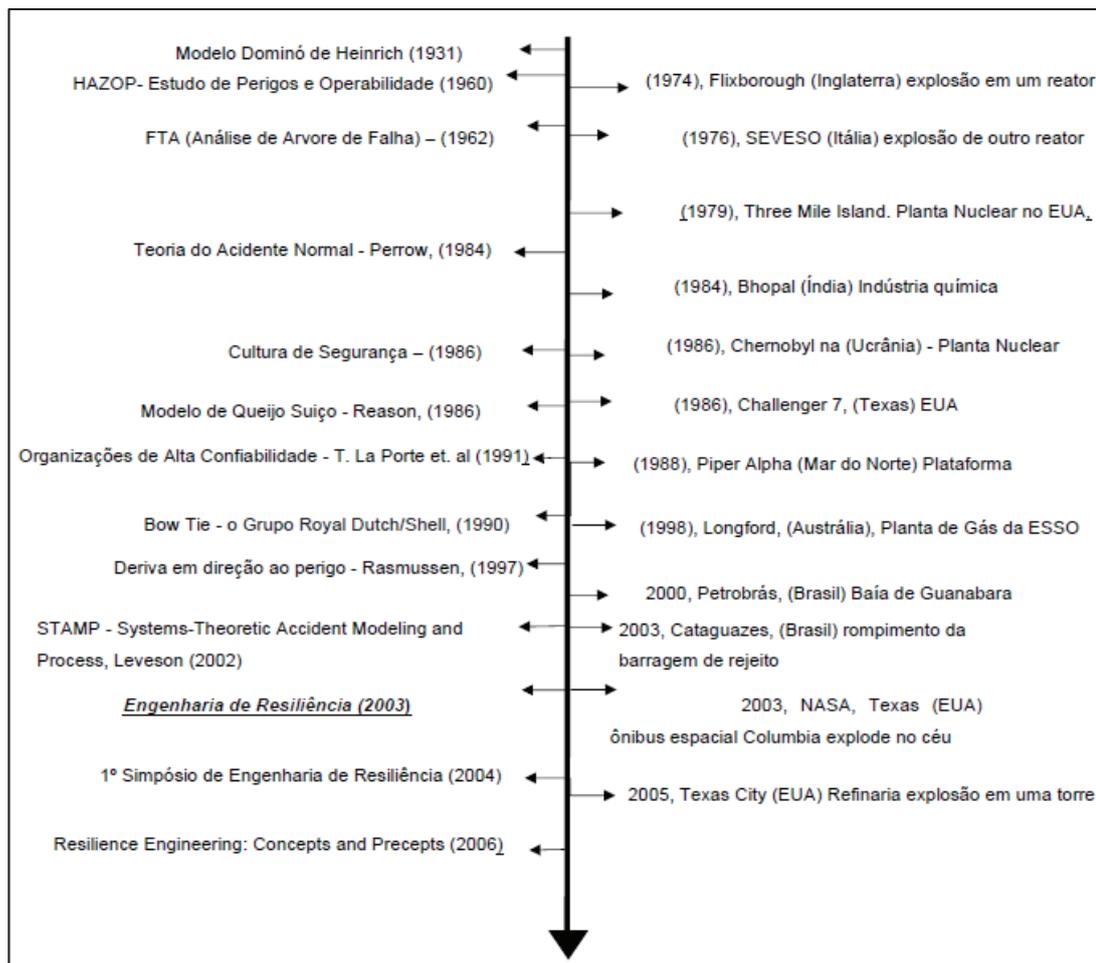
1.2 Surgimento da Engenharia de Resiliência como Paradigma para a Gestão da Segurança

Nesta última década, a ER vem se tornando uma alternativa para a gestão dos SSC. Isso porque novas abordagens na gestão da segurança desses sistemas vêm se mostrando um divisor de água ou um caminho para prevenir perdas e prover diretrizes para o comportamento desses sistemas diante das ameaças constantes provenientes das diversas variabilidades e dos riscos operacionais (RIGHI; SAURIN; WACHS, 2015).

Com as críticas aos acidentes de grandes proporções, ou ainda às variabilidades incidentais, segundo a linguagem da Ergonomia, diversos pesquisadores buscaram repostas por meio de teorias e métodos que explicassem o motivo para que tais acidentes continuassem a acontecer, mesmo com tantas ferramentas de prevenção. Pode se dizer que as pesquisas sobre segurança evoluíram junto com as ocorrências dos grandes acidentes, conforme a linha do tempo mostrada na Figura 1.

Segundo Herrera (2012), a primeira era da segurança foi a da tecnologia. As preocupações com a avaliação de segurança estavam, principalmente, ligadas às falhas tecnológicas e de seu potencial para desencadear acidentes. O modelo dominó foi criado por Heinrich, com a publicação do seu livro "*Industrial Accident Prevention*" (HEINRICH, 1931). O modelo dominó de casualidade explica o acidente como uma combinação de séries que ocorrem em uma ordem fixa. Métodos para avaliação da segurança foram desenvolvidos para buscar as causas dos acidentes, se aplicando o pensamento linear sobre as relações de causa e efeito. As principais técnicas conhecidas inspiradas no pensamento linear foram: *Fault Tree Analysis* (FTA) e *Hazard and Operability Study* (HAZOP).

Figura 1 – Histórico dos acidentes e evolução dos métodos-modelos teóricos



Fonte: adaptado de Herrera, 2012.

Nesse período, marcado pelos grandes acidentes, os aspectos do fator humano estavam relacionados ao *design* e à alocação de funções entre humanos e equipamentos técnicos no controle das operações (MILLER, 1953; FITTS, 1951). Havia uma tendência em dar ênfase à interface homem-máquina e à ergonomia situada, a qual analisa o que acontece no processo do trabalho para que o trabalhador responda às exigências da organização.

Ainda nesse período, também foi proposta uma outra abordagem dos acidentes sob o ponto de vista da liberação de energia indesejada e das barreiras. As estratégias de contramedidas estão relacionadas a prevenir, modificar ou mitigar a fonte de energia inspirada em Haddon (1973). Esse autor postulou diversas estratégias e reconheceu que as várias formas de energia – mecânica, térmica, radiante, química ou elétrica – eram os “agentes” da lesão. O sistema poderia ser melhorado colocando barreiras entre a fonte de energia e o objeto a ser protegido.

A técnica HAZOP (estudo de perigos e operabilidade) foi desenvolvida inicialmente na década de 1960 para analisar os principais sistemas de processos químicos. Desde então, ela foi estendida a outras áreas, incluindo operações de planta de processamento de minério, bem como outros tipos de sistemas de processos e sistemas complexos, como operação de usinas nucleares e desenvolvimento de *software* (KLETZ, 1999).

A análise de árvore de falhas (*Fault Tree Analysis - FTA*) foi, originalmente, desenvolvida, em 1962, nos Laboratórios *Bell* por H. A. Watson por meio de um contrato da Divisão de Sistemas Balísticos da Força Aérea dos EUA para avaliar o Sistema de Controle de Lançamento de Mísseis Balísticos Intercontinentais Nucleares denominados *Minuteman* (ICBM) (ERICSON, 1999).

A segunda era da segurança foi voltada para o erro humano. A compreensão da segurança e as respostas aos principais acidentes industriais são atribuídas ao “erro humano”. A Figura 1 mostra acidentes como Flixborough (1974), Three Mile Island (1979), Bhopal (1984), Challenger e Chernobyl (1986), entre outros. A investigação centra-se no erro humano utilizando conhecimentos psicológicos e psicossociológicos sobre a ocorrência, tipologia e mecanismos do erro humano (SWAIN; GUTTMANN, 1983; REASON, 1990; MAURINO *et al.* 1998; SHAPPELL; WIEGMANN, 2000).

A partir do final da década de 1980 (a era da organização e da cultura de segurança), o papel das organizações e da cultura organizacional é significativo, conforme a linha do tempo na Figura 1. Outro modelo de prevenção de acidentes foi proposto a partir da ideia de uma organização que possuísse uma “cultura de segurança” madura e robusta. Porém, diversos estudiosos se interessaram por pesquisar sobre o que seria verdadeiramente essa cultura.

Segundo Dekker (2019), o termo “cultura de segurança” foi inicialmente empregado por relatórios produzidos pela Agência Internacional de Energia Atômica e representou uma narrativa crítica do modelo capitalista sobre o aparato comunista russo na investigação do acidente de Chernobyl (1986). Segundo o próprio autor, os dois modelos de análise experimentaram falhas e incidentes em atividades nucleares, como, o incidente de *Three Mile Island*, em 1979 e, posteriormente, o acidente de Chernobyl, em 1986.

Ao final dos anos 1970, surgiu uma perspectiva pioneira - a teoria dos desastres causados pelo homem, que apresenta os acidentes como resultado de uma quebra (disrupção) no fluxo e interpretação de informações levando ao desastre. Turner (1978) introduz o conceito de “período de incubação”, onde uma cadeia de erros ou várias cadeias de erros se desenvolvem de forma despercebida. Os indicadores baseados nessa perspectiva estão relacionados à capacidade da organização em identificar e acompanhar os sinais de perigo.

Outra obra pioneira e com o enfoque sistêmico em acidentes foi publicada pelo sociólogo americano Charles Perrow (1984): *Normal accidents: living with high-risk technologies*. Nessa obra o autor enfatiza o papel da estrutura de sistemas complexos nas origens, denominando-os como: “acidentes normais ou sistêmicos”.

Perrow (1984) destaca que os grandes acidentes emergem da complexidade interativa entre os elementos dos SSC. Outro fator explicado por ele em relação à propriedade das interações em sistemas complexos é o fato deles serem estreitamente interligados (*tightly coupling*). Isso significa que os SSC são altamente interdependentes e associadas, de modo que uma mudança numa parte pode rapidamente afetar outras partes, diferenciando das interações consideradas “frouxas”. De acordo ainda com esse autor, os sistemas estreitamente interligados teriam as seguintes características:

- a) Possuem maior número de processos dependentes do tempo, ou seja, que não podem ser paralisados, por exemplo, à espera de uma intervenção corretiva;
- b) Possuem maior proporção de sequências específicas e invariantes, de modo que a ocorrência de A sempre leva ao surgimento de B;
- c) Além das sequências específicas invariantes, o desenho global do processo permite apenas um caminho de obtenção da meta de produção, por exemplo, uma planta nuclear não pode produzir eletricidade a partir de outro combustível, ou seja, trata-se de sistema pouco flexível;
- d) Possuem pequena margem de manobra ou “folga” (*slack*), ou seja, quantidades devem ser precisas, recursos não podem ser substituídos por outros, substituições temporárias de equipamentos não são possíveis etc.

Segundo Almeida (2006), a visão de Charles Perrow leva-o a leitura considerada essencialmente pessimista quanto às possibilidades de prevenção de acidentes nesse tipo de sistemas. Neles, seria impossível antever e evitar todas as

chances de interações complexas. E, parte delas, sendo fortemente interligadas, acabaria levando ao que foi denominado por “acidentes normais ou sistêmicos”. Essa denominação foi dada, não porque fossem acidentes de grandes frequências, mas sim, por decorrerem de características inerentes ao sistema.

Para Perrow (1984), alternativas para esses tipos de acidentes tecnológicos de grandes proporções estariam nas mãos da decisão política de não aceitar a adoção dessas tecnologias ou na estratégia de pessimismo estruturado, ou seja, exploração sistemática dos piores cenários como suporte à elaboração de práticas de prevenção.

Ao final da década de 1990, os acidentes começaram a ser vistos como resultado do funcionamento normal do sistema, pois Perrow já havia publicado a teoria dos acidentes normais. Nesse sentido, os acidentes surgem devido à interação entre humanos, máquinas e o meio ambiente e não podem ser explicados por simples cadeias de efeitos e linearidade. Há uma necessidade de compreender as consequências da migração sistemática de um sistema sociotécnico, levando em conta uma maior complexidade e desempenho (RASMUSSEN, 1997)

Em 1997, o psicólogo James Reason desenvolveu a teoria do “queijo suíço”. O modelo teve sua origem mais especificamente em agosto de 1987, com a publicação do livro *Human Error* (REASON, 1990). A intenção original do livro era fornecer um relato psicológico essencialmente cognitivo da natureza, com variedades e fontes mentais do erro humano. A questão subjacente era: o que a aparência em formato de erros relativamente não aleatórios pode nos dizer sobre processos amplamente ocultos que governam nossos pensamentos e ações? O livro destinava-se principalmente aos colegas de J. Reason: psicólogos cognitivos e acadêmicos.

Não havia nenhum plano de Reason, no início, de incluir os erros latentes e desastres, os quais só apareceram na versão *Mark 1* do modelo. Tal inclusão foi motivada por dois fatores: 1) abandono de um longo capítulo sobre a história dos estudos de erros; 2) onda de desastres ocorrida no final dos anos 1970 e 1980 como: Flixborough, Challenger, Three Mile Island, Bhopal, Chernobyl, o *Herald of Free Enterprise* e o incêndio subterrâneo de *King's Cross* (WEBER, 1983).

Cada um desses acidentes foi exaustivamente investigado e os relatórios deixaram claro que o desempenho daqueles que estavam na ponta (que podem ou não ter cometido erros, mas a maioria o cometeu) foi moldado pelas condições locais do local de trabalho e fatores organizacionais anteriores (WEBER, 1983).

Tornou-se óbvio que não se poderia dar uma explicação adequada do erro humano sem considerar essas questões do contexto. Não havia nada de novo nessa observação. Barry Turner (1978) e Charles Perrow (1984), entre outros, já haviam feito descrições dessas influências sistêmicas na etiologia dos acidentes graves.

O modelo de “queijo suíço” é um dispositivo explicativo heurístico para comunicar as interações e concatenações que ocorrem quando um sistema complexo bem defendido sofre uma falha catastrófica. Em particular, ele transmite o fato de que nenhuma falha, humana ou técnica, é suficiente para causar um acidente. Em vez disso, envolveria a conjunção improvável e, muitas vezes, imprevisível, de vários fatores contribuintes decorrentes de diferentes níveis do sistema. Também indica o que define um acidente organizacional, ou seja, a falha simultânea de várias defesas, facilitada e de alguma forma preparada por características abaixo do ideal relacionado ao *design* da organização.

Outro modelo que também foi aplicado aos indicadores proativos de processo foi a avaliação repetida de um conjunto limitado de 'sinais vitais' que coletivamente fornecem alguma indicação do estado atual da 'segurança' e os fatores que mais precisam de correção. A primeira dessas ferramentas foi o *Tripod Delta*, criado para a Shell em 1988-1990 por Wagenaar, Hudson, Reason, Benson e Groeneweg. Essa filosofia é discutida em detalhes por Reason (1990; 1997). Outras técnicas prospectivas baseadas nessas ideias são: *REVIEW* (criada para a British Rail), *MESH* (adaptada para a *British Airways Engineering* e para a *Singapore Airlines Engineering Company*) e PAOWF (uma técnica para medir 'indicadores proativos' na indústria de energia nuclear dos EUA).

A teoria das Organizações de Alta Confiabilidade (*High Reliability Organizations - HRO*), (LA PORTE, 1996), aprimorou com sucesso o estudo de organizações que lidam com tecnologias complexas. Essa teoria pode ser vista como uma resposta à teoria do Acidente Normal de Perrow (1984). Tais organizações que operam tecnologias altamente perigosas o fazem com muito menos acidentes do que o esperado. Os exemplos incluem o controle de tráfego aéreo, a marinha nuclear dos EUA e algumas usinas nucleares.

Cabe destacar que as Organizações de Alta Confiabilidade estão preocupadas sempre com a possibilidade de falhas. Para usar uma expressão agora bem conhecida, eles exibem o “desconforto crônico” sobre o quão bem eles têm seus

principais perigos sob controle. Elas reconhecem que antes de cada acidente grave havia sinais de alerta precoce do que estava por vir e se eles tivessem sido atendidos teriam impedido a ocorrência do acidente. Isso é verdade para todos os acidentes graves que foram estudados sistematicamente (HOPKINS, 2021). Fundamentados nessa crença, diversos estudiosos já propuseram Indicadores de Resiliência como base para detecção precoce desses sinais que representam falhas em barreiras e defesas que precedem os grandes acidentes.

Segundo Herrera (2012), esse tipo de organização considera a antecipação e a contenção de forma contínua. A antecipação está relacionada à capacidade de tomar conhecimento de eventos inesperados por meio da preocupação com falhas, relutância em simplificar e sensibilidade às operações. Já a contenção envolve resiliência e a capacidade de deferência à perícia. A deferência à expertise está relacionada à migração da tomada de decisão para os níveis em que as pessoas se reúnem para resolver um problema.

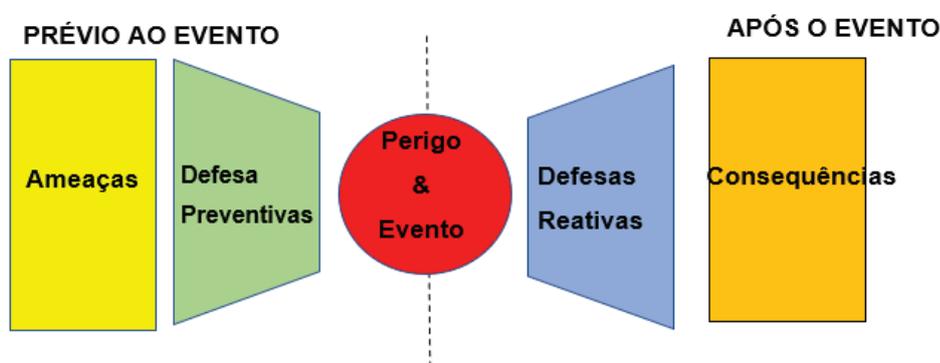
O monitoramento do desempenho com base nessa perspectiva poderia ser realizado por meio de pesquisas para avaliar o *mindfulness* (atenção plena) da organização e para avaliar a sua cultura de segurança. Tais pesquisas podem coletar informações quantitativas (por meio de questionários) e qualitativas (por meio de entrevistas). A Teoria da Organização de Alta Confiabilidade (HRO) (LAPORTE; CONSOLINI, 1991) influenciou o desenvolvimento para promover a cultura de excelência operacional e avaliar fatores organizacionais (REIMAN; OEDEWALD, 2009).

A metodologia *Bow Tie* (Gravata Borboleta), para análise qualitativa de risco, foi fundamentada no modelo de queijo suíço de Reason (1990). As origens exatas da metodologia são um pouco nebulosas. A menção mais antiga parece ser uma adaptação do *ICI PLC Hazan Course Notes* de 1979, apresentado pela Universidade de Queensland, Austrália. Sem dúvida o *Royal Dutch/ Shell Group* foi a primeira grande empresa a integrar totalmente a metodologia *Bow Tie* em suas práticas de negócios (ALIZADEH; MOSHASHAEI, 2015), que são creditados com o desenvolvimento da técnica que é amplamente utilizada hoje.

A principal motivação desse modelo era buscar a garantia de que os controles adequados dos riscos estavam consistentemente implementados em todas as operações por meio de defesas. Esse método é uma análise qualitativa que incorpora

técnicas de sistema de gestão. O *Bow tie* tornou-se popular como um método estruturado para avaliar o risco em que uma abordagem quantitativa não era possível ou desejável. Ela foi utilizada, principalmente, na identificação dos perigos e no desenvolvimento de registro desses perigos. Uma forma esquemática de mostrar como vincular defesas de perigo e sistemas, os procedimentos operacionais em vigor com o objetivo de eliminar o perigo ou reduzir sua frequência de ocorrência, bem como mitigar suas possíveis consequências, está representada na Figura 2.

Figura 2 – Visão das defesas - técnica *Bow tie* de análise dos riscos



Fonte: Frankenfeld e Mattos, 2023.

Em relação ao desempenho de segurança, na perspectiva de energia e barreira, destaca-se a importância do monitoramento da qualidade e da eficácia das barreiras de segurança. Um exemplo disso são os indicadores de barreira propostos por Vinnem (2010), que podem dar alertas precoces em uma abordagem proativa de forma a facilitar a antecipação promovendo uma das funções da resiliência. Esse autor publicou um estudo sobre instalações *offshore* que incluía indicadores proativos como indicadores de desempenho das barreiras, bem como, indicadores individuais para uma série de barreiras. Sabe-se que hoje o conceito de barreira foi estendido do aspecto puramente técnico para os aspectos humanos e organizacionais, pois é óbvio que tais barreiras são gerenciadas por operadores e gestores.

Rasmussen (1997) explica o conceito de *“Drift Tward Danger - Normalization of Deviance”* (Deriva para o perigo – Normalização do Desvio) em sua publicação: *“Risk management in a dynamic society: a modelling problem”*.

Segundo esse autor, os sistemas (organizações) operam dentro de sua capacidade, mas os seres humanos tendem a obter mais do sistema do que ele é

capaz de oferecer. Esse fenômeno empurra para os limites da capacidade do sistema, uma vez que operadores e gestores ultrapassam esses limites, o sistema falha de alguma forma e ocorre o acidente. O modelo, segundo Rasmussen (1997), possui três limitações:

- a) limite para o fracasso econômico e se o cruzarmos é onde se começa a perder dinheiro chegando à falência. O limite econômico falha quando o negócio não é sustentável financeiramente;
- b) limite inaceitável para a carga de trabalho, ou seja, quanto os humanos podem trabalhar e quanto trabalho podem assumir antes de quebrar e falhar?;
- c) limite da falha relacionada ao desempenho. Em que estágio se ultrapassa esse limite? Onde o sistema falhou e o resultado foi a falha ou o próprio acidente?

Dentro desses limites existe o espaço de possibilidade e liberdade para operar. Enquanto isso, tem-se um gradiente da pressão do gerenciamento em sentido contrário do limite para o fracasso econômico em direção a eficiência, portanto, como fazer mais com menos possível de recursos? Tentando obter mais lucro e minimizando os custos e despesas (RASMUSSEN,1997).

Outro gradiente que ocorre na direção oposta ao limite da carga de trabalho e em direção ao menor esforço é a inclinação humana para tentar trabalhar ou fazer coisas usando a menor quantidade de esforço. Essa inclinação deriva do instinto de sobrevivência que os humanos têm que os leva a fazer coisas como cortar caminhos ou encontrar soluções alternativas. No entanto, cortar caminhos não significa que somos preguiçosos, é apenas algo que os humanos fazem muito bem ao longo do tempo.

Tem-se um terceiro gradiente que deriva dos esforços para melhorar a segurança, como: políticas, procedimentos, campanhas, treinamentos. Todos eles reunidos podem mudar a cultura de segurança da organização. Esses esforços empurram contra os outros limites, ou ainda em direção oposta a tais gradientes de pressão do gerenciamento, buscando-se a eficiência e o gradiente de menor esforço.

Durante a busca adaptativa, os atores têm ampla oportunidade de identificar "um gradiente de esforço" e o gerenciamento normalmente fornecerá um "gradiente de custo" eficaz. O resultado muito provavelmente será uma migração sistemática em direção ao limite de desempenho funcionalmente aceitável e, se cruzar o limite for

irreversível, pode ocorrer um erro ou acidente (RASMUSSEN,1997). A Figura 3 mostra o modelo de migração para os limites de desempenho.

Figura 3 - Migração para os limites do desempenho aceitável



Fonte: Adaptado de Herrera (2012)

O cenário econômico da organização, a carga de trabalho, as práticas, as regras e restrições de segurança, são exemplos de pressões que influenciam o desempenho do sistema. Uma possibilidade é que o sistema se mova em direção a limites inaceitáveis. Essa vulnerabilidade pode se manifestar por um acidente, incidente ou interrupção das operações (RASMUSSEN,1997). As defesas podem ser corroídas ao enfrentar pressão de produção e o sistema tende a falhar, como no acidente de *Bohpal*, em 1984, dentre outros grandes acidentes.

Nesse contexto, supõe-se que um sistema de indicadores proativos possa dar alertas precoces relacionados a tais migrações do sistema, embora permaneça a limitação do sistema sociotécnico responder a altura em relação a esses sinais e sintomas. Indicadores estão sempre ligados a ideia de controle dos processos e resultados da organização.

Outro modelo denominado STAMP – (*Systems-Theoretic Accident Modeling and Process*) foi proposto por Nancy Leveson no ano de 2003. O método tem como principais objetivos: identificação dos perigos do sistema e as restrições de segurança necessárias para garantir um risco aceitável e o acúmulo de informações sobre como

essas restrições podem ser violadas para serem utilizadas para eliminar, reduzir ou controlar os riscos no projeto ou nas operações do sistema (HERRERA, 2012).

O resultado da análise STAMP é a informação de *hardware*, *software* e componentes humanos do sistema para:

- orientar procedimentos de teste e verificação (ou treinamento para humanos);
- alterar o *design* geral do sistema para oferecer proteção contra erros;
- adicionar recursos tolerantes às falhas ao próprio componente para proteger contra o perigo;
- orientar o processo de *design* tolerante às falhas.

O modelo STAMP de acidente, baseado na teoria dos sistemas, considera os acidentes como decorrentes das interações entre os componentes do sistema e, geralmente, não especificam variáveis ou fatores causais únicos. Nesse modelo, os acidentes são concebidos como resultado não de falhas de um componente, mas do controle inadequado ou imposição de restrições relacionadas à segurança no projeto, desenvolvimento e operação do sistema.

A segurança é vista como um problema relacionado à falta de controle, ou seja, os acidentes ocorrem quando as falhas de componentes, os distúrbios externos e/ou entre as interações disfuncionais entre os componentes do sistema não são tratados adequadamente. No Ônibus Espacial *Challenger*, por exemplo, os *O-rings* (anéis de vedação) não controlavam adequadamente a liberação do gás propulsor ao selar uma pequena lacuna na junta de campo. Na perda do *Mars Polar Lander*, o *software* não controlou adequadamente a velocidade de descida da espaçonave e interpretou erroneamente o ruído de um sensor de efeito *Hall* como uma indicação de que a espaçonave havia atingido a superfície do planeta.

Acidentes como esses, envolvendo erros de projeto de engenharia, podem, por sua vez, decorrer de um controle inadequado sobre o processo de desenvolvimento, ou seja, o risco não é gerenciado adequadamente na execução do projeto, na sua implementação e fabricação. O controle também é imposto pelas funções gerenciais de uma organização - o acidente do *Challenger* envolveu controles inadequados no processo de decisão de lançamento, por exemplo – e no sistema social e político dentro do qual a organização existe. O papel de todos esses fatores deve ser considerado na análise de acidentes.

Por fim, nos anos 2000, o conceito de complexidade passou a ser enfatizado para mostrar o funcionamento do sistema e que ele não pode ser explicado apenas pela agregação de fatores, mas deve ser entendido como um fenômeno emergente, onde sucessos e fracassos estão relacionados, respectivamente, à capacidade e incapacidade de antecipar e reconhecer riscos e situações críticas, e tomar as ações apropriadas (HOLLNAGEL, 2004). Explicar o sucesso operacional e o trabalho normal, portanto, torna-se tão relevante quanto explicar falhas e acidentes (HERRERA, 2012).

A perspectiva da ER (WOODS; WREATHAL, 2003; HOLLNAGEL *et al.* 2006) baseia-se no entendimento anterior, elaborando o entendimento de segurança relacionado aos Sistemas Sociotécnicos Complexos de hoje. Aqui, o foco está em teorias e ferramentas para criar previsões sobre os padrões de mudança de risco antes que falhas e danos ocorram (HERRERA, 2012).

Quanto à ER, segundo Righi, Saurin e Wachs (2015), as primeiras publicações sobre ela datam de 2003 e foram realizadas por Woods e Wreathall (2003). A primeira delas foi *“Managing Risk Proactively: The Emergence of Resilience Engineering”*, apresentando um panorama e perspectivas futuras sobre a ER. A segunda foi a *“Creating foresight: How resilience engineering can transform NASA’s approach to risky decision making”* (WOODS; WREATHALL, 2003). Porém, a ER tornou-se mais conhecida para a comunidade acadêmica depois do 1º Simpósio de Engenharia de Resiliência, realizado em outubro de 2004 na cidade de Söderköping/Suécia. De lá para cá esse tema veio tomando grande relevância.

A ER representa uma nova maneira de pensar a segurança. Enquanto as abordagens de gerenciamento de risco estabelecidas são baseadas em retrospectiva e enfatizam a tabulação de erros e o cálculo de probabilidades de falha, ela procura maneiras de aprimorar a capacidade das organizações de criar processos robustos e flexíveis, monitorar e revisar modelos de risco e usar recursos proativamente diante de interrupções ou pressões econômicas e de produção contínuas (DEKKER *et al.* 2008).

Dekker (2019) explica que, com o passar dos anos, a ER se tornou uma nova alternativa para a gestão da segurança, contrariamente aos modelos ortodoxos de controle do comportamento do trabalhador, bastante influenciados pelo movimento behaviorista, ao final da década de 1970. Para Dekker (2019), essa visão

centralizadora, que nasceu desde a revolução industrial com Taylor, encontrou críticas desde o surgimento de acidentes emblemáticos ocorridos em empresas com sistemas de gestão e cultura de segurança robustas. Dentre os exemplos citados pelo autor estão a explosão do poço em Macondo no México, que estava precedida de seis anos de desempenho sem lesões e sem incidentes na plataforma (*Deepwater Horizon*, 2010). Outro exemplo, foi a liberação de um grande volume do gás metil mercaptano que matou trabalhadores em uma planta da *DuPont* em Laport, no Texas, em novembro de 2014.

Embora diversos programas de segurança baseados em comportamento e atitude tenham obtido êxito, eles se mostraram altamente controversos, com os sindicatos argumentando que eles representavam à culpabilização dos trabalhadores pelos acidentes, especialmente quando associados à programas que puniam os trabalhadores que sofriam acidentes. Por outro lado, as empresas esperavam que tais programas fossem a chave para reduzir os índices de acidentes, criticando o ponto de vista do sindicato como sendo meramente obstrucionista (DEKKER, 2019).

Na maioria das vezes, os programas comportamentais deixam subentendido que as causas dos acidentes atribuídas se devem ao “erro humano”, sendo que ele não é a coisa em si, mas diz respeito à atribuição ou rótulo que é dado ao comportamento de uma pessoa. O campo de fatores humanos foi construído sobre essa base, porém, é necessário ir para além dela, buscando-se entender as razões em atribuir os resultados ruins ao “erro humano” e os processos cognitivos normais que produzem esse comportamento (DEKKER, 2019).

Segundo Hopkins (2002), deve-se ressaltar, no entanto, que a cultura de segurança focada em comportamento tende a ignorar as condições latentes que estão por trás de todos os acidentes de trabalho, destacando-se as atitudes dos trabalhadores como causa principal dos acidentes.

O “erro humano” pode ser visto como um ato político. Ele aparece, por exemplo, no livro de Perrow sobre acidentes normais na década de 1980. Há uma literatura secundária sobre acidentes, muitas vezes escrita por profissionais ou jornalistas investigativos, que aponta que tal “erro” foi atribuído por conveniência política, pois serviu para esconder questões gerenciais, políticas e organizacionais que poderiam ser honestamente identificadas como as causas “reais” de diversas tragédias (DEKKER, 2019).

Dekker (2014) propôs uma abordagem contrária ao modelo cartesiano-newtoniano da engenharia de segurança tradicional. Para ele existe uma transição da visão modernista em segurança para uma nova, em que os fatores humanos devam ser repensados. Isso inclui também a forma como os indicadores são idealizados. Na maioria das vezes, os indicadores de performance em segurança traduziram a visão da segurança como ausência de coisas ruins, como, por exemplo: incidentes, desvios e lesões. Em alguns casos chega-se a contar até mesmo os números de “erros humanos”, porém, a visão da ER é que segurança é a presença da capacidade do sistema (organização).

No quadro 4 a seguir está a transição do modelo proposto por Dekker (2014).

Quadro 4 – Transição do pensamento de segurança do modernismo do século XX para a uma nova era em segurança e fatores humanos.

Pensamento Modernista	Segurança Diferente
Pessoas são um problema a controlar.	As pessoas são a solução para aproveitar.
A segurança é definida como ausência de coisas negativas (acidentes, lesões) que mostram como as coisas dão errado.	A segurança é definida como presença de capacidade e competências que fazem as coisas darem certo.
A segurança é uma responsabilidade burocrática dirigida para cima na organização.	A segurança é uma responsabilidade ética dirigida para baixo na organização.
As relações de causa e efeito são lineares e sem problemas.	As relações de causa e efeito são complexas e não lineares.
Vocabulários de controle, restrição e déficit humano.	Vocabulários de empoderamento, diversidade e oportunidade humana entre trabalhadores e o respeito a sua dignidade no ambiente de trabalho.

Fonte: Adaptado de Dekker, 2014.

Dekker (2014) critica a visão reducionista da segurança baseada em tabulações de erros, incidentes e lesões, o que gerou por muito tempo uma falsa sensação de segurança. Ele considera que muitos acidentes de grandes proporções ocorreram em organizações que possuíam números zerados de acidentes, incidentes e lesões.

De forma geral, a visão hegemônica das ciências exatas na análise dos acidentes desconsiderava a contribuição das ciências humanas (sociologia, psicologia, ergonomia cognitiva e organizacional) que tentam romper com essa visão ao considerarem os sistemas complexos unidades de interesse e de análise, propondo novas teorias na área da segurança, como: Teoria dos acidentes normais;

Teoria de controle (STAMP); Teoria das Organizações de Alta Confiabilidade; Teoria da Complexidade; Engenharia de Resiliência (DEKKER *et al.* 2008).

1.3 A Teoria da Complexidade

A emergência do pensamento sistêmico representou uma revolução na história do pensamento científico ocidental em meados do Século XX e surgiu como uma crítica ao método analítico de René Descartes (1596 – 1650). O paradigma cartesiano forneceu as bases da ciência moderna, sendo que uma das suas características é que as partes constituintes de um sistema não podem ser analisadas ulteriormente, a não ser reduzindo-as em segmentos menores (CAPRA, 1996)

Dentre as críticas a esse modelo, e que deu origem à nova corrente científica de abordagem sistêmica, é de que as propriedades das partes não são intrínsecas de um sistema e só poderiam ser entendidas considerando o seu contexto amplo. Consequentemente, nessa abordagem, os sistemas não seriam mais observados em blocos básicos e analíticos de seus componentes, mas buscaria a compreensão do todo de sua organização (CAPRA, 1996).

Cabe destacar o papel do biólogo Ludwig von Bertalanffy (1901-1972), com a sua formulação da Teoria Geral dos Sistemas, sendo sua contribuição fundamental para a atual Teoria da Complexidade para compreensão dos sistemas, contrapondo o pensamento newtoniano-cartesiano vigente até então (DEKKER, 2011).

De maneira geral, Cilliers (1998) sintetizou quais seriam as características que compõem os sistemas dito complexos, a saber:

- são sistemas abertos às influências do ambiente em que operam. Tal abertura significa que é difícil enquadrar os limites em torno de um sistema de interesse;
- cada componente ignora o comportamento do sistema como um todo, bem como desconhece os efeitos completos de suas ações. Os componentes respondem localmente às informações apresentadas por eles naquele momento. A complexidade surge das imensas e multiplicadas teias de relações e interações que resultam dessas ações locais;
- complexidade é uma característica do sistema, não dos componentes dentro dele. O conhecimento de cada componente é limitado e local, não havendo

nenhum componente que possua capacidade suficiente para representar a complexidade de todo o sistema neste componente em si;

- operam em condições distantes do equilíbrio. As entradas precisam ser feitas o tempo todo por seus componentes para mantê-lo funcionando. Sem esse fluxo constante de ações, de entradas, ela não pode sobreviver em um ambiente em mudança. O desempenho de sistemas complexos é normalmente otimizado no limite do caos, pouco antes de o comportamento do sistema se tornar irreconhecível e turbulento;
- têm uma história, uma dependência de caminho. Seu passado é corresponsável por seu comportamento presente, e as descrições de complexidade devem levar em conta a história;
- as interações são não lineares. Isso significa que existe uma assimetria entre, por exemplo, entrada e saída, e que pequenos eventos podem produzir grandes resultados. A existência de *loops de feedback* significa que sistemas complexos podem conter multiplicadores (onde mais de um significa mais do outro, por sua vez levando a mais de um e assim por diante) e efeitos borboleta;
- não são fechados. Eles não agem no vácuo, os sistemas ou organizações sociotécnicas são sistemas abertos. Eles estão em constante interação com seu ambiente em mudança.

Diversas áreas do conhecimento estudam sistemas complexos, como a cibernética, a complexidade, a dinâmica não-linear, redes, teoria da catástrofe, teoria geral dos sistemas, sistemas dinâmicos, sistemas adaptativos complexos, entre outros (PERROW, 1984).

A interação em sistemas complexos é fundamentalmente diferente das interações em sistemas lineares (PERROW, 1984). Esse mesmo autor distingue os comportamentos distintos entre os sistemas complexos e os sistemas lineares. As interações lineares são aquelas em sequências de produção ou manutenção esperadas e familiares, e as que são bastante visíveis mesmo se não planejadas. As interações complexas são aquelas de sequências não familiares, ou não planejadas e inesperadas, portanto, não visíveis ou não imediatamente compreensíveis. Ele considera que os componentes de falha dos acidentes estão presentes, na maioria

das vezes, nas interações dos elementos do sistema e não nos componentes em si e que a falha se propaga até que o acidente ocorra.

Segundo Cook (1998), em sistemas complexos, os grandes acidentes requerem falhas múltiplas, ou seja, as falhas pontuais não são suficientes para o seu acontecimento. O acidente catastrófico ocorre quando falhas pequenas e aparentemente inócuas se juntam, havendo a possibilidade da ocorrência de um acidente sistêmico. Dito de outra forma, há muito mais oportunidades de falha do que acidentes explícitos do sistema. A maioria das trajetórias iniciais de falha são bloqueadas por componentes projetados de segurança do sistema. Trajetórias que chegam ao nível operacional são em sua maioria bloqueadas, geralmente por praticantes (operadores).

1.3.1 Sistemas Sociotécnicos Complexos.

Embora não exista consenso sobre a definição de complexidade, no geral é aceito que sistemas complexos compartilham alguns atributos interrelacionados, como: grande número de elementos; propriedades emergentes, não lineares e dinâmicas; *loops* de *feedback*; e comportamento adaptativo. Sistemas complexos podem ser naturais (por exemplo: sistemas termodinâmicos; organismos humanos, ecossistemas) ou ainda artificiais (por exemplo: usinas nucleares; missões espaciais; plantas químicas de processo).

Os SSC podem ser definidos como redes interconectadas de pessoas e tecnologias que funcionam para atingir um objetivo comum (PERROW, 1984). Esses sistemas possuem características relacionadas conforme apresentadas no quadro 5.

Quadro 5 - Principais atributos dos Sistemas Sociotécnicos Complexos

Características do sistema	Atributos
Muitos elementos que interagem dinamicamente	<ul style="list-style-type: none"> • Alterações do sistema ao longo do tempo. • As interações não são lineares. • A interação ocorre entre elementos fortemente acoplados.
Grande diversidade de elementos	<ul style="list-style-type: none"> • Os elementos são diferenciados de acordo com o número de categorias, como níveis hierárquicos e especialização. • A natureza das relações entre os elementos exhibe variedades, em termos de aspectos como grau de cooperação e grau de objetivo compartilhado.
Variabilidade inesperada	<ul style="list-style-type: none"> • Incerteza, que é o resultado da riqueza da interação entre os elementos, bem como do fato de os elementos receberem informações de fonte de informação indireta ou inferencial. • Sistemas complexos são abertos, o que significa que eles interagem com seu ambiente. • Existe o fenômeno da variabilidade inesperada. Um fenômeno emergente surge da interação entre os elementos, independentemente de qualquer controle central ou projeto.
Resiliência	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidade dos sistemas de ajustarem seu funcionamento antes, durante ou após as mudanças e perturbações, de modo que o sistema possa sustentar as operações necessárias nas condições esperadas e inesperadas. • O ajuste de desempenho é guiado por feedback, tanto de eventos recentes quanto da história anterior da organização. • Auto-organização que permite que um sistema complexo se desenvolva ou mude a estrutura interna de forma espontânea e adaptativa.

Fonte: Adaptado de Righi, Saurin e Wachs, 2015.

Assim sendo, esta pesquisa considera fundamental a abordagem dos SSC, vistos como sistemas adaptativos compostos por pessoas e tecnologias que interagem entre si para produzir uma resposta desejável para a área de segurança, bem como para outras áreas dos sistemas produtivos (SAURIN; GONZALEZ, 2013).

1.4 A Capacidade de Monitorar dos Sistemas Resilientes

Segundo Hollnagel (2015), o desempenho resiliente não é possível a menos que um sistema seja capaz de monitorar com flexibilidade, tanto seus próprios desempenhos (o que acontece dentro dos seus limites) e o que acontece no ambiente (fora do limite do sistema). O monitoramento melhora a capacidade do sistema lidar com possíveis eventos a curto prazo – ameaças e oportunidades, sendo importante que ele seja flexível e revisado periodicamente por meio de indicadores adequados. Como exemplo de indicador, pode-se citar o “*Leading indicators*” ou indicador proativo, que pode ser usado para apontar mudanças e eventos que estão prestes a acontecer (HOPKINS, 2009).

A principal dificuldade na proposição de indicadores proativos é que a sua interpretação requer uma descrição articulada, ou modelo, de como o sistema

funciona. E, na sua ausência, os indicadores passam então a ser definidos por associação ou correlação espúria, sendo esse um dos motivos pelo qual a maioria dos modelos analíticos adotam indicadores reativos, como as estatísticas de acidentes (HOLLNAGEL, 2011).

Embora o monitoramento faça sentido nas situações imediatas, ele pode ser menos óbvio para um futuro mais distante. Assim, o objetivo a ser perseguido é o de olhar para o potencial de se identificar possíveis eventos futuros, condições ou mudanças de estado que possam afetar a capacidade do sistema de funcionar positiva ou negativamente (HOLLNAGEL, 2011).

1.4.1 O Conceito de Indicador

A avaliação do desempenho de um produto ou processo organizacional é realizada por meio de indicadores que contêm informações quantitativas ou qualitativas sobre a eficiência, eficácia ou nível de satisfação que, em geral, permite acompanhar sua evolução ao longo do tempo e permite a comparação entre organizações. Pode-se citar como exemplos desses indicadores: a lucratividade; a rentabilidade; a inadimplência; o absenteísmo; a produtividade, entre outros (FNQ, 2014, 2015).

A etimologia da palavra indicador é “aquela que aponta”. Está relacionado com o latim “*indicare*” que significa “apontar”. Os indicadores são amplamente utilizados em sistemas econômicos para previsão e análise (HERRERA, 2012). Segundo a ICAO (*International Civil Aviation Organization*), os indicadores são definidos como “parâmetros que caracterizam ou tipificam o nível de propriedade de um sistema e sugere a definição de desempenho como uma combinação de indicadores quantitativos e qualitativos (ICAO, 2013).

Indicadores são medidas substitutas para itens identificados como importantes no(s) modelo(s) subjacente(s) de segurança e podem ser divididos em grupos denominados reativos ou proativos. O primeiro reflete as informações de desempenho referentes ao passado na gestão de segurança, possibilitando que o sistema aprenda com ele, enquanto o segundo fornece informações para que ações de controle possam ser tomadas a tempo de evitar resultados indesejados no processo ou uma mudança inaceitável em um ou mais dos principais resultados. Ou ainda que os

sistemas de gestão possam se antecipar e mitigar as mudanças adversas com base nos dados analisados (WREATHALL, 2006).

Florin e Linkov (2016) afirmam que indicadores de segurança criados por meio da perspectiva da ER podem apoiar a tomada de decisão sobre riscos, possibilitando que os sistemas de governança em empresas desenvolvam estratégias baseadas na resiliência para ajudar a lidar com choques inesperados e repentinos como acidentes de grandes proporções.

Entretanto, alguns fenômenos são difíceis de serem medidos por meio de indicadores diretos, sendo assim, muitos se perguntam o que fazer quando se observa que um atributo importante não pode ser medido e fica alocado no grupo dos indicadores qualitativos? Segundo a FNQ (2015), os *proxies*, ou medidas substitutas, muitas vezes são necessárias. Quando verificado que um atributo importante não pode ser medido e fica alocado no grupo dos qualitativos, geralmente adotam-se três alternativas, segundo a FNQ (2015):

- 1) conviver com uma abordagem exclusivamente subjetiva, sendo que tal prática é totalmente aceitável, desde que seja certificado que o risco da decisão tomada sobre este método qualitativo, em tese muito mais macio, seja baixo.
- 2) emprega-se indicadores que medem indiretamente o atributo. Indicadores desse tipo são muito comuns e não devem de forma alguma ser desprezados. O nome sofisticado para o indicador deste tipo é *proxy*, alguns exemplos típicos são os atributos de “eficácia de treinamento”, que é comumente complexo de se avaliar quantitativamente. Nesse caso muitas empresas recorrem a medidas *proxies*.
- 3) há uma crença de que as avaliações dos atributos subordinados, em conjunto, são suficientes. Ou seja, por lógica, pode-se concluir que quando se avalia todos os atributos de um galho da árvore, o final do galho está avaliado por *default*. Essa lógica falha no fato de que, em algumas circunstâncias, há fatores externos que não podem ser plenamente representados na árvore de atributos, sendo bom sempre verificar se este não será o caso.

Essas medidas substitutas são com frequência muito utilizadas para avaliar a resiliência que demonstram o potencial de desempenho resiliente.

1.4.2 Os Indicadores de Segurança e a Engenharia de Resiliência

A hipótese subjacente ao modelo chamado Teoria de Controle - STAMP (*Systems-Theoretic Accident Model and Process*) é que a teoria do sistema é uma maneira útil de analisar acidentes, particularmente acidentes sistêmicos. Em vez de definir o gerenciamento de segurança em termos de prevenção de eventos de falha de componentes, ele é definido como uma tarefa de controle contínuo para impor as restrições necessárias para limitar o comportamento do sistema às mudanças e adaptações seguras (LEVESON *et al.* 2003).

A gestão da segurança tem sido considerada um problema de controle dos SSC por depender de uma antecipação e um acompanhamento sistemático do desempenho organizacional (RASMUSSEN; SVENUNG, 2000). Uma medida é, portanto, a capacidade de prever – para antecipar as mudanças na forma do risco, antes que falhas e danos ocorram (HOLLNAGEL; WOODS; LEVESON, 2012).

Os sistemas de governança em segurança são, muitas vezes, organizados em torno de processos burocráticos, com base em uma visão reducionista sobre como as coisas dão errado. Eles se apoiam e legitimam sistemas de contagem e tabulação de falhas, adotando amplamente vocabulários como controle e restrição às deficiências humanas. Essa visão fez com que os sistemas confiassem apenas em indicadores focados em acidentes, quase acidentes ou desvios, negligenciando os indicadores relacionados aos processos operacionais. Contrapondo a essa visão, Dekker (2014) propõe uma nova era em segurança que valorize os seres humanos no lugar de tratá-los como um problema a ser controlado e que os indicadores passem a aplicar o conceito de Safety II, proposto por Hollnagel (2014b).

Hollnagel (2022) afirma que o modelo de gestão de segurança das grandes organizações precisa ser repensado. Porém, para ele, o conhecimento adquirido no modelo de Segurança-I não deve ser descartado, mas ultrapassado, pois os modelos tradicionais tendem a apresentar limitações e, de certa forma, influenciam a forma como os indicadores serão definidos pelas organizações.

A segurança tem sido tradicionalmente definida como uma condição em que o número de resultados adversos é o menor possível (Segurança-I), sendo seu objetivo garantir que o número de acidentes e incidentes seja mantido o mais baixo possível. Isso significa que a gestão da segurança deve partir das manifestações de ausência

de segurança e que - paradoxalmente - ela é medida pela contagem do número de casos em que falha e não pelo número de casos em que é bem-sucedida. Isso inevitavelmente leva a uma abordagem reativa baseada em responder ao que dá errado ou ao que é identificado como um risco - como algo que pode dar errado (HOLLNAGEL, 2014a).

Concentrar-se no que dá certo, e não no que dá errado, muda a definição de segurança de 'evitar que algo dê errado' para 'garantir que tudo dê certo'. Mais precisamente, Segurança-II é a capacidade de obter sucesso sob condições variáveis, de modo que o número de resultados pretendidos e aceitáveis seja o mais alto possível. Do ponto de vista da Segurança II, o objetivo da gestão da segurança é garantir que o máximo possível dê certo, no sentido de que o trabalho diário atinja seus objetivos, ou seja, para que tudo dê certo (HOLLNAGEL, 2014b).

Cook (1998) considera a segurança uma característica do sistema e não a de seus componentes, sendo uma propriedade emergente dos sistemas. Ela não reside em uma pessoa, dispositivo ou departamento de uma organização ou sistema e não pode ser comprada ou fabricada. Isso significa que a segurança não pode ser manipulada como uma matéria-prima.

Neste contexto, os indicadores de segurança criados sob a ótica da ER podem ajudar adequadamente no controle e acompanhamento das atividades.

Para Herrera (2012), é preciso entender que a definição de indicadores de desempenho em segurança é influenciada pela forma como a segurança é vista. Nesse sentido, se a segurança for vista como ausência de acidentes e falhas então os indicadores irão se referir às falhas, mal funcionamento ou desvios. Organizações críticas em segurança, que possuem a gestão do risco como componente crítico dos seus sistemas, implementaram inúmeras melhorias utilizando o conceito de indicadores reativos. A maioria desses indicadores fornecem informações pós fato, tornando-se uma tendência da maioria dos sistemas de gestão, por verem a segurança como ausência de falhas, desvios e incidentes.

No entanto, os sistemas ou organizações de hoje devem ser capazes de funcionar em ambiente de rápida mudança, nos quais existem inúmeras incertezas. A perspectiva da ER não vê a segurança como ausência de falhas, mas como algo que a organização ou SSC faz. Assim, o sucesso e as falhas estão relacionados a

capacidade do sistema ou organização de se ajustar e continuar suas operações sob a presença de mudanças contínuas ou restrições operacionais (HERRERA, 2012).

Feitas essas considerações, destacam-se duas dimensões de indicadores de segurança, tais como: 1) indicadores de segurança ocupacional e indicadores de segurança de processo; 2) indicadores proativos e indicadores reativos. Qualquer organização que procure avaliar o quão bem gerencia seus riscos de segurança de processo não pode, portanto, apenas confiar em dados de quase acidentes, lesões e fatalidades. Elas devem desenvolver indicadores que se preocupem especificamente com os perigos relacionados à segurança de processo (HOPKINS, 2009).

Segundo Herrera (2012) os indicadores se dividem em três tipos quanto a temporalidade do que é medido:

- Indicadores reativos – se referem ao que aconteceu no passado;
- Indicadores proativos – se referem ao que pode ocorrer no futuro;
- Indicadores atuais – se refere àquilo que está acontecendo no momento presente.

Antes das ocorrências de grandes acidentes representativos, a tendência em confundir esses dois tipos de indicadores de segurança, ocupacional e de processo, geraram uma distorção e uma falsa sensação de segurança. Um exemplo disso foi o acidente da fábrica de gás da Esso em *Longford*, na Austrália, no ano de 1998, a qual tinha uma taxa de acidentes com perda de tempo impecável e, ainda assim, administrava mal seus principais perigos (HOPKINS, 2009).

Para Dekker *et al.* (2008), uma das principais funções dos indicadores em organizações é o seu monitoramento. Os indicadores proativos, por exemplo, são assim denominados, pois indicam o que pode acontecer antes que aconteça. A vida cotidiana está repleta de exemplos, como: os indicadores do tempo para o final de semana ou amanhã, qual o comportamento da temperatura para o próximo inverno ou verão. Enquanto meteorologistas de hoje são muito bons em prever tempo, analistas de riscos tem menos sucessos em prever quando algo dará errado. É preocupante pensar que economistas e políticos parecem ser menos ainda capazes de prever crises políticas e financeiras. No caso do clima, existem bons indicadores proativos porque há uma compreensão precisa do fenômeno, ou seja, de como o clima irá se comportar nas próximas semanas ou meses.

Em outros casos, particularmente naqueles relacionados à segurança, tem-se apenas descrições fracas e incompletas do que acontece e, portanto, não há uma maneira eficaz para definir e propor indicadores proativos válidos. Por causa disso, a maioria dos sistemas de gestão em segurança dependem de indicadores reativos, como as estatísticas de acidentes. Embora muitos indicadores reativos tenham uma validade aparentemente razoável, eles só são conhecidos com um atraso, muitas vezes bastante considerável como, por exemplo, nas estatísticas anuais. O dilema de indicadores reativos e defasados é que a probabilidade de sucesso aumenta quanto menor for a defasagem (porque intervenções precoces são mais eficazes do que as tardias), por outro lado, a validade ou a certeza do indicador aumenta quanto maior a reatividade e defasagem, ou ainda seu período de amostragem (DEKKER *et al*, 2008).

Considerando-se que a resiliência é a capacidade de um sistema se ajustar efetivamente seu funcionamento antes de um evento, tal abordagem seria mais proativa, mas isso só pode ser feito se for dada a devida atenção ao que pode se tornar crítico a curto prazo. Portanto, para que um sistema assim proceda, é necessário que um esforço seja considerado válido, que seja feito o investimento necessário em recursos (tempo e dinheiro) e que o monitoramento se concentre nos indicadores ou sintomas corretos. Falhando nisso, o sistema poderá ser pego despreparado e sempre haverá situações que o desafiam completamente – os temidos eventos inéditos – contudo, mais pode ser feito para reduzir seu número e frequência do que as práticas de segurança estabelecidas permitem (DEKKER *et al*. 2008).

Os indicadores de segurança definidos sob a ótica da ER irão retratar as características e atributos com base no entendimento das propriedades dos sistemas resilientes. Desta forma, existe um número de fenômenos a ser considerados como comportamento resiliente de um sistema (organização), os quais são aplicados indicadores encontrados na literatura (HERRERA, 2012). Com base nisso, no quadro 6 são apresentados os fenômenos que foram identificados como propriedade dos sistemas resilientes.

Quadro 6 – Propriedades da Engenharia de Resiliência como base para indicadores

Propriedades	Descrição	Resiliência em ação (comportamento do sistema)	Indicadores de medição candidatos para fatores contribuintes para a resiliência
Capacidade de amortecimento (<i>Buffering Capacity</i>) ou <i>Slack</i> Obs.: <i>Slack</i> é considerado diferente de "buffering", pois ele surge da capacidade de improvisação do sistema sociotécnico e não é projetável	Refere-se ao tamanho ou tipo de interrupções que o sistema pode absorver e adaptar mantendo segurança e produção eficaz sem uma falha fundamental.	A noção de "buffering" muda conforme o cenário evolui. Por exemplo: O indicador pode estar relacionado com a capacidade de uma unidade de tratamento de traumas em relação ao que um paciente precisa.	Ex.:estoque de medicamentos. Instrumentos para realização de cirurgias dos pacientes em estágio críticos.
Flexibilidade	Aborda a capacidade do sistema para reestruturar em resposta às mudanças e pressões externas	Reconfiguração do sistema. Utilização de recursos de outras unidades.	Desenvolvimento de novos procedimentos. Reconhecimento de contingências não planejadas.
Margem	Indica o quão próximo o sistema opera até seu limite de desempenho. Deve ser notado que o limite de desempenho não é fixo, mas também varia conforme a sistema e contexto de operação variar.	Implantação de recursos em termos de distância à margem, disponibilidade e pontualidade.	Utilização de recursos, Carga de rede, Estabilidade de rede. Limite ajustável para manobras de forma a garantir a estabilidade do sistema.
Tolerância	Diz respeito a capacidade do sistema de ser tolerante as falhas. Não permitindo que estas evoluam para um cenário de desgoverno ou acidente.	Barreiras que são capazes de interromper um evento iniciador de um grande acidente em função de uma falha, sendo ela humana ou de equipamentos.	Existe um desafio para descrições elaboradas de comportamento organizacional no nível do processo. Os indicadores podem ser identificados fazendo pré - comparação pós-evento de comunicação e processo de tomada de decisão no indivíduo, grupo e níveis organizacionais. Como exemplo pode se dizer os casos de pequenos incidentes operacionais que não evoluíram para um grande acidente.
Interação em escala cruzada.	Woods usa a frase interações em escala cruzada para descrever as inter-relações dentro de um sistema. As decisões tomadas no nível estratégico ou macro do sistema podem impactar as decisões tomadas no nível operacional ou no nível micro e vice-versa.	A resiliência descendente inclui direções e soluções de nível macro que se preparam para a resiliência por meio de estruturas de metas, infraestrutura e procedimentos claros para lidar com compensações. A resiliência ascendente inclui decisões tomadas no nível micro, refletindo um compromisso com a segurança em casos de conflitos de objetivos (julgamentos de sacrifício).	Decisões tomadas em nível micro, com base em sacrifício, que serviu para garantir a adaptação durante um evento operacional inesperado ou decisões tomadas em nível macro que serviram para garantir a adaptação diante de um evento operacional inesperado.

Fonte: Adaptado de Herrera, 2012.

1.5 Metanálise com o uso do coeficiente Alpha de *Cronbach*

A avaliação de confiabilidade e validade dos instrumentos de medição em uma pesquisa são importantes, principalmente se os instrumentos de medição utilizam questionários e escalas psicométricas para realizar a coleta dos dados (SOUZA; ALEXANDRE; GUIRARDELLO, 2017). Confiabilidade e validade são consideradas as principais propriedades de medida de tais instrumentos. Entre os diversos testes estatísticos de confiabilidade e validade destacam-se: *Spearman* (BAUER, 2007); IVC- Índice de Validade de Conteúdo, ICC – Coeficiente de Correlação Interclasse.

Uma metanálise é uma técnica estatística que envolve a análise e a síntese de múltiplos estudos em diferentes contextos ou amostras, sendo uma ferramenta poderosa para combinar resultados independentes e obter uma estimativa geral do coeficiente Alfa de *Cronbach* ou examinar padrões e tendências em sua variação em diferentes situações. Segundo Peterson (1994), esse coeficiente pode ser utilizado por vários motivos, a saber:

- Síntese de evidências: permite que os pesquisadores reúnam resultados de vários estudos sobre a confiabilidade de um instrumento de medida e calculam uma média ponderada do Alfa de *Cronbach* em toda a amostra de estudos. Isso proporciona uma estimativa mais robusta e geral da consistência interna do instrumento;
- Identificação de padrões: através da metanálise, os pesquisadores podem identificar padrões ou tendências na confiabilidade do Alfa de *Cronbach* em diferentes grupos de participantes, culturas, contextos ou escalas. Isso pode ajudar a entender como a consistência interna pode variar em diferentes situações;
- Exploração de Fontes de Variação: uma metanálise pode examinar fontes potenciais de variação no Alfa de *Cronbach*, como características dos participantes, métodos de coleta de dados, características das escalas, entre outros. Isso pode fornecer *insights* sobre fatores que afetam a consistência interna;
- Auxílio na tomada de decisões: os resultados de uma metanálise podem orientar a seleção de instrumentos de medida confiáveis em futuras pesquisas ou práticas clínicas. Se um instrumento tem consistentemente um Alfa de

Cronbach alto em várias amostras e estudos, isso sugere que ele é confiável para medir o constructo desejado.

O coeficiente Alpha de *Cronbach* mede o grau de consistência das respostas fornecidas pelos participantes a um conjunto de itens em um questionário ou teste. Ele varia de 0 a 1, sendo que valores mais próximos de 1 indicam uma maior consistência interna entre os itens, o que significa que as perguntas ou itens do teste estão medindo a mesma característica ou construto de maneira confiável. Valores mais baixos desse coeficiente sugerem uma menor consistência interna, o que pode indicar que os itens não estão relacionados ou que o teste não é confiável para medir o que se propõe. Em geral, um Alfa de *Cronbach* acima de 0.70 é considerado aceitável para fins de pesquisa, mas valores mais altos (por exemplo, acima de 0.80) são geralmente preferíveis, pois indicam uma maior consistência interna (PETERSON, 1994).

2 METODOLOGIA

2.1 Caracterização da pesquisa

A pergunta motivadora desta revisão foi: como identificar e analisar o potencial de resiliência de organizações que operam e lidam com alto risco tecnológico por meio de indicadores de segurança criados com base na Engenharia de Resiliência?

Como forma de responder a essa questão, esta pesquisa teve como objetivo discutir e analisar métodos qualitativos e quantitativos para identificar o potencial de resiliência na gestão de segurança e subsidiar novas pesquisas sobre engenharia de resiliência aplicada à gestão de desempenho de segurança em indústrias com altos riscos tecnológicos.

Para o atendimento desse objetivo foi realizada uma revisão sistemática da literatura. Para tal, foram selecionados estudos que utilizaram abordagens quantitativas, qualitativas ou combinadas.

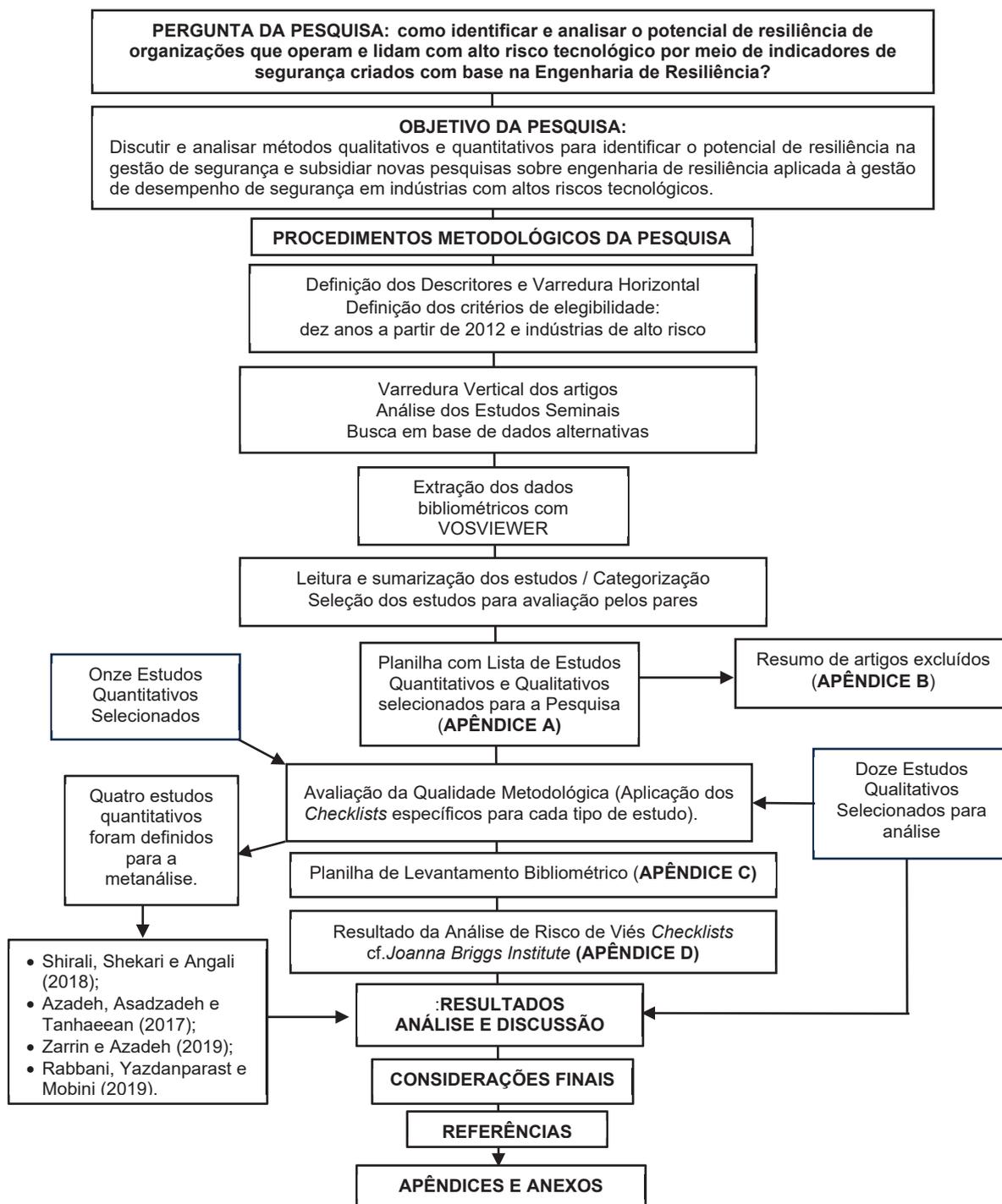
Conceitualmente, a revisão sistemática da literatura é projetada para localizar, avaliar e sintetizar as melhores evidências relacionadas a uma questão específica de pesquisa, a fim de fornecer respostas baseadas em evidências. Essa abordagem possibilita o avanço teórico e/ou prático de determinada área de conhecimento, permitindo que as informações sejam combinadas para o julgamento profissional na tomada de decisões e para a orientação de pesquisas futuras.

A revisão sistemática é considerada a melhor forma de sintetizar os achados de vários estudos que investigam as mesmas questões, sejam as evidências provenientes das áreas da saúde, educação, engenharia, entre outras. Metodologicamente, essas revisões seguem etapas bem definidas e transparentes, a saber: definição da questão ou problema; identificação e avaliação crítica das evidências disponíveis; síntese dos achados e extração de conclusões relevantes (BOLAND; CHERRY; DICKSON, 2017).

2.1.1 Etapas da pesquisa

Para melhor compreensão da organização desta pesquisa, na Figura 4 é apresentado o fluxograma das etapas realizadas.

Figura 4 – Percurso Metodológico da Pesquisa



Fonte: o autor, 2023.

2.1.2 Critérios de Elegibilidade

A partir da pergunta norteadora da revisão sistemática, um protocolo da pesquisa foi definido a priori, estabelecendo-se os critérios de elegibilidade e a estratégia de busca dos dados.

Foram adotados os seguintes critérios de exclusão para os estudos selecionados: tempo de publicação em até dez anos e a data de corte definida como o ano de 2012.

Buscou-se apenas os artigos que avaliaram a resiliência nos processos de segurança, considerando-se aqueles que englobam sistemas produtivos industriais com alto risco tecnológico, com exceção dos riscos tecnológicos de origem naturais. Também foram considerados estudos de revisão sistemática com temas aproximados ou sobre a Engenharia de Resiliência e indicadores.

Os artigos selecionados foram os publicados em inglês ou português. Alguns estudos que apresentaram métodos para avaliar a resiliência por meio de indicadores foram excluídos pelos seguintes motivos: tempo de publicação maior que 10 anos, ser relacionado à indústria de médio ou baixo risco ou por considerarem riscos tecnológicos de origem natural.

O resultado dos estudos selecionados contendo seus objetivos principais, seus métodos e resultados (achados) estão apresentados no Apêndice A.

A lista contendo os estudos excluídos segundo os critérios de elegibilidade da pesquisa estão dispostos no Apêndice B.

Os estudos selecionados para esta pesquisa tiveram como base um *checklist* proposto pelo documento *Critical Appraisal Tools Manual* (JOANNA BRIGGS INSTITUTE, 2022), sendo o mesmo aplicado para a análise de riscos de viés para estudos qualitativos e analíticos transversais, bem como para revisões sistemáticas. Os resultados do *checklist* estão apresentados no Apêndice D.

Cabe considerar que a análise do risco de viés tem o mesmo significado de análise da qualidade metodológica dos estudos incluídos na revisão e é parte do método de desenvolvimento de revisão sistemática, usualmente realizada após a etapa de extração de dados e antes da síntese quantitativa (metanálise) e análise das certezas das evidências geradas (UFSC; COBE, 2023).

Do ponto de vista conceitual, viés é um erro sistemático que pode aparecer em qualquer etapa de um estudo, distorcendo o seu resultado e comprometer a validade interna. Em geral, esse erro é não intencional, podendo ser relacionado à impossibilidade de solução, ou ainda, à não percepção do erro pelos pesquisadores (UFSC; COBE, 2023).

2.1.3 Levantamento de Dados

A busca geral de informações foi feita por meio de uma varredura horizontal, utilizando a base de dados do portal CAPES Periódicos, a fim de encontrar os estudos incluídos nos objetos da análise. Além disso, os *sites* e os bancos de dados para acesso à literatura cinzenta foram empregados com o objetivo de construir o referencial teórico e dar suporte a análise dos artigos encontrados. A literatura cinzenta internacional foi feita por meio de consulta nos repositórios, como *Perlego* e *Google Acadêmico*.

Também foi utilizado o *site Researchgate* para realizar uma triagem das referências citadas nos artigos selecionados, o qual se trata de uma rede social de pesquisadores vinculados a diversas instituições nacionais e internacionais. Assim, foi possível consultar os autores das pesquisas selecionadas para esclarecer dúvidas sobre os estudos analisados por esta revisão.

As buscas sistemáticas foram realizadas em três bases de dados: PUBMED, *Web of Science* e *Google Acadêmico*. A delimitação temporal do estudo compreendeu o período de janeiro de 2012 até janeiro de 2022.

A base de dados PUBMED foi consultada para identificar e extrair estudos que tivessem o mesmo objetivo desta pesquisa. Foi realizada a consulta com os seguintes descritores: ("*Resilience Engineering*"[All Fields] AND "*measure*"[All Fields]) AND "*indicators*"[All Fields] AND "*High-Risk*"[All Fields].

Na base *Web of Science* foram utilizados os descritores: "*Resilience Engineering*" (título) ou "*Indicators of Resilience Engineering*" (todos os campos) e "*Safety*" (todos os campos) e "*High-Risk industry*" (todos os campos) e "*Safety Management*" (todos os campos) e "*indicators*".

O *Google Acadêmico* foi consultado com o objetivo de identificar estudos relacionados. Foi realizada uma pesquisa avançada utilizando os seguintes

descritores: “*Resilience engineering indicators*” ou “*metrics*” e “*safety*”. Em seguida foram extraídos artigos que possuíam o mesmo escopo do presente estudo.

Para mais detalhes sobre a estratégia de busca com os filtros utilizados em cada base de dados, recomenda-se consultar o protocolo PROSPERO (CRD42022347710) (ILHANEZ *et al.* 2023). As bases foram consultadas entre os meses de setembro e outubro de 2022.

Os dados bibliométricos foram extraídos por meio dos *softwares Vosviewer, Mendeley Desktop e Mendeley Citation*, cujos relatórios permitiram levantar os principais dados analisados. De posse de todos estes dados foi possível criar uma planilha com referência onde apenas os estudos selecionados foram incluídos. Para a extração e análise dos dados foi feita uma planilha com levantamento bibliométrico (Apêndice C) com o objetivo de facilitar o processo de análise dos estudos e servir como uma base de dados periodicamente revisitada e atualizada.

2.1.4 Instrumento utilizado para organização do fluxo de informações da pesquisa

O instrumento utilizado para a organização do fluxo das informações coletadas nesta pesquisa foi fundamentado nas recomendações da plataforma *online* PRISMA (2023). Trata-se de um conjunto mínimo de diretrizes baseado em evidências para revisões sistemáticas e metanálises que se concentra, principalmente, em relatar tais revisões em diversos campos de conhecimento, além ser útil para a avaliação crítica de revisões sistemáticas publicadas (MOHER *et al.* 2015).

Segundo Page *et al.* (2021), alguns avanços ocorreram desde a primeira vez que o documento do PRISMA foi publicado em 2009. Suas diretrizes metodológicas sofreram várias atualizações e sua última versão data de 2020. Dentre as inovações, diversos processos foram propostos para sintetizar e apresentar resultados quando a metanálise não é possível ou apropriada.

Para a avaliação dos dados dos estudos quantitativos, definiu-se como desfecho primário a consistência interna dos seguintes domínios: comprometimento da alta administração; cultura de aprendizagem; conscientização; flexibilidade; preparação e cultura de relato.

O Alpha de Cronbach (MATTHIENSEN, 2011) foi utilizado na metanálise por ser um dos instrumentos mais empregados para avaliação da consistência interna dos

estudos desta revisão. Sendo assim, com o objetivo de comparar as metodologias e reduzir a heterogeneidade entre os estudos, as variáveis quantitativas geradas foram comparadas e os resultados da metanálise estão apresentados na Figura 6.

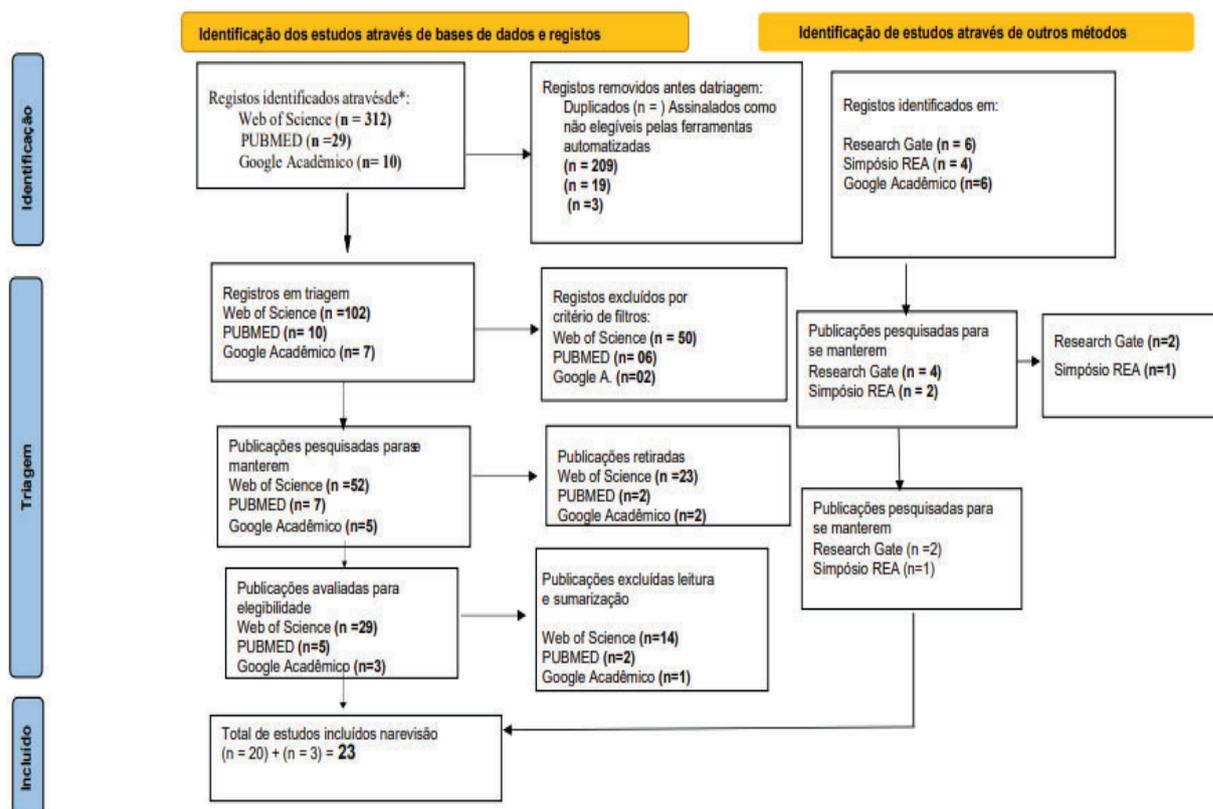
Foram calculados os alfas de *Cronbach* com intervalo de confiança de 95% para cada um dos estudos. Os estudos individuais foram agrupados em metanálise de efeitos aleatórios, pelo método da Máxima Verossimilhança Restrita seguindo as recomendações de Peterson (1994). A heterogeneidade entre os estudos selecionados foi analisada pela estatística Q de Cochran e o índice I – quadrado (I^2). Todas as análises foram executadas utilizando-se o pacote meta (versão 6.6-0) implementado em linguagem R (versão 4.2.2. para Mac Os).

2.1.5 Seleção dos estudos para análise

Para o processo de identificação e seleção dos artigos relevantes foram selecionados dois juízes independentes e, no caso de haver discordância entre eles, foi realizada uma reunião de consenso com a participação de um terceiro juiz. Durante essa etapa, evidenciou-se diferenças nas características dos estudos selecionados, nos tipos de intervenção e resultados, identificando-se alta heterogeneidade metodológica e no delineamento dos estudos. Dessa forma, foi possível apenas comparar quatro estudos e seus respectivos dados de forma quantitativa e interpretá-los com base na metanálise, conforme Figura 6.

O processo de triagem dos estudos e separação dos mesmos estão presentes no fluxograma PRISMA conforme Figura 5.

Figura 5 – Fluxo do processo de triagem com base na metodologia PRISMA



Fonte: adaptado de Page *et al.* 2021.

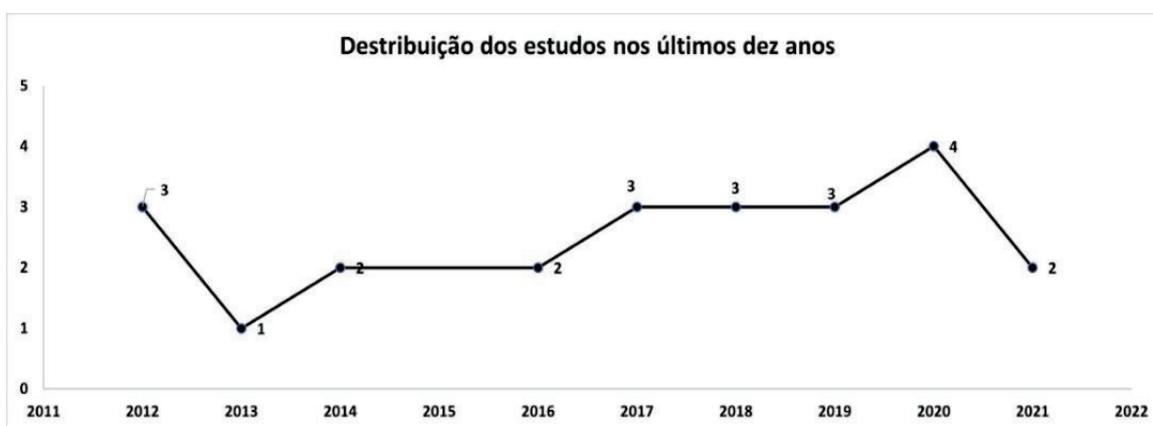
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Seleção e classificação dos estudos quantitativos e qualitativos

Os 23 artigos encontrados foram distribuídos em nove revistas diferentes e em seis eventos, dentre eles, três publicados em conferências e outros três publicados em simpósios. *Safety Health at Work* foi a revista com maior número de publicações, com 17%, seguida da *Safety Science*, com 13%; em terceiro lugar ficaram as revistas *Jornal Loss Prevento in the Process Industry* e *Human Factor and Ergonomics in Manufacturing & Service Industry*, com 9% cada uma.

Os estudos foram distribuídos geograficamente quanto ao país de relato: Iran (7 artigos); Brasil (5 artigos); EUA (2 artigos); Itália (3 artigos); Noruega (2 artigos); Austrália (1 artigo); Japão (1 artigo); China (1 artigo); México (1 artigo). A cronologia dos estudos ao longo dos últimos 10 anos se encontra no gráfico 1:

Gráfico 1 - Distribuição dos estudos nos últimos 10 anos



Fonte: o autor, 2023.

É possível observar que existe uma variação no número de publicações sobre o tema desta pesquisa. Entre os anos de 2017 e 2020 foi o período com maior número de produção científica sobre indicadores e avaliação da resiliência nas organizações.

Dos estudos analisados, observou-se que dezesseis possuem os Fatores de impacto dos seus respectivos periódicos, conforme lista decrescente a seguir:

Saurin e Werle (2017): FI. 7.247; Azadeh *et al.* (2014): FI. 6.392; Peñaloza *et al.* (2020): FI. 4.877; Patriarca *et al.* (2019): FI. 4.877; Shirali, Shekari e Angali (2018): FI. 4.045; Ranasinghe *et al.* (2020): FI. 4.045; AZADEH *et al.* (2017a): FI. 4.045;

Patriarca *et al.* (2018): FI. 4.045; Jain *et al.* (2018): FI. 3.916; NELSON *et al.* (2016): FI. 3.916; Chuang *et al.* (2020): FI. 3.752; Shirali *et al.* (2016): FI. 2.818; Rabbani, Yazdanparast e Mobini (2019): FI. 1.721; Azadeh *et al.* (2017b): FI. 1.699; Zarrin e Azadeh (2019): FI. .699; Pflanz e Levis (2012): FI. 0.833.

No quadro 7 são apresentados os estudos quantitativos identificados por meio da busca sistemática em base de dados de acordo com suas respectivas numerações.

Quadro 7 – Classificação dos estudos quantitativos selecionados

nº.	Título do artigo e autores
(i)	<i>Assessing Reliability and Validity of an Instrument for Measuring Resilience Safety Culture in Sociotechnical Systems</i> (SHIRALI, SHEKARI; ANGALI, 2018)
(ii)	<i>Assessment of resilience engineering factors in high-risk environments by fuzzy cognitive maps: A petrochemical plant</i> (AZADEH <i>et al.</i> 2014)
(iii)	<i>Combinatorial optimization of resilience engineering and organizational factors in a gas refinery by a unique mathematical programming approach</i> (AZADEH <i>et al.</i> 2017b)
(iv)	<i>A consensus based AHP for improved assessment of resilience engineering in maintenance organizations</i> (AZADEH; ASADZADEH; TANHAEAN, 2017a)
(v)	<i>Mapping the influences of resilience engineering on health, safety, and environment and ergonomics management system by using Z-number cognitive map</i> (ZARRIN; AZADEH, 2019)
(vi)	<i>An algorithm for performance evaluation of resilience engineering culture based on graph theory and matrix approach</i> (RABBANI, YAZDANPARAST; MOBINI, 2019)
(vii)	<i>Development of a Leading Performance Indicator from Operational Experience and Resilience in a Nuclear Power Plant</i> (NELSON <i>et al.</i> 2016)
(viii)	<i>An Analytic Framework to Assess Organizational Resilience</i> (PATRIARCA <i>et al.</i> 2018)
(ix)	<i>A framework for the analysis of slack in socio-technical systems</i> (SAURIN; WERLE, 2017)
(x)	<i>Assessment of resilience engineering factors based on system properties in a process industry</i> (SHIRALI <i>et al.</i> 2016)
(xi)	<i>A Fuzzy Model to Assess Resilience for Safety Management</i> (GRECCO <i>et al.</i> , 2013)

Fonte: o autor, 2023.

No quadro 8 são apresentados os estudos qualitativos identificados por meio da busca sistemática em base de dados de acordo com suas respectivas numerações.

Quadro 8 – Classificação dos estudos qualitativos selecionados

nº.	Título do artigo e autores
(xii)	<i>Measurement of resilience potential - development of a resilience assessment grid for emergency departments</i> (CHUANG et al. 2020)
(xiii)	<i>Resilience Assessment GRID (RAG) for Facilitating Safety Consciousness of Nuclear Power Plant Personnel</i> (SAKUDA; KITAMURA, 2020)
(xiv)	<i>Proactive Resilience Based Indicators: The Case of the Deepwater Horizon Accident</i> (ØIEN, NIELSEN et al. 2012)
(xv)	<i>Serious games for industrial safety: An approach for developing resilience early warning indicator</i> (PATRIARCA et al, 2019)
(xvi)	<i>Process Resilience Analysis Framework (PRAF): A systems approach for improved risk and safety management</i> (JAIN et al. 2018)
(xvii)	<i>The Systemic Potential Management Building a Basis for Resilient Performance</i> (HOLLNAGEL et al. 2021)
(xviii)	<i>A program to support the construction and evaluation of resilience indicators</i> (HUBER et al., 2012)
(xix)	<i>Uma Abordagem para o Monitoramento de Indicadores de Resiliência em Organizações</i> (Souza et al. 2021)
(xx)	<i>A resilience engineering perspective of safety performance measurement systems: A systematic literature review</i> (PEÑALOZA et al. 2020)
xxi)	<i>Resilience engineering indicators and safety management: A systematic review</i> (RANASINGHE et al. 2020)
(xxii)	<i>An Approach to Evaluating Resilience in Command-and-Control Architectures</i> (PFLANZ; LEVIS, 2012)
(xxiii)	<i>The Scales Framework for Identifying and Extracting Resilience Related Indicators: Preliminary Findings of a Go-around Case Study</i> (HERRERA et al. 2014)

Fonte: o autor, 2023.

3.2 Síntese das características dos estudos em diferentes setores industriais considerados como Sistemas Sociotécnicos Complexos

A classificação das instituições quanto às suas tipologias e diferentes complexidades tem sido uma preocupação da teoria organizacional ao longo do tempo. Muitas décadas se passaram desde que Charles Perrow (1984) abordou essa temática no capítulo três (*Complexity, Coupling and Catastrophe*) de sua obra: “*Normal Accidents Living with High-Risk Technologies*”.

O autor classificou as tarefas organizacionais em duas dimensões: a primeira é relacionada à natureza das interações dentro do funcionamento da organização (linear ou complexa) e a segunda, à natureza do acoplamento de eventos e processos existentes (soltos ou apertados). Perrow (1984) também indicou alguns exemplos de indústrias com interações lineares, a saber: fábricas de linha de produção e indústrias da construção civil, construção e montagem. Já as indústrias de alta complexidade possuem interações complexas e acoplamentos rígidos, pouca margem de manobra e limitações relativas à substituição de mão de obra ou de material, bem como

múltiplos parâmetros de controle com potenciais interações; além disso, tais sistemas (organizações) são mais vulneráveis aos desastres (*major accidents*).

Um estudo mais atual descreve as principais características dos Sistemas Sociotécnicos Complexos de alto risco, entre elas, têm-se: i) muitos elementos que interagem dinamicamente; ii) grande diversidade de elementos, iii) variabilidade inesperada; iv) resiliência (RIGHI; SAURIN, 2015).

Os segmentos da indústria encontrados nesta pesquisa foram considerados Sistemas Sociotécnicos Complexos de alto risco tecnológico, com características similares às citadas por Perrow (1984), os quais englobam os seguintes setores: Indústria Química de Processo; Indústria de Petróleo; Indústria Nuclear; Indústria Aérea; Indústria Militar Naval; e Indústria da Saúde.

Destaca-se, ainda, que o conceito de SSC de alto risco foi atualizado por diversos autores desde a publicação de “*Normal Accidents*” em 1984. Para Le Coze (2023) a matriz das indústrias com características de sistemas complexos de alto risco deveria ser atualizada, levando-se em conta as décadas de evolução da tecnologia e da indústria. Nesse contexto, ele cita como exemplo a COVID-19, que comprovou o quanto os sistemas de emergência em saúde são também considerados sistemas complexos considerados críticos.

Para entender o que significa o acoplamento rígido citado por Perrow (1984), torna-se necessário comparar os sistemas ou organizações consideradas de acoplamento justo e acoplamento frouxo. Algumas características presentes no quadro 9 mostram as principais diferenças desses sistemas produtivos.

Quadro 9 – Processos com acoplamento justo x acoplamento frouxo

Acoplamento Justo	Acoplamento Frouxo
Retardos nos Processos produtivos não são possíveis.	Retardos nos processos produtivos são possíveis.
Ordem das sequências de produção invariável.	Ordem das sequências de produção podem ser alteradas.
Apenas um meio para atingir um objetivo.	Métodos alternativos para atingir o objetivo.
Poucas folgas de suprimentos equipamentos e pessoal.	Folgas de suprimentos equipamentos e pessoal.
Redundância e buffers de capacidade são pensados no projeto propositalmente.	Redundâncias e <i>buffers</i> de capacidade podem ser facilmente adicionados.
Indústria Química de Processo; Indústria de Petróleo; Indústria Nuclear; Indústria Aérea; Indústria Militar Naval; Indústria da Saúde.	Construção e montagem; Indústria de Manufatura; Indústria de alimentos; Indústria de Montagem de Veículos; Produções de linha e montagem em geral.

Fonte: adaptado de Perrow, 1984.

3.3 Resultados Individuais dos Estudos Quantitativos

No presente estudo, os onze principais artigos selecionados enfatizaram métodos quantitativos para avaliar a resiliência e serão apresentados a seguir. Eles contêm os seus objetivos e achados, sendo que, ao final serão detalhados os estudos considerados mais relevantes para a pesquisa.

(i) Shirali *et al.* (2018) avaliaram a validade de um constructo como instrumento de medição desenvolvido para avaliar a resiliência em sistemas sociotécnicos. Como resultado, o instrumento mostrou ser confiável para este fim, embora não tenha analisado o risco de viés entre os participantes e não possuam capacidade de medir todas as dimensões da resiliência.

(ii) Azadeh *et al.* (2014) avaliaram os fatores de resiliência em uma planta petroquímica relacionados à segurança. Os resultados mostraram que a preparação, a conscientização e a flexibilidade foram os fatores mais importantes entre os nove fatores da ER analisados. Foram distribuídos sessenta questionários, metade para especialistas e a outra metade para os trabalhadores. Os autores não definiram uma estratégia clara de amostragem.

(iii) Azadeh *et al.* (2017b) investigaram os impactos recíprocos dos fatores gerenciais e organizacionais na ER. Os resultados mostraram que os fatores organizacionais tinham maior impacto na resiliência da organização do que os fatores gerenciais. Também se observou que os fatores da ER relacionados com a aprendizagem e flexibilidade tiveram maior influência sobre os fatores gerenciais e organizacionais.

(iv) Azadeh, Asadzadeh e Tanhaeean (2017a) desenvolveram uma ferramenta para avaliação dos fatores da ER nos departamentos de manutenção em uma grande indústria de petróleo. O estudo confirmou uma estreita relação entre os fatores da ER e os de modelagem de desempenho denominados *performance shaping fator*. Segundo o CCPS (CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY), esse fator é definido por qualquer característica inerente de um indivíduo (personalidade, nível de fadiga, habilidade e conhecimento) bem como pela situação de trabalho (demandas de tarefas, políticas da fábrica, *design* de interface, treinamento e ergonomia).

(v) Zarrin e Azadeh (2019) propuseram mapear as influências da ER no sistema de gestão de saúde, segurança, meio ambiente e ergonomia em uma planta petroquímica. Os resultados mostraram que os princípios da ER têm alto impacto na gestão de SMS (Segurança, Meio Ambiente e Saúde) da empresa. Também revelou que o comprometimento da alta administração tem maior impacto no meio ambiente, a aprendizagem tem maior impacto na saúde, a preparação tem maior impacto na ergonomia e a conscientização maior impacto na segurança.

(vi) Rabbani, Yazdanparast e Mobini (2019) avaliaram a cultura resiliente em segurança da organização. Os resultados mostraram que, entre os dez departamentos avaliados em uma planta petroquímica, os departamentos “processo e produção” e “controle da qualidade e operações químicas de polímeros” possuíam uma cultura de segurança mais resiliente, ao passo que os departamentos “inspeção, laboratório e manutenção” tinham um menor índice e precisavam de atenção.

(vii) Nelson *et al.* (2016) descreveram a análise dos dados operacionais das informações contidas no programa de ações corretivas em uma usina nuclear, utilizando *software Fuzzy Logic Toolbox*. A metodologia considerou o erro humano e os fatores organizacionais, devido à sua grande contribuição para eventos consequentes, bem como as condições e os comportamentos inseguros. Os dados utilizados para alimentar os indicadores foram as falhas dos equipamentos da usina nuclear e os relatórios de erros operacionais, além das ações corretivas. Esses dados geraram um indicador calculado pelo *software* com base na severidade das falhas.

(viii) Patriarca *et al.* (2018) avaliaram as quatro habilidades principais da resiliência por meio do questionário com base no método RAG (*Resilience Assessment Grid*) de Hollnagel (2011) e depois submeteram os resultados à matriz AHP (*Analytic Hierarchy Process*) de Saaty (2004), em um departamento de anestesiologia de um hospital na Europa central. Os resultados mostraram que a grade de análise de resiliência, ou seja, um conjunto ponderado de perguntas de sondagem, pode ser utilizado em diferentes domínios, com uma abordagem *Safety II* (Hollnagel, 2014b).

(ix) Saurin e Werle (2017) analisaram recursos de folga (*slack*) como fenômenos de resiliência de diferentes naturezas em Sistemas Sociotécnicos Complexos, oferecendo *insights* sobre o *design* do sistema de trabalho. O indicador Unidades de Folga (UoS) é composto por um *pool* de recursos de folga semelhantes

que compartilham uma mesma finalidade a uma UoS, tais como: recursos redundantes em uma ala cirúrgica correspondem a uma (UoS). Ele propõe avaliar até que ponto cada UoS mitiga as fontes de resultados inesperados (variabilidades) em termos de recursos, e isso pode ser feito por meio de uma escala correspondente.

Essas UoS nada mais são do que um sistema de redundância de recursos para uma determinada necessidade crítica, como instrumentação de uma sala cirúrgica. Os UoS identificados ao longo do tempo e correlacionados com acidentes ou quase acidentes podem se tornar indicadores de segurança importantes.

Embora esse estudo apresente uma série de contribuições em termos de alocação adequada para prover os recursos mínimos relativos à demanda, a estrutura criada para análise das folgas não contabiliza os custos de manutenção da UoS *versus* os custos de absorção de desperdícios decorrentes da variabilidade. Além disso, a versão atual desse método não captura a natureza dinâmica das fontes de variabilidade e dos UoS, as quais podem mudar em termos de intensidade e acoplamento ao longo do tempo.

3.4 Estudos quantitativos com os métodos detalhados

Dois estudos quantitativos com os métodos detalhados para chegar aos desfechos encontrados estão apresentados nesta seção: (x) Shirali, Shekari e Angali (2016) e (xi) Grecco *et al.* (2013).

- **Estudo (x) de Shirali, Shekari e Angali (2016): *Assessing reliability and validity of an instrument for measuring resilience safety culture in sociotechnical systems.***

- ✓ Resumo metodológico do estudo (x) de Shirali, Shekari e Angali (2016)

O estudo teve como objetivo apresentar uma nova visão para avaliar os fatores da ER em uma indústria de processo, utilizando uma ampla gama de indicadores. Para isto, foram utilizadas entrevistas semiestruturadas com perguntas de múltipla escolha de 24 operadores experientes e 8 gerentes, análise de documentos, trabalho em equipe, além de conversas amigáveis e informais.

As seções e subseções que abordam componentes da ER, que estavam contidas na entrevista, foram determinadas pelo Método *Delphi*. Os dados foram analisados com base na abordagem de Análise de Componentes Principais e para a verificação e validação foi utilizada a Taxonomia Numérica e o Teste de *Spearman* (BAUER, 2007).

Os dados foram analisados por meio de entrevistas semiestruturadas para buscar alcançar maior profundidade nos dados obtidos, assim como nos resultados. Esse recurso possibilita uma maior flexibilidade à coleta de dados, assim como é dada maior abertura ao entrevistado, tornando as respostas mais fidedignas, já que há liberdade para que ele possa formular uma resposta pessoal com uma ideia melhor do que realmente pensa.

✓ Resultado do estudo (x) de Shirali, Shekari e Angali (2016)

Os questionários foram distribuídos para cada atributo de variável conforme a tabela 1, a seguir. Cada atributo teve um número ‘p’ de perguntas aplicadas para 32 trabalhadores.

Tabela 1- Cada atributo recebeu o número “p” de perguntas

Variáveis	Atributos	Nº de Perguntas do questionário como “p” variáveis aplicadas para 32 trabalhadores.
Indicador 1	Capacidade de buffer:	p= 27
Indicador 2	Margem:	p = 7
Indicador 3	Tolerância:	p = 8
Indicador 4	Interações entre escalas	p= 5
Indicador 5	Cultura de aprendizagem	p=13
Indicador 6	Flexibilidade:	p=18
Indicador 7	Antecipação:	p=5
Indicador 8	Atenção:	p=9
Indicador 9	Resposta:	p=10

Fonte: adaptado de Shirali, Shekari e Angali, 2016.

Foi elaborada uma matriz $n \times p$, onde as ‘n’ linhas representam os 32 indivíduos respondentes dos questionários. As colunas ‘p’ representam as perguntas (as variáveis analisadas).

As características observadas são representadas pelas variáveis (p1, p2, p3, ..., p_n). A matriz de dados é de ordem ‘n x p’ e normalmente denominada matriz **X**.

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2p} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \dots & x_{3p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & \dots & x_{np} \end{bmatrix} \quad (1)$$

A estrutura de interdependência entre as variáveis da matriz de dados é representada por uma matriz de covariâncias 'S' ou por uma matriz de correlações 'R'. Essa estrutura contém as variáveis p_1, p_2 e o objetivo da análise de componentes principais é transformar essa estrutura, representada pelas variáveis $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$, em uma outra, representada pelas variáveis $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_p$, não correlacionadas e com variâncias ordenadas, para ser possível comparar os indivíduos usando apenas as variáveis Y_{iS} que apresentam maior variância. No estudo (x) de Shirali, Shekari e Angali (2016) a solução foi dada pela matriz de covariância S.

Matriz de covariância S:

A partir da matriz X de dados de ordem 'n x p', foi desenvolvida outra matriz de covariância Σ da população π , que é representada por S. A matriz S é simétrica e de ordem 'p x p'. Por exemplo, para a Capacidade Buffer, o Indicador 01 é o primeiro indicador de resiliência avaliado no estudo, o qual é composto por 27 perguntas, sendo a matriz de covariância é de ordem de 27x27.

$$S = \begin{bmatrix} Var(x_1) & Cov(x_1x_2) & Cov(x_1x_3) & \dots & \widehat{Cov}(x_1x_p) \\ Cov(x_2x_1) & Var(x_2) & Cov(x_2x_3) & \dots & \widehat{Cov}(x_2x_p) \\ Cov(x_3x_1) & Cov(x_3x_2) & Var(x_3) & \dots & \widehat{Cov}(x_3x_p) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \widehat{Cov}(x_px_1) & \widehat{Cov}(x_px_2) & \widehat{Cov}(x_px_3) & \dots & \widehat{Var}(x_p) \end{bmatrix} \quad (23)$$

Normalmente, as características são observadas em unidades de medidas diferentes entre si e, neste caso, é conveniente padronizar as variáveis. Para determinar os componentes principais normalmente se parte da matriz de correlação R.

A matriz **Z** das variáveis padronizadas **zj** é igual a matriz de correlação da matriz de dados **X**. A padronização é calculada para cada coluna, onde **X** é a média e DP é o desvio padrão, onde $Z = (\text{Valor} - X) / DP$ e, geralmente, ele fica em torno de -3 a +3.

Se Z for maior ou igual a 4 por exemplo, ele é considerado um *outlier* (ponto fora da curva).

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} & \dots & z_{1p} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} & \dots & z_{2p} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} & \dots & z_{3p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & z_{n3} & \dots & z_{np} \end{bmatrix} \quad (24)$$

É importante observar que o resultado encontrado para análise da matriz S pode ser diferente do resultado encontrado na matriz R. A recomendação é que a padronização só deve ser feita quando as unidades de medidas das variáveis, ou características observadas, não forem as mesmas.

Na matriz de correlações entre os valores padronizados (Z) de cada variável no caso da Capacidade 'Buffer', como foram realizadas 27 perguntas, essas variáveis irão constituir uma matriz de correção de 27x27, onde a diagonal principal é a correlação de uma variável com ela mesma. Os componentes principais são determinados resolvendo-se a equação característica (Determinante) da matriz R, a seguir:

$$\det[R - \gamma I] = 0 \text{ ou } |R - \gamma I| = 0 \quad (25)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & r(x_1x_2) & r(x_1x_3) & \dots & r(x_1x_p) \\ r(x_2x_1) & 1 & r(x_2x_3) & \dots & r(x_2x_p) \\ r(x_3x_1) & r(x_3x_2) & 1 & \dots & r(x_3x_p) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(x_px_1) & r(x_px_2) & r(x_px_3) & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

A variância do componente principal Y_i é igual (=) aos autovalores λ_i . São gerados 'p' autovalores, sendo $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 \dots \lambda_p$, que são as raízes da equação característica da matriz R. Para cada autovalor λ_p existe um autovetor \tilde{a}_i .

$$\tilde{a}_i = \begin{bmatrix} a_{i1} \\ a_{i2} \\ \vdots \\ a_{ip} \end{bmatrix} \quad (27)$$

A análise de componentes principais resultou na tabela 2.

Tabela 2 - Resultado do ACP em relação aos indicadores

Autovalor	7.912	0.417	0.305	0.146	0.109
Proporção acumulada	0.879	0,046	0,034	0,016	0.012
	0.879	0.925	0.959	0.976	0.988
	ACP1	ACP2	ACP3	ACP4	ACP5
Capacidade de amortecimento ou Buffer	0,346	0,042	0,078	0,298	-0,546
Flexibilidade	0,344	-0,241	-0,022	-0,331	-0,466
Margem	0,339	0,384	0,069	0,167	0,286
Tolerância	0,325	-0,185	0,514	-0,650	-0,045
Interação em escala cruzada	0,331	-0,553	-0,525	-0,246	0,040
Aprendizado	0,337	-0,337	0,244	0,179	0,450
Atenção	0,337	0,221	0,339	0,138	0,180
Resposta	0,339	0,120	-0,405	0,164	0,382
Antecipação	0,320	0,526	-0,332	-0,462	-0,197

Fonte: adaptado de (x) Shirali, Shekari e Angali, 2016.

Os valores do primeiro componente principal foram padronizados para gerar a Tabela 3 com o *ranking* dos componentes principais apresentados em ordem decrescente de importância.

Tabela 3 - Ordem dos indicadores baseados na Análise de Componentes Principais.

Indicador	Z score	Ranking ACP
Capacidade Buffer	0.313	1º
Flexibilidade	0.296	2º
Margem	0.321	8º
Tolerância	0.248	6º
Interação e escala cruzada	0.226	9º
Aprendizagem	0.292	3º
Atenção	0.320	5º
Resposta	0.292	4º
Antecipação	0.287	7º

Fonte: adaptado de (x) Shirali, Shekari e Angali, 2016.

Depois da Análise de Componente Principal foi aplicada a Taxonomia Numérica (TN), que é o agrupamento pelo cálculo de distância entre os fatores (indicadores).

A distância de cada indicador do indicador ideal para cada índice, como: Capacidade *Buffer*, Aprendizagem etc. é dada pela fórmula abaixo, em que Z_{jmax} é o máximo e j th variável.

$$C_i = \sqrt{\sum_{i=1}^9 (Z_{ij} - Z_{jmax})^2} \quad (28)$$

O nível de crescimento para cada indicador é:

$$f_i = \frac{C_{oi}}{C_0}, \text{ onde } C_0 = \bar{C} + 2sd \quad (29)$$

Onde \bar{C} e sd são a média e o desvio padrão de C_{oi} , respectivamente, f_i está entre 0 e 1, sendo 1 a pior e 0 a melhor pontuação.

A Matriz de distância para os indicadores, segundo agrupamento por Taxonomia Numérica é apresentada na tabela 4.

Tabela 4 - Matriz de distância para indicadores por Taxonomia Numérica.

Indicadores	Capacidade Buffer	Flexibilidade	Margem	Tolerância	Interação e escala cruzada	Aprendizagem	Atenção	Resposta	Antecipação
Capacidade Buffer	0	2.68	10.42	8.99	10.68	6.32	8.12	7.49	9.95
Flexibilidade	2.68	0	7.07	6.34	8.02	3.66	5.48	4.85	7.30
Margem	10.42	7.78	0	1.49	0.41	4.16	2.32	2.96	0.53
Tolerância	8.99	6.34	1.49	0	1.73	2.72	0.92	1.57	1.01
Interação e escala cruzada	10.68	8.02	0.41	1.73	0	4.40	2.59	3.21	0.80
Aprendizagem	6.32	3.66	4.16	2.72	4.40	0	1.88	1.28	3.69
Atenção	8.12	5.48	2.32	0.92	2.60	1.88	0	0.77	1.85
Resposta	7.49	4.85	2.96	1.57	3.21	1.28	0.77	0	2.48
Antecipação	9.95	3.30	0.53	1.01	0.80	3.69	1.85	2.48	0

Fonte: adaptado de (x) Shirali, Shekari e Angali, 2016.

A Tabela 5 mostra o *ranking* dos indicadores, resultante do método da TN.

Tabela 5 - Ranking dos indicadores (Taxonomia Numérica)

Indicadores	f_i	Pontuação	Ranking da TN
Capacidade Buffer	0.034	0.429	2º
Flexibilidade	0.011	0.139	1º
Margem	0.738	9.404	8º
Tolerância	0.604	7.7	6º
Interação em escala cruzada	0.763	9.719	9º
Aprendizagem	0.371	4.725	3º
Atenção	0.523	6.663	5º
Resposta	0.464	5.911	4º
Antecipação	0.694	8.484	7º

Fonte: adaptado de (x) Shirali, Shekari e Angali, 2016.

A Correlação de *Spearman* (BAUER, 2007) foi aplicada para validar (e comparar) os resultados obtidos pela ACP e pela TN, conforme a fórmula a seguir:

$$p = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n} \quad (30)$$

Foi calculada a correlação de *Spearman* entre a ACP e a TN. A correlação entre os dois métodos foi de 0,936, ou seja, a correlação é um acordo positivo.

- ✓ Conclusão do estudo (x) de Shirali, Shekari e Angali (2016)

Os dados recolhidos nas entrevistas foram tratados pela ACP. A TN também foi utilizada para validar os resultados da ACP. Os resultados das análises mostraram que três indicadores de interações entre escalas cruzadas, margem e antecipação estavam em um nível inferior à melhor prática, respectivamente. Enquanto isso o método ACP mostrou que os indicadores capacidade *buffering*, flexibilidade e aprendizagem possuíam os melhores níveis.

Os resultados da análise das unidades mostraram também que as unidades de manutenção, hidrogênio e controle III estavam em mau estado. Portanto, a planta deve primeiro tentar atingir o nível de melhores práticas e depois buscar resultados ainda melhores, monitorando constantemente esses indicadores sempre que ocorrerem grandes mudanças e modificações no sistema. Ao final, os autores recomendaram novos estudos para o desenvolvimento desses indicadores.

- **Estudo (xi) de Grecco et al. (2013): A fuzzy model to assess resilience for safety management.**

Esse estudo adotou uma abordagem *fuzzy* para estabelecer um método de avaliação da resiliência em organizações com base em indicadores proativos de desempenho de segurança definidos de acordo com os princípios da ER.

O resultado apontou que o setor de radiofármacos de uma empresa, com base no valor limite de (0,6) como mínimo aceitável, apresentou deficiência no atributo 1, em que o comprometimento da alta administração recebeu um valor abaixo desse limite. Uma das oportunidades desse estudo foi que ele ainda precisa ser aplicado em uma empresa.

- ✓ Resumo metodológico do estudo (xi) Grecco *et al.* (2013)

O estudo propõe um novo método para acessar a resiliência baseado na *Fuzzy Set Theory* (FST), por achar que os outros meios ignoram a subjetividade do constructo.

A FST possui uma visão de que os sujeitos em uma pesquisa prática não podem ser considerados como dentro ou fora de determinados grupos. Nesse sentido, essa forma matemática difusa de interpretar os indivíduos adota um grau de pertencimento ou afastamento de grupamentos específicos (MAIERS; SHERIF, 1985; GRECCO *et al.* 2013). O estudo foi dividido em três grandes etapas: 1ª) seleção dos indicadores proativos; 2ª) determinação de um padrão ideal de resiliência; 3ª) avaliação do nível de resiliência real comparado com o padrão.

1ª Etapa: contém a seleção de indicadores proativos, conforme o quadro 10.

Quadro 10– Seleção dos temas e atributos dos indicadores

TEMAS	INDICADORES	TEMAS	INDICADORES
Compromisso da alta direção	1.1 recursos humanos 1.2 recursos materiais 1.3 compromisso em segurança 1.4 política de segurança 1.5 gerenciamento dos procedimentos 1.6 programa de treinamento 1.7 seleção por competência	Consciência	4.1 Relato dos problemas 4.2 Segurança da informação 4.3 Comunicação 4.4 Equipe 4.5 Carga de trabalho 4.6 Relação das pessoas 4.7 Tarefas e habilidades
Cultura de aprendizagem	2.1 Disseminação da informação 2.2 Fluxo da informação 2.3 Gerenciamento do trabalho 2.4 Práticas de trabalho atuais 2.5 Adaptação local 2.6 Conteúdo da documentação 2.7 Disponibilidade da documentação 2.8 Análise de incidentes 2.9 Investigação de incidentes e acidentes	Cultura de Justiça	4.8 Consciência da limitação 4.9 Manutenção preventiva 4.10 Ações proativas 5.1 Relatar os desvios/preocupações 5.2 Entender os erros 5.3 Percepção dos erros 5.4 As ações não são punitivas 5.5 Avaliação por pares 5.6 Reconhecimento profissional
Flexibilidade	3.1 Habilidade de lidar com o inesperado 3.2 Capacidade para flexibilidade 3.3 Limites do trabalho seguro	Preparação para os problemas	6.1 Plano de emergência 6.2 Identificação dos riscos 6.3 Segurança de equipamentos 6.4 Sistema de alarmes

Fonte: Adaptado de Grecco *et al.* 2013.

2ª Etapa: Padrão ideal de resiliência.

Essa segunda fase consiste na consulta à especialistas em produção e resiliência de radiofármacos e engenharia sobre o grau de importância de cada métrica do indicador para que o setor da organização possa ser considerado resiliente. Isso significa que o grau de importância atribuído a cada indicador pelo especialista mostrar como o setor deve ser para atingir um nível de resiliência ideal. Não se está avaliando o setor, mas o nível ideal de resiliência que deveria ter.

Nessa fase são realizados os seguintes passos: 1) seleção de especialistas; 2) cálculo da importância relativa de cada especialista, com base no conhecimento e experiência; 3) escolha do termo linguístico e funções de pertinência; 4) determinação do grau de importância de cada indicador; 4) agregação de opiniões difusas; 5) padrão de resiliência (GRECCO *et al.* 2013).

O cálculo da importância de cada métrica relativa dada aos especialistas foi feito com base nos seus atributos (experiência, conhecimento de segurança na produção de radiofármacos e conhecimento em despachar radiofármacos embalados).

Foi usado um questionário (**Q**) com a identificação do perfil e as informações de um único especialista. A importância relativa (**RI**) do especialista, **E_i** (**i = 1, 2, 3, ..., n**) é um subconjunto $\mu_i(k) \in [0,1]$ definido pela equação (31) a seguir, sendo que **tQ_i** é a pontuação total do especialista **i**.

$$RI_i = \frac{tQ_i}{\sum_{i=1}^n tQ_i} \quad (31)$$

A escolha de termos linguísticos e funções de pertinência: cada indicador principal pode ser visto como uma variável relacionada a um conjunto de termos linguísticos associados às funções de pertinência. Esses termos linguísticos são representados por números *fuzzy* triangulares para representar o grau de importância de cada indicador. É sugerido que os especialistas empreguem os termos linguísticos U (Sem importância), LI (pouco importante), I (importante) e VI (muito importante) para avaliar a importância de cada indicador (GRECCO *et al.* 2013).

Para as opiniões difusas foi utilizado o método de agregação por similaridade proposto por Hsu e Chen (1996), que é usado para combinar as opiniões dos especialistas que são representadas por números *fuzzy* triangulares. Sendo o acordo representado pelo grau de concordância (**AD**) entre os especialistas **E_i** e **E_j**, que são

determinados pela proporção da área de interseção para a área total das funções de membro. O grau de concordância (**AD**) é definido pela equação:

$$AD = \frac{\int_x (\min\{\mu_{Ni}(x), \mu_{Nj}(x)\}) dx}{\int_x (\max\{\mu_{Ni}(x), \mu_{Nj}(x)\}) dx} \quad (32)$$

Se dois especialistas têm as mesmas estimativas, ou seja, $AD = 1$, as estimativas dos dois especialistas são consistentes e o grau de concordância entre eles é um. Se dois especialistas têm estimativas completamente diferentes, o grau de concordância é zero. Se as estimativas iniciais de alguns especialistas não tiverem interseção, o método da matriz *Delphi* (AM) foi usado para ajustar a opinião dos especialistas e obter a interseção comum em um corte de nível α fixo (Hsu; Chen, 1996).

$$AM = \begin{bmatrix} 1 & AD_{12} & \cdots & AD_{1j} & \cdots & AD_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ AD_{i1} & AD_{i2} & \cdots & AD_{ij} & \cdots & AD_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ AD_{n1} & AD_{n2} & \cdots & AD_{nj} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Assim, quanto maior a porcentagem de sobreposição, maior o grau de concordância. Depois de todo o acordo, os graus entre os especialistas são calculados nessa matriz de concordância (AM), que dá uma visão no acordo entre os peritos.

A concordância relativa (RA_i) do especialista, em que E_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), é dada pela equação (34). Em seguida, calcula-se o grau de concordância relativa (RAD_i) do especialista E_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) pela equação (35) e o coeficiente de consenso (CC_i) do especialista E_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) pela equação (36).

$$RA_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (AD_{ij})^2} \quad (34)$$

$$RAD_i = \frac{RA_i}{\sum_{i=1}^n RA_i} \quad (35)$$

$$CC_i = \frac{RAD_i \cdot RI_i}{\sum_{i=1}^n (RAD_i \cdot RI_i)} \quad (36)$$

Sendo \tilde{N} um número difuso para combinar opiniões de especialistas, então ele é o valor *fuzzy* de cada indicador principal que também é um número *fuzzy* triangular. Por definição do coeficiente de consenso (CC) do especialista E_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), \tilde{N} pode ser definido pela equação (37). Referindo-se à equação (37), \tilde{n}_i é o número difuso triangular relativo aos termos linguísticos, U (Sem importância), LI (pouco importante), I (importante) e VI (muito importante).

$$\tilde{N} = \sum_{i=1}^n (CC_i \cdot \tilde{n}_i) \quad (37)$$

O padrão de resiliência é uma referência e foi estabelecido pelo cálculo do grau de importância normalizado (NID) de cada indicador preventivo que compõe cada propriedade relevante para organizações resilientes. O NID de cada indicador principal é dado pela *defuzzificação* de seu número difuso triangular \tilde{N} (a_i, b_i, c_i), onde b_i representa a importância do grau. O NID pode ser definido pela equação (38).

$$NID_i = \frac{NID_i}{\text{alto valor de } b_i} \quad (38)$$

3ª Etapa: Avaliação de resiliência

Essa terceira fase do método consiste em avaliar o nível de resiliência em comparação com o padrão de resiliência. Nela, os valores linguísticos são usados para avaliar os graus de assiduidade dos indicadores proativos do setor de pacotes de expedição de radiofármacos dados pelos trabalhadores. Sugere-se que os trabalhadores empreguem os seguintes termos linguísticos: SD (discordo totalmente); PD (discordo parcialmente); NAND (nem concordo nem discordo); PA (Concordo Parcialmente); SA (Concordo Totalmente).

A Tabela 6 mostra os graus de frequência e os números difusos triangulares para termos linguísticos. Com o método de *defuzzificação* do centro de área, foi calculado o grau de presença (AD) ao padrão de resiliência pela equação (39). Referindo-se à equação (39), AD_j é o grau de atendimento do indicador principal j do tema i no setor de expedição de embalagens de radiofármacos (GRECCO *et al.* 2013).

$$AD_i = \frac{\sum_{j=1}^k NID_j \cdot adj_j}{\sum_{j=1}^k NID_j} \quad (39)$$

A avaliação média da resiliência desse setor foi realizada por sete trabalhadores e os resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Números fuzzy na avaliação dos graus de atendimento dos indicadores

Grau de atendimento	Simbologia	Termo linguístico	Número fuzzy triangular
0,2	DT	Discordo totalmente	N1= (0,0; 0,2; 0,4)
0,4	DP	Discordo parcialmente	N2= (0,2; 0,4; 0,6)
0,6	NCND	Não concordo, nem discordo	N3= (0,4; 0,6; 0,8)
0,8	CP	Concordo parcialmente	N4= (0,6; 0,8; 1,0)
1,0	CT	Concordo totalmente	N5= (0,8; 1,0; 1,0)

Fonte: Adaptado de Grecco *et al.* 2013.

A Tabela 7 mostra os graus de atendimento ao padrão de resiliência do processo de expedição de radiofármacos, considerando os valores médios.

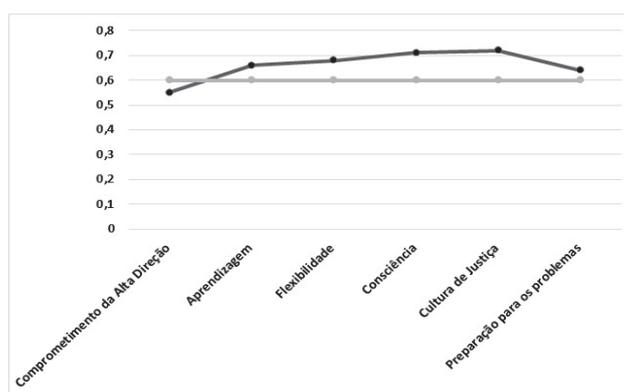
Tabela 7 - Valores médios do grau de atendimento ao padrão de resiliência

Princípios	Grau de Atendimento
Comprometimento da Alta Direção	0,55
Aprendizagem	0,66
Flexibilidade	0,68
Consciência	0,71
Cultura de Justiça	0,72
Preparação para os problemas	0,64

Fonte: Adaptado de Grecco *et al.* 2013.

O gráfico 2 mostra os resultados de aceitação, sendo satisfatório um grau de assiduidade maior ou igual a 0,6. O resultado da avaliação média da organização mostrou que o setor avaliado se mostrou satisfatório em cinco indicadores, apresentando problemas relacionados com o compromisso da alta administração (GRECCO *et al.* 2013).

Gráfico 2 – Avaliação média da resiliência realizada pelos sete trabalhadores



Fonte: adaptado de Grecco *et al.* 2013.

- Conclusão do estudo de Grecco *et al.* 2013

Nesse artigo, descreveu-se um método para avaliação da resiliência organizacional que utiliza indicadores proativos e os conceitos e propriedades da Teoria dos Conjuntos *Fuzzy*. Desenvolveu-se uma resiliência padrão usando um

método de agregação de similaridade para agregar opiniões individuais difusas, considerando a diferença de importância dada por cada especialista que participou da pesquisa. Um estudo piloto na unidade de produção de radiofármacos mostra que esse método oferece perspectivas interessantes para a implementação de princípios de ER.

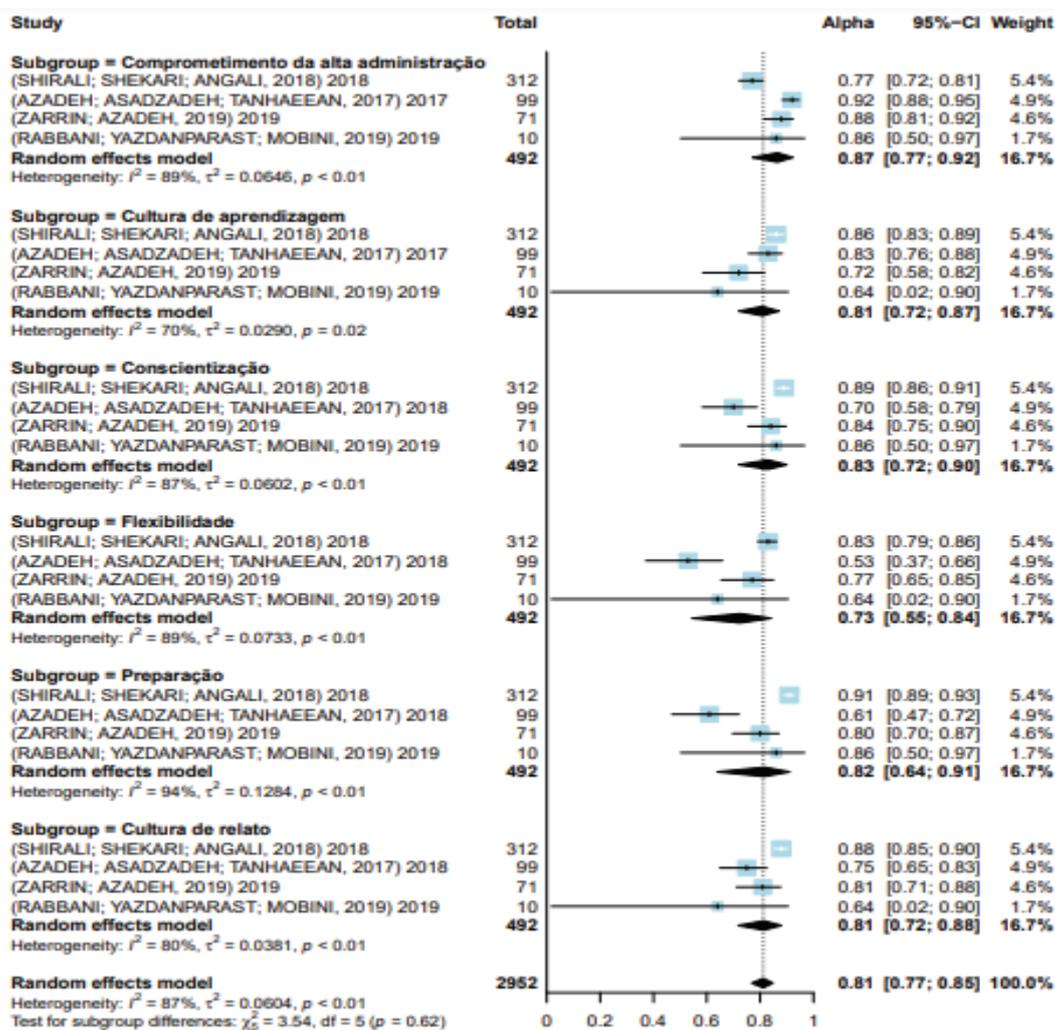
Ele pode ser uma ferramenta proativa para fornecer uma base para a ação sem esperar a ocorrência de eventos negativos. Através do uso do método identificou-se problemas relacionados às métricas de indicadores principais no tema “Comprometimento da alta direção”. Esses problemas podem ser investigados a fim de implementar ações para tornar o processo de expedição de pacotes de radiofármacos mais eficiente e seguro, além de melhorar a resiliência neste setor.

3.4.1 Síntese dos Resultados dos Estudos Quantitativos (Metanálise)

Devido à heterogeneidade dos estudos em relação aos seus delineamentos, intervenções, medidas de desfecho e contextos, foi possível realizar a metanálise de apenas quatro estudos quantitativos selecionados de um total de onze avaliados pela pesquisa que utilizaram o mesmo método de cálculo para medidas da confiabilidade dos instrumentos de coleta, bem como comparadas as variáveis que possuíam o mesmo domínio e que foram aplicadas nos quatro estudos.

A metanálise foi feita para os seguintes estudos: (i) Shirali, Shekari e Angali (2018); (iv) Azadeh, Asadzadeh e Tanhaeean (2017); (v) Zarrin e Azadeh (2019); (vi) Rabbani, Yazdanparast e Mobini (2019).

A Figura 6 mostra os resultados desta metanálise, considerando-se cada variável dos estudos selecionados.

Figura 6 – *Forestplot* para cada variável comum dos estudos

Fonte: o autor, 2023.

Os atributos das variáveis, que medem a resiliência dos sistemas selecionados foram: Comprometimento da alta Administração; Cultura de Aprendizagem; Conscientização; Flexibilidade; Preparação e Cultura de Relato. Essas variáveis foram calculadas para os quatro estudos, porém, é importante deixar claro que seis do total dos onze estudos quantitativos apresentaram tais atributos semelhantes para as variáveis. Eles também utilizaram como instrumentos de coleta os questionários aplicados à força de trabalho. Os resultados foram analisados a partir do uso do método acima citado e as variáveis serão detalhadas a seguir.

1) Comprometimento da alta administração

Nesta metanálise foram combinados os resultados dos quatro estudos citados, totalizando as respostas de 492 participantes. A menor consistência interna foi encontrada no estudo de Shirali, Shekari e Angali (2018) e a maior consistência, no estudo de Azadeh, Asadzadeh e Tanhaeean (2017). A consistência interna combinada para esse domínio foi $\alpha=0.87$ [IC-95%: 0.77 a 0.92; I² = 89%].

2) Cultura de aprendizagem

Para a cultura de aprendizagem foi possível combinar os resultados dos quatro estudos citados, com 492 respondentes. A consistência interna entre os estudos variou de $\alpha=0.64$ (RABBANI; YAZDANPARAST; MOBINI, 2019) à $\alpha=0.86$ (SHIRALI; SHEKARI; ANGALI, 2018). Com uma estimativa combinada de $\alpha=0.81$ [IC-95%: 0.72 a 0.87; I² = 70%].

3) Conscientização

Para esse domínio, constatou-se uma variação de $\alpha=0.70$ (AZADEH; ASADZADEH; TANHAEEAN, 2017) à $\alpha=0.89$ (SHIRALI; SHEKARI; ANGALI, 2018). A metanálise revelou uma consistência combinada de $\alpha=0.83$ [IC-95%: 0.72 a 0.90; I² = 87%].

4) Flexibilidade

Nesse domínio, observou-se uma variação no Alfa de Cronbach de $\alpha=0.53$ (AZADEH; ASADZADEH; TANHAEEAN, 2017) à $\alpha=0.83$ (SHIRALI; SHEKARI; ANGALI, 2018). Entre os quatro estudos citados a consistência interna combinada foi $\alpha=0.73$ [IC-95%: 0.55 a 0.84; I² = 89%].

5) Preparação

A consistência interna para esse domínio varia substancialmente entre os estudos, com uma variação de $\alpha = 0.61$ à $\alpha = 0.91$. Apesar disso, a metanálise encontrou elevada consistência interna com $\alpha = 0.82$ [IC-95%: 0.64 a 0.91; I2 = 94%].

6) Cultura de relato

Para a cultura de relato, observou-se que o estudo de Rabbani, Yazdanparast e Mobini (2019) teve menor consistência interna com $\alpha = 0.64$. Entretanto, o resultado combinado dos quatro estudos revelou elevada consistência interna para esse domínio com $\alpha = 0.81$ [IC-95%: 0.72 a 0.88; I2 = 82%].

O gráfico na figura 6, com o *forestplot* extraído do *software* R, constatou-se que a metanálise realizada encontrou elevada consistência interna para os questionários aplicados à força de trabalho. O comprometimento da alta administração foi o item dos questionários que apresentou maior consistência interna (confiabilidade) e o atributo flexibilidade menor consistência interna nos questionários aplicados à força de trabalho.

Em geral, os estudos quantitativos não apresentaram um planejamento das amostragens bem definido. Outro ponto em comum foram os principais atributos das variáveis de mensuração: comprometimento da alta administração; conscientização; cultura de aprendizado; flexibilidade; cultura de relato, sendo que todos eles possuem forte ligação com a ER.

A síntese dos onze estudos quantitativos mostrou que seis deles adotaram tais atributos. Com exceção do estudo de Patriarca *et al.* (2018), nenhum outro propôs em conjunto uma análise dos quatro potenciais sistêmicos da ER que são: monitorar, responder, aprender e antecipar. Todos apresentaram uma avaliação ascendente dos fatores de resiliência por meio de questionário padrão aplicado à força de trabalho.

Um fator limitante em comum entre os estudos foi que nenhum deles apresentou a capacidade de calcular todas as dimensões da resiliência, pois isso seria inviável em função do grande volume de variáveis geradas. Alguns autores citaram essa limitação em seus estudos.

Os métodos quantitativos mais usados para gerar as pontuações dos fatores de resiliência, com base com base nos modelos matemáticos e estatísticos: lógica *Fuzzy*, (ZADEH, 1965); Processo Hierárquico Analítico (PHA) (SAATY, 2004); teoria

de grafos (EULER, 1736); Análise Envoltória de Dados (AED) (CHARNES *et al.* 1978), *Principal Component Analysis* (PCA) (KARL; PEARSON, 1901). Observa-se que a lógica *Fuzzy* é a mais utilizada entre os onze estudos quantitativos, e cinco deles aplicaram essa técnica: (ii) Azadeh *et al.* (2014); (iii) Azadeh *et al.* (2017); (v) Zarrin e Azadeh (2019); (vii) Nelson *et al.* (2016); (xi) Grecco *et al.* (2013).

Seis dos onze estudos analisados realizaram o teste de confiabilidade com aplicação do coeficiente *Alpha* de *Cronbach*. Eles foram predominantemente transversais ou analíticos transversais, em termos epidemiológicos, e todos realizaram um diagnóstico da organização em um instante específico. O resumo dos estudos quantitativos incluídos na pesquisa, contendo os principais atributos dos indicadores encontrados estão apresentados no Quadro 11.

Quadro 11: Resumo dos estudos incluídos na pesquisa e atributos dos indicadores quantitativos

AUTORES	OBJETIVO	LOCAL	CONTEXTO
Shirali (2018)	<p>Avaliar a validade de conteúdo, de constructo (por análises de fatores exploratória e confirmatória) e confiança (por Cronbach e teste-reteste) para medir a cultura resiliente em segurança de SSC.</p>	<p>Irã Respondentes (R.): 312</p>	<p>Refinaria de petróleo localizada no sudoeste do Irã.</p>
Azadeh, Salehi, Mirzayi e Roudi (2017)	<p>Investigar os impactos recíprocos de fatores gerenciais e organizacionais e da Engenharia de Resiliência na segurança por meio de programação matemática.</p>	<p>Irã Respondentes (R): 41</p>	<p>Refinaria no sul do Irã.</p>
Azadeh, Asadzadeh e Tanihaeean (2017)	<p>Desenvolver uma ferramenta verificada para a avaliação da Engenharia de Resiliência na segurança das organizações de manutenção na indústria de óleo e gás.</p>	<p>Irã Respondentes (R): 99</p>	<p>A avaliação foi realizada em 11 departamentos do setor de manutenção de uma estatal de petróleo na província de Teerã.</p>
Shirali et al. (2016)	<p>Avaliar fatores da Engenharia de Resiliência na segurança de uma indústria de processo usando uma ampla gama de indicadores.</p>	<p>Irã Respondentes (R): 32</p>	<p>Indústria de processo no Irã.</p>
Azadeh, Salehi, Arvan e Doiatkhan (2014)	<p>Avaliar os fatores de resiliência na segurança de uma planta petroquímica, podendo ser expandida para outras indústrias.</p>	<p>Irã Respondentes (R): 60</p>	<p>Os respondentes: gerentes, engenheiros, trabalhadores experientes que trabalham na planta, especialistas neste sistema produtivo.</p>
Rabbani, Yazdanparast e Mobini (2019)	<p>Apresentar um novo algoritmo de otimização de desempenho baseado na teoria dos grafos, na abordagem matricial e em métodos estatísticos para Avaliação da cultura de ER.</p>	<p>Irã Respondentes (R): 10</p>	<p>Uma planta antiga desgastada, bem como práticas de gerenciamento de segurança antigas e inadequadas.</p>
Zarrin e Azadeh (2019)	<p>Mapear as influências da ER no sistema de gestão de saúde, segurança, meio ambiente e ergonomia usando o mapa cognitivo fuzzy e o número z.</p>	<p>Irã Respondentes (R): 71</p>	<p>Implementado Em uma grande planta petroquímica localizada no Irã.</p>
Grecco et al. (2013)	<p>Adotar uma abordagem fuzzy set theory (fst) para avaliação da resiliência em organizações com base em indicadores proativos de desempenho de segurança, definidos de acordo com os princípios da ER.</p>	<p>Brasil Respondentes (R): 12</p>	<p>A instalação nuclear onde é realizado o processo de expedição de empacotamento de radiofármacos.</p>
Saurin e Werle (2017)	<p>Saber como analisar Recursos de folga de diferentes naturezas em sistemas sociotécnicos complexos Para enfrentar as variabilidades (incluindo variabilidades incidentais).</p>	<p>Brasil Respondentes (R): 45</p>	<p>O estudo foi aplicado em uma maternidade de um grande hospital, onde havia riscos de segurança para pacientes e profissionais.</p>
Nelson et al. (2016)	<p>Analisar os dados operacionais do programa de ações corretivas com 120.000 ações corretivas ao longo de 10 anos.</p>	<p>EUA Respondentes (R): 120.000</p>	<p>Dez anos de ações corretivas, de 2005 a 2014, em uma usina nuclear (Idaho, EUA).</p>
Patriarca et al. (2018)	<p>Definir uma análise para medir a resiliência organizacional em SSC, levando em conta a sua segurança e combinando a grade de análise RAG (Resilience Assessment Grid) e o processo AHP.</p>	<p>Roma Respondentes (R): 12</p>	<p>Pesquisa aplicada no departamento de anesthesiologia, cuidados críticos e medicina da dor, da Universidade Sapienza (Roma, Itália).</p>

Fonte: o autor, 2023

AUTORES		ATRIBUTOS DOS INDICADORES									
Shirali (2018)	Azadeh, Salehi, Mirzayi e Roudi (2017)	Azadeh, Asadzadeh e Tanhaeean (2017)	Shirali et al. (2016)	Azadeh, Salehi, Arvan e Dolatkthah (2014)	Rabbani, Yazdanparast e Mobini (2019)	Zarrin e Azadeh (2019)	Grecco et al. (2013)	Saurin e Werle (2017)	Nelson et al. (2016)	Patriarca et al. (2018)	
Cultura justa	Compromisso da alta administração	Confiança Mútua e Transparência	Capacidade de amortecer	Compromisso da alta administração	Compromisso da alta administração	Compromisso da alta administração	Compromisso da alta administração	Taxa irregular de chegada do paciente	Tarefas de trabalho	Antecipação	
Gestão de mudanças	Aprendizagem	Melhoria nas habilidades adaptativas	Flexibilidade	Cultura de relatos	Cultura de relatos	Saúde e cultura de aprendizagem	Aprendizagem	Taxa de ocupação da enfermaria	Plano de ações corretivas	Resposta	
Cultura de Aprendizagem	Consciência	Aperfeiçoamento em habilidades inteligentes	Margem	Cultura de aprendizagem	Cultura de aprendizagem	Ergonomia e preparação	Flexibilidade	Falta de anestesista de plantão		Monitoramento	
Gestão e análise dos riscos	Flexibilidade	Promoção da cooperação	Tolerância	Consciência	Conhecimento	Segurança e consciência	Consciência	Taxa de ocupação da UTI neonatal		Aprendizagem	
Preparação	Auto-organização	Esclarecimento de procedimentos de trabalho seguro	Interação em escala cruzada	Preparação	Preparação		Cultura justa	Acessibilidade do ambiente construído			
Flexibilidade	Redundância	Empoderamento dos funcionários	Aprendizagem	Flexibilidade	Flexibilidade		Preparação	Procedimentos burocráticos			
Cultura de relatos			Atenção	Trabalho em equipe	Auto-organização			Apoio psicológico ao paciente			
Comprometimento da alta administração			Resposta	Redundância	Tolerância a falhas			Falta de reserva de sangue			
Consciência			Antecipação	Tolerância a falhas	Trabalho em equipe			Condição clínica do paciente			
Sistema de gestão em segurança					Redundância						
	Investigação dos acidentes; envolvimento do pessoal; competência										

Fonte: o autor, 2023.

3.5 Resultados Individuais dos Estudos Qualitativos

Chuang *et al.* (2020) e Sakuda e Kitamura (2020) utilizaram em seus estudos o método RAG para medir o potencial da performance resiliente da organização em relação à segurança em indústrias diferentes.

No estudo (xii), Chuang *et al.* (2020) avaliaram um departamento de emergência médica de um hospital com o objetivo de identificar qual era o *status* das quatro capacidades resilientes: monitorar, responder, antecipar e aprender. O estudo mostrou que o monitoramento era a função mais deficiente do departamento de emergência e concluiu que as questões do método RAG devem ser bem elaboradas por um time de especialistas no processo produtivo do departamento avaliado.

No estudo (xiii), Sakuda e Kitamura (2020) utilizaram o método para evitar a degradação do potencial de resiliência na usina nuclear de *Fukushima Daiichi*. Em função do cenário pós-traumático do acidente de 2011, os autores enfrentaram diversas resistências, porém, conseguiram encontrar um caminho para aceitação da pesquisa utilizando o RAG adaptado com base em fragilidades da planta nuclear.

O estudo revelou que essa adaptação do método pode ser uma ferramenta útil para facilitar a conscientização sobre os possíveis pontos fracos da planta, além de apontar um caminho para melhorar os potenciais de monitoramento e resposta através da identificação das fragilidades. Porém, em função das dificuldades, a pesquisa não demonstrou a pontuação dos quatro principais atributos da resiliência.

Algumas características semelhantes foram apresentadas nos estudos qualitativos (xiv) de Øien e Nielsen (2012), (xv) Patriarca *et al.* (2019) e (xvi) de Jain *et al.* (2018). Eles propuseram ferramentas para detecção e alerta precoce por meio de indicadores proativos que possibilitassem detectar com antecedência os acidentes de grandes proporções (*major accidents*), baseando-se em revisões da literatura para analisar as estatísticas dessas ocorrências e as principais causas e falhas nas defesas que desencadearam esses tipos de acidentes no passado.

No estudo (xvii), Hollnagel *et al.* (2021) propuseram algo semelhante, porém, foi baseado em sinais fracos, que são fontes de informação não cobertas pelos Sistemas de Gestão de Segurança tradicionais, abrangendo o que eles não estão preparados, o que não esperam e o que de outra forma não percebem. Para esse autor, os sinais fracos compreendem os muitos pequenos eventos que estão abaixo

do limite de notificação ou gravidade, bem como os padrões de desempenho geralmente não reconhecidos – os hábitos, as rotinas e as compensações comuns – os quais, na maioria das vezes, levam aos resultados esperados, mas que, de vez em quando, dão origem a resultados inesperados e indesejados.

No estudo (xiv), Øien e Nielsen (2012) desenvolveram o método *Resilience based Early Warning Indicators* (R.E.W.I.), contendo um conjunto de medidas de autoavaliação que fornece informações sobre os atributos fundamentais da resiliência organizacional voltadas aos gerentes seniores e profissionais de segurança de uma organização. Os objetivos do método são fornecer alertas precoces para evitar acidentes graves e melhorar a segurança e o desempenho organizacional a longo prazo, o que pode ser visto como um esforço para melhorar o potencial de monitoramento e antecipação da organização.

No estudo (xv), Patriarca *et al.* (2019) adaptaram o método R.E.W.I. de Øien e Nielsen (2012) para propor um jogo em uma fábrica de produtos químicos, mais especificamente em uma unidade de produção de amônia. A proposta visou favorecer o engajamento dos trabalhadores na segurança do trabalho e, de forma mais geral, superar as barreiras psicológicas à participação dos colaboradores da fábrica na pesquisa.

Esses três últimos métodos citados de detecção precoce sempre irão depender de uma resposta assertiva da organização diante de um indicador que sinalize as falhas latentes e a fragilidade das barreiras e/ou defesas organizacionais. Porém, se os esforços para gerenciar esses tipos de indicadores não forem recompensados por uma resposta assertiva do time de implantação, o método estará fadado ao insucesso.

Hollnagel *et al.* (2021) mostraram uma evolução do método RAG para o método *Systemic Potential Management* (SPM). A Organização Europeia para a Segurança da Navegação Aérea desenvolveu esse projeto com o objetivo de detectar sinais fracos de alerta precoce que possam prevenir ocorrências de acidentes ou eventos que representem uma ameaça ao sistema de gestão e controle de tráfego aéreo. Isso foi o modo de demonstrar uma preocupação comum às diversas organizações e seus sistemas de governança em risco e fortalecer o potencial de antecipação para evitar as ameaças.

Uma evolução observada entre os métodos RAG e SPM é que as antigas quatro habilidades (monitorar, responder, aprender e antecipar) agora são chamados

de quatro potenciais sistêmicos da organização. Esse estudo será detalhado mais à frente.

O SPM é uma ferramenta para gerenciar o desempenho de uma organização e como as mudanças são implementadas. O SPM usa quatro conjuntos de perguntas chamadas de primeiro plano para avaliar as mudanças como meio de gerenciá-las. Em contraste às perguntas de fundo, as perguntas de primeiro plano devem ser usadas repetidamente ao longo do projeto. Os potenciais sistêmicos descrevem ou definem efetivamente o que uma organização deve fazer – os critérios de desempenho – e respondem às perguntas (o perfil do potencial de desempenho) e, conseqüentemente, representam o quão bem esses critérios foram alcançados (HOLLNAGEL *et al.* 2021).

Um elemento crítico para os métodos RAG e SPM é saber como elaborar bem as perguntas de forma a se ter um correto diagnóstico do que se pretende avaliar. É necessário ter um time de implementação com experiência dentro dos processos da empresa onde eles estão sendo aplicados. Outro fator importante é que os respondentes devem passar por uma entrevista preparatória, do contrário o diagnóstico corre o risco de ter perguntas e respostas genéricas sem sentido. Outra limitação é que o método sempre irá depender da percepção dos funcionários sobre os quatro principais potenciais sistêmicos da resiliência: monitoramento, resposta, aprendizagem e antecipação

Uma ferramenta tecnológica (*software*) foi proposta no estudo (xviii) de Huber *et al.* (2012) e no estudo (xix) de Souza, Gomes e Carvalho (2021) para gerar Indicadores de Resiliência e garantir a segurança dos sistemas. O primeiro estudo propôs uma estrutura para indicar onde a organização está localizada dentro das capacidades necessárias para lidar com perturbações que podem afetá-la, incluindo acidentes em uma companhia de táxi aéreo. Por meio de questionários preenchidos no sistema, os indicadores foram gerados com os seguintes atributos: comprometimento, consciência, adaptabilidade e eficiência. Elaboraram-se questões seguindo esses quatro princípios e colocaram-nas em uma escala de notas

O estudo de Souza, Gomes e Carvalho (2021) foi aplicado à indústria nuclear e pretendeu utilizar os conceitos da ER na compreensão da organização pela análise de tarefas e atividades cognitivas para desenvolvimento de indicadores pelos próprios agentes humanos atuantes no nível operacional. Questionários foram preenchidos

para detectar quais dificuldades organizacionais, de recursos e de conhecimento, além de outras que poderiam aparecer, impedindo a realização adequada das tarefas. O estudo foi focado na identificação das fontes de variabilidade das tarefas, seguindo as premissas da análise cognitiva para coleta de dados, a qual tem como objetivo a compreensão do trabalho realizado do ponto de vista dos trabalhadores da linha de frente, obtendo seu conhecimento tácito e estratégias informais para lidar com a complexidade.

O operador aponta nos questionários quais desses elementos apresentam problemas ou dificuldades para sua performance diária. Essa análise é feita em tempo real pelo sistema e permite que os gestores saibam quais os desvios ou dificuldades dos operadores. Como desvantagem, o método irá sempre depender da interpretação dos trabalhadores em relação às perguntas, o que pode causar viés de resposta dos participantes. Além disso, não se sabe até que ponto os trabalhadores estarão dispostos a revelar suas dificuldades.

Foram identificados dois estudos secundários de importante contribuição para esta pesquisa. O primeiro foi a revisão sistemática feita no estudo (xx) de Peñaloza *et al.* (2020), que teve o objetivo de avaliar sistemas de medição de desempenho em segurança com foco em identificar se a ER oferece uma nova perspectiva em segurança para esses sistemas e se os conceitos dessa disciplina têm sido postos em prática. Os resultados dessa revisão mostraram que, embora ainda de forma bastante prematura, as premissas da ER vêm sendo utilizadas como uma ótica para a definição de sistemas de indicadores de desempenho em segurança.

A segunda revisão sistemática foi o estudo (xxi) de Ranasinghe *et al.* (2020), que teve como objetivo principal explorar indicadores de ER que foram identificados como importantes no desenvolvimento e na avaliação do ambiente de trabalho resiliente em indústrias de alto risco, particularmente na indústria de reforma e construção civil. Os resultados mostraram que os quatro indicadores comumente usados foram: comprometimento da alta administração, conscientização, aprendizado e flexibilidade, todos com forte relacionamento com a ER. Porém, essa revisão não considerou indicadores definidos de forma qualitativa, apenas os métodos quantitativos. Como já citado, indicadores não são apenas dados quantitativos, mas são também fatos relevantes que podem sinalizar um fenômeno (FNQ, 2014).

No estudo (xxii), Pflanz e Levis (2012) apresentaram diretrizes para medição de resiliência organizacional com base em medidas substitutas, como tolerância a erros, capacidade de repostas em eventos inesperados e nível de conectividade entre os elementos do sistema ou organização. O estudo adotou o *software Petri Net*, o qual projeta uma arquitetura de rede utilizando elementos da álgebra linear e apresenta três fases principais da resiliência: prevenção, sobrevivência e recuperação. Os conceitos apresentados nesse estudo também se aplicam à resiliência organizacional, porém, a pesquisa só focou na fase de sobrevivência da resiliência – fase em que a capacidade dos sistemas é afetada ou sofre deformação.

Por fim, no estudo (xxiii), Herrera *et al.* (2014) propuseram outra aplicação de Indicadores de Resiliência na indústria da aviação, mais especificamente em um departamento de controle de tráfego aéreo em um aeroporto. Os autores desenvolveram uma estrutura de escalas para identificar um grupo de Indicadores de Resiliência.

Esse estudo aplicou o conceito de *Safety I and Safety II* de Hollnagel *et al.* (2014b) e foi desenvolvido a partir de observações dos “*air traffic controller offices*” (ATCO). A estrutura de escala detectava não apenas os incidentes, acidentes e desvios, mas a presença de capacidade do sistema homem-máquina nos momentos em que as operações saíam do esperado, ou eram ameaçadas, nesses instantes em que não era possível um pouso adequado e os pilotos tinham que arremeter as aeronaves.

Durante as manobras de arremeter (*go-around*), considerados incidentes operacionais, foi possível identificar instanciações de soluções de problemas e manobras propostas pelos controladores de tráfego aéreo que evitaram colisões ou queda de aeronaves (acidentes de grandes proporções) graças às habilidades desses profissionais em solucionar tais problemas, em sua maioria não contemplados em procedimentos.

No que diz respeito à ER, a estrutura de escala proposta pelo estudo suporta a identificação e a extração de Indicadores de Resiliência para mapeamento em padrões (HERRERA *et al.* 2014), dessa forma, facilita a aprendizagem sobre o que vai bem, além do que dá errado (PEÑALOZA *et al.*, 2020).

3.6 Estudos qualitativos e seus métodos detalhados

Com a análise dos estudos qualitativos, foi possível identificar uma tendência deles em gerar indicadores mais proativos que possuam o objetivo de detectar alertas que sinalizem precocemente o risco de acidentes de grandes proporções. Outro fator observado foi que esses estudos partiram de um referencial teórico mais atual e mais alinhado com os novos conceitos da ER. Assim sendo, nos tópicos a seguir serão apresentados em detalhe os dois estudos qualitativos selecionados nesta pesquisa.

- (xxiii) **Herrera et al. (2014): *The Scales framework for identifying and extracting resilience related indicators: Preliminary findings of a go-around case study.***

Esse estudo fez parte do projeto de pesquisa “ESCALA” do *Single European Sky ATM Research* (SESAR) e foi apresentado no evento *SESAR innovation day*, em 2014, que ocorre periodicamente. Trata-se de um projeto colaborativo para reformular o espaço aéreo europeu e a sua gestão do tráfego aéreo - *Air Traffic Management* (ATM). As instituições EUROCONTROL e a Comissão Europeia desenvolveram parcerias entre empresas privadas e o SESAR.

Esse projeto abordou a seguinte questão de pesquisa: “Que valor agregado a combinação de *Enterprise Architecture* (EA) ou Arquitetura Corporativa com *Resilience Engineering* (RE) pode trazer para medir o potencial de resiliência do sistema de Gerenciamento de Tráfego Aéreo - ATM (*Air Traffic Management*)?”

Esses autores utilizaram o conceito da ER em conjunto com o conceito de EA (*Enterprise Architecture*), a fim de melhorar a capacidade de SSC em operações sob condições esperadas e inesperadas. Eles expandiram o foco da análise de sistemas de gestão de segurança proativos, incluindo dados sobre o que dá errado (Segurança I), bem como o que dá certo (Segurança II).

A Arquitetura Corporativa normalmente prescreve uma abordagem holística em que a tecnologia não é isolada dos aspectos humanos, propondo uma integração de componentes técnicos do sistema com as partes interessadas.

A possibilidade de se monitorar o sistema sob diferentes pontos de vista parece atraente e em linha com a ER no que diz respeito à sua forma flexível. A estrutura do

“ESCALA” combina o conhecimento da ER e as ferramentas da Arquitetura Corporativa em um modelo que integra os aspectos humanos, organizacionais e técnicos. Nesse projeto, os principais objetivos dos indicadores foram: 1) monitorar o *status* do sistema e seu desempenho, 2) decidir onde e como agir, 3) motivar aqueles em posição de tomar as ações necessárias para que elas realmente aconteçam.

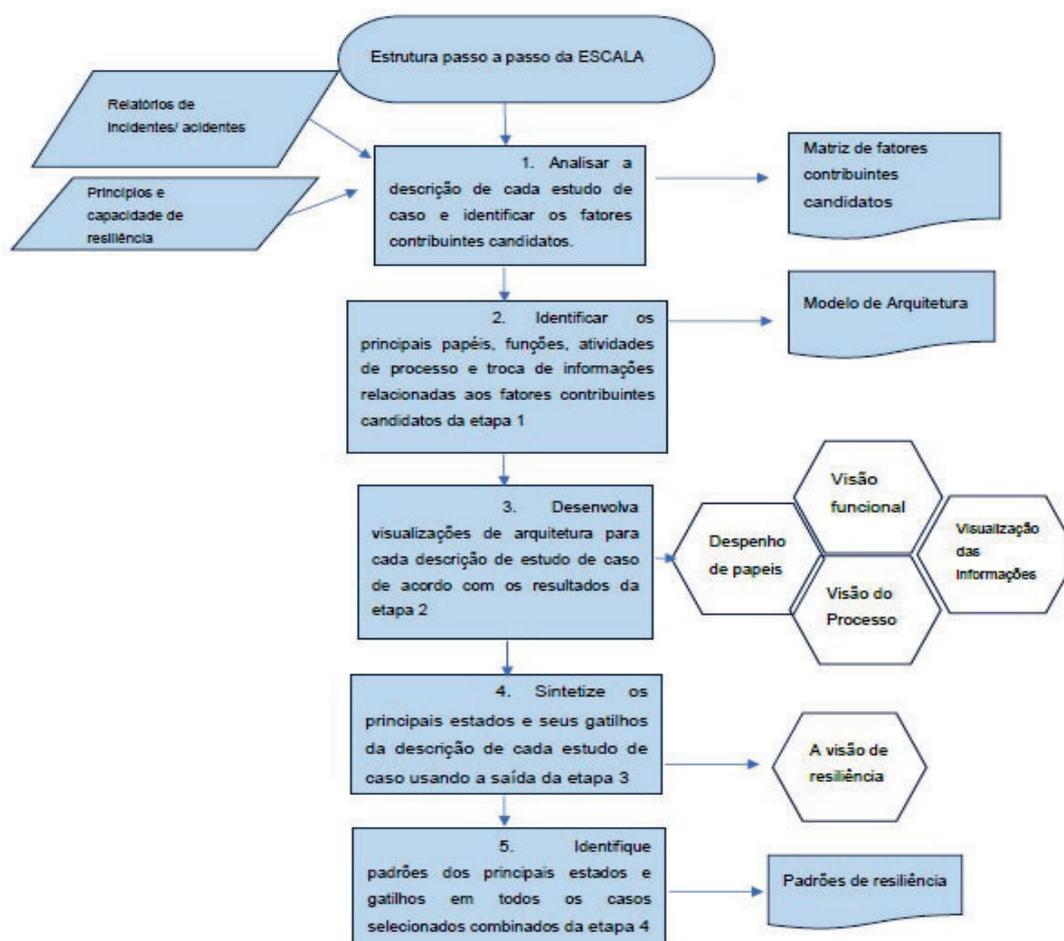
Os alertas precoces e os indicadores que os antecedem abordam a necessidade de prever e agir antes que um evento desejado ou indesejado ocorra. Portanto, os indicadores devem estar relacionados com os aspectos que são importantes para sistemas resilientes, não sendo vistos como relacionados à componentes ou fatores isolados, mas que seguem padrões em que os indicadores têm relação com a capacidade do sistema de se adaptar aos distúrbios que mostram interdependências e relações.

A estrutura do “ESCALA” inclui: um ponto de vista funcional, um ponto de vista de processo e um ponto de vista de informação. Além disso, foi proposto o ponto de vista da ER, visando explorar e identificar um conjunto de indicadores, que não estão isolados, pois podem afetar uns aos outros influenciando o contexto das operações. Assim, um conjunto de indicadores considerados Padrões de Resiliência foi criado por Herrera *et al.* (2014). Não se trata apenas de identificar eventos únicos, mas de como as partes podem interagir e afetar umas às outras.

- ✓ Resumo metodológico do estudo (xxiii) de Herrera *et al.* 2014
- A estrutura de Escala

A estrutura de ESCALA inclui uma abordagem metodológica para aplicar a Arquitetura Corporativa em combinação com um quadro teórico da ER, abrangendo as etapas ilustradas na Figura 7.

Figura 7 - Abordagem preliminar para aplicar a estrutura da escala



Fonte: Herrera *et al.* 2014.

Esse estudo foi organizado em etapas, conforme descritas a seguir.

Etapa 1 – Analisar cada descrição do estudo de caso e identificar os fatores contribuintes candidatos.

Nesta etapa, cada relatório de incidente para os estudos de caso selecionados foi rastreado "manualmente", analisando as descrições feitas pelos investigadores do incidente. Embora muitos dos fatores contribuintes associados ao incidente tenham sido explicitamente declarados no relatório, alguns fatores adicionais possíveis foram identificados por meio da análise.

Como entrada para essa atividade, as capacidades e os princípios de resiliência foram usados como pistas para caracterizar e organizar os fatores

contribuintes identificados. Fatores contribuintes são fatores correlacionados aos aspectos de resiliência e podem ser positivos ou negativos.

Etapa 2 – Identificar os principais papéis, funções, atividades do processo e troca de informações relacionadas aos fatores contribuintes candidatos na etapa 1. Essa etapa organiza os aspectos relacionados aos fatores contribuintes identificados na etapa anterior em papéis, funções (responsabilidades), atividades e intercâmbio de informações. A saída é um modelo que consta no quadro 12 que define os papéis relevantes (humano e sistema), as funções que tais papéis desempenham, em quais atividades de processo eles se envolvem (interação entre as diferentes funções dos operadores e setores) e as informações trocadas nas atividades.

Etapa 3 – Desenvolve visualizações de arquitetura para cada descrição de estudo de caso de acordo com os resultados da etapa 2 descritos em visões de arquitetura apropriadas. Essas são visões funcionais, as quais essencialmente descrevem as responsabilidades e atribuições. A visualização de informações mostra os elementos de comunicação, a visão dos processos realizados e a interação entre os papéis (incluindo os elementos de informação sendo trocados).

Etapa 4 – Sintetiza os estados principais e seus gatilhos de cada descrição de estudo de caso usando a saída do passo 3 em que a visão do processo para um caso particular quando estiver completa, os estados principais e seus gatilhos serão extraídos. Os gatilhos são tratados como candidatos a Indicadores de Resiliência.

Etapa 5 – Identificar padrões dos principais estados e gatilhos em todos os casos selecionados combinados da etapa 4. Enquanto na etapa anterior, os candidatos a Indicadores de Resiliência dos casos individuais foram extraídos, nessa etapa o objetivo foi identificar Padrões de Resiliência a partir de uma visão consolidada. Os padrões são construídos com base nos conceitos atuais da ER, bem como nas descobertas dos estudos de caso do projeto. Um padrão de resiliência é uma coleção de indicadores candidatos e de sua base, a partir da qual hipóteses mais concretas podem ser feitas. Por exemplo, as composições de padrões de um determinado conjunto de indicadores são representativas em outros casos? Essas hipóteses foram avaliadas nos estudos de caso do projeto ESCALA.

A seguir, a aplicação dessas etapas propostas por Herrera *et al.* (2014) foi realizada para o estudo de caso ocorrido em 2011 no Aeroporto de Arlanda (Estocolmo – Suécia), descrevendo um possível incidente grave que foi evitado por

um segundo controlador de tráfego aéreo que notou a comunicação entre um controlador e a aeronave, redirecionando a aeronave sob sua responsabilidade. Essa ação evitou que duas aeronaves entrassem em rota de colisão. O fato de o segundo controlador ter ouvido a comunicação entre o controlador e a aeronave é considerado um candidato a indicador de resiliência (um gatilho, evento ou situação que indica a resiliência) e o estado, nesse caso, era que a aeronave pela qual ele era responsável foi redirecionada.

Antes de apresentar esse caso, será feita uma breve descrição da manobra de arremeter um avião (*Go-Around: GA*), segundo Herrera *et al.* (2014). A arremetida é um pouso abortado de uma aeronave que está em aproximação final. Ele pode ser adotado quando não existem condições para o pouso. O início de um procedimento GA pode ser ordenado pelo controlador ou decidido pelo piloto em comando por vários motivos. A GA não constitui em si qualquer tipo de emergência. De fato, um GA executado corretamente é uma manobra segura e bem praticada. No entanto, ela requer execução adequada do piloto e suporte adequado do controlador. Essa manobra ocorre com uma taxa média de 1-3 por 1000 abordagens e uma em cada dez tentativas leva a um resultado potencialmente perigoso.

Vários elementos desempenham um papel durante um GA, como pilotos, elementos da aeronave usados para pouso e decolagem, pista e condições meteorológicas, ATCOs (*Air Traffic Control Offices*) que supervisionam a parte de pouso do voo, sistemas de pouso usados por pilotos e ATCOs, redes de segurança como o Sistema de Alerta de Proximidade do Solo, dispositivos de comunicação entre pilotos e ATCOs, procedimentos para pouso, *layout* da pista, gerenciamento de GA e reencaminhamento de uma aeronave.

Em uma perspectiva de resiliência, um GA pode ser considerado como um evento que gera uma perturbação no sistema sob análise (por exemplo, um ACC - *Area Control Center*) que tem que lidar com isso. A forma como o ACC lida com isso, permite-nos identificar alguns fatores contribuintes, positivos e/ou negativos, que podem ser correlacionados com aspectos de resiliência

Conforme explicado anteriormente, a abordagem apresentada visa identificar esses fatores contribuintes, extrair os Indicadores de Resiliência relacionados e modelá-los por meio de uma Visão da Resiliência. Os indicadores são consolidados

na forma de Padrões de Resiliência, que podem ser investigados em estudos de casos ESCALAS futuras.

- O caso do incidente no aeroporto de Arlanda (HERRERA *et al.* 2014)

Em janeiro de 2011, uma aeronave abortou tardiamente o pouso na pista 26 do aeroporto de Arlanda ao mesmo tempo em que outra aeronave decolou da pista 19R. Na aproximação perdida da pista 26, a curva à direita deveria ser realizada o mais rápido possível para evitar conflito com o tráfego que parte de outra pista. A aeronave que abortou o pouso seguiu os procedimentos prescritos para aproximação falhada somente após três chamadas do ATCO.

Embora o conflito tenha sido observado pelo ATCO e a aeronave de partida tenha sido instruída a mudar seu curso, ocorreu uma infração de separação.

Durante o GA, o comandante assumiu o controle da aeronave. O fato de o comandante assumir os controles em um estágio tardio provavelmente resultou em uma falta de capacidade restante suficiente para seguir imediatamente o procedimento de aproximação.

- ✓ Aplicação da estrutura de Escalas no Incidente do Aeroporto Arlanda (GA)

Etapa 1. Analisar a descrição dos estudos de caso de Arlanda e identificar fatores contribuintes candidatos. A primeira etapa é executada sem qualquer suporte de arquitetura incluindo a identificação de possíveis fatores contribuintes do relatório do incidente. Alguns exemplos de fatores contribuintes identificados foram:

- A aeronave de pouso estava muito rápida e muito alta para fazer um pouso adequado;
- O piloto de vôo (*Flight Pilot*) tinha pouco experiência para pousar (considerando-se o contexto);
- O comandante assumiu o papel do piloto de vôo, com a experiência em receber este tipo de informação para GA por parte do controle de tráfego aéreo e dos instrumentos da aeronave, em uma situação já estressante;
- A comunicação entre um dos controladores e a aeronave de pouso foi captada por um segundo controlador na torre.

Relacionando os princípios de resiliência, o quadro 12 apresenta o resultado da matriz elaborada para esse estudo de caso. Ele exemplifica adversidades (variabilidade) positivas (+) quando o sistema sociotécnico consegue lidar com o inesperado e fazer regulações, bem como as adversidades (variabilidade) negativas que contribuem para os incidentes e perda de governabilidade do sistema (HERRERA *et al.* 2014).

Quadro 11 – Princípios de resiliência, capacidades e indicadores de potencial (+) positivo e (-) Negativo do estudo de caso Arlanda.

Princípios de Resiliência	Capacidade de antecipação	Capacidade de monitorar	Capacidade de responder	Capacidade de aprender
1. Endereçamento de trabalho, como é feito e compreensão das operações diárias.		(+) ATCO - Oficiais de Controle de Tráfego Aéreo monitoram um ao outro.	(+) Ação adicional realizado por um dos ATCOs para corrigir a situação.	
2. Condições variadas significam variações internas ou externas afetando o funcionamento do sistema.	(-) Condição inesperada (não a arremeter em si, mas o fato de que a aeronave não seguiu as instruções do controlador).			(+) Formação e competência quando situações ficam fora do procedimento.
3. Sinal e dicas que alertam o setor operacional e/ou pessoal de gestão.	(-) STCA não funciona quando aeronave está perto de pousar e não há outro sistema ajudando se este não for o caso.	(-) Instrumentos de voo para pouso (avião posição)		
4. Trocas múltiplas de metas (<i>trade-offs</i>) que afetam as operações.			(+) Conflito potencial na manobra de arremeter administrado por dois Oficiais de Controle de Tráfego Aéreo (ACTO).	
5. Margens, redundância e capacidade adaptativa visam manter recursos suficientes, não o trabalho sozinho, mas também representando mudanças potenciais.				

Fonte: Herrera *et al.* 2014.

Quadro 12 – cont.

Princípios de Resiliência	Capacidade de antecipação	Capacidade de monitorar	Capacidade de responder	Capacidade de aprender
6. Acoplamento, cascatas de interações tratam de cooperação, coordenação e compartilhamento de conhecimento.		(+) Oficiais de Controle de Tráfego Aéreo (ATCOS) monitoram um ao outro.	(+) Previnem uma colisão potencial entre aeronaves.	
7. Tempo, sincronização e prazos.		(-) O Oficial de Controle de Tráfego Aéreo teve que enviar 3 instruções para a aeronave antes da ação ter sido executada.		
8. Subespecificação e ajustes aproximados.			(-) Nem todos os detalhes sobre GA são especificados nos procedimentos. Capacidades de <i>buffer</i> para lidar com subespecificações.	

Fonte: Herrera *et al.* 2014.

Etapa 2. Aplicação da escala

Nessa etapa, os papéis, funções, atividades e trocas de informações relacionadas a cada um dos fatores contribuintes identificados na etapa 1 são descritos em uma forma matricial. Por exemplo, o fator contribuinte “O Comandante toma o papel do piloto ao receber um excesso de informações do controle de tráfego aéreo e instrumentos da aeronave em uma situação já estressante” como está relatado no Quadro 13, que exemplifica, para cada fator contribuinte identificado, os construtos arquitetônicos mapeados, como: papéis, funções, atividades de processo e troca de informações.

Na coluna “Funções e atores envolvidos”, a função inclui o ator (ou seja, a instanciação da função nesse caso particular) entre parênteses. Nesse caso, as atividades mencionadas são equivalentes às funções, mas não necessariamente. Uma atividade também pode ser uma subparte de uma função mais completa (ou seja, a responsabilidade relevante da função). Nesse exemplo, foram enviadas três mensagens de instrução ATC do controlador da torre para a aeronave, mas apenas a terceira foi confirmada pelo piloto. O quadro 13 também apresenta as funções do ATC e solicita a interação dos ATCOs.

Quadro 12 – Matriz de construtos arquitetônicos

Candidatos a Fatores Contribuintes	Atividade	Papéis e Atores Envolvidos na Operação	Função	Instrução
O comandante experimenta um excesso de informações quando recebeu informações da torre e dos instrumentos de controle da aeronave.	Receber instruções do ATC (<i>Air Traffic Control</i>).	Usuário do Espaço Aéreo (Aeronave CRJ-200).	Receber instruções ATC.	* Instrução ATC nº 1 * Instrução ATC nº 2 * Instrução ATC nº 3
	Prover instruções do (<i>Air Traffic Control</i>).	ATC (Controlador de Torre 2 (Arlanda)).	Fornecer instruções ATC.	
Os ATCOs se apoiam mutuamente no monitoramento e coordenação do tráfego de rede.	Monitorar a Separação(*).	ATC (Tower Controller 1 (Arlanda)).	Fornecer instruções ATC.	* A/C 1 muda de rumo para evitar colisão A/C2.
	Monitorar a Separação.	ATC (Tower Controller 1 (Arlanda)).	Fornecer instruções ATC.	* Instrução ATC # 1...#3.

Fonte: adaptado de Herrera *et al.* 2014.

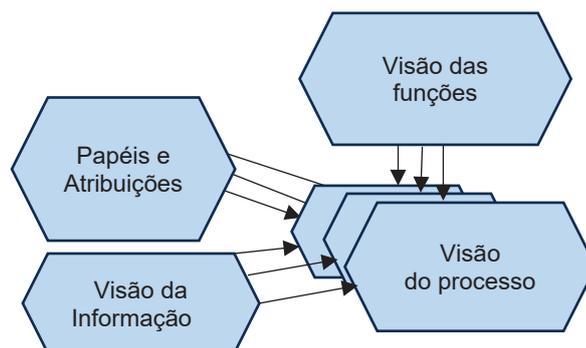
(*) No controle de tráfego aéreo, separação é o nome dado ao conceito de manter uma aeronave a uma distância mínima de outra aeronave para reduzir o risco de colisão dessas aeronaves, bem como prevenir acidentes devido a fatores secundários, como esteira de turbulência.

Etapa 3: Desenvolver visões de arquitetura para a descrição do estudo de caso do aeroporto de Arlanda de acordo com os resultados da etapa 2.

Nessa etapa, as funções, as informações e visões de processo para o estudo de caso específico são desenvolvidos. Nessa etapa, a linha de base usada é a arquitetura ou arranjo se apoiando na estrutura de ESCALA, sendo que a visão de processo para esse caso particular é desenvolvida de acordo com a sequência dos eventos estudados.

A partir da arquitetura básica, pode-se dizer que os papéis, a visão funcional e a visão de informação constituem um conhecimento base ou um catálogo a partir do qual construções inerentes podem ser coletadas ao estabelecer a visão do processo (como ilustrado pelas setas pretas na Figura 8). Ou seja, trata-se de representações mais estáticas entre os casos observados. Se um caso apresenta novos papéis (ou atores), novas funções ou novas interações, essas visualizações são atualizadas na estrutura. No entanto, para cada estudo de caso é desenvolvida uma visão de processo individual.

Figura 8 – Visualização do processo coleta construções de outras visualizações



Fonte: Herrera *et al.* 2014.

Etapa 4. Sintetizar os principais estados e seus gatilhos a partir da descrição do estudo de caso Arlanda usando o resultado da etapa 3.

Uma vez desenvolvida a visão do processo, outra análise ocorre. A quarta etapa visa extrair Indicadores de Resiliência candidatos da visão consolidada fornecida pela visão do processo (incluindo sequências de atividades, bem como interação e troca de informações entre papéis e atores do centro de controle de tráfego aéreo).

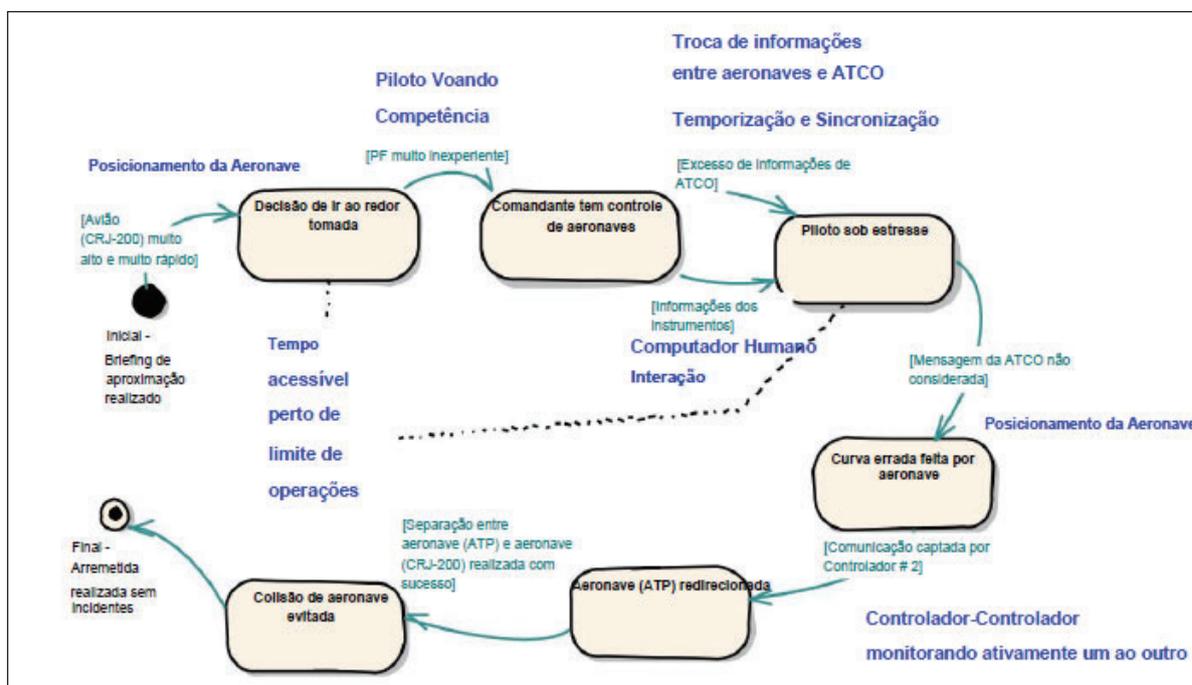
Para isso, aplica-se diagramas de estado UML (*Unified Modeling Language*). A intenção de um diagrama de estado é representar estados e seus gatilhos, conforme a Figura 9. Considerando a natureza da resiliência, há o interesse em saber o estado do sistema (seja ele positivo ou negativo) e os fatores desencadeantes que levam o sistema a tal estado.

Desta forma, os diagramas de estado permitem “ampliar” os detalhes considerados mais relevantes e abstrair os detalhes menos relevantes e que potencialmente podem desfocar a imagem geral.

O que a ilustração abaixo mostra são os principais estados decorrentes da análise da visão do processo do caso Arlanda. Os retângulos arredondados indicam os estados principais enquanto as setas entre eles os seus gatilhos.

Os Indicadores de Resiliência candidatos são extraídos dos gatilhos que serão levados para a próxima etapa.

Figura 9 – Diagrama de estado representando as principais etapas do caso do aeroporto de Arlanda e seus gatilhos.

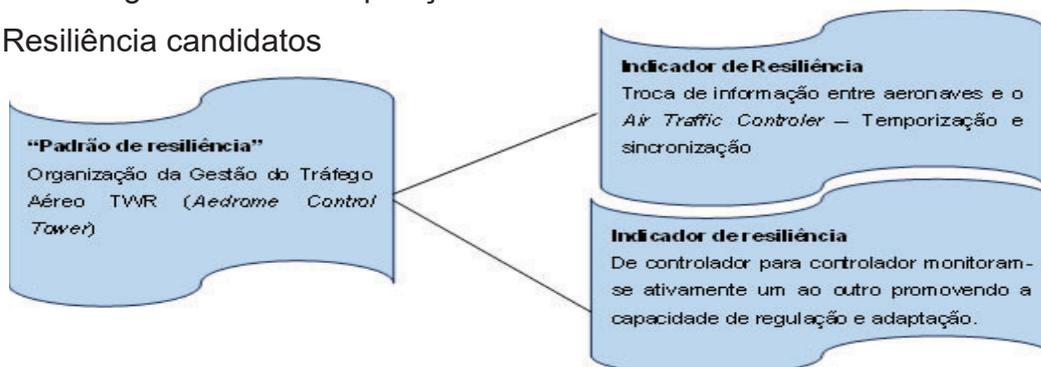


Fonte: Herrera *et al.* 2014.

Etapa 5 - Identificar padrões dos principais estados e gatilhos no estudo de caso de Arlanda e nos outros casos selecionados combinados da etapa 4.

Esse passo consolida os resultados da análise do estudo de caso para identificar Padrões e Indicadores de Resiliência candidatos associados a tais padrões, conforme ilustrado na Figura 10. O Padrão de Resiliência é a “Organização da Gestão de Tráfego TWR” que é constituída por dois Indicadores de Resiliência: “Troca de informações entre aeronaves e ATC (*Air Traffic Control*) – Tempo e Sincronização” e “Controlador monitorando ativamente um ao outro”.

Figura 10 – Composição dos Padrões de Resiliência dos Indicadores de Resiliência candidatos



Fonte: adaptado de Herrera *et al.*, 2014.

A ER vê a segurança como a capacidade de ter sucesso sob condições variadas. De acordo com essa visão, o desempenho da segurança deve estar relacionado aos fatores que permitem que o sistema continue operando. As operações de SSC, como o ATM, são produzidas por interações dinâmicas de muitos atores humanos, técnicos e organizacionais dentro e entre diferentes organizações, como provedores de serviços de navegação aérea e usuários do espaço aéreo.

Além disso, uma capacidade essencial de um sistema resiliente é “saber o que procurar” de forma flexível, analisando o estado atual do sistema e seu contexto de operações. O monitoramento deve atentar para o que ocorre no ambiente de operações e no próprio sistema. Argumenta-se que a Arquitetura Corporativa facilita o monitoramento de forma flexível e a mudança de perspectivas para alcançar um melhor entendimento sobre como o sistema realmente funciona e quais aspectos afetam seu funcionamento. Ele permite mudar o foco das funções para a informação e para o ponto de vista do processo.

✓ Conclusão do estudo de Herrera *et al.* (2014)

Esse estudo apresentou a estrutura ESCALA para identificar e extrair indicadores relacionados à resiliência. Esse processo foi amplamente aplicado no procedimento de *Go-Around* (GO), em particular no estudo de caso de Arlanda.

A análise do caso representa um primeiro passo e os resultados são preliminares. Eles dizem respeito à Engenharia de Resiliência, Arquitetura Corporativa e, em detalhe, à questão de pesquisa do projeto em que se abordou o valor agregado em combiná-los (HERRERA *et al.* 2014).

No que diz respeito à ER, a estrutura ESCALA auxilia na identificação e extração de Indicadores de Resiliência e no mapeamento em padrões. Além disso, o projeto visa unificar a terminologia atual relacionada ao domínio da ER, a fim de criar um vocabulário comum e evitar mal-entendido e confusões quando esses termos são usados (HERRERA *et al.* 2014).

No que diz respeito à Arquitetura Corporativa, ela é aplicada em um novo domínio de aplicação e a estrutura de escala (*framework scales*) desenvolve uma combinação da Engenharia de Resiliência com a Arquitetura Corporativa (AC) em

ATM (*Air Traffic Management*). Além disso, a estrutura fornece uma visão de resiliência absolutamente nova que pode ser implementada na AC. Essas melhorias estão alinhadas ao EATMA (*European Air Traffic Management*) possibilitando a análise das atuais funcionalidades do ATM e alterações do SESAR (*Single European Sky ATM Research*).

Ambos os resultados preliminares apresentados lidam com o ainda vívido interesse da comunidade científica e do SESAR nos domínios da ER e da AC. Juntos, eles direcionam a atenção para aspectos importantes relacionados à flexibilidade e adaptações do sistema ATM (HERRERA *et al.* 2014).

Finalmente, os resultados preliminares abordando a questão da pesquisa do projeto sugerem uma estrutura apoiada por dados empíricos e nova representação com diferentes pontos de vista que suportam monitoramento flexível e antecipação de interações de nível cruzado, interdependências e cascatas potenciais. A estrutura desenvolvida é uma metodologia iterativa para combinar AC (arquitetura corporativa) e ER (Engenharia de Resiliência) que fornece uma modelagem de abordagem de sistemas de interações dentro e entre organizações. A integração da análise da ER suporta a ilustração das adaptações necessárias para que o sistema ATM continue operando (HERRERA *et al.* 2014).

A aplicação da estrutura em um conjunto de estudos de caso exhibe direções para trabalhos futuros e levanta algumas questões. No momento, observam-se alguns indicadores preliminares que precisam ser validados e avaliados qualitativa e quantitativamente com o apoio de especialistas no assunto, como ATCOs, pilotos e partes interessadas em ATM. O trabalho futuro precisa incluir orientação suficiente indicando como desenvolver o ponto de vista da resiliência de maneira sistemática. Outro desafio importante é lidar com operações dinâmicas adotando esses tipos de notações que podem oferecer apenas visões estáticas. Essas questões oferecem a oportunidade de explorar ainda mais a ER e melhorar a Arquitetura Empresarial (HERRERA *et al.* 2014).

- **(xvii) Hollnagel *et al.* (2021): Systemic Potential Management.**

Como citado anteriormente, no final de 2011, a EUROCONTROL iniciou um projeto denominado “Sinais fracos no desempenho de segurança da ANSP (*Air*

Navigation Service Provider)” em colaboração com DFS (Provedor de Serviço Alemão de Navegação Aérea) e com várias universidades e institutos de pesquisa. Desenvolveu-se esse projeto com o objetivo de detectar sinais fracos de alerta precoce que possam prevenir ocorrências de acidentes ou eventos que representem uma ameaça ao sistema de gestão e controle de tráfego aéreo, de modo a demonstrar uma preocupação comum a diversas organizações e seus sistemas de governança em risco e fortalecer o potencial de antecipação para prevenir as ameaças (HOLLNAGEL *et al.*, 2021).

A seguir são apresentados os principais destaques dos estudos de Hollnagel *et al.* (2021).

✓ Os Quatro Potenciais como Sinais Fracos

Os sinais fracos incluem o espaço e padrões temporais que as pessoas reconhecem e usam para gerenciar seu trabalho. No caso de sistemas intangíveis – como na gestão de mudanças nas organizações – padrões temporais são imperceptíveis porque se estendem ao longo do tempo e, por isso, é de difícil compreensão para nós. Uma possível solução para isso é aplicar algo semelhante a uma abordagem de lapso de tempo como é usado em fotografia e filme, exceto que, nesse caso, o intervalo entre as medições deve estar na ordem de meses em vez de minutos, horas ou dias. Se sinais significativos pudessem ser definidos, isso tornaria possível (e sensato) procurar por padrões nas formas como uma organização opera, ou seja, estatísticas de acidentes e tendências em acidentes ou outros eventos relatados e que são, em princípio, uma espécie de registro de lapso de tempo. Esses eventos são, no entanto, geralmente tratados individualmente ou estatisticamente e não em conjunto (HOLLNAGEL *et al.*, 2021).

O que constitui um sinal significativo dependerá da natureza e das características do processo que está sendo gerenciado. De acordo com os argumentos acima, para uma abordagem unificada, os sinais devem ser relevantes com múltiplos focos ou prioridades, em vez de específicos para apenas um deles. Dado que pode ser difícil encontrar sinais específicos no desempenho de um sistema, pode ser melhor olhar para o que está por trás para ver o que determina ou molda o desempenho.

Os padrões de desempenho são, em primeiro lugar, determinados pela regularidade do contexto, portanto, pela natureza do(s) processo(s) sendo controlada. Mas os padrões de desempenho também são determinados por características de como um sistema responde, monitora, aprende e antecipa, semelhante ao quão observável é o desempenho organizacional (artefatos e comportamentos), o qual depende de valores adotados não observáveis e pressupostos subjacentes. No caso de processos em desenvolvimento lento, como segurança, qualidade etc., os potenciais – ou melhor, o *status* avaliado dos potenciais – podem, portanto, servir como fonte de informação (ou sinais) que podem ser usados na gestão de mudanças, desde que seja possível avaliá-las sistematicamente (HOLLNAGEL *et al.*, 2021).

✓ Avaliando os Potenciais sinais de um possível incidente

Aceitando o argumento de que os quatro potenciais da resiliência (monitorar, responder, aprender e antecipar) podem ser usados como indicações significativas de quão bem um sistema ou organização provavelmente irá realizar o próximo passo. O cerne da questão é como eles podem ser avaliados ou medidos. A lógica direta é que se você não pode medir alguma coisa, então não pode melhorar esta coisa. Se quiser mudar algo, então você deve ser capaz de determinar quando uma mudança ocorreu e se a intervenção resultou em resultados esperados. Se o objetivo por tanto é gerenciar – o que significa mudar os potenciais, então é necessário de alguma forma avaliar ou medi-los. A rigor, o que é preciso é de uma maneira de perceber e integrar sinais amplamente distribuídos no tempo para que os padrões possam ser reconhecidos (HOLLNAGEL *et al.*, 2021).

Uma primeira sugestão pode ser avaliar o nível de cada potencial como tal, semelhante à avaliação do nível da cultura de segurança etc. Mas é tão fútil fazer perguntas sobre o nível de um potencial, como é fazer perguntas sobre o “nível de resiliência”. Uma pergunta como “qual é o potencial para monitoramento” ou “quão alto é o seu potencial para aprender” pode muito bem suscitar uma resposta, mas dificilmente ser significativo – e certamente não aquele que pode ser facilmente usado para escolher uma intervenção relevante. Cada potencial pode, no entanto, ser visto como compreendendo um número de facetas ou funções mais específicas que são comuns a muitos tipos de atividade. Em vez de avaliar cada potencial como um

elemento autocontido, os potenciais podem, portanto, ser caracterizado em termos das várias facetas que um potencial representa (HOLLNAGEL *et al.*, 2021).

✓ Perguntas em Segundo Plano e Primeiro Plano

Sempre que algo seja feito para mudar um sistema, tais como a introdução de uma nova automação, o conhecimento sobre a razões para a mudança – a razão ou base do projeto – é necessário avaliar o quão bem a mudança funciona. Nos casos em que essas informações estejam incompletas ou ausentes, é necessário recuperá-las e/ou complementá-las. Isso pode ser feito sondando os detalhes do projeto do sistema como eles pertencem aos quatro potenciais de resiliência (HOLLNAGEL *et al.*, 2021).

Uma vez que as informações sobre a lógica do projeto permaneçam estáveis durante a mudança – e presumivelmente também por algum tempo depois – pode-se considerar que elas sejam informações básicas que só precisam ser adquiridas uma vez. Perguntas de fundo para o potencial de resposta deve ser direcionado para facetas como a justificção para a lista de eventos que precisavam de uma resposta, idem para a lista de respostas, sua relevância, o limite para respostas e a verificação das respostas (HOLLNAGEL *et al.*, 2021).

Por exemplo, se a seleção de eventos e a resposta são baseados na tradição, requisitos reguladores, *design* base, experiência, especialização, avaliação de risco, indústria padrão ou outra coisa. As perguntas básicas para o potencial para monitorar deve ser direcionado para facetas de como os indicadores e medições foram selecionados, e como sua relevância é estabelecida. Outros aspectos relevantes do monitoramento seria a validade de indicadores, atrasos na amostragem, como as medições são combinadas e analisadas, o papel organizacional e apoio de monitoramento etc. Questões de fundo para o potencial de aprender devem olhar para o papel e a importância de aprendizagem na organização, como a aprendizagem é fornecida e gerenciada, o equilíbrio entre relatórios e aprendizagem, como as “lições aprendidas” devem ser usadas – e mantidas – pela organização, e assim por diante (HOLLNAGEL *et al.*, 2021).

Questões de fundo para o potencial de antecipar devem examinar o propósito e o valor potencial da antecipação, como se encaixa em uma estratégia ou visão de

longo prazo, seja uma função interna ou terceirizada, e como ela se alinha com a cultura e valores organizacionais. Outras facetas que se relacionam com a forma como o sistema realmente as desempenham não será estável, mas provavelmente mudará – e realmente deveria mudar – à medida que um projeto avança (HOLLNAGEL *et al.*, 2021).

Muitas das mudanças são as consequências previsíveis que constituem o propósito ou motivação para o projeto. No entanto, sempre haverá algum imprevisto como alterações que possam prejudicar a finalidade. O SPM usa quatro conjuntos de perguntas – chamadas perguntas de primeiro plano – para avaliar as mudanças dessas facetas como um meio de gerenciar a mudança. Em contraste às perguntas de fundo, as perguntas de primeiro plano devem ser usadas repetidamente ao longo do projeto (HOLLNAGEL *et al.*, 2021).

As perguntas de primeiro plano devem se referir ao que um potencial significa na prática. Exemplos de perguntas de primeiro plano para os quatro potenciais são fornecidos no Anexo B. As questões são genéricas porque não se referem a um processo específico ou aplicação. Para avaliar o potencial de resposta é claramente útil, por exemplo, saber o quão sério uma condição deve ser antes de dar uma resposta, ou em outras palavras, qual é o limite. Caso ele esteja muito baixo, haverá muitos “falsos começos” e se for definido muito alto, uma resposta pode chegar tarde demais. Outra questão poderia ser determinar se os recursos necessários estão permanentemente disponíveis, ou se haverá um atraso antes que uma resposta possa começar. Sendo assim, é possível desenvolver um conjunto de perguntas que, juntas, fornecem uma base para avaliar o potencial de resposta (HOLLNAGEL *et al.*, 2021).

A mesma abordagem pode ser usada para desenvolver um conjunto de perguntas para os outros três potenciais. No caso do potencial para monitorar, é útil saber: a relevância dos indicadores ou “sinais” para o efeito, com que frequência as medições ou observações são feitas, se há algum atraso em interpretá-los ou analisá-los, como eles são usados (como indicações de avanço ou atraso, por exemplo), e quão significativos eles são para a linha de frente operacional e para retaguarda gerencial (HOLLNAGEL *et al.*, 2021).

Para o potencial de aprender, questões importantes são: se a aprendizagem tem o foco certo, seja reativo ou contínuo, e como as “lições aprendidas” são compartilhadas e usadas dentro de uma organização, cuja prioridade – e recursos –

a aprendizagem é dada etc. Finalmente, para o potencial para antecipar perguntas em primeiro plano, pode-se questionar a relevância da estratégia, seja ela ampla ou restrita, se a antecipação ocorre frequentemente e como os resultados são usados e por quem. O potencial de antecipação difere dos outros três – e especialmente ao de responder e monitorar – oferecendo menos oportunidades de realmente observar como isso é feito (HOLLNAGEL *et al.*, 2021).

A antecipação raramente é uma atividade rotineira (que pode ser algo para perguntar). As perguntas sobre o potencial de antecipação devem, portanto, ser baseadas mais na teoria do que na prática. Ao todo, os quatro conjuntos de perguntas fornecem o núcleo do método chamado de Gerenciamento de Potenciais Sistêmicos (SPM) que descrevem ou definem efetivamente o que uma organização deve fazer (os critérios de desempenho) e as respostas dada às perguntas (o perfil do desempenho potencial) (HOLLNAGEL *et al.*, 2021).

✓ Desenvolvimento de Perguntas Detalhadas

O SPM pretende ser uma ferramenta para gerenciar o quão bem uma organização executa e como as mudanças são implementadas. Uma vez que as perguntas genéricas não se referem a nenhum domínio ou processo, um primeiro passo é desenvolver perguntas que são específicas para a organização ou mudança que está sendo considerada. As perguntas devem ser sobre o funcionamento dos aspectos como algo está sendo feito em vez de como alguém pensa sobre isso ou gosta/não gosta (HOLLNAGEL *et al.*, 2021).

As perguntas genéricas de primeiro plano podem servir como ponto de partida, mas apenas as que são consideradas relevantes para o objetivo real que deve ser usado. As perguntas genéricas podem e devem obviamente ser complementadas por perguntas baseadas no conhecimento sobre a organização e a natureza da mudança pretendida. As questões devem ser diagnósticas, ou seja, preocupadas com problemas ou questões conhecidas por serem relevantes e, portanto, significativas para avaliar. Se as perguntas genéricas parecem perder problemas importantes conhecidos, outras questões de diagnóstico devem ser adicionadas (HOLLNAGEL *et al.*, 2021).

Quando uma pergunta é feita, é importante que ela seja significativa, mas também que as respostas sejam concretas e práticas. No contexto dos quatro potenciais, as perguntas devem ser formativas para que as respostas possam ser usadas diretamente para escolher uma intervenção apropriada (HOLLNAGEL *et al.*, 2021).

As perguntas devem ser tão concretas e operacionais quanto possível e, preferencialmente, referem-se às atividades reconhecíveis ou funções que podem ser avaliadas em termos se são adequadamente executadas como operações e não como impressões subjetivas. As respostas podem ser usadas como ponto de partida para propor ações ou mudanças específicas para melhorar – ou manter – as condições, tendo em mente que os potenciais não são independentes uns dos outros (HOLLNAGEL *et al.*, 2021).

Para ilustrar isso, considere, por exemplo, as seguintes questões a serem formuladas:

1. *A organização aprende com os eventos relatados?*

As respostas normalmente seriam concordando ou discordando. Isso indicaria a atitude geral em aprendizagem organizacional entre os respondentes, mas não seria diretamente útil para desenvolver uma intervenção eficaz (HOLLNAGEL *et al.*, 2021). Se a resposta for discordante, seria claramente necessário fazer alguma coisa. Mas a declaração não é específica o suficiente para ajudar com isso.

2. *Há recursos suficientes para escrever relatórios ou os relatórios enviados estão sendo investigados o suficiente?*

Nesse caso é muito mais fácil pensar no que fazer, no caso de uma resposta afirmativa para manter as condições, e no caso de haver uma resposta discordante para melhorá-los.

3. *O conjunto de indicadores é revisado regularmente?*

Se as respostas mostrarem que não é esse o caso, ou seja, que os respondentes discordam que os indicadores sejam revistos regularmente e corretamente, então essa é uma boa base para decidir o que fazer, ainda que a escolha dos meios exija conhecimento sobre como a organização em questão funciona em vez de se ter soluções de prateleira.

✓ Como Formular as Perguntas

Quanto às questões de primeiro plano apresentadas no Anexo B, ressalta-se que todas elas foram formuladas da mesma maneira, mas obviamente seria possível formular questões de muitas maneiras diferentes de como as declarações que os respondentes podem concordar ou discordar. A seguir são fornecidos alguns exemplos: **“Revisitamos e revisamos nossa lista de eventos e planos de ação em uma base sistemática?”**. Ou **“O período coberto pelos indicadores reativos é apropriado?”** Em ambos os casos, as respostas podem ser binárias (“Sim” ou “Não”) ou graduada por meio de uma escala *Likert*.

As perguntas também podem ser abertas ou fechadas, negativa (**Indicadores não são revisados regularmente e adequadamente?**) ou positiva (**As denúncias enviadas estão sendo suficientemente investigadas?**).

As perguntas geralmente devem ser descritivas (referindo-se ao que se passa ou acontece) em vez de relacionais (especulando sobre como algo se relaciona com algo mais) ou causal (especulando sobre relações hipotéticas). As perguntas devem ser formuladas de modo que sejam significativas para os entrevistados e fáceis de se responder, seja porque se referem a algo que faz parte da competência ou experiência dos respondentes, ou conhecedor em geral. Mas o mais importante, uma pergunta não deve ser feita a menos que você saiba como usar a resposta.

✓ Administrando as Perguntas

O propósito dos potenciais sistêmicos é apoiar a gestão da mudança organizacional, em vez de ser usado como referência. É, portanto, essencial que as perguntas sejam administradas não apenas uma vez, mas em intervalos regulares. O tempo entre as pesquisas deve depender da natureza do processo ou mudança que está sendo gerenciada e uma compreensão de quão rápida (ou lentamente) as mudanças ocorrem. As respostas às perguntas fornecem informações sobre a “posição” de uma organização e essa informação deve ser atualizada à medida que a situação muda.

Com que frequência as perguntas devem ser usadas depende da natureza da mudança, mas uma vez de três a seis meses pode ser um intervalo razoável para muitas mudanças organizacionais.

A frequência deve corresponder à taxa de mudança (suposta) a ser considerada, ou uma mudança deliberadamente feita, ou ainda, mudanças/flutuações nas condições externas que requerem intervenções de gestão. O número de vezes que o SPM deve ser usado ou a duração total também depende da natureza da mudança, mas pode ser facilmente na ordem dos anos em vez de meses.

Uma vez que as avaliações se destinam a apoiar as operações e a gestão da mudança, é importante que sejam confiáveis. Isto pode ser assegurado tendo, na medida do possível, um grupo estável de entrevistados. Eles devem ser claramente pessoas diretamente envolvidas com as funções que estão sendo gerenciadas, mas também pode ser útil ter pessoas em diferentes funções e posições organizacionais, ou mesmo especialistas externos, como forma de verificar possíveis vieses nas respostas.

O número de respondentes não deve ser muito grande e deve ser fácil, rápido e conveniente para responder as perguntas.

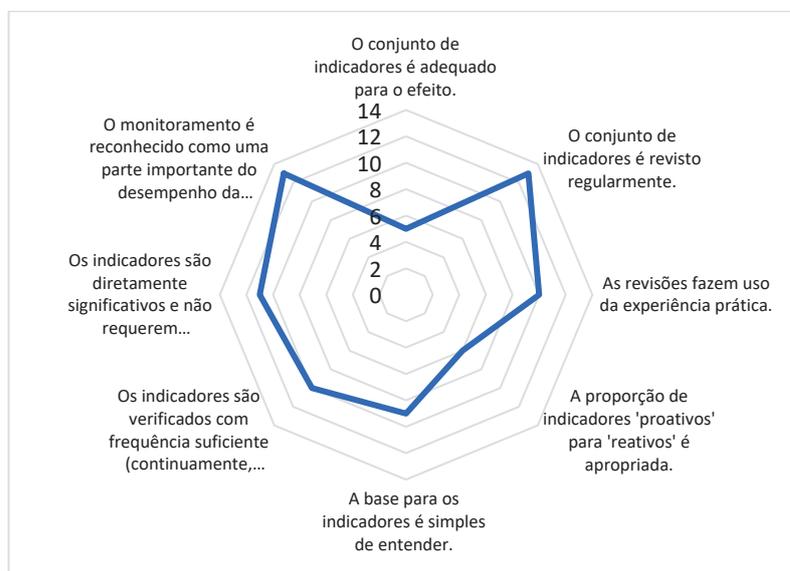
✓ Interpretando as Respostas

As respostas não podem ser simplesmente comparadas a um padrão ou referência externa, mas apenas para respostas anteriores da mesma organização, ou entre departamentos da mesma organização (por exemplo, entre dois ACCs – *Air Command and Control* - ou dois TWRs (*Air traffic control tower*). Ao comparar respostas de aplicações repetidas dos conjuntos de perguntas, os perfis de resposta irão mostrar como uma organização muda ao longo do tempo e se tornaram menos aceitáveis. Nesse caminho, os dois perfis mostram a mudança na “posição” da organização no que diz respeito ao potencial de resposta. Perfis semelhantes devem ser feitos para os demais potenciais.

Uma maneira conveniente de construir um perfil é usar os chamados gráficos ou redes de radar que fazem parte da maioria dos pacotes de análises. Se as respostas forem dadas em uma escala *Likert*, torna-se simples produzir os gráficos

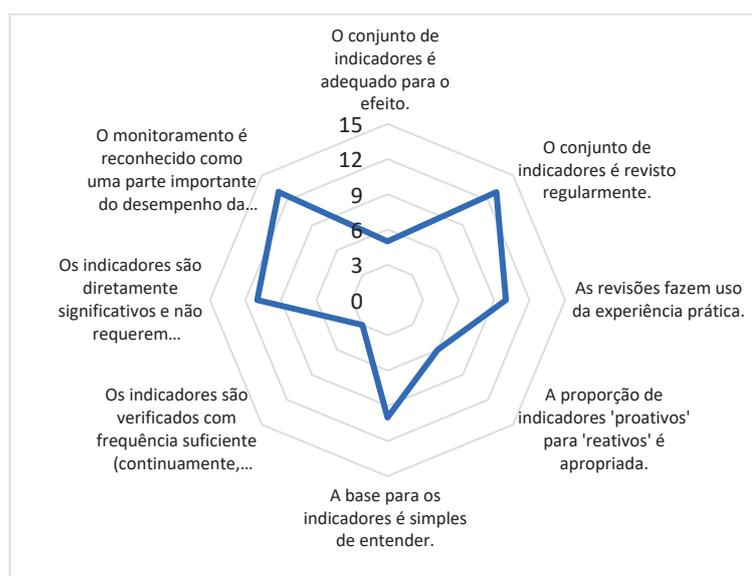
correspondentes. Por outro lado, algum tipo de ajuste pode ser necessário. Um exemplo de como as respostas podem parecer é mostrado nos gráficos 3 e 4.

Gráfico 3 - Perfil com o potencial de monitorar com base no gráfico radar no Mês 4



Fonte: Hollnagel *et al.*, 2021.

Gráfico 4 – Perfil com o potencial de monitorar com base no gráfico radar no Mês 8



Fonte: Hollnagel *et al.*, 2021.

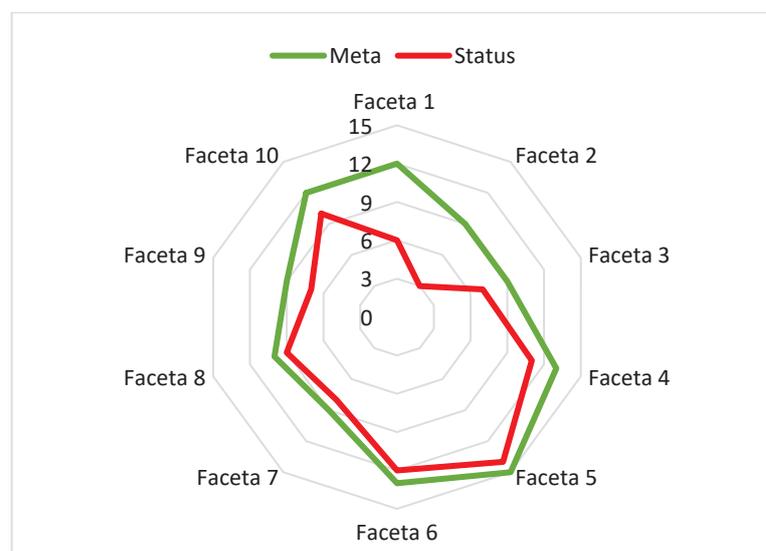
Nesse caso, para facetas do potencial de monitoramento, os valores são meramente ilustrativos e não representam uma amostra real. Ao comparar os perfis a partir do mês 4 e 8, é fácil verificar quais respostas se tornaram mais aceitáveis, que permaneceram as mesmas.

O gráfico de radar é uma maneira de visualizar uma relação potencialmente complicada, mas não o sinal fraco que está sendo procurado. Ele é análogo a um quadro em fotografia de lapso de tempo e o sinal fraco é o padrão temporal, ou seja, as mudanças nas formas dos polígonos aparecem quando vários perfis são vistos juntos. É claro que também é útil procurar mais de perto em cada perfil para determinar se o *status* das facetas é o esperado e o pretendido. Se eles não são, pode ser porque a frequência era muito alta (os efeitos ainda não se manifestaram), ou porque a intervenção escolhida não funcionou como pretendido.

Os perfis dos potenciais sistêmicos não só fornecem uma maneira prática de determinar qual a situação ou posição é, mas eles também podem ser usados para representar qual o objetivo ou alvo deve ser. O objetivo ou propósito de uma mudança organizacional geralmente é dado verbalmente, ou na melhor das hipóteses, como um valor numérico, como zero acidentes, uma redução de X% em eventos relatados, ou um aumento de Y% na qualidade em um determinado ponto no tempo. Mas se um objetivo é pensado em termos de metas de desempenho, ele pode ser facilmente transformado em um perfil para qualquer um ou todos os potenciais.

Uma forma de mostrar isso é ilustrado pelo gráfico 5. Aqui o perfil externo (verde) representa a meta, enquanto o perfil interno (vermelho) mostra a situação em um momento específico.

Gráfico 5 - Mês 8, avaliação do status do potencial com suas metas



Fonte: Hollnagel *et al.*, 2021.

O objetivo poderia, é claro, também ter sido mostrado simplesmente como um polígono regular com a pontuação máxima de respostas, nesse caso 15. Isso corresponderia a uma afirmação como “o potencial de resposta deve ser o mais alto possível”.

Mas ao diferenciar as várias facetas do potencial de resposta, torna-se possível expressar o objetivo de uma maneira mais sutil para significar que algumas facetas são mais importantes que outras.

✓ Conclusão do estudo de Hollnagel *et al.* (2021)

Existe uma necessidade óbvia e persistente de maneiras de gerenciar sistemas e suas mudanças. Enquanto é necessário compreender a expressão real de resultados indesejados, como liberações descontroladas de energia, uma estratégia tradicional de “encontrar e consertar” não é mais suficiente. Outras estratégias que lidam melhor com a questões dos SSC são necessárias.

Gerenciar uma mudança, como o desenvolvimento e introdução da nova automação, é um empreendimento desafiador, em que as influências podem vir tanto internas como externas, como, por exemplo: fontes; pressão de tempo; questões financeiras; revisão; prioridades; ou mudanças em parceiros e colaboradores. Os

projetos inevitavelmente precisam fazer concessões nas fases iniciais, e contam com ajustes que podem resolver problemas reais (atuais) no curto prazo, mas, muitas vezes, ao custo de um ajuste claro do objetivo desejado do projeto geral e da trajetória de longo prazo.

Prevenir isso requer uma compreensão profunda do desempenho do sistema, bem como um método prático para acompanhá-lo ao longo do tempo. O gerenciamento eficaz do sistema é impossível sem uma avaliação profunda dos acoplamentos intrincados entre as funções necessárias para um desempenho aceitável.

Ainda é preciso haver métodos que forneçam uma maneira eficaz e confiável de examinar um fenômeno difícil de definir e quantificar, também denominado de sinal fraco.

3.6.1. Síntese dos Resultados dos Estudos Qualitativos

Os resultados apontaram para uma tendência dos estudos qualitativos em buscar indicadores proativos que possam antecipar acidentes ou eventos de grandes proporções. Alguns estudos denominaram indicadores de alerta precoce baseados em resiliência, outros chamaram de sinais fracos para a detecção de acidentes.

Uma característica comum dos estudos qualitativos foi a abordagem mais longitudinal, reconhecendo, por meio dos métodos, a necessidade de se revisitar os processos e coletar outra vez os dados em função das mudanças constantes que sofrem os SSC. Outra característica em comum entre eles foi a preocupação com a antecipação por meio de sinais fracos ou alertas precoces comprovados pelos seguintes estudos: (xiv) Øien e Nielsen (2012), (xxiii) Herrera *et al.* (2014), (xvi) Jain *et al.* (2018), (xv) Patriarca *et al.* (2019), (xxiii) Hollnagel *et al.* (2021).

Os estudos apresentaram um interesse maior nos atributos dos indicadores do que em suas métricas. Por fim, dois estudos não apresentaram congruência entre a metodologia e os objetivos propostos com a representação e a análise dos resultados.

A pesquisa de Jain *et al.* (2018), embora apresente uma estrutura de análise de resiliência de processo e considere os fatores técnicos e sociais, esses últimos não foram avaliados e incluídos nos resultados.

Já o estudo de Sakuda e Kitamura (2020) aplicou a metodologia RAG, porém, não mostrou a pontuação das quatro principais habilidades da resiliência, conforme preconiza o método que são: os objetivos; os locais; o contexto; e os principais atributos dos indicadores de segurança, com a perspectiva da Engenharia de Resiliência, encontrados nos estudos qualitativos, conforme é mostrado no quadro 14.

A análise da qualidade metodológica dos estudos qualitativos (risco de viés) encontra-se detalhada no Apêndice D.

Quadro 13 – Síntese dos estudos qualitativos incluídos na pesquisa

Autores	Objetivo do estudo	Local	Contexto
Hollnagel <i>et al.</i> (2021)	Avaliar a gestão dos potenciais sistêmicos de resiliência dos sistemas organizacionais e detectar sinais fracos que possam ser alertas de grandes acidentes, promovendo a gestão segura do tráfego aéreo	Suécia.	O estudo deriva de um projeto denominado “Sinais Fracos”, uma iniciativa da organização EUROCONTROL em conjunto com as universidades europeias.
Øien e Nielsen (2012)	Estabelecer indicadores de segurança proativos para monitoramento de risco de derramamento de óleo no campo de Goliat, por meio de um modelo de resiliência baseado em alertas precoces	Noruega.	Campo de Goliat, no mar Barent, está localizado na parte norueguesa do Mar de Barents.
Herrera <i>et al.</i> (2014)	Descrever a estrutura de escala e sua aplicação a um caso concreto por meio da combinação de <i>Enterprise Architecture</i> com <i>Resilience Engineering</i> para medir o potencial de resiliência do sistema ATM – <i>Air Traffic Management</i> .	Suécia.	Aplicado em uma torre de operações de tráfego aéreo no Aeroporto de Arlanda.
Peñaloza <i>et al.</i> (2020)	Identificar se a Engenharia de Resiliência oferece uma nova perspectiva sobre os sistemas de medição de desempenho em segurança e entender como o engenheiro de resiliência tem posto isso em prática nos sistemas de medição de desempenho em segurança.	Brasil.	Estudo desenvolvido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) para sistemas complexos de alto risco.
Souza, Gomes e Carvalho (2021)	Aplicar conceitos da Engenharia de Resiliência na compreensão da organização pela análise de tarefas e atividades cognitivas para desenvolvimento de indicadores.	Rio de Janeiro, Brasil	Estudo desenvolvido pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro. Desenvolvido para indústria nuclear.
Patriarca <i>et al.</i> 2019)	Promover e melhorar a sua resiliência para eventos indesejados com indicadores utilizados para alerta precoce em gamificação.	Roma, Itália.	Setor de fabricação de amônia de uma indústria química de processo.
Chuang <i>et al.</i> (2020)	O estudo visa redesenhar um gráfico utilizando o método RAG (<i>Resilience Analysis Grid</i>), para gerar indicadores da avaliação da resiliência em segurança.	Taiwan, China.	Unidade de emergência de um hospital em Taiwan.
Sakuda e Kitamura (2020)	Utilizar o método RAG (<i>Resilience Analysis Grid</i>) para evitar a degradação do potencial de resiliência em segurança da usina nuclear de Fukushima.	Japão.	Usina Nuclear de Fukushima.
Jain <i>et al.</i> (2018)	Apresentar uma nova estrutura, incorporando fatores técnicos e sociais em uma abordagem integrada para avaliar a resiliência em indústria de processo por meio de indicadores.	Estados Unidos.	Estudo desenvolvido pela Universidade do Texas.
Huber <i>et al.</i> (2012)	Propor uma estrutura para indicar onde a organização está localizada, dentro das capacidades necessárias para lidar com as perturbações que podem afetá-la.	Rio de Janeiro, Brasil.	Estudo desenvolvido pelo Instituto de Engenharia Nuclear da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
Pflanz e Levis (2012)	Descreve abordagem como base em tolerância a erros, capacidade de resposta a eventos inesperados no momento de sobrevivência quando o sistema (organização) é ameaçada ou interrompida e se recupera. Também demonstra que o nível de colaboração entre os elementos humanos da organização ajuda na capacidade adaptativa e na fase de sobrevivência.	Estados Unidos.	Laboratório de Arquitetura de Sistemas, <i>George Mason University</i> . Condado de <i>Fairfax</i> .

Fonte: o autor, 2023.

SÍNTESE DA DISCUSSÃO

Esta revisão sistemática mostrou uma tendência dos estudos quantitativos em analisar a resiliência organizacional com base em indicadores com atributos propostos por Reason (1997). Esse autor realizou uma pesquisa sobre os principais elementos de uma cultura de segurança. Na ocasião, o autor descobriu as seguintes subculturas como atributos de uma cultura de segurança: 1) comprometimento da liderança; 2) conscientização; 3) preparação; 4) flexibilidade; 5) cultura de relato; 6) cultura de aprendizagem.

Mais tarde, esses atributos foram utilizados por Wreathall (2006) no capítulo dezessete da obra *Resilience Engineering*. Entretanto, nem todos os SSC com cultura de segurança robusta provaram ser sinônimos de desempenho resiliente em segurança, conforme estatísticas de eventos demonstradas no estudo de Jain *et al.* (2018).

Segundo Hopkins (2002), deve-se enfatizar, entretanto, que a cultura como mentalidade tende a ignorar as condições latentes que estão por trás de todos os acidentes de trabalho, destacando as atitudes dos trabalhadores como causa dos acidentes. Outro fator é que elementos de uma cultura de segurança proposta por Reason (1997) foram concebidos dentro de uma perspectiva excluindo os maus resultados - Segurança I (HOLLNAGEL, 2014b). Os atributos dos indicadores estão menos alinhados com o conceito de Segurança II (HOLLNAGEL, 2014b), vindo da Engenharia de Resiliência

Quanto aos indicadores apontados pelos estudos quantitativos, em sua maioria, eles propuseram avaliar a gestão das organizações para saber se eram resilientes ou não, dentro de uma abordagem reativa.

As variáveis quantitativas propostas nos estudos foram obtidas por meio de aplicação de questionários junto à força de trabalho ou de levantamento dos erros e falhas operacionais, bem como falhas de equipamentos críticos. Em seguida, foi feita a aplicação dos diversos métodos de cálculo. Uma limitação apontada é que esses estudos sempre irão depender da percepção da força de trabalho em relação aos fatores de resiliência e à gestão da segurança. Apenas metade dos estudos

quantitativos realizaram entrevistas com a força de trabalho, uma prática recomendada para evitar erros interpretativos dos questionários.

Diferentemente dos estudos quantitativos, os quais apresentaram métodos e características de estudos transversais ou analíticos transversais, os estudos qualitativos reconheceram a limitação em utilizar apenas um diagnóstico momentâneo da organização e, sendo assim, desenvolveram métodos e propuseram abordagens longitudinais.

Contrariamente ao estudo quantitativo de Nelson *et al.* (2016), o estudo qualitativo de Herrera *et al.* (2014) utilizou o conceito de indicador como um fenômeno ou fato relevante (FNQ, 2014) e desenvolveu uma escala para extrair indicadores baseados nos novos conceitos de Segurança I e Segurança II (HOLLNAGEL, 2014b), conforme mostrado no Anexo B.

Por fim, os estudos qualitativos apresentaram maior proximidade de atributos revelados no estudo secundário de Peñaloza *et al.* (2020) para medição de desempenho em segurança com base na ER em Sistemas Sociotécnicos Complexos. Esses atributos são: fornecer *feedback* em tempo real para os diretamente envolvidos na execução e supervisão da atividade de produção, o que foi comprovado no estudo de Souza, Gomes e Carvalho (2021) e Huber *et al.* (2012); facilitar a aprendizagem do que vai bem, além do que dá errado, conforme apresentado no estudo de Herrera *et al.* (2014); e oferecer *insights* sobre a gestão de compensações entre segurança e outras dimensões de negócios, característica presente no estudo de Øien e Nielsen (2012). O estudo de Øien e Nielsen (2012) recomenda a implantação de um sistema informatizado de apoio à tomada de decisões durante o conflito entre produção e segurança, esta abordagem levou em consideração a análise dos grandes acidentes.

Uma contribuição importante a respeito dos estudos quantitativos foi o trabalho de Saurin e Werle (2017): “*A framework for the analysis of slack in socio-technical systems*”. Esse método poderia ser importante para mitigar impactos se ele fosse adotado por sistemas de emergências hospitalares antes de ocorrências adversas. A folga aplicada à falta de espaços e recursos para atendimento da população afetada, se adotado por sistemas de emergências hospitalares, poderia atenuar variabilidades externas, como a pandemia, salvando vidas em células hospitalares de emergência consideradas sistemas críticos.

Esse método seria de grande utilidade para melhorar o aproveitamento dos recursos e exercer uma capacidade de mitigação ou amortecimento (*buffer/slack*) dos efeitos adversos. A folga de recursos também é um conceito que pode ser projetado por sistemas de gerenciamento de projetos, como exemplo, o conceito da capacidade *buffer*, o que nada mais é do que a folga projetada como redundância de recursos para garantir o funcionamento de sistemas críticos em projetos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta revisão sistemática da literatura teve o objetivo discutir e analisar métodos qualitativos e quantitativos para identificar o potencial de resiliência na gestão de segurança e subsidiar novas pesquisas sobre engenharia de resiliência aplicada à gestão de desempenho de segurança em indústrias com altos riscos tecnológicos.

Os resultados da análise aplicada mostraram que os métodos quantitativos para elaboração e definição de indicadores de segurança, sob a perspectiva da Engenharia de Resiliência, deveriam priorizar medições periódicas recorrentes, ou seja, realizar estudos longitudinais em pesquisas futuras, levando em conta as mudanças sutis e contínuas, uma das características da natureza mutável dos SSC, bem como o surgimento de condições latentes que são originadas tanto no nível gerencial quanto na linha de frente das operações. Por este motivo, indicadores do potencial de resiliência dos processos de segurança não deveriam coletar dados em um tempo curto, mas, sim, por monitoramento realizado repetidas vezes. Além disso, poucos estudos quantitativos apresentaram métricas para calcular habilidades principais que caracterizam a resiliência dos sistemas que são: antecipação, resposta, monitoramento e aprendizagem.

Com base nos estudos analisados, um aspecto que requer maior número de pesquisas é a utilização de métodos qualitativos para gerar indicadores quando os operadores são obrigados a lidar com incidentes ou variabilidades inesperadas e conseguem manter as operações mesmo diante das adversidades. Mesmo que não sejam utilizadas métricas para esse tipo de cenário, eles são marcadores importantes, pois ocorrem regulações ou adaptações fora do trabalho prescrito, as quais são realizadas para contornar tais situações e evitar acidentes de grandes proporções.

Os métodos qualitativos para gerar Indicadores de Segurança sob a perspectiva da Engenharia de Resiliência indicaram ser um melhor caminho, pois os modelos lineares possuem como desvantagem a dificuldade em avaliar todas as dimensões da resiliência, uma vez que esse é um fenômeno multidimensional e complexo.

O gráfico com o *forestplot* apresentado na figura 6, constatou que a metanálise realizada encontrou elevada consistência interna para os questionários aplicados à

força de trabalho. O comprometimento da alta administração foi o item dos questionários que apresentou maior consistência interna (confiabilidade) e o atributo flexibilidade menor consistência interna nos questionários aplicados à força de trabalho.

Como limitações desta pesquisa, tem-se uma possível perda de informações que podem ocorrer devido aos estudos excluídos na revisão da literatura. Outra dificuldade diz respeito à diversidade de definições da resiliência e da Engenharia de Resiliência, sem haver um consenso, sobretudo por ser uma área relativamente nova e que envolve uma visão multidisciplinar dos processos e estudos que utilizam diferentes métodos e instrumentos analíticos.

Outra limitação identificada foi a ausência de um questionário padrão a ser aplicado para força de trabalho, pois os estudos demonstraram heterogeneidade quando analisados os instrumentos de coleta dos dados (questionários ou escalas). Neste ramo da pesquisa, embora os modelos RAG/SPM já apresentem um caminho, é necessário que as instituições de pesquisa ou comitês de pesquisa sobre Engenharia de Resiliência reconheçam um modelo padronizado aplicável para indústrias de alto risco.

As práticas para antecipar eventos indesejados devem ser guiadas por indicadores de alerta precoce que devem ser aplicados com base em salvaguardas de prevenção da organização. Já as práticas para recuperar a governabilidade dos sistemas devem ser guiadas por salvaguardas que possuem função de mitigação ou regulação para retorno à normalidade dos sistemas (organização), incluindo a participação sociotécnica neste processo.

REFERÊNCIAS

ALIZADEH, S. S.; MOSHASHAEI, P. The Bowtie method in safety management system. **Scientific Journal of Review**, v. 4, n. 9, p. 133-138, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/339439384>. Acesso em: 10 out. 2022.

ALMEIDA, I. M. Abordagem sistêmica de acidentes e sistemas de gestão de saúde e segurança do trabalho. **Interface**, v. 1, n. 2, p. 1-27, dez. 2006.

AZADEH, A. *et al.* Assessment of resilience engineering factors in high-risk environments by fuzzy cognitive maps: A petrochemical plant. **Safety Science**, v. 68, p. 99-107, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.03.004>. Acesso em: 10 out. 2023.

AZADEH, A. *et al.* Combinatorial optimization of resilience engineering and organizational factors in a gas refinery by a unique mathematical programming approach. **Human Factors and Ergonomics in Manufacturing**, v. 27, n. 1, p. 53-65, Jan. (2017b). Disponível em: <https://doi.org/10.1002/hfm.20690>. Acesso em: 11 out. 2023.

AZADEH, A.; ASADZADEH, S. M.; TANHAEEAN, M. A consensus based AHP for improved assessment of resilience engineering in maintenance organizations. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 47, p. 151-160, (2017a). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2017.02.028>. Acesso em: 10 out. 2023.

BAUER, L. **Estimação do coeficiente de correlação de spearman ponderado**. 2007. Dissertação (Mestrado em Epidemiologia) – Programa de Pós-Graduação em Epidemiologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2007. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/11499/000616112.pdf>. Acesso em: 10 out. 2022.

BERTALANFFY; L. V. **General systems theory: foundation, development, applications**. New York: George Braziller Inc., 1968.

BAUMAN, Z. **Modernidade líquida**. 1 ed. Rio de Janeiro: Zahar. 2001.

BOLAND, Angela; DICKSON, Rumona; CHERRY, Gemma. Doing a systematic review: A student's guide. **Doing a Systematic Review**, p. 1-304, 2017.

CAPRA, Fritjof. **A teia da vida**. São Paulo: Cultrix, 1996.

CASTRO, E. M. N. V.; SILVA, E. R.; CASTRO, K. N. V. Educação ambiental para além do capital: um desafio do século XXI. **Revista Brasileira de Educação Ambiental**, v. 15, n. 4, p. 507-527, 2020.

CETESB. **Análise de risco tecnológico**. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 2023. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/analise-risco-tecnologico/historico>. Acesso em: 15 nov. 2022.

CHARNES, A.; COOPER, W.W.; RHODES, E. Measuring the efficiency of decision making units. **European Journal of Operational Research**, v. 2, n. 6, p. 429-444, 1978

Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8). Acesso em: 8 out. 2022.

CHUANG, S. *et al.* Measurement of resilience potential: development of a resilience assessment grid for emergency departments. **PLoS ONE**, v. 15, n. 9, p. 1-17, Sept. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0239472>. Acesso em: 8 out. 2022.

CILLIERS, P. **Complexity and postmodernism**. London and New York: Routledge, 1998, 167p.

CONKLIN, T. **The 5 principles of human performance: a contemporary update of the building blocks of human performance for the new view of safety**. [S.l.: s.n.], 2019.

COOK, R. I. **How complex systems fail cognitive technologies laboratory**. Chicago: University of Chicago, 1998. Disponível em: <https://www.adaptivecapacitylabs.com/HowComplexSystemsFail.pdf>. Acesso em: 17 out. 2022.

COOK, R. I.; RENDER, M.; WOODS, D. D. Gaps in the continuity of care and progress on patient safety. **British Medical Journal**, v. 320, n. 7237, p. 791-794, 2000.

DEKKER, S. **Drift into failure: from hunting broken component to understanding complex system**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2011.

DEKKER, S. *et al.* **Resilience engineering: new directions for measuring and maintaining safety in complex systems: final report**. Sweden: Lund University School of Aviation, 2008. Disponível em: https://www.academia.edu/29657793/Resilience_Engineering_New_directions_for_measuring_and_maintaining_safety_in_complex_systems. Acesso em: 7 out. 2022.

DEKKER, S. **Safety Differently: Human Factors for a New Era**, Boca Raton, Florida: CRC Press, 2nd ed. 2014

DEKKER, S. **Field guide understanding human error**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2017.

DEKKER, S. **Foundations of safety science**. Boca Raton, Florida: Routledge, 2019.

EDWARDS, B.; BAKER, A. **Bob's Guide to Operational Learning: How to Think Like a Human and Organizational Performance (HOP)**. Publicação Independente, 2020.

ERICSON, C. A. **Fault tree analysis: a History Proceedings of the 17th International System Safety Conference-1999**. [S.l.: s.n.], 1999. Disponível em:

<https://ftaassociates.files.wordpress.com/2018/12/C.-Ericson-Fault-Tree-Analysis-A-History-Proceedings-of-the-17th-International-System-Safety-Conference-1999.pdf>. Acesso em: 31 out. 2022.

FITTS, P. M. **Human engineering for an effective air navigation and traffic control system**. Ohio: Ohio State University Foundation, 1951.

FLORIN, M. V., LINKOV, I. (eds.) **Resilience: an edited collection of authored pieces comparing, contrasting, and integrating risk and resilience with an emphasis on ways to measure resilience**. Lausanne: EPFL International Risk Governance Center, 2016.

FRANKENFELD, K. P.; MATTOS, U. A. O. **Engenharia de resiliência: fundamentos, aplicações e tendências**. Rio de Janeiro: Letra Capital, 2023.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE QUALIDADE (FNQ). **Sistema de Indicadores**. São Paulo: FNQ, 2014. Disponível em: https://fnq.org.br/comunidade/wp-content/uploads/2018/12/n_3_sistema_de_indicadores_fnq.pdf. Acesso em: 22 out. 2022.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE QUALIDADE (FNQ). **Transformando o sistema de indicadores**. São Paulo: FNQ 2015.

GRECCO, C. *et al.* A fuzzy model to assess resilience for safety management. *In: Symposium on Resilience Engineering, Managing Trade-Offs*, 5., 2013, Soesterberg. **Anais...** Ohio: Ohio State University Research and Scholarship, 2013.

HADDON, W. Jr. Dano de energia e as dez estratégias de contramedidas. **J. Trauma**, v. 13, p. 321-331, 1973.

HEINRICH, H. W. **Industrial accident prevention**. 3.ed. New York: McGraw-Hill, 1931.

HERRERA, I. A. *et al.* The SCALES framework for identifying and extracting resilience related indicators: Preliminary findings of a go-around case study. *In: SESAR INNOVATION DAYS*, 4., 2014. **Proceedings**. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2014.

HERRERA, I. A. **Proactive safety performance indicators**. 2012. Thesis (Philosophiae Doctor) - Department of Production and Quality Engineering, Faculty of Engineering Science and Technology, Norwegian University of Science and Technology, Norwegian, 2012. Disponível em: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:541042/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 17 out. 2022.

HOLLNAGEL, E. **Introduction to the Resilience Analysis Grid (RAG)**. [S.l.: s.n.], 2015. Disponível em: [http://erikhollnagel.com/onewebmedia/RAG Outline V2.pdf](http://erikhollnagel.com/onewebmedia/RAG%20Outline%20V2.pdf). Acesso em: 15 out. 2022.

HOLLNAGEL, E. Resilience engineering: a new understanding of safety. *J Ergon Soc Korea*, v. 35, n. 3, p. 185-191, 2016.

HOLLNAGEL, E. RAG: the Resilience Analysis Grid. *In*: HOLLNAGEL, J.; PARIÈS, J.; WOODS, D. D.; WREATHAL, J. (ed.). **Resilience engineering in practice: a guidebook**. London: CRC Press, 2013. p. 275-295.

HOLLNAGEL, E. Is safety a subject for science? **Safety Science**, v. 67, p. 21-24, 2014a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2013.07.025>. Acesso em: 17 out. 2022.

HOLLNAGEL, E. **Safety-I and safety-II: the past and future of safety management**. London: CRC Press, 2014b.

HOLLNAGEL, E.; LEONHARDT, J.; LICU, T. **The systemic potentials management: building a basis for resilient performance**. Bélgica: Eurocontrol, 2021.

HOLLNAGEL, E.; WOODS, D. D.; LEVESON, N. **Resilience engineering: concepts and precepts**. 1 ed. Hampshire: Ashgate Publishing Limited; 2006.

HOLLNAGEL, E.; WOODS, D. D.; LEVESON, N. **Resilience engineering: concepts and precepts**. 2 ed. Hampshire: Ashgate Publishing Limited; 2012.

HOLLNAGEL, Erik. **Barriers and accident prevention**. Routledge, 2016.

HOPKINS, A. **A practical guide to becoming a high reliability organisation**. Austrália: Australian Institute of Health and Safety, 2021. Disponível em: <https://www.aihs.org.au/sites/default/files/A Practical Guide to becoming a High Reliability Organisation - Andrew Hopkins.pdf>. Acesso em: 17 out. 2022.

HOPKINS, A. Thinking about process safety indicators. **Safety Science**, v. 47, n. 4, p. 460-465, 2009.

HOPKINS, A.; MASLEN, S. **Risky rewards**. London: CRC Press, 2019.

HOPKINS, A. *et al.* **Safety culture, mindfulness and safe behaviour: converging ideas?** The Australian National University Research Publications. Working/Technical Paper, 2002. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1885/41764> <http://digitalcollections.anu.edu.au/handle/1885/41764>. Acesso em: 18 set. 2023.

HUBER, G. J.; GOMES, J. O.; DE CARVALHO, P. V. R. A program to support the construction and evaluation of resilience indicators. **Work**, v. 41, n. supl. 1, p. 2810-2816, 2012.

HSU, H. M.; CHEN, C. T. Aggregation of fuzzy opinions under group decision making, *Fuzzy Sets and Systems*, **Science Direct**, v. 79, n. 3, mai., p. 279-285, 1996.

IEEE. **David D. Woods' Biography**. Canada. IEEE Xplore, 2023. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/author/37270228400>. Acesso em: 21 out. 2023.

INEA. **Diagnóstico dos acidentes ambientais no Estado do Rio de Janeiro: 1983-2016: enfoque no transporte rodoviário de produtos perigosos.** Rio de Janeiro: INEA, 2018. Disponível em: <https://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2019/01/Diagn%C3%B3stico-dos-Acidentes-Ambientais-no-Estado-do-Rio-de-Janeiro-1983-2016.pdf>. Acesso em: 12 out. 2022.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). **Safety management manual:** international civil aviation organization. 30th. Quebec: International Civil Aviation Organization, 2013. Disponível em: <https://www.icao.int/SAM/Documents/2017-SSPGUY/Doc%209859%20SMM%20Third%20edition%20en.pdf>. Acesso em: 13 out. 2022.

JAIN, P. *et al.* Process resilience analysis framework (PRAF): a systems approach for improved risk and safety management. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 53, p. 61-73, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.08.006>. Acesso em: 3 out. 2022.

JOANNA BRIGGS INSTITUTE (JBI). **Critical appraisal tools.** 2022. Disponível em: <https://jbi.global/critical-appraisal-tools>. Acesso em: 1 out. 2023.

KLETZ, T. A. **Hazop & Hazan. Identifying and Assessing Process Industry Hazards.** Boca Raton, Florida: CRC Press. 1st ed., 1999.

LA PORTE, L. T. R. High reliability organizations: unlikely, demanding and at risk. **Journal of Contingencies and Crisis Management**, v. 4, n. 2, p. 60-71, jun. 1996. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1468-5973.1996.tb00078.x>. Acesso em: 13 nov. 2022.

LE COZE, J. C. **Safety science research.** Boca Raton: Taylor & Francis, 2019.

LE COZE, J. C. Coupling and complexity at the global scale: flows, networks, interconnectedness and synchronicity (e.g. Covid-19). **Safety Science**, v. 165, Sept. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106193>. Acesso em: 13 nov. 2022.

LEVESON, Nancy et al. Applying STAMP in accident analysis. In: **NASA Conference Publication.** NASA; 1998, 2003. p. 177-198.

LONG, S. **Socioanalytic methods.** London: Routledge, 2013.

MAIERS, J.; SHERIF, Y. S. Applications of fuzzy set theory. **IEEE transactions on systems, man, and cybernetics**, v. SMC-15, n. 1, p. 175-189, Jan.-Feb. 1985. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6313408>. Acesso em: 18 nov. 2022.

MATTHIENSEN, A. Uso do coeficiente alfa de Cronbach em avaliações por questionários. **Embrapa: Boa vista, Roraima**, n. 48, 2011. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/936813/uso-do-coeficiente-alfa-de-cronbach-em-avaliacoes-por-questionarios>. Acesso em: 3 nov. 2022.

MAURINO, D. E. *et al.* **Beyond Aviation Human Factors**: safety in high technology systems. London: Routledge, 1998.

MILLER, Robert B. **A method for man-machine task analysis**. Washington: Wright Air Development Center, Air Research and Development Command, United States Air Force, 1953.

MOHER, D., SHAMSEER, L., CLARKE, M. *et al.* Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. **Systematic Reviews**. v.4, n.1. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/2046-4053-4-1>. Acesso em: 8 out. 2023.

NELSON, P. F. *et al.* Development of a leading performance indicator from operational experience and resilience in a nuclear power plant. **Nuclear Engineering and Technology**, v. 48, n. 1, p. 114-128, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1738573315002223?via%3Dihub>. Acesso em: 13 nov. 2022.

ØIEN, K.; NIELSEN, L. Proactive resilience-based indicators: the case of the deepwater horizon accident. *In*: Spe/Apea International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production 2012: protecting people and the environment – evolving challenges, 2012. **Anais...** Texas: Society of Petroleum Engineers, 2012.

PAGE, M. J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **The BMJ**, v. 372, 2021.

PATRIARCA, R. *et al.* An analytic framework to assess organizational resilience. **Safety and Health at Work**, v. 9, n. 3, p. 265-276, Sept. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2093791117301968?via%3Dihub>. Acesso em: 13 nov. 2022.

PATRIARCA, R. *et al.* Serious games for industrial safety: an approach for developing resilience early warning indicators. **Safety Science**, v. 118, Oct. 2019, p. 316-331. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.05.031>. Acesso em: 13 nov. 2022.

PEÑALOZA, G. A. *et al.* A resilience engineering perspective of safety performance measurement systems: A systematic literature review. **Safety Science**, v. 130, Out. 2020.

PERROW, C. **Normal accidents**: living with high-risk technologies. New York: Basic Books, 1984. Disponível em: <https://www.theism.org/public-library/Charles%20Perrow%20-%20Normal%20Accidents.pdf>. Acesso em: 15 out. 2022.

PETERSON, R. A. A meta-analysis of cronbach's coefficient alpha. **Journal of Consumer Research**, v. 21, n. 2, p. 381, 1994.

PFLANZ, M.; LEVIS, A. An approach to evaluating resilience in command and control architectures. **Procedia Computer Science**, v. 8, p. 141-146, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050912000312?via%3Dihub>. Acesso em: 13 nov. 2022.

RABBANI, M.; YAZDANPARAST, R.; MOBINI, M. An algorithm for performance evaluation of resilience engineering culture based on graph theory and matrix approach. **International Journal of Systems Assurance Engineering and Management**, v. 10, n. 2, p. 228–241, Apr. 2019.

RANASINGHE, U. *et al.* Resilience engineering indicators and safety management: a systematic review. **Safety and Health at Work**, v. 11, n. 2, June 2020.

RASMUSSEN, J. Risk management in a dynamic society: a modelling problem. **Safety Science**. V., n. 2–3, p. 183-213, nov./dec. 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(97\)00052-0](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(97)00052-0). Acesso em: 20 set. 2023.

RASMUSSEN, J.; SVEDUNG, I. **Proactive risk management in a dynamic society**. Sweden: Swedish Rescue Services Agency, University of Karlstad, 2000. Disponível em: <https://dvikan.no/ntnu-studentserver/reports/Risk%20Management%20in%20a%20Dynamic%20Society.pdf> Acesso em: 13 nov. 2022.

REASON, J. **Managing the risks of organizational accidents**. London: Routledge, 1997.

REASON, J. **Human Error**. Cambridge: Cambridge University Press. 1990.

REIMAN, T.; OEDEWALD, P. **Evaluating safety-critical organizations – emphasis on the nuclear industry Research**. n. 12, Technical Research Centre of Finland. April 2009. Disponível em: <https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/contentassets/dd847a4bf3734d7c855f690867ba60b1/200912-evaluating-safety-critical-organizations--emphasis-on-the-nuclear-industry>. Acesso em: 2 set. 2023

RESILIENCE ENGINEERING ASSOCIATION (REA). The Official home of Resilience Engineering. Disponível em: <https://www.resilience-engineering-association.org/>. Acesso em: 21 dez. 2023.

RIGHI, A. W.; SAURIN, T. A. Complex socio-technical systems: characterization and management guidelines. **Applied Ergonomics**, v. 50, p. 19-30, Sept. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003687015000204?via%3Dihub>. Acesso em: 13 nov. 2022.

RIGHI, A. W.; SAURIN, T. A.; WACHS, P. A systematic literature review of resilience engineering: research areas and a research agenda proposal. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 141, p. 142-152, July 2015.

SAATY, T. L. Decision making: the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP). **Journal of Systems Science and Systems Engineering**, v. 13, n. 1, p. 1-35, 2004.

SAKUDA, H.; KITAMURA, M. Resilience assessment grid (RAG) for facilitating safety consciousness of nuclear power plant personnel. *In*: REA SYMPOSIUM ON RESILIENCE ENGINEERING: SCALING UP AND SPEEDING UP LINNÆUS UNIVERSITY, 8., 2020. Kalmar, Sweden: Linnaeus University, 2020.

SAURIN, T. A.; FAMÁ, C. C.; FORMOSO, C. T. Principles for designing health and safety performance measurement systems: insights from resilience engineering. **Produção**, v. 23, n. 2, p. 387-401, 2013.

SAURIN, T. A.; GONZALEZ, S. S. Assessing the compatibility of the management of standardized procedures with the complexity of a sociotechnical system: Case study of a control room in an oil refinery. **Applied Ergonomics**, v. 44, n. 5, p. 811-823, Sept. 2013. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003687013000264>. Acesso em: 13 nov. 2022.

SAURIN, T. A.; WERLE, N. J. B. A framework for the analysis of slack in socio-technical systems. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 167, p. 439-451, Dec. 2017.

SHAPPELL, S. A.; WIEGMANN, D. A. **Office of aviation medicine the human factors analysis and classification system – HFACS**. Springfield, Virginia: National Technical Information Service, 2000.

SHIRALI, G. A.; SHEKARI, M.; ANGALI, K. A. Quantitative assessment of resilience safety culture using principal components analysis and numerical taxonomy: A case study in a petrochemical plant. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 40, p. 277-284, Mar. 2016.

SHIRALI, G.; SHEKARI, M.; ANGALI, K. A. Assessing reliability and validity of an instrument for measuring resilience safety culture in sociotechnical systems. **Safety and Health at Work**, v. 9, n. 3, p. 296-307, Sept. 2018.

SOUZA, A. C.; ALEXANDRE, N. M. C.; GUIRARDELLO, E. B. Propriedades psicométricas na avaliação de instrumentos: avaliação da confiabilidade e da validade. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**: revista do Sistema Único de Saúde do Brasil, v. 26, n. 3, p. 649–659, 2017.

SOUZA, A. P.; GOMES, J.O.; CARVALHO, P.V.R. Uma Abordagem para o Monitoramento de Indicadores de Resiliência em Organizações. **Revista Ação Ergon.** v. 6, n. 2, p. 1-11, 2021. Disponível em: <https://app.periodikos.com.br/journal/abergo/article/627d539ca9539504123c8ba3>

SWAIN, A.; GUTTMAN, H. E. **Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications**. Califórnia: Sandia National

Laboratories, 1983. Disponível em: <https://www.nrc.gov/docs/ML0712/ML071210299.pdf>. Acesso em: 30 out. 2022.

TURNER, B.; PIDGEON, N. **Man-made disaster**. 2th. New Hampshire: Butterworth-Heinemann Publishing, 1978.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARIANA (UFSC/COBE). **Risco de viés em Revisões Sistemáticas**: Guia prático. 2023. Disponível em: <https://guiariscodeviescobe.paginas.ufsc.br/capitulo-1-introducao/>. Acesso em: 10 out. 2023.

VINNEM, J. E. Risk Indicators for Major Hazards on Offshore Installations. **Safety Science**. v. 48., n. 6. p. 770-787, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.02.015>. Acesso em 3 set. 2023.

WEBER, L. **Revisiting The Swiss Cheese Model Of Accidents**. Regional Cooperation, Organizations and Problems, n. 13, p. 191–194, 1983.

WOODS, D. D. Creating foresight: how resilience engineering can transform NASA's approach to risky decision making. **Work**, v. 4, n. 2, p. 137-144, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/237353911_Creating_Foresight_How_Resilience_Engineering_Can_Transform_NASA's_Approach_to_Risky_Decision_Making. Acesso em: 15 out. 2022.

WOODS, D. How to design a safety organization: test case for resilience engineering. *In*: WOODS, D. **Resilience Engineering**: concepts and precepts. Boca Raton: CRC Press, 2012.

WOODS, D. D.; BRANLAT, M. Basic patterns in how adaptive systems fail. *In*: HOLLNAGEL, J.; PARIÈS, J.; WREATHAL, J. (ed.) **Resilience engineering in practice**: a guidebook. London: CRC Press, 2011.

WOODS, D. D.; WREATHALL, J. **Managing risk proactively**: the emergence of resilience engineering. Columbus: Ohio University, 2003. Disponível em: [http://csel.eng.ohio-state.edu/woods/error/working descript res eng.pdf](http://csel.eng.ohio-state.edu/woods/error/working%20descript%20res%20eng.pdf). Acesso em: 3 nov. 2022.

WREATHALL, J. **Developing models for measuring resilience**. Dublin: Ohio, 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/J-Wreathall/publication/255609212_Developing_Models_for_Measuring_Resilience/links/547cb45c0cf27ed978622c98/Developing-Models-for-Measuring-Resilience.pdf. Acesso em: 17 out. 2022.

ZADEH, L.A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X). Acesso em 12 set. 2022.

ZARRIN, M.; AZADEH, A. Mapping the influences of resilience engineering on health, safety, and environment and ergonomics management system by using Z-number

cognitive map. **Human Factors and Ergonomics in Manufacturing**, v. 29, n. 2, p. 141-153, Mar. 2019.

APÊNDICE A – Lista de Estudos Quantitativos e Qualitativos selecionados para a Pesquisa

AUTORES	LOCAL	PRINCIPAIS OBJETIVOS	INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	PRINCIPAIS RESULTADOS
(i) Shirali, Shekari e Angali (2018)	Sudoeste, Irã, Refinaria de Petróleo	Avaliar a validade de conteúdo, a validade de constructo (por análises de fatores exploratória e confirmatória) e confiança (por alfa de Cronbach e teste-reteste) de instrumento desenvolvido para medir a cultura resiliente em segurança de sistemas sociotécnicos.	Escala <i>Likert</i> (IVC - Índice de Validade de Conteúdo, teste-T, Lawshe, alpha de Crombach)	Os resultados dos testes realizados indicam que o instrumento é válido e confiável.
(ii) Azadeh <i>et al.</i> (2014)	Indústria Petroquímica no Irã	O principal objetivo deste estudo é avaliar os fatores de resiliência de uma planta petroquímica, podendo ser expandido para outras indústrias. É alcançado através de um método de mapas cognitivos <i>Fuzzy</i> (FCMs), que considera as interações entre os fatores devido aos seus pesos finais calculados.	Teoria de grafos e lógica <i>Fuzzy</i> (<i>Fuzzy Cognitive Map</i>)	Os resultados mostraram que a preparação, a conscientização e a flexibilidade são os fatores mais importantes dentre todos os nove fatores de ER. Além disso, a redundância e o trabalho em equipe desempenham um papel pequeno entre os fatores RE.
(iii) Azadeh <i>et al.</i> (2017)	Sul do Irã, Refinaria de Petróleo	Este estudo tem como objetivo investigar os impactos recíprocos de fatores gerenciais e organizacionais e da Engenharia de Resiliência por meio de uma abordagem única de programação matemática.	DEA (<i>Data Envolment Analysis</i>) / <i>Fuzzy c-mean</i>	Obteve-se que os fatores organizacionais têm maior impacto na resiliência do que os fatores gerenciais. Também se obteve que os fatores da resiliência relacionados a aprendizagem e flexibilidade têm maior influência sobre os fatores gerenciais e organizacionais.
(iv) Azadeh, Asadzadeh e Tanhaeean (2017)	Irã, Companhia de Petróleo da Província de Terhan	O objetivo do estudo foi desenvolver uma ferramenta verificada para a avaliação da Engenharia de Resiliência em organizações de manutenção na indústria de óleo e gás.	(AHP) Processo Hierárquico Analítico/ algoritmo <i>K-means</i> /DEA (<i>Data Envolment Analysis</i>)	O estudo também confirmou a estreita relação entre a Engenharia de Resiliência e os fatores de modelagem de desempenhos relacionados a seres humanos, sugerindo que os serviços para promover a Engenharia de Resiliência levarão os tais fatores a estarem em boas condições para que o erro humano possa ser reduzido e a segurança possa ser melhorada.
(v) Zarrin e Azadeh (2019)	Planta Petroquímica no Noroeste do Irã	O objetivo do estudo foi mapear as influências da Engenharia de Resiliência no sistema de gestão de saúde, segurança, meio ambiente e ergonomia, usando o mapa cognitivo de número Z.	O conceito de <i>Z-numbers</i> com abordagem de mapa cognitivo <i>Fuzzy</i> (FCM) é integrado e uma nova abordagem chamada de mapa cognitivo de <i>Z-number</i> é proposta	Os resultados mostraram que os princípios da Engenharia de Resiliência têm alto impacto na gestão de SSMA. Os resultados também indicaram que o comprometimento da alta administração tem o maior impacto (0,827) no ambiente, a aprendizagem tem o maior impacto (0,792) na saúde, a preparação tem o maior impacto (0,786) na ergonomia, e a conscientização tem o maior impacto (0,776) na segurança.
(vi) Rabbani, Yazdanparast e Mobini (2019)	Indústria Petroquímica no Irã	Para isso, o objetivo deste estudo é apresentar um novo algoritmo de otimização de desempenho baseado na teoria dos grafos, abordagem matricial e métodos estatísticos para avaliação da cultura de Engenharia de Resiliência de uma determinada organização.	Teoria de grafos e abordagem matricial	Entre os 10 departamentos avaliados em termos de fatores de resiliência, “processo de produção”, “controle de qualidade” e “operação química de polímeros” foram considerados os mais efetivos em cultura de resiliência da planta petroquímica entre os departamentos considerados pelo estudo. Os resultados também indicaram que os departamentos de “inspeção”, “laboratório” e “manutenção” tiveram o menor índice de resiliência e requerem mais atenção. Baixo índice de resiliência significa capacidade fraca do sistema em caso de acidentes inesperados ou crises acontecerem.

APÊNDICE A (Cont.)

AUTORES	LOCAL	PRINCIPAIS OBJETIVOS	INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	PRINCIPAIS RESULTADOS (ACHADOS)
(vii) Nelson <i>et al.</i> (2016)	Laboratório Nacional de Idaho, EUA	Este trabalho descreve a análise dos dados operacionais das informações contidas no Programa de Ações Corretivas. A metodologia considera o erro humano e os fatores organizacionais por causa de sua grande contribuição para eventos consequentes. Os resultados incluem uma ferramenta desenvolvida a partir dos dados a serem usados para identificação, previsão e redução da probabilidade de eventos consequentes significativos.	<i>Software: Fuzzy Logic Toolbox do MATLAB (versão 2.1.1; The Math Works, Inc., Natick, MA, EUA)</i>	Os resultados incluem uma ferramenta desenvolvida a partir dos dados a serem usados para identificação, previsão e redução da probabilidade de eventos consequentes significativos. Esta ferramenta é baseada na curva de resiliência que foi construída a partir dos dados operacionais da planta.
(viii) Patriarca <i>et al.</i> (2018)	Região Central da Europa.	A partir das quatro categorias (monitoramento, resposta, antecipação e aprendizagem), este artigo tem como objetivo definir uma análise semiquantitativa para medir a resiliência organizacional em Sistemas Sociotécnicos Complexos, combinando a grade de análise de resiliência RAG (<i>Resilience Assessment Grid</i>) e o processo de hierarquia analítica AHP.	RAG (<i>Resilience Assessment Grid</i>) e AHP - Matriz Saaty	O resultado da grade de análise de resiliência, ou seja, um conjunto ponderado de perguntas de sondagem, pode ser utilizado em diferentes domínios como ferramenta de apoio em uma ação gerencial mais ampla orientada para o <i>Safety-II</i> , para trazer segurança de gestão no <i>core business</i> da organização.
(ix) Saurin e Werle (2017)	Maternidade, Rio Grande do Sul, Brasil	O objetivo do estudo foi saber como analisar recursos de folga de diferentes naturezas em Sistemas Sociotécnicos Complexos, oferecendo <i>insights</i> sobre o design do sistema de trabalho para enfrentar as variabilidades inesperadas dos sistemas complexos.	Estatísticas descritivas, como médias, desvios-padrão e coeficientes de variação, foram usadas para analisar os dados dos questionários, o que produziu informações que foram diretamente utilizadas. Unidades de Folga (UoS): são cada <i>pool</i> de recursos de folga semelhantes que compartilham uma mesma finalidade, corresponde a uma UoS, por exemplo, equipamentos redundantes em uma ala cirúrgica, independentemente do número de equipamentos extras. Em seguida, deve-se avaliar até que ponto cada UoS mitiga cada fonte de variabilidade. Esta avaliação é baseada numa escala de 7 pontos.	Benefícios da estrutura para avaliar o <i>slack</i> (folga): (i) permite a análise conjunta de recursos <i>slack</i> de diferentes naturezas, com base em um constructo compartilhado (UoS), métrica (pontuação de proteção) e esquema de classificação; (ii) permite a priorização de fontes de variabilidade, com base no quanto efetivamente elas são cobertas por recursos <i>slack</i> ; (iii) lança luz sobre fontes de variabilidade e recursos ociosos que surgem da auto-organização e práticas informais de trabalho; isso reflete um foco no trabalho realizado [16], ao mesmo tempo em que deixa espaço para o trabalho imaginado, enfatizando os requisitos de folga dos regulamentos; (iv) UoS identificado ao longo do tempo e correlacionar isso com acidentes e quase acidentes: a previsão é de que a folga medida seja um indicador importante de segurança.

APÊNDICE A (Cont.)

AUTORES	LOCAL	PRINCIPAIS OBJETIVOS	INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	PRINCIPAIS RESULTADOS
(x) Shirali <i>et al.</i> (2016)	Indústria de Processos no Irã	Este estudo tem como objetivo representar uma nova visão para avaliar fatores da Engenharia de Resiliência em uma indústria de processo usando uma ampla gama de indicadores. Este artigo teve como objetivo uma avaliação quantitativa de RE com base em nove Indicadores de Resiliência, ou seja, capacidade de <i>buffer</i> , margem, tolerância, interações entre escalas, aprendizado cultura, flexibilidade, antecipação, atenção e resposta usando o PCA e as abordagens de taxonomia numérica (NT) em uma planta de processo.	Análise de Componentes Principais/Taxonomia Numérica/Delphi/Spearman – confiabilidade dos resultados	Os resultados das análises mostraram que três indicadores de interações entre escalas, margem e antecipação estavam em um nível inferior à melhor prática, respectivamente. Além disso, os resultados da análise das unidades mostraram que as unidades de manutenção, hidrogênio e controle 3 estavam em piores condições em relação aos fatores de resiliência levantados.
(xi) Grecco <i>et al.</i> (2013)	Brasil, Indústria de Radiofármacos	O objetivo desta pesquisa é adotar uma abordagem <i>Fuzzy Set Theory</i> (FST) para estabelecer um método para avaliação de resiliência em organizações com base em indicadores proativos de desempenho de segurança, definidos de acordo com os princípios da Engenharia de Resiliência.	Lógica <i>Fuzzy</i> através do método <i>Fuzzy Set Theory</i> para medir os fatores de resiliência	Consideramos satisfatório um grau de assiduidade maior ou igual a 0,6. O resultado da avaliação média mostrou que o setor de expedição de embalagens de radiofármacos apresentaram cultura de aprendizagem satisfatória, consciência de flexibilidade, cultura justa e preparação. No entanto, este setor apresentou problemas relacionados ao compromisso da alta administração.
(xii) Chuang <i>et al.</i> (2020)	China, Departamento de Emergência Médica de um Hospital em Taiwan	O estudo visa redesenhar a grade de avaliação de resiliência de Hollnagel (RAG), em um RAG personalizado (ED-RAG) para dar suporte ao gerenciamento de resiliência em Departamento de Emergência Médica de um Hospital em Taiwan. ED-RAG (<i>Emergency Department - RAG</i>)	Pontuações de 0 até 4 para questões específicas elaboradas por uma equipe de pesquisadores e funcionários que conheciam o departamento. Com isso, foi possível definir notas de 0 a 100% para as quatro habilidades da resiliência: potencial para aprender (86,11%); potencial de resposta (61,56); antecipar (56,25%); monitorar (33,93).	O ED-RAG representa um instantâneo da resiliência dos EDs sob condições específicas. Pode ser realizado várias vezes por um único hospital para monitorar as direções e o conteúdo de melhoria que pode complementar a gestão de segurança convencional em direção à resiliência. Algumas considerações são necessárias para ter sucesso quando os hospitais o utilizam. Estudos futuros, para superar potenciais deficiências metodológicas do ED-RAG, são necessários. Entre as quatro habilidades avaliadas a única que ficou abaixo foi o monitoramento.
(xiii) Sakuda e Kitamura (2020)	Usina Nuclear de Fukushima, Japão	Utilizou o RAG para evitar a degradação do potencial de resiliência em uma usina nuclear.	Gráfico aranha com pontuações da escala Likert para medir monitoramento, resposta, aprendizagem e antecipação.	Descobriu-se que o RAG baseado em fragilidade pode ser uma ferramenta útil para facilitar a conscientização sobre os possíveis pontos fracos da planta de energia nuclear.

APÊNDICE A (Cont.)

AUTORES	LOCAL	PRINCIPAIS OBJETIVOS	INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	PRINCIPAIS RESULTADOS
(xiv) Øien e Nielsen (2012)	Noruega, Campo de Goliat no mar Barent	Desenvolver uma abordagem baseada em resiliência, principalmente em função da capacidade de fornecer advertências para cenários desconhecidos (atípicos), não cobertos por uma avaliação de risco. Aprimorando a capacidade de antecipação, por meio de indicadores, para evitar um acidente de grandes proporções.	Consciência sobre os riscos 1.1.1. Nº de anos de conhecimento do sistema produtivo. 1.1.2. Informações sobre os riscos através de cursos, documentos, HAZOP, AQRs, nos últimos 3 meses. 1.1.3. Qualidade dos relatos de quase acidentes e incidentes. 1.1.4. Informações sobre a qualidade das barreiras (segurança técnica). 1.1.5. Informações sobre a qualidade das funções de suporte de barreira (segurança operacional). 1.1.6. Discussão de questões/status de HSE em reuniões regulares. 1.1.7. Comunicação de risco/resiliência em todos os níveis da organização. Antecipação 1.2.1. Nº de identificação de risco/perigo (HAZID etc.). 1.2.2. Aprenda com as próprias experiências e acidentes. 1.2.3. Aprenda com outras experiências e acidentes.	Mostra que o método pode ser aplicado em qualquer indústria de óleo e gás. Também mostra que os indicadores para as questões gerais propostas podem fornecer alerta antecipado para grandes acidentes.
(xv) Patriarca <i>et al.</i> (2019)	Itália, Roma	A abordagem proposta visa favorecer o engajamento dos trabalhadores na segurança do trabalho e, de forma mais geral, superar as barreiras psicológicas à sua participação. A abordagem foi explorada em um estudo de caso dentro da indústria química. Em particular, o setor de segurança crítica da produção de amoníaco foi abordado, com o objetivo de promover e melhorar a sua resiliência para eventos indesejados	Nº de anos de experiência com produção de NH3. Nº de horas de cursos de risco nos últimos 12 meses. Informações sobre a qualidade das barreiras (segurança técnica). Nº de falhas de barreira, por ex., falhas de PRVs. Nº de exceções tratadas no último mês Nº de casos de comunicação mal-sucedidas entre os operadores durante manobras operacionais. Nº dos casos em que uma decisão de resposta foi atrasada nos últimos três meses.	O método ainda é visto com grande ceticismo, pois envolve uma estrutura para montar os jogos. Talvez com análise de custo e benefício possa ser implantado eletronicamente, uma vez que montar a estrutura e o design do jogo pode ter um alto custo.
(xvi) Jain <i>et al.</i> (2018)	Universidade do Texas, EUA	Apresentou uma estrutura genérica para medir a probabilidade da resiliência de um sistema de processo com base em métricas nas quais uma Rede Bayesiana (BN) pode ser desenvolvida por meio de uma equação.	Resilience Analysis Framework (PRAF), as métricas foram desenvolvidas considerando os indicadores de desempenho estabelecidos pela API RP 754 (API, 2010) e com base nos aspectos de resiliência do processo de Early Detections (ED), Erro Tolerant Design (ETD), capacidade de recuperação (recoverability) (R) e (plasticity) plasticidade (P). Estes foram categorizados em técnicos (ED, ETD, R) e resiliência social (P). Obs.: utiliza o cálculo desses fatores em Rede Bayesiana, porém, não demonstrou valores.	A Estrutura de Análise de Resiliência de Processo é apresentada no contexto de melhoria da gestão de riscos e segurança. Conforme ilustrado, os principais aspectos da resiliência do sistema de processo são detecção (ED), design tolerante a erros (ETD), recuperabilidade (R) e plasticidade (P). Na aplicação, o uso desses aspectos serve para conduzir a previsibilidade.

APÊNDICE A (Cont.)

AUTORES	LOCAL	PRINCIPAIS OBJETIVOS	INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	PRINCIPAIS RESULTADOS
(xvii) Hollnagel <i>et al.</i> (2021)	Suécia, Eurocontrol	Construir uma base para o desempenho resiliente dos Sistemas Sociotécnicos Complexos que fazem a gestão do tráfego aéreo por meio de um método qualitativo de avaliação de desempenho resiliente em uma organização que controla o tráfego aéreo. Propondo questionário e escala Likert com pontuação para os potenciais: monitorar, responder, aprender e antecipar.	Gráfico em formato de teia com pontuações da escala Likert para medir: monitoramento, resposta, aprendizagem e antecipação.	Método qualitativo com base em um questionário psicométrico que avalia o potencial de resiliência dos sistemas organizacionais que tem o objetivo de promover a gestão do tráfego aéreo, utilizando os potenciais de resposta, monitoramento, antecipação e aprendizagem.
(xviii) Huber <i>et al.</i> (2012)	Instituto de Engenharia Nuclear, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, Brasil	O objetivo deste estudo foi propor uma estrutura para indicar onde a organização está localizada, dentro das capacidades necessárias para lidar com as perturbações que podem afetá-la (nível de resiliência da organização).	Consciência; eficiência; adaptabilidade; compromisso.	Na avaliação dos especialistas sobre o aplicativo de resiliência da empresa de táxi aéreo, o método e a sua divisão de atividades em três níveis resultaram em atividades compatíveis com as capacidades, interesses e disponibilidades dos envolvidos, sendo assim, bem aceito. O conceito combinado de desenvolvimento prático (um método representativo, participativo, iterativo e interativo) de Indicadores de Resiliência também foi bem aceito e deve ser testado em mais áreas de trabalho.
(xix) Souza <i>et al.</i> (2021)	Brasil, UFRJ (Rio de Janeiro)	Propôs aplicar conceitos da Engenharia de Resiliência na compreensão da organização pela análise de tarefas e atividades cognitivas para desenvolvimento de indicadores pelos próprios agentes humanos atuantes no nível operacional, além da especificação inicial de uma ferramenta computacional para apoiar essa compreensão.	Gráficos radiais (aranha) com pontuação para os seguintes fatores para realização das tarefas operacionais, ex: treinamento e experiência; comunicação; instalações e equipamentos; atividades de grupos e interfaces de trabalho.	Fornecer uma oportunidade tecnológica para detecção de desvios do trabalho em direção às suas fronteiras de segurança. Permite que os gestores analisem de forma fotográfica como as atividades foram ou estão sendo realizadas ao longo do dia. São obtidos gráficos radiais com os indicadores que afetam em termos de dificuldades para o time atingir os objetivos da tarefa.
(xx) Peñaloza <i>et al.</i> (2020)	Brasil, UFRG (Rio Grande do Sul)	Uma revisão sistemática da literatura com o objetivo de identificar se o RE oferece uma nova perspectiva sobre os sistemas de medição de desempenho em segurança, e entender como o RE tem posto em prática nos sistemas de medição de desempenho em segurança.	a) sistema de indicadores devem apoiar o monitoramento da variabilidade diária; b) sistemas de indicadores devem fornecer <i>feedback</i> em tempo real para os envolvidos diretamente na execução e supervisão das atividades de produção; c) sistema de indicadores devem facilitar o aprendizado do que vai bem, além de o que dá errado; d) sistema de indicadores devem oferecer <i>insights</i> sobre o gerenciamento de <i>trade-offs</i> entre a segurança e outras dimensões do negócio; e) sistema de indicadores deve evoluir devido à natureza mutável de Sistemas Sociotécnicos Complexos.	No entanto, existiram vários estudos moderados ou fortemente alinhados com essas diretrizes, sugerindo que a ER tem sido implicitamente adotada até certo ponto nos sistemas de medição de desempenho.

APÊNDICE A (Cont.)

AUTORES	LOCAL	PRINCIPAIS OBJETIVOS	INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO	PRINCIPAIS RESULTADOS
(xxi) Ranasinghe <i>et al.</i> (2020)	Austrália, Universidade de NewCastle	O principal objetivo desta pesquisa é explorar indicadores de ER que foram identificados como importantes no desenvolvimento e na avaliação do ambiente de trabalho resiliente em indústrias de alto risco, particularmente na reforma de construção.	Comprometimento da alta administração; conscientização aprendizado flexibilidade	Os resultados mostram que os quatro indicadores comumente usados foram: comprometimento da alta administração, conscientização, aprendizado e flexibilidade, todos com forte relacionamento com RE. As descobertas deste estudo são úteis para as partes interessadas na tomada de decisões sobre os indicadores de ER mais importantes no contexto de sua pesquisa ou prática, pois isso evita a ambiguidade e a disparidade na identificação de indicadores de RE.
(xxii) Pflanz e Levis (2012)	Industria Marítima, Centro de Comando e Controle da Marinha Americana na Georgia, EUA	Este artigo descreve uma abordagem quantitativa para avaliar a resiliência esperada de um comando e sistema de controle. Apresenta diretrizes para a medição da resiliência organizacional, com base em medidas substitutas, como tolerância a erros, capacidade de resposta a eventos inesperados e nível de conectividade entre os elementos do sistema ou organização.	Software Petri Net apresenta uma modelagem de rede em álgebra linear que demonstra como calcular a resiliência.	Apresentou diretrizes para a medição da resiliência organizacional com base em medidas substitutas, como tolerância a erros, capacidade de resposta a eventos inesperados e nível de conectividade entre os elementos do sistema.
(xxiii) Herrera <i>et al.</i> (2014)	Aeroporto de Arlanda na Suécia	Propôs uma estrutura de escala com o objetivo de identificar conjuntos de Indicadores de Resiliência. Aplicou o conceito de Safety II de segurança como presença de capacidade.	Os Indicadores de Resiliência nada mais são do que instanciações de soluções de problemas que os procedimentos não cobrem. Problemas apresentados durante a manobra de arremeter em uma torre central de gestão do tráfego aéreo. Exemplos: (+) Conflito potencial na manobra de arremeter administrado por dois Oficiais de Controle de Tráfego Aéreo (ACTO) (+) ATCOs (Air Traffic Control Officers) - Previnem uma colisão potencial entre aeronaves.	No que diz respeito à Engenharia de Resiliência, a estrutura de ESCALA suporta na identificação e extração de Indicadores de Resiliência e no mapeamento em padrões.

APÊNDICE B – Resumo dos Estudos Excluídos

Razões para Exclusão	Referências
Indústria de médio risco	Rubio-Romero (2018)
Não é indústria de alto risco tecnológico	Chen <i>et al.</i> (2018)
Estudo duplicado com estudo acima	Chen (2017)
Estudo duplicado com o de Shirali <i>et al.</i> (2016)	Azadeh e Zarrin (2016)
Estudo duplicado com o de Azadeh (2017)	Azadeh <i>et al.</i> (2013)
Estudo duplicado com o de Shirali <i>et al.</i> (2016)	Shirali <i>et al.</i> (2013)
Tempo da publicação	Saurin e Carim Junior (2011)
Tempo da publicação	Costella <i>et al.</i> (2009)
Tempo da publicação	Herrera <i>et al.</i> (2010)

APÊNDICE C – Planilha do Levantamento Bibliométrico

AUTORES	TÍTULO DO ESTUDO	APLICAÇÃO POR TIPO DE INDÚSTRIA	SETOR	LOCAL
(i) Shirali, Shekari e Angali (2018)	Assessing Reliability and Validity of an Instrument for Measuring Resilience Safety Culture in Sociotechnical Systems	Indústria Petroquímica	Petróleo	Irã
(ii) Azadeh <i>et al.</i> (2014)	Assessment of resilience engineering factors in high-risk environments by fuzzy cognitive maps: A petrochemical plant	Indústria Química e Petroquímica	Petróleo	Irã
(iii) Azadeh <i>et al.</i> (2017)	Combinatorial optimization of resilience engineering and organizational factors in a gas refinery by a unique mathematical programming approach	Indústria de óleo e gás/ Refinaria	Petróleo	Irã
(iv) Azadeh, Asadzadeh e Tanhaeean (2017)	A consensus-based AHP for improved assessment of resilience engineering in maintenance organizations	Indústria Química e Petroquímica	Petróleo	Irã
(v) Zarrin e Azadeh (2019)	Mapping the influences of resilience engineering on health, safety, and environment and ergonomics management system by using Z-number cognitive map	Indústria Petroquímica	Petróleo	Irã
(vi) Rabbani, Yazdanparast e Mobini (2019)	An algorithm for performance evaluation of resilience engineering culture based on graph theory and matrix approach	Indústria Química e Petroquímica	Petróleo	Irã
(vii) Nelson <i>et al.</i> (2016)	Development of a Leading Performance Indicator from Operational Experience and Resilience in a Nuclear Power Plant	Indústria Nuclear	Nuclear	México
(viii) Patriarca <i>et al.</i> (2018)	An Analytic Framework to Assess Organizational Resilience	Setor de Anestesia de Hospital	Saúde	Europa Central
(ix) Saurin e Werle (2017)	A framework for the analysis of slack in socio-technical systems	Setor de Maternidade de Hospital	Saúde	Brasil
(x) Shirali <i>et al.</i> (2016)	Assessment of resilience engineering factors based on system properties in a process industry	Indústria de Processo	Químico	Irã
(xi) Grecco <i>et al.</i> (2013)	A Fuzzy Model to Assess Resilience for Safety Management	Indústria da Saúde (Medicina Nuclear)	Nuclear	Brasil
(xii) Chuang <i>et al.</i> (2020)	Measurement of resilience potential - development of a resilience assessment grid for emergency departments	Hospital de pequeno porte	Saúde	Taiwan
(xiii) Sakuda e Kitamura (2020)	Resilience assessment grid (rag) for facilitating safety consciousness of nuclear power plant personnel	Indústria Nuclear	Nuclear	Japão
(xiv) Øien e Nielsen (2012)	Proactive Resilience Based Indicators: The Case of the Deepwater Horizon Accident	Indústria do Petróleo Offshore	Petróleo	Noruega
(xv) Patriarca <i>et al.</i> (2019)	Serious games for industrial safety: An approach for developing resilience early warning indicators	Indústria Química	Químico	Itália
(xvi) Jain <i>et al.</i> (2018)	Process Resilience Analysis Framework (PRAF): A systems approach for improved risk and safety management	Indústria Petroquímica	Petróleo	EUA
(xvii) Hollnagel <i>et al.</i> (2021)	The Systemic Potential Management Building a Basis for Resilient Performance	Aviação Civil	Aéreo	Bélgica
(xviii) Huber <i>et al.</i> (2012)	A program to support the construction and evaluation of resilience indicators	Aviação Civil	Aéreo	Brasil
(xix) Souza <i>et al.</i> (2021)	Uma abordagem para o monitoramento de indicadores de resiliência em organizações	Indústria Nuclear	Nuclear	Brasil
(xx) Peñalosa <i>et al.</i> (2020)	A resilience engineering perspective of safety performance measurement systems: A systematic literature review.	Indústria da Construção	Construção civil	Brasil
(xxi) Ranasinghe <i>et al.</i> (2020)	Resilience engineering indicators and safety management: A systematic review	Todas as indústrias de alto risco tecnológico	Construção civil	Austrália
(xxii) Pflanz e Levis (2012)	An Approach to Evaluating Resilience in Command and Control Architectures	Indústria Naval Centro de Comando e Controle da Marinha Americana	Naval	EUA
(xxiii) Herrera <i>et al.</i> (2014)	The SCALES Framework for Identifying and Extracting Resilience Related Indicators: Preliminary Findings of a Go-around Case Study	Aviação Civil	Aéreo	Noruega

APÊNDICE D - Análise do Risco de Viés

Checklist Joanna Briggs (Estudos Quantitativos)	Azadeh et al. (2014)	Azadeh et al. (2016)	Azadeh et al. (2017)	Shirali et al. (2018)	Shirali et al. (2016)	Rabbani et al. (2019)	Zarrin e Azadeh (2019)	Grecco et al. (2013)	Nelson et al. (2016)	Saurin e Werle (2017)	Patriarca et al. (2018)
Os critérios para inclusão das amostras foram claramente definidos?	Alto Risco	Alto Risco	Alto Risco	Baixo Risco	Alto Risco	Baixo Risco	Alto Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Não está claro	Não está claro
O tema do estudo e o cenário foram escritos em detalhe?	Não está claro	Alto Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco
A exposição foi medida de forma válida e confiável?	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Não está claro
Os objetivos e critérios padrão foram utilizados para a medida da condição?	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco
Os fatores de confusão foram identificados?	Alto Risco	Alto Risco	Alto Risco	Baixo Risco	Alto Risco	Baixo Risco	Alto Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco
Existiam estratégias para lidar com os fatores de confusão declarados?	Alto Risco	Alto Risco	Alto Risco	Alto Risco	Alto Risco	Baixo Risco	Alto Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Não está claro
Os resultados foram medidos de forma válida e confiável?	Não está claro	Baixo Risco	Não está claro	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco
Foi utilizada análise estatística apropriada?	Baixo Risco	Alto Risco	Alto Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Não está claro	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco

Escala para o risco de viés	Baixo Risco	Não está claro	Alto Risco	Não Aplicável
------------------------------------	--------------------	-----------------------	-------------------	----------------------

Fonte: Joanna Briggs Institute (2022). *Checklist* aplicado para análise do risco de viés dos estudos quantitativos. Obs.: A limitação em comum dos estudos quantitativos é que nenhum conseguiu apresentar um instrumento para avaliar ou medir todas as dimensões do fenômeno da resiliência em indústrias de alto risco.

APÊNDICE D (Cont.)

Checklist Joanna Briggs Institute Estudos Qualitativos	Hollnagel et al. (2021)	Herrera et al. (2014)	Øien e Nielsen (2012)	Patriarca (2019)	Jain et al. (2018)	Huber et al. (2012)	Souza (2021)	Chuang et al. (2020)	Sakuda e Kita-mura (2020)	Pflanz e A. Levis (2012)
Existe congruência entre a perspectiva filosófica declarada e a metodologia de pesquisa?	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Alto Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco
Existe congruência entre a metodologia de pesquisa e a questão ou objetivos de pesquisa?	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Não está claro	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Alto Risco	Baixo Risco
Existe congruência entre a metodologia de pesquisa e os métodos usados para coletar dados?	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Não está claro	Não está claro	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Não está claro	Baixo Risco
Existe congruência entre a metodologia de pesquisa e a representação e análise dos dados?	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Alto Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Alto Risco	Baixo Risco
Existe congruência entre a metodologia de pesquisa e a interpretação dos resultados?	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Alto Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Alto Risco	Baixo Risco
Existe uma declaração localizando o pesquisador culturalmente ou teoricamente?	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável

Escala para o risco de viés	Baixo Risco	Não está claro	Alto Risco	Não Aplicável
------------------------------------	--------------------	-----------------------	-------------------	----------------------

APÊNDICE D (Cont.)

Checklist Joanna Briggs Institute Estudos Qualitati- vos	Hollna- gel et al. (2021)	Herrera et al. (2014)	Øien e Nielsen (2012)	Patriarc a (2019)	Jain et al. (2018)	Huber et al. (2012)	Souza (2021)	Chuang et al. (2020)	Sakuda e Kitamu- ra (2020)	Pflanz e A. Levis (2012)
Existe influência do pesquisador na pesquisa, e vice-versa, endereçado?	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável	Não aplicável
Os participantes e suas vozes são adequadamente representados?	Não está claro	Não está claro	Não está claro	Alto Risco	Não aplicável	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco
As conclusões tiradas no relatório de pesquisa fluem da análise, ou interpretação, dos dados?	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Não está claro	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco	Baixo Risco

Fonte: Joanna Briggs Institute (2022). *Checklist* aplicado para análise do risco de viés dos estudos qualitativos.

APÊNDICE D (Cont.)

Checklist Joanna Briggs Institute (Relatos de Revisões Sistemáticas)	Peñaloza et al. (2020)	Ranasinghe (2020)
A pergunta de revisão está clara e explicitamente declarada?	Baixo Risco	Alto Risco
Os critérios de inclusão foram adequados para a questão de revisão?	Não está claro	Baixo Risco
A estratégia de busca foi adequada?	Baixo Risco	Baixo Risco
As fontes e recursos utilizados para a busca dos estudos foram adequados?	Baixo Risco	Baixo Risco
Os critérios de avaliação dos estudos foram adequados?	Baixo Risco	Baixo Risco
A avaliação crítica foi realizada por dois ou mais revisores de forma independente?	Não está claro	Baixo Risco
Havia métodos para minimizar erros na extração de dados?	Não está claro	Baixo Risco
Os métodos usados para combinar os estudos foram adequados?	Baixo Risco	Baixo Risco
A probabilidade de viés de publicação foi avaliada?	Baixo Risco	Não está claro
As recomendações para políticas e/ou práticas foram apoiadas pelos dados relatados?	Baixo Risco	Baixo Risco
As diretrizes específicas para novas pesquisas foram adequadas?	Baixo Risco	Baixo Risco

Escala para o risco de viés

Baixo Risco
Não está claro
Alto Risco
Não Aplicável

Fonte: Joanna Briggs Institute (2022). *Checklist* aplicado para análise do risco de viés dos estudos secundários.

ANEXO A – Protocolo De Registro Da Pesquisa

The Resilience Engineering as Perspective for Safety Indicators in High Technological Risk Industries: A Systematic Literature Review

To enable PROSPERO to focus on COVID-19 submissions, this registration record has undergone basic automated checks for eligibility and is published exactly as submitted. PROSPERO has never provided peer review, and usual checking by the PROSPERO team does not endorse content. Therefore, automatically published records should be treated as any other PROSPERO registration. Further detail is provided [here](#).

Review methods were amended after registration. Please see the revision notes and previous versions for detail.

Citation

Marcelo Praxedes Larrea Ihanez Ihanez, Elmo Rodrigues da Silva, Ubirajara Mattos, Karoline Frankefeld, Luiz Silva. The Resilience Engineering as Perspective for Safety Indicators in High Technological Risk Industries: A Systematic Literature Review. PROSPERO 2022 CRD42022347710 Available from: https://www.crd.york.ac.uk/prospero/display_record.php?ID=CRD42022347710

Review question

Analyze the assessment methods, based on resilience engineering, used to measure and improve performance in safety management, in organizations that operate and deal with high technological risk

Searches

- Periódicos Capes (www-periodicos-capes-gov-br)
- Web of Science, (<https://www.webofscience.com/>)
- Mendeley, (<https://www.mendeley.com>)
- Google Acadêmico, (<https://www.scholar.google.com.br>)
- Research Gate (<https://www.researchgate.net/>)
- Scopus (www.Scopus.com)
- Wiley Liberary: (<https://onlinelibrary.wiley.com/>)
- Perlego <https://www.perlego.com/>

Types of study to be included

Epidemiologically speaking, quantitative-qualitative studies are cross-sectional analytical and use operational research and applied statistical techniques. Qualitative studies are cross-sectional and longitudinal and use previous reviews and surveys to reach a conclusion.

Condition or domain being studied

This study was developed to evaluate, from the perspective of resilience engineering, how safety indicators are generated and what are the gaps in the studies carried out so far and propose new approaches, as well as understand the state of the

art in the application of these evaluated methods. It is believed that such indicators can help to prevent the risks of major technological accidents.

Participants/population

This study is being carried out to analyze the conditions of high technological risk in industries that have the potential to generate accidents and damage the health of workers and society around the facilities.

Intervention(s), exposure(s)

a Population or Problem - Industrial organizations with high technological risk and complexity and the use of indicators to measure resilient performance in safety.

b Intervention or Exposure - Industries of high technological risk and complexity whose activities generate high potential for disasters and loss of life.

c Comparison - Comparison of methods to generate indicators of the organizations' resilient performance.

d Outcomes - Identify the main difficulties, gaps, and benefits in applying these methods / Propose new approaches. Identify the main ways to assess the resilience potential of these organizational systems.

Comparator(s)/control

The studies are quantitative and quanti-qualitative to define resilient performance indicators for companies' safety processes. Primary and secondary studies will be compared with each other in order to show gaps and show a path for future research.

Context

a) Publication time: must be studied from the last 10 years, adopting the cut-off date of 2010.

b) Articles that intend to define criteria for evaluating resilient performance in the field of safety will be separated by means of a qualitative or quantitative indicator.

c) Only studies that encompassed industrial production systems with high technological risk, with the exception of natural technological risks. According to UNEP (2015) risks of the technological origin or industrial condition, are those that include accidents, dangerous procedures, infrastructure failures, or human activities, which can cause loss of life, injury, illness or other health impacts, material damage, loss of livelihoods and services, social and environmental disturbances or damage. Examples of technological hazards include industrial pollution, nuclear radiation, toxic waste, dam failures, transport accidents, factory explosions, fires, and chemical spills. Technological risks can also arise directly as a result of an impact related to a natural event.

d) Secondary studies that are characterized by systematic reviews already carried out on the same topic, within the aforementioned publication time, will also be analyzed

Main outcome(s)

Identify the main difficulties, gaps, and benefits in applying methods / Propose new approaches. Identify as main ways of evaluating or security potential in security, of these organizational systems.

Additional outcome(s)

Not applicable

Data extraction (selection and coding)

Joanna Briggs's tools will be used to assess the risk of bias and the methodological quality of quantitative and qualitative studies.

Only studies that meet the inclusion criteria will be included. Studies must meet more than 50% of the risk of bias analysis tool

Data will be extracted via an excel spreadsheet and software such as Revman to analyze the risk of bias and Vosviewer to collect bibliometric data.

Risk of bias (quality) assessment

Joanna Briggs's tools will be used to assess the risk of bias and the methodological quality of quantitative and qualitative studies.

Strategy for data synthesis

The data must be synthesized using an excel spreadsheet and software such as Vosviewer and Revman.

Quantitative and qualitative variables will be extracted. As this review is still in progress, it is considered to carry out a meta-analysis adopting a 9.2.3.2 The standardized mean difference to deal with the high heterogeneity of the studies.

Analysis of subgroups or subsets

The studies will be separated into groups with the same methodology to obtain the outcome variables.

Participants will be separated by industry types

Contact details for further information

Marcelo Praxedes Larrea Ilhanez Ilhanez

ilhanez.marcelo@posgraduacao.uerj.br

Organisational affiliation of the review

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

<http://www.peamb.eng.uerj.br/>

Review team members and their organisational affiliations

Mr Marcelo Praxedes Larrea Ilhanez Ilhanez. Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Elmo Rodrigues da Silva. Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Ubirajara Mattos. Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Karoline Frankefeld. Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Luiz Silva. Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Collaborators

Elmo Rodrigues , D.Sc.: Da Silva. UERJ Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Ubirajara Aluizio de Oliveira Mattos. UERJ Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Karoline Frankenfeld. UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Julio Silva. UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Luiz Silva. UERJ- Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Anticipated or actual start date

01 September 2022

Anticipated completion date

31 March 2023

Funding sources/sponsors

There are no sponsors

Grant number(s)

State the funder, grant or award number and the date of award

There is no funder

Conflicts of interest

Language

English, Portuguese-Brazil

Country

Brazil

Stage of review

Review Ongoing

Subject index terms status

Subject indexing assigned by CRD

Subject index terms

Humans; Risk Assessment; Safety Management

Date of registration in PROSPERO

19 October 2022

Date of first submission

09 October 2022

Stage of review at time of this submission

The review has not started

Stage	Started	Completed
Preliminary searches	No	No
Piloting of the study selection process	No	No
Formal screening of search results against eligibility criteria	No	No
Data extraction	No	No
Risk of bias (quality) assessment	No	No
Data analysis	No	No

Revision note

: Measuring safety performance in organizations is a critical element in managing production systems. This practice allows decisions to be made objectively and based on data analysis. In the study of resilience engineering applied to the safety of production systems, there is interest on the part of the scientific community and companies in identifying, in the different processes of organizations, indicators to measure resilient performance in safety management. This study aims to discuss and analyze qualitative and quantitative methods to identify the resilience potential in safety management and support new research on resilience engineering applied to safety performance management in industries with high technological risks. The methodology used included a systematic review of the national and international literature of the last ten years. The results obtained provide a critical analysis of the methods used to define safety indicators applied through resilience engineering to the management of safety work in organizations that deal with high technological risks. Qualitative methods for generating safety indicators from the perspective of Resilience Engineering have proven to be a better way, as they apply the concepts of Safety I and Safety II and early warning indicators

The record owner confirms that the information they have supplied for this submission is accurate and complete and they understand that deliberate provision of inaccurate information or omission of data may be construed as scientific misconduct.

The record owner confirms that they will update the status of the review when it is completed and will add publication details in due course.

Versions

19 October 2022

19 October 2022

20 March 2023

ANEXO B – Questionários do Estudo de Hollnagel *et al.* (2021)

Perguntas genéricas de primeiro plano

Quadro 14 : Possíveis facetas em primeiro plano do potencial de resposta

- O conjunto de eventos para os quais existem respostas é adequado.
- O conjunto de eventos é revisado/revisado regularmente.
- A frequência dessas revisões é adequada.
- Fica claro quando uma resposta deve ser dada.
- As respostas são simples de fazer e não exigem escolhas.
- As respostas prescritas são apropriadas para as situações em que são necessárias.
- As respostas podem ser iniciadas / iniciadas com rapidez suficiente.
- As respostas sejam totalmente implementadas com rapidez suficiente.
- Respostas eficazes podem ser sustentadas por tempo suficiente.
- Fica claro quando uma resposta (ou situação) não é mais necessária.
- Existem recursos suficientes (pessoas, equipamentos, materiais) para garantir a prontidão de resposta.
- Recursos suficientes são exclusivos para o potencial de resposta.
- Os recursos são mantidos em um nível aceitável
- A prontidão para responder é regularmente verificada e mantida

Quadro 15: Possíveis facetas de primeiro plano do potencial para monitorar

- O conjunto de indicadores é adequado para o efeito.
- O conjunto de indicadores é revisto regularmente.
- As revisões fazem uso da experiência prática.
- A proporção de indicadores 'proativos' para 'reativos' é apropriada.
- A base para os indicadores é simples de entender.
- Os indicadores são verificados com frequência suficiente (continuamente, regularmente, de vez em quando).
- Os indicadores são diretamente significativos e não requerem interpretação adicional.
- O monitoramento é reconhecido como uma parte importante do desempenho da organização

Quadro 16: Possíveis facetas em primeiro plano do potencial para aprender

- A base para a aprendizagem (os eventos selecionados) é suficientemente ampla.
- Tentamos aprender tanto com os sucessos (coisas que dão certo) quanto com os fracassos (coisas que dão errado).
- Os relatórios de eventos são fáceis de entender.
- Os relatórios de eventos contêm detalhes e dados suficientes.
- Existem procedimentos bem definidos para coleta, análise e aprendizado de dados.
- Há treinamento formal adequado e suporte organizacional para coleta, análise e aprendizado de dados.
- A aprendizagem é contínua e não orientada por eventos.
- Os recursos destinados à investigação e aprendizagem são adequados.
- O atraso entre o relatório e os resultados da análise (lições aprendidas) é aceitável.
- Os resultados da aprendizagem são comunicados de forma eficaz em toda a organização.

As lições aprendidas são direcionadas ao nível certo (por exemplo, indivíduos, grupos, departamentos).

As “lições aprendidas” são implementadas adequadamente (como regulamentos, procedimentos, normas, treinamento, instruções, redesenho, reorganização, etc.)

Quadro 17: Possíveis facetas de primeiro plano do potencial de antecipação

Ameaças e oportunidades futuras são avaliadas com frequência suficiente.

As informações sobre eventos futuros são comunicadas ou compartilhadas dentro da organização.

A organização tem uma visão claramente formulada para o futuro.

A organização está claramente preocupada com o que pode acontecer no futuro.

A consciência de risco faz parte da cultura organizacional.

Exemplos de Perguntas de Primeiro Plano Específicas da *Arrival Manager* (AMAN)

Quadro 18: Exemplo de AMAN - facetas do potencial de resposta

As respostas preparadas são adequadas para os recursos de automação escolhidos?

Existe uma lista de “mudanças” de automação e um “conceito de operações” antes, durante e depois das mudanças?

O conceito de operações descreve adequadamente os recursos operacionais que você experimenta?

As soluções de automação foram revisadas desde o início? Se sim, o que desencadeou a revisão da mudança?

Está claro quem é responsável por manter e gerenciar a mudança na automação?

O critério de disparo ou limite para respostas são previsíveis?

As respostas da automação contribuem para um rendimento ideal na pista?

As respostas em caso de falha total/falha parcial/corrupção da automação são adequadas?

A automação responde rápido o suficiente em todos os casos?

Com que rapidez uma resposta eficaz pode ser implementada para falha total, falha parcial ou corrupção do sistema?

A automação pode sustentar consistentemente uma resposta eficaz? Ele difere para modos diferentes?

Se a automação for interrompida, fica claro quando ela voltou ao estado “normal”?

São alocados recursos suficientes para garantir a prontidão de resposta em caso de falha total/falha parcial da automação?

Quem é responsável por manter o potencial de resposta? Está documentado em algum lugar?

A prontidão para responder é mantida suficientemente bem?

É fornecido treinamento e instruções suficientes?

Quadro 19: Exemplos de AMAN relacionados ao potencial de monitoramento

Os indicadores definidos são adequados para todas as situações?

O conjunto de indicadores é revisado regularmente?

Com base em que são ou serão revistos?

Quem é responsável por manter a lista?

São suficientes os indicadores “proativos”?

Como é estabelecida a validade de um indicador (independentemente de estar “adiantado” ou “atrasado”)?

Os indicadores são usados individualmente ou em conjunto com outros indicadores?

Existe algum atraso ou atraso na obtenção de medições/indicadores aceitáveis?

As medições são feitas com frequência suficiente?

As medições são específicas do sistema ou fazem parte de uma medição mais sistêmica do Sistema ATM ABC Ao no controle terminal?

As medições/indicadores são diretamente significativas e quantos requerem algum tipo de análise?

Como os resultados são comunicados e usados?

Os efeitos medidos são transitórios ou permanentes? Atualizado de forma confiável?

O cronograma de pesquisa da OPS possui recursos adequados? Existe um relatório disponível?

Os recursos estão disponíveis a tempo para a análise e interpretação dos indicadores que não são diretamente significativos?
