



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS DE FLORIANÓPOLIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Diego Luiz de Mattos

Análise ergonômica do trabalho e dinâmica de sistemas: uma abordagem integrada para
previsão de cenários

Florianópolis

2020

Diego Luiz de Mattos

**Análise ergonômica do trabalho e dinâmica de sistemas: uma abordagem integrada para
previsão de cenários**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do título de Doutor em
Engenharia de Produção na área de Ergonomia.
Orientador: Prof. Dr. Eugenio Andrés Díaz Merino.

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

de Mattos, Diego Luiz
Análise ergonômica do trabalho e dinâmica de sistemas:
uma abordagem integrada para previsão de cenários / Diego
Luiz de Mattos ; orientador, Eugenio Andrés Díaz Merino,
2020.
219 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção. 2. Ergonomia. 3. Análise
Ergonômica do Trabalho. 4. Dinâmica de Sistemas. 5. Sistemas
Produtivos. I. Merino, Eugenio Andrés Díaz . II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós
Graduação em Engenharia de Produção. III. Título.

Diego Luiz de Mattos

**Análise ergonômica do trabalho e dinâmica de sistemas: uma abordagem integrada para
previsão de cenários**

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado por banca examinadora
composta pelos seguintes membros:

Prof. Eugenio Andrés Díaz Merino, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Fernando Antônio Forcellini, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Marcelo Gitirana Gomes Ferreira, Dr.
Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof. Luis Carlos Paschoarelli, Dr.
Universidade Estadual Paulista

Rafael Ariento Neto, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi
julgado adequado para obtenção do título de doutor em Engenharia de Produção na área de
Ergonomia.

Prof. Enzo Morosini Frazzon, Dr.
Coordenador do Programa

Prof. Eugenio Andrés Díaz Merino, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2020

RESUMO

Em face de seu incremento tecnológico, os sistemas produtivos têm se tornado, ao longo do tempo, cada vez mais complexos e dinâmicos, representando um desafio para a análise ergonômica. Por ter abordagem sistêmica, a AET viabiliza uma descrição qualitativa desses sistemas por meio da identificação dos *loops* e retroalimentações que moldam seu comportamento. Contudo, encontra limitações em compreender tal comportamento e prever cenários em horizontes temporais médio e longo. Isso implica um aumento da imprevisibilidade para a tomada de decisão. Frente ao exposto, o objetivo da pesquisa foi propor uma abordagem integrada, utilizando a AET, e, após sua fase de diagnóstico parcial, a inserção da Dinâmica de Sistemas. O software Ergo-IBV foi usado como técnica auxiliar para o diagnóstico. A Dinâmica de Sistemas atende à análise de contextos complexos, possibilitando a compreensão e a simulação do comportamento do sistema. Com isso, busca-se evoluir o diagnóstico da AET para uma percepção mais profunda da dinâmica do trabalho. Trata-se de uma pesquisa de abordagem qualitativa e quantitativa, de natureza aplicada, objetivo exploratório, cujos procedimentos técnicos definem-se como pesquisa bibliográfica e estudo de caso. A pesquisa divide-se em três etapas: (i) revisão da literatura e proposta de abordagem; (ii) aplicação prática da proposta de abordagem por meio de um estudo preliminar e um estudo de caso; (iii) avaliação da proposta de abordagem. O estudo preliminar realizado em uma indústria de componentes elétricos automotivos indicou que em uma configuração alternativa à atual (com um operador adicional) ocorre queda do indicador de afastamento do trabalho em 51,6% e aumento da produção em 92,7%. No estudo de caso realizado em uma indústria de caixas de papelão ondulado, a inserção de pausas indica que há queda do indicador de afastamento do trabalho em razão da redução da sobrecarga humana física, possibilitando à linha manter o contingente próximo da situação ideal de cinco trabalhadores. A aplicação prática permitiu aprofundar o diagnóstico dos sistemas produtivos estudados e, por meio da simulação, descrever quais subsistemas controlam seu comportamento, além de testar políticas de melhorias. A abordagem estabelece uma evolução com relação à abordagem de sistemas dinâmicos em ergonomia em virtude de possibilitar simular cenários em médio e longo prazos, aumentando a segurança na tomada de decisão para a transformação do trabalho.

Palavras-chave: Ergonomia. Análise Ergonômica do Trabalho. Dinâmica de Sistemas. Sistemas Produtivos.

ABSTRACT

Due to their technological development, production systems have become increasingly complex and dynamic over time, representing a challenge for ergonomic analysis. Because it has a systemic approach, EWA enables a qualitative description of these systems by identifying the loops and feedback that shape their behavior. However, it finds limitations in understanding such behavior and predicting scenarios over medium and long time horizons. This implies increased unpredictability for decision making. Given the above, the objective of the research is to propose an integrated approach, using EWA and, after its partial diagnosis phase, the insertion of System Dynamics. Ergo-IBV software was used as an auxiliary technique for diagnosis. System Dynamics addresses the analysis of complex contexts enabling the understanding and simulation of system behavior. This seeks to evolve the diagnosis of AET to a deeper understanding of the dynamics of work. It is a research of qualitative and quantitative approach, of applied nature, exploratory objective, whose technical procedures are defined as bibliographic research and case study. The research is divided into three stages: (i) literature review and proposed approach; (ii) practical application of the proposed approach through a preliminary study and a case study; (iii) evaluation of the proposed approach. A preliminary study conducted in an automotive electrical components industry indicated that in an alternative to the current configuration (with an additional operator) there is a 51.6% reduce in work time and a 92.7% increase in production. In a case study conducted in a corrugated box industry, the insertion of breaks indicates that there is a reduce in work leave due to the reduction of physical human overload, allowing the line to keep the contingent close to the idel situation of 5 workers. The practical application allowed to deepen the diagnosis of the studied productive systems and, through the simulation, to describe which subsystems control their behavior, besides testing improvement policies. The approach establishes an evolution regarding the dynamic systems approach in ergonomics in order to simulate scenarios in the medium and long term, increasing the security in decision making for the transformation of work.

Keywords: Ergonomics. Ergonomic Work Analysis. Systems Dynamics. Productive Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – <i>Systematic Search Flow</i> (SSF).....	35
Figura 2 – Evolução da construção do portfólio I.....	37
Figura 3 – Fases da AET.....	53
Figura 4 – Interface do software Ergo-IBV.....	57
Figura 5 – Evolução da construção do portfólio II.....	59
Figura 6 – Estágios estruturados para abordagem de Dinâmica de Sistemas.....	74
Figura 7 – Interface do software Vensim PLE X64 de Dinâmica de Sistemas.....	75
Figura 8 – Modelo Básico de Sistema de Trabalho pela ótica da Macroergonomia.....	78
Figura 9 – Linha do tempo da pesquisa.....	95
Figura 10 – Etapas da pesquisa.....	96
Figura 11 – Etapa 1 – desenvolvimento da abordagem.....	97
Figura 12 – Subfase da Análise Ergonômica do Trabalho.....	100
Figura 13 – Subfase da Dinâmica de Sistemas.....	105
Figura 14 – Exemplo de diagrama de causalidade.....	106
Figura 15 – Exemplo de diagrama de fluxo e estoque.....	106
Figura 16 – Protocolo de modelagem e calibração.....	108
Figura 17 – Etapas da aplicação prática da proposta de abordagem.....	109
Figura 18 – Etapas da AET e inserção da dinâmica de sistemas.....	113
Figura 19 – Imagem frontal do Conveyor.....	119
Figura 20 – Movimentação do operador.....	120
Figura 21 – Diagrama de Enlace Causal do contexto sistêmico.....	124
Figura 22 – Diagrama de Fluxos e Estoques.....	127
Figura 23 – Orientação visual recomendada.....	138
Figura 24 – Abastecimento da impressora.....	149
Figura 25 – Auxiliar de produção – Amarradeira.....	149
Figura 26 – Auxiliar de produção – paletização.....	150
Figura 27 – Análise das atividades de processo e set up com módulo REBA do software Ergo-IBV.....	154
Figura 28 – Contexto conceitual da análise.....	156
Figura 29 – Diagrama de fluxos e estoques.....	158
Figura 30 – Caminho da informação do ciclo dos sistemas produtivos estudados.....	177

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição das pesquisas usando o software Ergo-IBV por setor produtivo.....	59
Gráfico 2 – Frequência do uso dos módulos do software Ergo-IBV.....	63
Gráfico 3 – Taxa de incidência de doenças	130
Gráfico 4 – Taxa de produção e produção desejada.....	130
Gráfico 5 – Taxa de sobrecarga humana (<i>human overload</i>)	131
Gráfico 6 – Taxa de rendimento da linha	131
Gráfico 7 – Taxa de quantidade de trabalhadores (<i>workforce</i>)	132
Gráfico 8 – Taxa de sobrecarga humana (<i>human overload</i>) para o cenário 2.....	133
Gráfico 9 – Taxa de incidência de doenças para o cenário 2	133
Gráfico 10 – Taxa de rendimento da linha para o cenário 2.....	134
Gráfico 11 – Quantidade desejada de trabalhadores na linha.....	134
Gráfico 12 – Taxa de produção e produção desejada para o cenário 2	135
Gráfico 13 – Análise de Sensibilidade da variável “ <i>Production rate</i> ” para o cenário 2	136
Gráfico 14 – Comparativo de produção por turno para os três cenários	161
Gráfico 15 – Sobrecarga humana física.....	162
Gráfico 16 – Operadores titulares e operadores afastados	163
Gráfico 17 – Conhecimento acumulado da tarefa	164
Gráfico 18 – Tempo de ciclo	164

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos métodos em relação à sua capacidade de abordagem	32
Quadro 2 – Classificação do estudo	34
Quadro 3 – Classificação dos estudos encontrados com relação à sua forma de abordagem ..	37
Quadro 4 – Módulos de análise do software Ergo-IBV	56
Quadro 5 – Diferença entre a abordagem cartesiana e abordagem sistêmica	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEPRO	Associação Brasileira de Engenharia de Produção
ACWA	<i>Applied Cognitive Wareness Analysis</i>
AEPS	Anuário Estatístico da Previdência Social
AET	Análise Ergonômica do Trabalho
APP	Análise Prelimiinar de Perigos
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CEPSH	Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos
DORT	Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho
EMG	Eletromiografia
HFS	<i>Human Factors Society</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBV	Instituto de Biomecânica de Valência
IEA	<i>International Ergonomics Association</i>
IES	<i>International Ergonomics Society</i>
ILO	<i>International Labour Organization</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MPAS	Ministério da Previdência Social
NIOSH	<i>National Institute for Occupational Safety and Health</i>
NR	Norma Regulamentadora
OIT	Organização Internacional do Trabalho
OMS	Organização Mundial da Saúde
OCRA	<i>Occhipinti and Colombini Risk Assessment</i>
OWAS	<i>Ovako Working Analysis System</i>
PPGEP	Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção
REBA	<i>Rapid Entire Body Assessment</i>
RULA	<i>Rapid Upper Limb Assessment</i>
SELF	<i>Societéd'Ergonomie de Langue Française</i>
SSF	<i>Systematic Search Flow</i>
MMC	Manipulação Manual de Cargas
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	21
1.2	FORMALIZAÇÃO DO PROBLEMA	26
1.3	OBJETIVOS	29
1.3.1	Objetivo geral	29
1.3.2	Objetivos específicos	29
1.4	PRESSUPOSTO	30
1.5	JUSTIFICATIVA	30
1.6	CARACTERIZAÇÃO GERAL DO ESTUDO	33
1.7	DELIMITAÇÃO	34
1.8	ORIGINALIDADE E INEDITISMO	35
1.9	ADERÊNCIA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO	38
1.10	ESTRUTURA GERAL DA TESE	40
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	41
2.1	A EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS PRODUTIVOS	41
2.2	ERGONOMIA	45
2.2.1	Análise Ergonômica do Trabalho (AET)	51
2.2.2	Software Ergo-IBV	56
2.2.2.1	<i>Ergo-IBV – Panorama geral</i>	57
2.3	PENSAMENTO SISTÊMICO: CONCEITOS E DEFINIÇÕES	64
2.3.1	Tipos de sistemas	66
2.3.1.1	<i>Sistemas simples</i>	67
2.3.1.2	<i>Sistemas complicados</i>	68
2.3.1.3	<i>Sistemas complexos</i>	68
2.3.2	Dinâmica de Sistemas	70
2.3.3	Ergonomia e Pensamento Sistêmico	76
2.3.3.1	<i>Ergonomia e Sistemas Dinâmicos</i>	80
2.3.3.2	<i>Ergonomia e Dinâmica de Sistemas</i>	84
2.4	SÍNTESE DA FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	90
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	95
3.1	MATERIAIS E MÉTODOS	96
4	PESQUISA APLICADA	111

4.1	A PROPOSTA DE ABORDAGEM	111
4.1.1	Premissas para proposta de abordagem	111
4.1.2	Representação gráfica da proposta de abordagem	112
4.2	APLICAÇÃO PRÁTICA	114
4.2.1	Estudo preliminar: o caso da indústria de componentes elétricos automotivos	115
4.2.2	Problema específico do estudo preliminar	116
4.2.3	Resultados do estudo preliminar	116
4.2.3.1	<i>Análise ergonômica do trabalho</i>	117
4.2.3.1	<i>Modelagem e simulação com uso da Dinâmica de Sistemas</i>	123
4.2.3.2	<i>Recomendações para o estudo preliminar</i>	137
4.2.4	Discussão acerca do estudo preliminar	138
4.2.5	Conclusões acerca do estudo preliminar	141
4.2.6	Estudo de caso: indústria de caixas de papelão ondulado	142
4.2.7	Problema específico do estudo de caso	144
4.2.8	Resultados do estudo de caso	145
4.2.8.1	<i>Análise Ergonômica do Trabalho</i>	145
4.2.8.2	<i>Modelagem e simulação com uso da dinâmica de sistemas</i>	155
4.2.8.3	<i>Recomendações</i>	164
4.2.9	Discussão para o estudo de caso	165
4.2.10	Conclusões acerca do estudo de caso	170
4.3	ANÁLISE DA PROPOSTA DE ABORDAGEM E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	171
4.3.1	Análise das fases da proposta de abordagem	171
4.3.2	Análise do alcance da proposta de abordagem	173
4.3.3	Análise da aplicação prática da proposta de abordagem	176
5	CONCLUSÕES	179
5.1	CONCLUSÕES GERAIS	179
5.2	PERCEPÇÕES DO PESQUISADOR	182
5.3	FUTUROS ESTUDOS	184
	REFERÊNCIAS	187
	ANEXO A – ITEM 17.1 E 17.2 DA NORMA REGULAMENTADORA 17	203
	APÊNDICE A – ARTIGO PUBLICADO NO PERIÓDICO <i>APPLIED</i> <i>ERGONOMICS</i>	205

1 INTRODUÇÃO

A seção introdutória visa contextualizar o leitor acerca dos assuntos relevantes para a construção da pesquisa. Serão abordados a evolução tecnológica e de gestão dos sistemas produtivos desde a Revolução Industrial, o advento da Teoria Geral de Sistemas e a mudança de paradigma por ela imposta na ciência e na forma de compreender sistemas produtivos, o surgimento da Ergonomia como disciplina científica e a Análise Ergonômica do Trabalho (AET), a Dinâmica de Sistemas, questões que permeiam a atuação da Ergonomia em sistemas complexos e não lineares, e as lacunas de conhecimento identificadas com relação ao tema. Também será apresentado o problema que guia a pesquisa, bem como os objetivos gerais e específicos definidos, sua justificativa, caracterização, delimitação e originalidade e ineditismo. Por fim, estabelece-se a conexão da pesquisa com o Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e define-se sua estrutura documental.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Os sistemas produtivos e sua gestão se desenvolveram visando maior eficiência e lucro de acordo com as circunstâncias históricas e características de cada época (DELWING, 2007). A Revolução Industrial, no início do século XX, transformou a produção de maneira crítica. O processo artesanal deu lugar à produção em massa. As organizações passaram a racionalizar a produção em busca de eficiência, por meio de um trabalho fragmentado e individualizado. Isso resultou em significativo aumento no volume produtivo (BITTENCOURT; ALVES; AREZES, 2011).

O estudo de Frederick Winslow Taylor (1856-1915), de igual forma, impulsionou avanços significativos dos processos produtivos em termos de eficiência por meio da organização do trabalho (DELWING, 2007).

Ainda que diversas formas de organização do trabalho tenham se desenvolvido, os princípios de Taylor tornaram-se referência de produtividade em quase todo o século XX. O modelo taylorista, implantado por Ford na concepção das linhas de produção (também chamado taylorista/fordista), foi, de fato, importante contribuinte para a expansão produtiva em diversos países (CAMPOS, 2000). Para tanto, a chamada Teoria da Administração Científica propôs métodos de racionalização do trabalho, cujas bases emergiam da rigidez hierárquica e

fragmentação das tarefas, entendendo a organização como um sistema fechado (sem interação com o ambiente) (CAMPOS, 2000; MATOS; PIRES, 2006).

Contudo, o desenvolvimento de novas formas de compreender organizações e as dificuldades nas relações de trabalho foram fatores que impactaram sobre o paradigma taylorista vigente na metade do século XX.

O advento da Teoria Geral de Sistemas, de Ludwig Von Bertalanffy (1925), ofereceu uma nova perspectiva sobre a percepção instaurada pela administração científica com relação a um sistema produtivo. Bertalanffy (1975) define sistema como um conjunto de elementos que se relacionam entre si e apresenta-o como organismo cujo todo é maior que a soma das partes.

Segundo Campos (2000), o estabelecimento da Teoria de Sistemas impactou na compreensão dos sistemas produtivos em razão de propor a organização como um sistema aberto, que interage com o ambiente. De acordo com o autor, isso serviu de base para o equilíbrio entre a organização e seu entorno, contribuindo para a quebra do paradigma taylorista.

Após a formalização da Teoria Geral de Sistemas, ocorreu uma mudança de paradigma, não apenas na maneira de compreender uma organização produtiva, mas na abordagem científica de forma geral, passando de uma visão fragmentada dos fenômenos para a busca por um entendimento mais amplo de suas relações. Essa nova forma de pensamento e abordagem contempla a noção intrínseca de complexidade¹ e instabilidade (TABAH; GERA, 2011).

A evolução dos sistemas produtivos culminou em maior eficiência dos processos e aumento da produtividade. Isso se refletiu em maior competitividade do mercado. No entanto, se de um lado há uma indústria cada vez mais competitiva, visando produzir e gerar lucro, de outro, há o ser humano, elemento importante para qualquer organização. Tanto na indústria de bens de consumo quanto na indústria de base, indústria intermediária, de ponta e setores de serviços, existe a necessidade do ser humano para desempenhar a efetivação de seus processos produtivos.

Destaca-se nesse ponto, portanto, que o surgimento de conflitos nas relações trabalhistas na década de 1950 também influenciou a quebra do paradigma taylorista e os preceitos da administração científica. As extensas jornadas de trabalho, bem como o esvaziamento do conteúdo da atividade em face da subdivisão e especialização da tarefa contribuíram para a

¹ Complexidade, nesse contexto, refere-se a sistemas complexos. Para Heylighen (1988), um sistema complexo se caracteriza por quantidade, imprevisibilidade e dificuldade e possui elementos diferentes e duas ou mais partes, as quais são conectadas ou entrelaçadas, tendo comportamento imprevisível.

deterioração da qualidade de vida do trabalhador e o aumento das doenças ocupacionais (CAMPOS, 2000).

Diante disso, buscar melhorias das condições de trabalho torna-se tão importante quanto buscar eficiência produtiva. Apesar de tradicionalmente aparentarem distinção entre si, as dimensões negócio/productividade e trabalhador são variáveis reciprocamente dependentes no que tange à rentabilidade em médio e longo prazos de uma corporação (SHOAF et al., 2004).

A Ergonomia (ou Fatores Humanos) surge nesse contexto como uma disciplina que visa estudar efetivamente os aspectos humanos no trabalho. “A ergonomia é uma disciplina científica relacionada ao entendimento das interações entre os seres humanos e outros elementos ou sistemas, e à aplicação de teorias, princípios, dados e métodos a projetos a fim de otimizar o bem-estar humano e o desempenho global do sistema.” (INTERNATIONAL ERGONOMICS ASSOCIATION, 2018).

Sua oficialização data de 12 de julho de 1949. Foi nesse dia que, na Inglaterra, um grupo de cientistas e pesquisadores reuniu-se com a intenção de formalizar a existência desse novo ramo de aplicação interdisciplinar de ciência, que assim foi denominada (do grego: *ergon* = trabalho e *nomos* = regras) (MURREL, 1969).

A disciplina destacou-se conforme ocorreu a evolução e o crescimento dos sistemas produtivos e, principalmente, quando começaram a surgir os primeiros registros das doenças ocupacionais e da incompatibilidade de alguns desses sistemas com o homem, fato esse que gerava afastamento, desgaste ao trabalhador, perdas produtivas e sobrecarga. Desde a Revolução Industrial até os dias atuais, ocorreu um aumento significativo no número de registros dessas doenças e acidentes. No último relatório da Organização Internacional do Trabalho (OIT) (INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION, 2018), estimou-se que 2,34 milhões de pessoas morrem todos os anos em decorrência de acidentes e doenças relacionados ao trabalho.

Em suma, a ergonomia surge como uma disciplina sistêmica, abordando sistemas produtivos diversos (de simples a complexos), os quais representam um desafio aos pesquisadores e profissionais da área (LEPLAT, 1996). O objetivo da abordagem sistêmica em ergonomia é aprimorar o desempenho do sistema em estudo, porém primando, sobretudo, pela segurança e o bem-estar das pessoas que o operam ou com ele interagem (WILSON, 2014).

Leplat (1996) destaca a importância da compreensão sistêmica e faz uma proposta conceitual dos sistemas de atuação da ergonomia como sendo sistemas simples, complicados e complexos. Tais conceitos foram sintetizados posteriormente:

Um sistema simples seria perfeitamente descritível em termos de finalidade, fronteiras, entradas, saídas e relação entre componentes ou subsistemas. Um computador no plano do *hardware* pode ser perfeitamente descrito como um sistema simples, e é como é apresentada sua arquitetura física. Um sistema complicado seria de natureza simples, porém integrado por um grande número de combinações internas e externas, por elevado grau de subdivisões em subsistemas e componentes. Um avião de grande porte pode ser descrito como um sistema complicado. Já um sistema complexo é uma organização para a qual é difícil senão impossível restringir sua descrição a um limitado número de parâmetros ou variáveis características sem perder suas propriedades essenciais. (VIDAL; CARVÃO; BONFATTI, 2011, p. 42).

Ainda de acordo com os autores, um sistema passa a ser não linear quando suas interações internas deixam de ser lineares (em que cada input corresponde a somente um output da mesma natureza). Nesse ponto o sistema começa a apresentar comportamentos complexos, como imprevisibilidade e eclosões (*emergences*) (VIDAL; CARVÃO; BONFATTI, 2011).

Para transformar o trabalho, a Ergonomia propõe métodos e ferramentas cuja função pode variar de acordo com a demanda apresentada ao profissional/pesquisador. Dentre eles, a Análise Ergonômica do Trabalho (GUÉRIN et al., 2001) oferece um método que guia sua compreensão sistêmica. A Norma Regulamentadora NR17, em vigor atualmente no Brasil, estabelece, inclusive, sua efetivação por via obrigatória nas organizações, a fim de subsidiar entendimento e melhorias das situações de trabalho (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2002). Ainda, como apoio da AET, ferramentas de análise de riscos ergonômicos são utilizados para o diagnóstico acerca de situações específicas de trabalho. O software Ergo-IBV, por exemplo, é uma referência de um pacote de ferramentas de análise ergonômica que serve para examinar riscos variados, e será detalhado posteriormente nesse documento em função de seu uso.

Frente à mudança de paradigma de uma visão fragmentada para uma visão global, métodos e ferramentas de abordagem sistêmica surgiram, sob influência das teorias de Bertalanffy e da cibernética.² A Dinâmica de Sistemas foi desenvolvida por Jay W. Forrester, no *Massachusetts Institute of Technology*, no ano de 1950, para abordar problemas inerentes a sistemas dinâmicos, partindo do pressuposto de que a estrutura do sistema gera seu comportamento. Por meio da modelagem, que é, basicamente, um escopo da estrutura de relações causalísticas entre os elementos de um sistema e a simulação do comportamento dessas estruturas em um horizonte de tempo, a Dinâmica de Sistemas busca compreender o

² Segundo Kim (2004), a teoria da cibernética foi desenvolvida em 1948 pelo matemático Norbert Wiener e colaboradores. A ideia fundamental é a de que máquinas e seres vivos possuem funções de processamento de informações e controle semelhantes, sendo assim, equivalentes e redutíveis aos mesmos modelos e mesmas leis matemáticas.

comportamento e a influência dos *loops*³ que formam os subsistemas, além de testar decisões e corrigir rumos de forma antecipada nos mais diversos contextos. Em suma, busca traçar o comportamento dos elementos do sistema e como se influenciam para simular cenários, sejam eles favoráveis ou não para esse sistema.

Como uma ferramenta de modelagem de sistemas dinâmicos, a Dinâmica de Sistemas oferece uma alternativa para complementar os métodos de modelagem estática e/ou qualitativa, pois atende a análise de contextos complexos, mesmo com fatores abstratos.

Para tanto, Coyle (1996) destaca que, ao analisar um sistema, a Dinâmica de Sistemas tratará de:

- a) analisar como as informações, ações e componentes interagem para gerar um comportamento dinâmico;
- b) diagnosticar as causas dos comportamentos não desejados;
- c) tratar os feedbacks de maneira a ajustar o comportamento para obter o comportamento desejado.

O autor ainda ressalta que, por sua capacidade de compreender sistemas e prever cenários, a Dinâmica de Sistemas tem sido utilizada em diversas áreas de estudo, como na economia, gestão organizacional e questões ambientais.

O desenvolvimento dos sistemas produtivos, pontualmente descrito nesta seção, é a base para compreender o atual contexto no qual se insere a atividade da ergonomia, levando em conta sua abordagem sistêmica e a complexidade dos sistemas em que opera.

Um sistema é composto por diversos elementos, cuja interconectividade estabelece interdependência entre esses variados elementos. Cabe destacar que a evolução dos sistemas produtivos imposto pelo crescente nível tecnológico culmina em ambientes cada vez mais dinâmicos (SALMON et al., 2017). Nesse sentido, é necessário que a ação ergonômica leve em conta os reflexos sistêmicos da interação dos elementos desses sistemas, que podem ser não lineares⁴ (WALKER et al., 2017; SALMON et al., 2017).

³ Um *loop* é uma representação gráfica de um conjunto de elementos interligados. Essa representação é composta por setas de ligação em formato circular de causas e efeitos que define que a perturbação de um elemento em outro implica uma variação em si próprio pelo mecanismo de resposta ou retroalimentação. *Loops* positivos são chamados de *loops* de reforço, enquanto *loops* negativos são chamados de *loops* de equilíbrio, contrariedade ou balanceamento (BASTOS, 2003).

⁴ Um sistema não linear se caracteriza por uma quantidade tal de retroalimentações a ponto de dificultar a previsibilidade de seu comportamento, adicionando-lhe forte componente de imprecisão e incerteza. Isso implica também em dificuldades de descrevê-lo analiticamente (FORRESTER, 1968).

Em resumo, a ergonomia surge como uma disciplina sistêmica, paralelamente ao incremento tecnológico e de gestão dos sistemas produtivos. Utiliza-se de métodos e ferramentas como a Análise Ergonômica do Trabalho (AET) para compreender e transformar o trabalho. Contudo, sistemas dinâmicos⁵ com comportamentos não lineares têm se apresentado como um desafio para profissionais e pesquisadores da área de ergonomia (STANTON; SALMON; RAFFERTY, 2013; WILSON, 2014; KARSH; WATERSON; HOLDEN, 2014; WALKER et al., 2017; SALMON et al., 2017; GUASTELLO, 2017). As afirmações expostas tangenciam a definição do problema da presente pesquisa, descrito na próxima subseção.

1.2 FORMALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Autores como Stanton, Salmon e Rafferty (2013), Wilson (2014), Karsh, Waterson e Holden (2014), Walker et al. (2017), Salmon et al. (2017), Guastello (2017) e Hancock (2019) têm discutido acerca das capacidades, potencialidades e limitações dos métodos da ergonomia e sua relação com a complexidade e dinâmica dos sistemas produtivos atuais.

De acordo com Moray (1994), Walker et al. (2017) e Guastello (2017), a ergonomia atua em contextos de sistemas que se tornam, a cada dia, mais complexos, em razão do incremento tecnológico industrial. Diante disso, busca entendê-lo e solucionar possíveis problemas com relação ao trabalho humano. Existe, portanto, a necessidade de estabelecer suas fronteiras e sua atuação fazendo uso de técnicas e ferramentas de abordagem sistêmica que prevejam e modelem seu comportamento.

A dinâmica entre as interações do homem e seu ambiente de trabalho é relevante para entender os impactos no trabalhador (DIANAT; VAHEDI; DEHNAVI 2016). Sistemas produtivos implicam sistemas complexos que determinam comportamentos não lineares. De acordo com Parsons (2000) e Dianat, Vahedi e Dehnavi (2016), a dinâmica entre o trabalhador e o ambiente de trabalho pode ocasionar situações que afetam direta ou indiretamente sua saúde e a produtividade.

A não linearidade implícita no comportamento desses sistemas resulta em dificuldades de prever seu comportamento futuro (PERROW, 1984; SAURIN; GONZÁLEZ, 2013). Na prática, a tomada de decisão acerca das intervenções ergonômicas nesses sistemas está atrelada à incerteza em médio e longo prazos, que pode culminar em efeitos contraintuitivos⁶ e no

⁵ De acordo com Ogata (1998) um sistema dinâmico caracteriza-se por apresentar saídas atuais dependentes das entradas antecedentes.

⁶ Efeitos contraintuitivos são comportamentos não esperados, típicos de sistemas não lineares, que podem surgir ao não se considerar a complexidade na modelagem, principalmente em função dos mecanismos de

insucesso dessas intervenções (HEYLIGHEN; CILLIERS; GERSHENSON, 2007; CILLIERS, 1999; PERROW, 1984; HOLLNAGEL; WOODS, 2005; SAURIN; GONZÁLEZ, 2013).

Para Vidal, Carvão e Bonfatti (2011), os esquemas analíticos da ergonomia apresentam oportunidades de aprimoramento em razão de determinadas limitações na função de prever o comportamento futuro de sistemas complexos. Isso porque seu comportamento está constantemente mudando, o que dificulta descrever suas transições. Também afirmam que não são sistemas passivos e que cada alteração gera, potencialmente, comportamentos diferentes, caracterizando um cenário de incerteza.

Uma forma usual de abordar sistemas para solucionar problemas é a modelagem, que é considerada a forma mais objetiva para se estudar o comportamento de sistemas (MORAES; SOARES, 2005; SILVA, 2005), visto que modelo é uma representação simplificada da realidade (MONTMOLLIN, 1990). A ergonomia procura modelar a atividade de trabalho para atingir seu objetivo de transformação da situação (VIDAL; CARVÃO; BONFATTI, 2011). Para os autores, um importante aspecto da ação ergonômica é, pontualmente, a modelagem em contextos complexos. “Para a ergonomia interessa caracterizar um sistema complexo pelas propriedades que possam nos fazer compreender seu funcionamento;” (VIDAL; CARVÃO; BONFATTI, 2011, p. 42).

Também se ressalta que o estudo de sistemas dinâmicos não lineares apresenta duas distintas abordagens: qualitativa (objetiva compreender o comportamento do sistema de maneira geral); e quantitativa (busca compreender o comportamento do sistema ao longo do tempo) (SAVI, 2006). Determinar, teoricamente, a evolução temporal das características de um sistema é importante para seu entendimento, porém pode ser dificultado pela limitação no que tange à capacidade humana de antever efeitos não lineares em sistemas complexos. Também é importante considerar que testes experimentais podem ser caros e demorados (MONTEIRO, 2006).

Para Guérin (2001), a Análise Ergonômica do Trabalho (AET) é um método eminentemente qualitativo, utilizado por profissionais e pesquisadores da área de ergonomia, que se apoia na compreensão da atividade real, nas características interindividuais dos trabalhadores e na sua relação com o trabalho, com o objetivo de transformá-lo. Dada a

retroalimentação. Chain (2011) cita o exemplo de autoestradas americanas nas décadas de 1950 e 1960: Em Boston, as autoestradas foram construídas pensando em valorizar as áreas mais distantes do centro, porém, como grande parte da população necessita se deslocar até as regiões centrais a trabalho utilizando essas vias, os engarrafamentos e a poluição do ar aumentaram consideravelmente em um efeito contrário ao esperado (contraintuitivo).

complexidade da relação de interação do homem com os sistemas produtivos, ela surge da necessidade de compreender tal relação. A AET propõe uma modelagem de um sistema produtivo baseado em observações do analista e da narrativa dos atores. A finalidade desse modelo fornecido pelo método pode se aproximar dos modelos de otimização, cujas saídas indicam como atingir um objetivo concreto. Para Chain (2011), esse tipo de modelo indica o que deve ser feito para se obter o melhor resultado possível em uma relação de custo/benefício. Modelos de otimização, apesar de úteis, podem apresentar algumas limitações, principalmente no que diz respeito à previsão do comportamento do sistema em horizontes de tempo em longo e médio prazos. Isso pode ocorrer em decorrência da não linearidade do comportamento e da imprevisibilidade das retroalimentações (CHAIN, 2011).

A AET, por ter caráter qualitativo, pode fornecer um diagnóstico sistêmico por possibilitar identificar (utilizando observações diretas e análise da narrativa dos atores envolvidos no trabalho) os *loops* e *feedbacks* que ocorrem em um sistema produtivo e, com isso, determinar os acontecimentos pontuais de determinada situação de trabalho. Isso fornece informações concisas e confiáveis para a tomada de decisão acerca das intervenções de ergonomia em curto prazo. Contudo, apresenta oportunidades de aprimoramento quando se trata de relacionar a influência desses *loops* (subsistemas) e compreender, quantitativamente, como esses elementos (que formam os subsistemas) se comportam em um horizonte de tempo maior, indicando quais subsistemas governam o sistema. Isso ocorre em decorrência da dificuldade de prever comportamentos não lineares em sistemas complexos. Em face dessa dificuldade ocorre, em médio e longo prazos, uma redução na confiabilidade para a tomada de decisão.

Surge dessa situação a possibilidade de incrementar as abordagens qualitativas com métodos quantitativos sistêmicos que auxiliem na análise e previsão do comportamento desses sistemas em médio e longo prazos.

Em resumo, o comportamento não linear dos sistemas complexos onde atua a ergonomia dificulta sua previsibilidade em médio e longo prazos. Com isso, percebem-se dificuldades em modelar, principalmente de maneira quantitativa, o comportamento dinâmico de um sistema complexo em horizontes temporais. Isso culmina em um cenário de menor confiabilidade para a tomada de decisão acerca das intervenções ergonômicas e um possível risco de insucesso das transformações propostas. Diante disso, a problemática de pesquisa define-se em como prever, quantitativamente, o comportamento de sistemas dinâmicos e não lineares onde atua a ergonomia em médio e longo prazos, de forma a aumentar a confiabilidade na tomada de decisão acerca das intervenções ergonômicas.

Em resposta ao problema levantado, apresentam-se os objetivos da pesquisa.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Integrar a Análise Ergonômica do Trabalho e a Dinâmica de Sistemas em uma proposta de abordagem visando maior previsibilidade e confiabilidade na tomada de decisão com relação a intervenções ergonômicas que são, majoritariamente, qualitativas, por meio da previsão quantitativa de cenários.

Após apresentar a abordagem sistematizada, realizou-se sua aplicação prática em dois casos reais, sendo um estudo preliminar e um estudo de caso, em setores produtivos. Posteriormente, uma avaliação qualitativa acerca da abordagem foi realizada.

1.3.2 Objetivos específicos

Para efetivar o objetivo principal foram estabelecidos objetivos específicos. Dessa forma, os objetivos específicos deste estudo se constituem em:

- a) utilizar a AET para a compreensão qualitativa do trabalho e, assim, descrever os principais subsistemas atuantes nas questões ergonômicas dos sistemas produtivos em um estudo preliminar e um estudo de caso;
- b) quantificar os riscos físicos ergonômicos do trabalho em análise no estudo;
- c) descrever conceitualmente os sistemas a serem analisados utilizando o diagrama de enlace causal, determinando fatores de influência e retroalimentação com base nas informações levantadas pela AET;
- d) construir um modelo de simulação computacional para cada situação de forma a permitir a compreensão do comportamento do sistema em análise de maneira quantitativa e em determinados horizontes temporais, como apoio à tomada de decisão.
- e) avaliar comparativamente o modelo de abordagem proposto com outros métodos e abordagens utilizados e relacionar as saídas das simulações com as teorias e estudos vigentes.

1.4 PRESSUPOSTO

O desenvolvimento desta pesquisa pressupõe que a integração da Análise Ergonômica do Trabalho e Dinâmica de Sistemas auxilie a aumentar a previsibilidade do comportamento de sistemas produtivos em horizontes temporais maiores (ou seja, em situações em que o impacto não ocorre imediatamente após a intervenção) no tocante às questões ergonômicas, cujo impacto ocorre tanto na saúde do trabalhador quanto na performance produtiva. A compreensão sistêmica qualitativa do trabalho provida pela AET em conjunto com a análise quantitativa e a previsão de cenários fornecida pela Dinâmica de Sistemas atuando conjuntamente pode refletir maior confiabilidade na tomada de decisões da ergonomia em médio e longo prazos.

1.5 JUSTIFICATIVA

Com os avanços tecnológicos da indústria, a ergonomia depara-se com ambientes e sistemas cada vez mais complexos, com comportamentos não lineares (WOODS; DEKKER, 2000; DEKKER; HANCOCK; WILKIN, 2013; GROTE; WEYER; STANTON, 2014; WALKER et al., 2017; SALMON et al., 2017). Salmon et al. (2017) afirmam que a complexidade está implícita nos sistemas de trabalho desde o início da própria disciplina, porém o crescente nível tecnológico começa a demandar cada vez mais métodos e abordagens que permitam compreender e prever o comportamento dos sistemas de atuação da ergonomia.

Além disso, diversos autores têm discutido a importância de estudos que aprimorem diagnósticos sistêmicos e métodos quantitativos de previsão de cenários (WILSON, 2014; KARSH; WATERSON; HOLDEN, 2014; SALMON et al., 2017; WALKER et al., 2017).

Salmon et al. (2017) relatam que, apesar do viés sistêmico, há um *gap*⁷ entre os problemas apresentados por sistemas cada vez mais dinâmicos e de difícil previsibilidade e os métodos e ferramentas de previsão da disciplina, uma vez que o diagnóstico ergonômico se apoia, de maneira geral, em análises qualitativas. Para os autores, é importante buscar reduzir a distância entre o estado atual e um estado desejável (com maior capacidade de prever cenários sistêmicos). Isso pode encontrar ponto de partida nos métodos e ferramentas já existentes, desde que sejam integrados a outros métodos e ferramentas que ofereçam meios para tanto.

⁷ *Gap* é um termo em inglês cujo significado pode ser definido com distanciamento, lacuna, separação. No caso em questão, *Gap* relaciona-se à distância entre um estado atual e um estado desejado.

Walker et al. (2017) consideram a necessidade de métodos de ergonomia incrementarem suas ferramentas para análise de sistemas cada vez mais complexos, de forma a aumentar o alcance da análise e previsão para horizontes de tempo maiores e facilitar a tomada de decisão.

Abordagens reducionistas que se baseiam em separar o sistema para compreender os componentes e, em seguida, remontar os componentes para reconectar o sistema (a partir de uma suposição tácita de que o todo não pode ser maior do que a soma de suas partes) podem dificultar a detecção de todas as nuances do comportamento desse sistema, principalmente quando se trata de cenários futuros. Abordagens sistêmicas e dinâmicas, em contrapartida, oferecem um meio pelo qual se abre a possibilidade de previsões que considerem os reais comportamentos de um ambiente de complexidade e maior controlabilidade (SALMON, 2016).

O impacto da dificuldade em compreender o comportamento não linear desses sistemas de trabalho recai diretamente sobre a emergência de efeitos contraintuitivos decorrentes de decisões cujo resultado é diferente do objetivo traçado inicialmente. Tais efeitos podem impactar, por exemplo, em maior sobrecarga humana física ao trabalhador e déficits de produtividade (MATTOS et al., 2019). Em sistemas com esse nível de complexidade e ambiente de incerteza, medidas que resultem em efeitos contraintuitivos podem desequilibrar a dinâmica entre o trabalhador e o ambiente de trabalho e, assim, afetar sua saúde e a performance da organização (PARSONS, 2000; DIANAT; VAHEDI; DEHNAVI, 2016).

Stanton et al. (2016) compilaram em sua obra 84 métodos e ferramentas de ergonomia dentre os mais utilizados por profissionais e pesquisadores. Para reforçar a justificativa da pesquisa, distribuíram-se esses métodos e ferramentas em um quadro conceitual que fornece um panorama acerca de sua capacidade e alcance. Ressalta-se que a escala construída não visa estabelecer diferenças hierárquicas ou atratividade a determinado método, mas, sim, possibilitar uma visualização do arcabouço metodológico desenvolvido ou utilizado pela disciplina conforme os autores. Para tanto, os métodos e ferramentas foram classificados em quatro subgrupos:

- a) G1: não consideram todos os elementos do sistema (fatores exclusivamente biomecânicos, fisiológicos ou ambientais);
- b) G2: abordam o sistema sem previsão de cenários (analisam diversos elementos dentro de um sistema);
- c) G3: abordam o sistema com previsão de cenários restritos (horizontes temporais curtos, situações específicas);

- d) G4: abordam o sistema com previsão de cenários em horizontes temporais maiores e de forma quantitativa.

A classificação dos métodos e ferramentas, conforme descrito, encontra-se no Quadro 1, a seguir:

Quadro 1 – Classificação dos métodos em relação à sua capacidade de abordagem

Não considera todos os elementos do sistema (fatores exclusivamente biomecânicos, fisiológicos ou ambientais)	Abordagem sistêmica sem previsão de cenários (analisam diversos elementos dentro de um sistema)	Abordagem sistêmica com previsão de cenários limitados (horizontes temporais curtos, qualitativo)	Abordagem sistêmica com previsão de cenários em horizontes temporais maiores e de forma quantitativa
G1 - 38 métodos/ferramentas	G2 - 34 Métodos/ferramentas	G3 - 09 métodos/ferramentas	<u>L1 - 00</u> <u>métodos/ferramentas</u>

Fonte: o autor, com base em Stanton et al. (2016).

Na revisão dos métodos compilados por Stanton et al. (2016), verifica-se que, de forma geral, a ergonomia dispõe de métodos sistêmicos que fornecem previsões de cenários com restrições a prazos curtos e aspectos específicos do sistema. Contudo, aponta, também, para limitações desses métodos e ferramentas em prever cenários sistêmicos quantitativos em horizontes temporais de longo e médio prazos.

Os métodos classificados como G1, em suma, têm capacidade para analisar aspectos ambientais e biomecânicos do trabalhador em atividade. São exemplos desses métodos, protocolos e ferramentas: Avaliação Rápida para Membros Superiores (RULA), Avaliação Rápida do Corpo Inteiro (REBA) Eletromiografia (EMG), Mensuração Eletrotérmica, Índices de Conforto Térmico, entre outros.

Os métodos classificados como G2 apresentam capacidade sistêmica, mas limitações ao prever cenários. São exemplos desses métodos: Análise Aplicada de Trabalho Cognitivo, Análise de Caminho Crítico para Atividade Multimodal, Grupos Focais, Abordagem ao Treinamento Baseado em Eventos e Ambientes Sintéticos de Tarefa para Equipes (VANT-AST).

Os métodos classificados como G3 apresentam capacidade sistêmica com capacidade de prever cenários, porém restritos a horizontes temporais curtos e limitados a aspectos específicos da análise. Também não possuem capacidade quantitativa. São exemplos desses métodos: Abordagem Sistemática de Redução e Previsão do Erro Humano, Medição de

Consciência Situacional, Análise *HITOP*TM, *TOP-Modeler*[®], Antropotecnologia e Análise Macroergonômica.

Nenhum método, dentre os estudados, possui capacidade para prever, em médio e longo prazos, o comportamento de sistemas. A lacuna, representada pela classificação L1, indica a fronteira do conhecimento acerca da questão levantada pela pesquisa, na qual se pretende inserir o objeto de estudo desta tese.

1.6 CARACTERIZAÇÃO GERAL DO ESTUDO

Este estudo, do ponto de vista de seus objetivos, caracteriza-se como uma pesquisa exploratória. Conforme aponta Vieira (2002), esse tipo de pesquisa busca familiarizar o pesquisador com o problema em questão; o autor ainda complementa que essa atitude permite avaliar problemas complexos, tornando-os mais simples e explícitos, bem como levantando hipóteses mais apropriadas. Para Gil (1991), esse tipo de pesquisa envolve levantamento bibliográfico, entrevistas e análise de exemplos que estimulem a compreensão, e assume, de maneira geral, as formas de Pesquisas Bibliográficas e Estudos de Caso.

Quanto à sua natureza, trata-se de uma Pesquisa Aplicada a qual, segundo Silva e Menezes (2005, p. 20), “objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática e dirigida à solução de problemas específicos.”

Quanto à forma de abordagem do estudo, trata-se de uma pesquisa qualitativa (em razão da utilização da AET e dos diagramas de enlace causal da Dinâmica de Sistemas) e quantitativa (em virtude da modelagem matemática provida pela Dinâmica de Sistemas):

- a) qualitativa: de acordo com Silva e Menezes (2005, p. 20), “[...] há uma relação dinâmica entre o mundo real e o sujeito, isto é, um vínculo indissociável entre o mundo objetivo e a subjetividade do sujeito que não pode ser traduzido em números”;
- b) quantitativa: de acordo com Silva e Menezes (2005), busca traduzir informações em números para análise.

No tocante aos procedimentos técnicos, esta pesquisa caracteriza-se como (GIL, 1991; SILVA; MENEZES, 2005) bibliográfica e estudo de caso.

Conforme Gil (1991), a pesquisa bibliográfica é um tipo de pesquisa elaborado a partir de conteúdo já publicado, constituído especialmente de livros, artigos de periódicos e da

internet. Além disso, envolve a coleta de material bibliográfico para uma revisão literária acerca dos temas envolvidos. Foram pesquisados os termos: Ergonomia, Análise Ergonômica do Trabalho, *Human Factors*, Ferramentas de Avaliação Ergonômica, Ergo-IBV, Taylorismo, Fordismo, Produção Enxuta, Teoria Geral de Sistemas, Visão Sistêmica e Dinâmica de Sistemas.

Já o estudo de caso se refere ao estudo aprofundado e exaustivo de um ou poucos objetos de forma que se permita o seu amplo e detalhado conhecimento.

Com relação aos resultados, trata-se de uma pesquisa aplicada a qual, segundo Silva e Menezes (2005), tem por objetivo gerar conhecimentos voltados à solução de problemas práticos.

O objeto de estudo de tese define-se, pontualmente, como compreender as potencialidades e limitações da proposta de abordagem integrada entre AET e Dinâmica de Sistemas na tratativa de problemas ergonômicos e impactos no ser humano e na performance produtiva ambientados em sistemas complexos.

A classificação do estudo e o valor agregado por cada fase seguem no Quadro 2:

Quadro 2 – Classificação do estudo

	Aspecto	Classificação	
(a)	Natureza do objeto	Exploratória	Pesquisa bibliográfica e estudo de caso.
(b)	Natureza	Aplicada	Orienta melhorias das situações de trabalho e prescreve possíveis cenários futuros.
(c)	Abordagem do problema	Qualitativa e quantitativa	Quantitativa quando determina e relaciona os principais fatores do sistema e índice de riscos ergonômicos e o uso de técnicas qualitativas relacionadas à AET, e quantitativa na etapa final de tratamento do problema.
(d)	Procedimentos técnicos	Pesquisa bibliográfica e estudo de caso	Pesquisa bibliográfica, pois é elaborada a partir de algum conteúdo anteriormente publicado, e estudo de caso, visto que denotará estudo profundo de uma situação real para detalhar conhecimentos acerca do fenômeno.
(e)	Resultados	Aplicada	Objetiva gerar conhecimentos voltados à solução prática de problemas.

Fonte: o autor.

1.7 DELIMITAÇÃO

Dentro do contexto referente ao tema ergonomia, a presente pesquisa se delimita ao estudo da integração da AET à Dinâmica de Sistemas, temas centrais da proposta. Os resultados serão analisados sob a perspectiva da ergonomia e, em maior amplitude, da Engenharia de Produção.

Com relação à delimitação espacial, a presente pesquisa foi desenvolvida em duas organizações produtivas localizadas no Estado de Santa Catarina, sendo a primeira um estudo preliminar, e a segunda, um estudo de caso. Tanto os resultados obtidos com a AET quanto com os cenários previstos com a Dinâmica de Sistemas descrevem apenas os sistemas produtivos sob análise, porém podem fornecer dados para conclusões mais genéricas acerca de sistemas produtivos que possuam semelhança, resguardando, todavia, detalhes mais específicos. Contudo, para a aplicação em outros sistemas produtivos ou mesmo organizações distintas, ajustes ou adaptações deverão ser realizadas com base em novas análises.

Temporalmente, a aplicação e análise se realizaram entre os anos de 2017 e 2019 (no entanto, algumas informações técnicas de posse do pesquisador em razão de sua atuação profissional em período anterior também foram utilizadas). Os dados obtidos pela aplicação da abordagem descrevem o comportamento do sistema no momento da análise (AET), e a previsão de cenários (Dinâmica de Sistemas) em um horizonte de tempo definiu-se em conjunto com as pessoas que atuam na gestão dos sistemas produtivos objetos deste estudo no momento da pesquisa *in loco*.

1.8 ORIGINALIDADE E INEDITISMO

Para atestar a originalidade desta pesquisa, uma revisão sistemática foi realizada referente ao uso da Dinâmica de Sistemas em Ergonomia. Para tanto, seguiu-se o método *Systematic Search Flow* (SSF) proposto por Ferenhof e Fernandes (2016) para revisão de literatura. O método é composto por quatro fases e oito atividades, conforme a Figura 1.

Figura 1 – *Systematic Search Flow* (SSF)



Fonte: Ferenhof e Fernandes (2016, p. 556).

Primeiramente, o pesquisador desenvolveu um plano de pesquisa que compreende a formulação das questões da pesquisa de interesse, as palavras-chave e um conjunto de critérios

de inclusão e exclusão de estudos para determinar o estado atual do conhecimento acerca dos temas.

As bases de dados utilizadas de acordo com os critérios de escolha foram: (a) *Web of Knowledge*, por possuir mais de 9.000 periódicos indexados; (b) *Scopus*, por possuir mais de 21.000 periódicos indexados. Assim, configura-se como a maior base de dados na área de ciência e tecnologia.

A *String* de busca utilizada foi: ((*“ergonomics” OR “human factors”*) AND (*“dynamic systems” OR “System dynamics”*)).

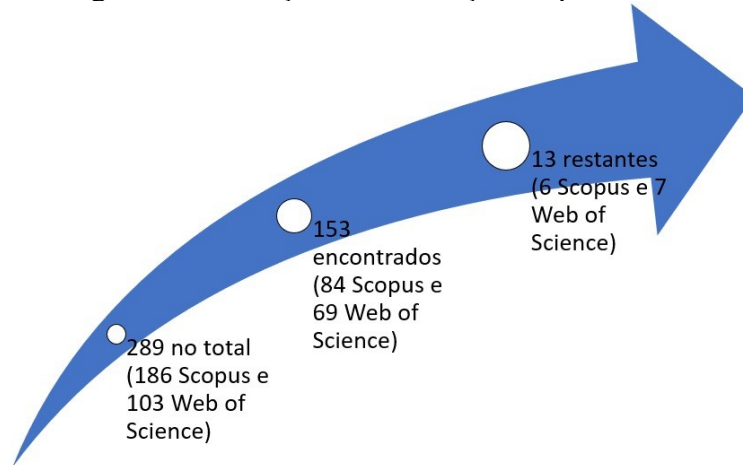
Os critérios de inclusão e exclusão dos artigos encontrados foram especificados, sendo:

- a) os artigos selecionados continham título, resumo ou a presença de palavras-chave referentes aos termos Ergonomia e Dinâmica de Sistemas no corpo do texto;
- b) os artigos estavam disponíveis com acesso em texto integral através da Coordenação de Aperfeiçoamento do Ensino Superior (CAPES), Google, Google Acadêmico ou foram enviados por e-mail pelos autores.

Além disso, um documento de Excel foi criado contendo os aspectos-chave da pesquisa. No caso em questão foram: título do artigo, nome do autor, anos de publicação, revista, instituição e país de origem, método do estudo, principais achados e setor no qual se desenvolveu a pesquisa.

Após essa etapa, e uma vez que todas as questões relevantes foram especificadas, o autor acessou as bases de dados e procurou artigos adequados aos objetivos. A pesquisa ocorreu em 29 de outubro de 2019 e resultou em 186 artigos encontrados na base de dados *Scopus*, sendo que desses, 84 foram elencados após serem eliminados estudos desconexos ao tema pela leitura do resumo, e desses, seis utilizavam a dinâmica de sistemas no contexto da ergonomia, porém todos analisavam acidentes de trabalho e suas causas. Na base de dados *Web of Science* foram encontrados 103 estudos, que foram submetidos à análise do resumo. Após a leitura deste, 69 artigos foram selecionados. Ainda, na sequência, os artigos restantes foram submetidos à leitura integral para formação do portfólio, e desses, sete permaneceram ao final. Dos artigos restantes, seis tratam do uso da dinâmica de sistemas em acidentes de trabalho e apenas um trata do tema de modelagem matemática integrando o fator humano. O processo de formação do portfólio segue na Figura 2.

Figura 2 – Evolução da construção do portfólio I



Fonte: o autor.

Após a formação do portfólio, realizou-se uma discussão e análise acerca dos artigos remanescentes, permitindo categorizar os principais achados do tema em questão, auxiliando o esclarecimento da dinâmica de sistemas junto à ergonomia de acordo com a literatura científica.

A última etapa consistiu na redação dos dados encontrados nas etapas anteriores da revisão.

As conclusões apontam que existem utilizações da dinâmica de sistemas com relação ao estudo do erro humano nos acidentes, porém não foram encontrados estudos utilizando a dinâmica de sistemas para modelar e analisar sistemas inerentes à atuação da ergonomia, indicando uma lacuna de conhecimentos, conforme demonstra o Quadro 3.

Quadro 3 – Classificação dos estudos encontrados com relação à sua forma de abordagem

Dinâmica de Sistemas de maneira geral	Aplicação de Dinâmica de Sistemas ou outras formas de modelagem em episódios de acidentes de trabalho	Aplicação da Dinâmica de Sistemas em Ergonomia
153 estudos	13 estudos	0 estudos

Lacuna de conhecimentos

Fonte: o autor.

O mesmo procedimento de pesquisa se estendeu às bases e dados de teses e dissertações da Base Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD), ao Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES e à base internacional *ProQuest*. Para tanto, utilizaram-se os mesmos descritores de busca.

Nenhuma tese ou dissertação foi encontrada nas bases de dados apontadas (Base Digital Brasileira de Teses e Dissertações, Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES e *ProQuest*).

Além disso, a importância do tema destaca-se pela abertura de um *call for papers* para uma edição especial do periódico *Applied Ergonomics* (A2 Qualis-Capes Engenharias III), divulgada também pelo periódico *Journal of Industrial Ergonomics* (B1 Qualis-Capes), para publicação entre maio e junho de 2018. Segundo o *journal Applied Ergonomics* (2017), no texto de apresentação da edição especial, na conferência 2016 do Instituto Britânico de Ergonomia e Fatores Humanos, Patrick Waterson, David Golightly e Chris Baber realizaram um painel de sessão cujo título foi *Retorno Cibernético*. A discussão tangenciou o que é considerado uma tendência crescente na comunidade da ergonomia, que é a quantificação e modelagem de sistemas (sem exclusão da abordagem clássica), reminiscência das abordagens cibernéticas do passado. Ainda, de acordo com Baber, Golightly e Waterson (2019), em 2013, Baber argumentou em uma conferência da *UK Ergonomics Society* em favor da necessidade de se entender como os sistemas mudam ao longo do tempo.

O objetivo dessa edição se referia aos impactos dos sistemas dinâmicos e dos modelos de dinâmica dos sistemas, dos métodos e do pensamento sobre a ergonomia, de que maneiras as ideias desenvolvidas junto à cibernética estão influenciando a ergonomia moderna e como isso está levando a métodos quantitativos ou a modelos de sistemas dinâmicos (para fazer previsões sobre um cenário ou explicar o comportamento de sistemas complexos). Há, também, o interesse em métodos que permitam descrever quantitativamente, sem desconsideração dos métodos qualitativos, o comportamento de sistemas ao longo de determinado horizonte de tempo. Nessa edição foi submetido, aprovado e publicado o artigo *Simulating the influence of physical overload on assembly line performance: a case study in an automotive electrical component plant*, de autoria de Diego Luiz de Mattos, Rafael Ariento Neto, Eugenio Andrés Díaz Merino e Fernando Antônio Forcellini.

1.9 ADERÊNCIA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

De acordo com a Associação Brasileira de Engenharia de Produção (Abepro) (2017, p. 1): “[...] compete à Engenharia de Produção o projeto, a implantação, a operação, a melhoria e a manutenção de sistemas produtivos integrados de bens e serviços, envolvendo homens, materiais, tecnologia, informação e energia.”

Uma das áreas definidas pela Abepro como parte integrante do ramo da engenharia de produção é a área de Engenharia do Trabalho, definida como: “Projeto, aperfeiçoamento, implantação e avaliação de tarefas, sistemas de trabalho, produtos, ambientes e sistemas para fazê-los compatíveis com as necessidades, habilidades e capacidades das pessoas visando a melhor qualidade e produtividade [...]” Tem como objetivo aplicar tais conhecimentos na compreensão das interações entre pessoas e outros elementos do sistema, integrando as áreas: (i) Projeto e Organização do Trabalho; (ii) Ergonomia; (iii) Sistemas de Gestão de Higiene e Segurança do Trabalho; (iv) Gestão de Riscos de Acidentes do Trabalho.

A área de ergonomia tem como objeto a pesquisa e o desenvolvimento em ergonomia aplicada ao projeto do trabalho, ao desenvolvimento de produtos e serviços e aos processos produtivos. Os estudos desenvolvidos implicam análise e projeto de aspectos ergonômicos do trabalho, produtos, serviços e processos, tendo como finalidade a adequação destes às pessoas. O objetivo é a melhoria do bem-estar humano e o desempenho global do sistema (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2017).

O estudo em questão busca dar suporte à gestão da produção e de pessoas, bem como a saúde e segurança dos trabalhadores, pois tem como foco central a atuação humana no contexto industrial, na eficiência e na ergonomia, agindo também sobre a produtividade e os custos. Assim, este estudo tem relação direta com o Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da UFSC na área de concentração Ergonomia, buscando por meio de um método compreender e adaptar o trabalho ao homem.

A importância deste estudo reflete-se diretamente da questão social da saúde do trabalhador. Uma vez que se busque compreender o trabalho, sua transformação torna-se eminente, em virtude do conhecimento adquirido. A compreensão⁸ desses aspectos pode tornar viável o desenvolvimento ou reestruturação de ambientes laborais, tornando-os adaptados ao ser humano, reduzindo esforço e o ônus de um trabalho inadaptado e fornecendo benefícios ao sistema produtivo.

⁸ Algumas teses e dissertações foram já desenvolvidas no PPGEF-UFSC nesse sentido, como, por exemplo: Modelo de gestão da ergonomia integrado as práticas da produção enxuta – ERGOPRO: o caso de uma empresa de embalagem e papelão ondulado (MATEUS JÚNIOR, 2013); Avaliação de um modelo de gestão de ergonomia baseado em práticas da produção enxuta: enfoque no índice de absenteísmo em uma empresa de embalagens de papelão ondulado catarinense (MATTOS, 2015).

1.10 ESTRUTURA GERAL DA TESE

Este trabalho foi estruturado em seis seções:

- a) a primeira delas, já apresentada, disserta sobre a contextualização geral do estudo e o problema abordado, a lacuna de conhecimento encontrada, os objetivos do estudo, pressupostos, justificativa, a caracterização geral da pesquisa, sua delimitação, originalidade e ineditismo, bem como sua importância e relação com o Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da UFSC;
- b) a seção 2 refere-se à revisão de literatura, abordando temas que suportem teoricamente este estudo;
- c) na seção 3 apresentam-se os procedimentos metodológicos do estudo, descrevendo seus materiais, métodos e etapas seguidas;
- d) na seção 4 é apresentado o modelo proposto. Também se apresenta, nesta seção, um estudo preliminar que subsidiou dados a respeito da viabilidade prática para um ulterior estudo de caso também descrito nesta seção. Posteriormente, relata-se uma avaliação qualitativa acerca da aplicação do modelo e uma discussão a respeito dos resultados obtidos;
- e) na seção 5 seguem as conclusões do estudo;
- f) finalmente, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas na realização do presente estudo, bem como documentos anexos e apêndices.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O referencial teórico tem a função de descrever conceitos de base à compreensão e construção da pesquisa. Para tanto, revisões bibliográficas com relação à evolução tecnológica da indústria, Ergonomia, pensamento sistêmico e Dinâmica de Sistemas foram conduzidas. Revisões bibliográficas sistemáticas sobre o uso do software Ergo-IBV e acerca da relação entre Ergonomia e Dinâmica de Sistemas também foram realizadas. Esta seção será dividida em quatro partes:

- a) a primeira parte descreve a evolução tecnológica da indústria e os principais aspectos de cada fase;
- b) a segunda parte aborda o histórico e conceitos fundamentais da Ergonomia. Dentro disso, são explorados os assuntos referentes à Análise Ergonômica do Trabalho (AET) e ao software Ergo-IBV, contendo também as ferramentas de avaliação ergonômica por ele disponibilizadas;
- c) a terceira parte aborda o histórico e conceitos do pensamento sistêmico, com base na Teoria Geral de Sistemas. Dentro disso, a Dinâmica de Sistemas é apresentada;
- d) a quarta e última parte descreve relações entre ergonomia e visão sistêmica, ergonomia e sistemas dinâmicos e ergonomia e Dinâmica de Sistemas.

Ao fim desta seção, apresenta-se um resumo sobre os assuntos abordados, em preparação à seção seguinte.

2.1 A EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS PRODUTIVOS

O início do século XX foi marcado pela Revolução Industrial e dos sistemas produtivos. Tal evento transformou o trabalho de maneira crítica. A produção em massa tomou o lugar do processo artesanal então vigente, e muitas atividades passaram a ser individualizadas, únicas, com pouco ou nenhum acesso ao produto acabado. Uma visão fragmentada caracterizava tipicamente essa nova maneira de produzir. Com isso, cada vez mais empregos foram sendo criados dentro da indústria e cada vez mais trabalhadores foram contratados.

Nesse contexto, as organizações passaram a racionalizar a produção buscando incrementar a eficiência das máquinas, o que resultou em um aumento de volume produtivo,

sendo que os Estados Unidos da América foram os primeiros a implementar a divisão do trabalho (BITTENCOURT; ALVES; AREZES, 2011).

Wood Junior (1992, p. 8) pontua que foi Frederick W. Taylor, buscando aprimorar seus processos, quem “desenvolveu uma série de princípios práticos baseados na separação entre o trabalho mental e físico e na fragmentação das tarefas.” Isso culminou na configuração de uma nova força de trabalho marcada pela derrocada das habilidades genéricas manuais e um incremento da produtividade. Porém, por outro lado, foi o posterior nascedouro de problemas crônicos, como absenteísmo e elevados índices de *turnover*.⁹

Henry Ford, em 1914, introduziu o conceito de linhas de montagem para fabricar automóveis, fato que se tornou conhecido como o Fordismo. Conseguiu, com isso, reduzir custos de produção e melhorar a qualidade do produto (WOOD JUNIOR, 1992).

Outra importante linha de pensamento da administração da produção ficou conhecida como Fayolismo. Tal escola se caracteriza pela ênfase na estrutura organizacional, pela visão do homem econômico e pela busca da eficiência (CHIAVENATO, 1993).

Dalmolin et al. (2007) descrevem os princípios abordados por Fayol de maneira sintetizada, sendo:

- a) divisão do trabalho;
- b) autoridade e responsabilidade;
- c) disciplina;
- d) unidade de comando;
- e) unidade de direção;
- f) subordinação dos interesses individuais aos interesses gerais;
- g) remuneração do pessoal;
- h) centralização;
- i) hierarquia;
- j) ordem;
- k) equidade;
- l) estabilidade do pessoal;
- m) iniciativa;
- n) espírito de equipe.

⁹ O *turnover* é um termo utilizado para caracterizar o movimento de entradas e saídas, admissões e desligamentos, de profissionais empregados de uma empresa, em um determinado período (MEDEIROS; ALVES; RIBEIRO, 2012, p. 118).

De igual importância para a evolução dos sistemas produtivos foi Max Webber. Seu trabalho contribuiu por formular as bases da Teoria Burocrática. Webber definiu como sendo as bases de sua teoria: “[...] organização burocrática pela ênfase na precisão, velocidade, clareza, regularidade, confiabilidade e eficiência atingidas através da criação de uma divisão rígida de tarefas, supervisão hierárquica e regras e regulamentos detalhados.” (WOOD JUNIOR, 1992, p. 7).

Em suma, Max Weber estudou os sistemas de produção propondo que as organizações devem se caracterizar pela racionalidade, buscando a eficiência, com características de previsibilidade de seu funcionamento (CHIAVENATO, 2003; MATOS; PIRES, 2006). Nesse ponto, segundo os autores, o pensamento de Weber continha grande semelhança com ideias bases do pensamento de Taylor e Ford, como a divisão do trabalho baseada na especialização funcional, hierarquia e autoridade bem definidas, seleção com base em competência técnica, entre outros.

A Escola das Relações Humanas surge com a ideia de que a moral envolvida no trabalho e as metas a serem cumpridas pelos trabalhadores devem equilibrar-se, propondo ponderação às ideias da Teoria Clássica da Administração (CHIAVENATO, 2000; MOTTA; VASCONCELOS, 2012).

Apesar das várias formas de organização do trabalho e sistemas produtivos que surgiram desde a Revolução Industrial, os preceitos de Taylor definiram o paradigma em grande parte do século XX. A chamada Administração Científica foi implantada em diversas organizações pelo mundo, tendo importância no crescimento produtivo de vários países (CAMPOS, 2000). Contudo, as bases estabelecidas por Taylor para a gestão produtiva foram diretamente impactadas por uma mudança no contexto da economia mundial ocorrida a partir do ano de 1970. Conforme Antunes et al. (2008, p. 29), houve uma necessidade de ajustamento do cenário econômico movido pelo aumento da competitividade em decorrência de uma recessão do mercado durante esse período.

Em face dessa recessão, as capacidades instaladas em diversos setores da economia tornaram-se superiores à demanda total de produtos observada, o que acirrou a competitividade dos mercados no mundo todo. De fato, a crise do petróleo do ano de 1973 influenciou e modificou os requisitos gerais de concorrência em âmbito internacional (ANTUNES et al., 2008).

Com isso, observou-se a queda da produção em massa, que foi dando lugar a sistemas menos rígidos de produção, impulsionado pela redução do consumo em massa. A produção

baseada em demandas torna-se crítica para a sobrevivência das organizações. Novas formas de gestão ganham espaço, o que fez difundir o modelo japonês, que teve como base o sucesso da Toyota nesse período em que as demais companhias acumulavam perdas. O sistema que ficou conhecido como Sistema Toyota de Produção, ou Sistema de Produção Enxuta, firmou parcerias para tornar sua produção flexível a ponto de atender às demandas do mercado de maneira rápida e eficiente (BUENO; OLIVEIRA, 2009).

A partir da década de 1970 a liderança industrial, antes concentrada nos Estados Unidos e Europa Ocidental, passou a enfrentar forte concorrência das organizações japonesas em razão do declínio da forma de organização do trabalho das empresas ocidentais. Os modelos Tayloristas e Fordistas estavam passando por um processo de substituição por conceitos novos e menos rígidos, observados no pensamento japonês, em praticamente todas as cadeias produtivas ao redor do mundo (WOOD JUNIOR, 1992).

De acordo com Antunes et al. (2008), as origens dos princípios básicos do sistema de produção enxuta decorrem dos trabalhos de Shigeo Shingo e Taiichi Ohno dentro da indústria automobilística, e esta ficou conhecida no ocidente, principalmente no Estados Unidos, como Sistema *Just-in-time*.

Sobre esse novo sistema, Lima e Zawislak (2003) apontam que se trata de um sistema de produção caracterizado pelo foco em eliminar de maneira progressiva o desperdício, pela busca de um fluxo contínuo entre os processos, pela produção guiada pela demanda no tempo, qualidade e quantidade estabelecidos pelo cliente e pela estreita relação junto aos fornecedores.

Liker (2007) elenca os principais desperdícios apontados pela produção:

- a) superprodução: é a perda por produzir além do volume programado ou necessário;
- b) espera: tem origem de um intervalo de tempo no qual nenhum processamento, transporte ou inspeção é executado;
- c) transporte: é uma atividade que não agrega valor, podendo ser encarado como perda;
- d) processamento: são parcelas do processamento que poderiam ser eliminadas sem afetar as características e funções básicas do produto/serviço;
- e) estoque: é a perda sob forma de estoque de matéria-prima, material em processamento e/ou produto acabado.
- f) movimentação: perdas que se relacionam aos movimentos desnecessários realizados pelos operadores na execução de uma operação;

g) produtos defeituosos: é o resultado do processamento de produtos que tenham alguma de suas características de qualidade fora de uma especificação ou padrão estabelecido e que, dessa forma, não satisfaçam os requisitos de uso.

Após sua disseminação e por conta de seus resultados, organizações em todos os continentes buscaram implementar a produção enxuta para alcançar resultados semelhantes (SPEAR; BOWEN, 1999).

No entanto, deve-se ressaltar a importância do papel do trabalhador em todos os sistemas produtivos e na implementação das teorias administrativas citadas:

Se de um lado há uma indústria cada vez mais competitiva, buscando gerar produção e lucro, de outro, há a força humana de trabalho, fundamental para todo sistema produtivo. Independentemente do tipo: indústria de bens de consumo, indústria de base, indústria intermediária, de ponta, e chegando até os setores de serviços, todas essas organizações necessitam do homem para que seus processos sejam efetivados de forma completa. (MATTOS, 2015).

A evolução dos sistemas produtivos em termos de gestão e tecnologia ocorreu, a cada período, em um sentido simples-complexo. A concorrência, a busca pela eficiência e o incremento tecnológico aumentaram a sofisticação dos elementos e variáveis que compõem um sistema de produção. Isso levou a um aumento do dinamismo desses sistemas. Esse dinamismo é um desafio para a análise ergonômica, justamente em razão do grande número de elementos que estabelecem relações, dificultando a previsão do comportamento do sistema (STANTON; SALMOS; RAFFERTY, 2013; WILSON, 2014; KARSH; WATERSON; HOLDEN, 2014; WALKER et al., 2017; SALMON et al., 2017).

A ergonomia evoluiu conjuntamente aos sistemas produtivos e de gestão da produção. Isso ocorreu principalmente em decorrência do aumento de doenças relacionadas ao trabalho e de problemas de inadaptabilidade de ambientes laborais ao homem. A próxima subseção, portanto, abordará os conceitos básicos da ergonomia.

2.2 ERGONOMIA

A palavra ergonomia surge da junção dos termos *ergon* (trabalho) e *nomos* (regras) (FALZON, 2007). Destaca-se que o termo ergonomia foi utilizado pela primeira vez em 1857 por Wojciech Jastrzebowski, um cientista polonês, em seu trabalho que leva o título de *Ensaio*

de ergonomia ou ciência do trabalho, baseada nas leis objetivas da ciência sobre a natureza (ABRAHÃO et al., 2009).

Para Iida e Guimarães (2016), ergonomia é o estudo da adaptação do trabalho ao homem. Kroemer e Grandjean (2005) definem-a como a ciência da configuração de trabalho adaptada ao homem com o principal objetivo de desenvolvimento científico para a adequação das condições de trabalho às capacidades e limitações das pessoas que o realizam.

Em agosto de 2000 a Associação Internacional de Ergonomia (IEA) adotou a premissa de que a ergonomia tem por objetivo a compreensão das interações entre os seres humanos e os outros componentes de um sistema. Também busca agregar ao processo de concepção e desenvolvimento técnicas, teorias, princípios, métodos e informações pertinentes para a melhoria do bem-estar do ser humano e da performance global dos sistemas.

Dessa forma, a ergonomia possui dois objetivos: (i) produzir conhecimento sobre a relação entre trabalho e trabalhador; e (ii) formular conhecimentos, métodos, ferramentas e princípios que possam orientar a transformação das condições de trabalho para criar melhores condições entre ambiente e trabalhador. A produção do conhecimento e a racionalização da ação são, portanto, o eixo principal da pesquisa ergonômica (ABRAHÃO; PINHO, 2002).

A especificidade da ergonomia encontra-se em um ponto central entre dois objetivos: (i) melhorias na produção em termos de eficácia, eficiência, confiabilidade, produtividade, durabilidade, entre outros; e (ii) melhorias para as pessoas envolvidas no processo em termos de saúde, segurança, conforto, facilidade de uso, interesse e prazer no trabalho, entre outros (FALZON, 2007).

Apesar da formalização na metade do século passado, a ergonomia tornou-se objeto de estudo desde que o homem necessitou se adaptar a novos esquemas de trabalho, fruto da evolução e das mudanças nos processos produtivos. Sob esse prisma, pode-se inferir que a ergonomia passou por vários estágios de evolução, em busca de propor soluções de melhorias que acompanhassem esses avanços e mudanças (ALMEIDA, 2011).

A formalização da ergonomia enquanto disciplina, é recente. Ela aconteceu a partir de 1949, com a criação da *Ergonomics Research Society*, na Inglaterra. Em 1959 foram criadas *Human Factors Society* (HFS) e a *International Ergonomics Society* (IES) nos Estados Unidos e, em 1963, a *Société d'Ergonomie de Langue Française* (SELF), na França (ABRAHÃO et al., 2009, p. 20).

Uma série de profissionais, como engenheiros, desenhistas industriais, fisioterapeutas, médicos e enfermeiros, podem exercer a função da ergonomia. Esses profissionais podem ser chamados de ergonomistas pelo conhecimento adquirido com a experiência e formação

acadêmica ao longo dos anos e atuam no ensino (universidades e instituições de ensino), em instituições de pesquisa, órgãos normativos, prestação de serviços e setor produtivo (indústrias, departamentos de projetos, saúde e segurança, treinamentos, entre outros) (DUL; WEERDMEESTER, 2004; IIDA; GUIMARÃES, 2016).

Essa interdisciplinaridade¹⁰ (engenheiros, desenhistas industriais, médicos, fisioterapeutas, enfermeiros, entre outros) converge em busca de compreender o trabalho com vistas a evitar que a inadequação da interação entre homem, máquina e ambiente culmine em adoecimento do trabalhador ou mau desempenho do sistema.

A ergonomia pode contribuir para solucionar um grande número de problemas sociais relacionados com a saúde, segurança, conforto e eficiência. Muitos acidentes podem ser causados por erros humanos. Estes incluem acidentes com aviões, carros guindastes, tarefas domésticas e muitos outros. Analisando-se esses acidentes pode-se chegar à conclusão que são causados pelo relacionamento inadequado entre os operadores e suas tarefas. A probabilidade de ocorrência dos acidentes pode ser reduzida quando se consideram adequadamente as capacidades e limitações humanas e as características do ambiente, durante o projeto de trabalho. (DUL; WEERDMEESTER, 2004, p. 3).

Wisner (2004) reforça que a ergonomia se vale do conhecimento adquirido por essas várias disciplinas (medicina, engenharia, design, etc.), apesar de sua autonomia.

Destaca-se, também, que as novas tecnologias e seus impactos no trabalho humano têm sido abordados sob vários prismas dentro da disciplina da ergonomia em razão das diversas áreas do conhecimento envolvidas em sua atuação e da natureza da problemática analisada. De fato, ela tem sido solicitada a atuar na análise e reestruturação de processos produtivos, principalmente nas questões referentes à caracterização da atividade e à inadequação de postos de trabalho, em especial ao introduzirem-se novas tecnologias e métodos de produção (ABRAHÃO, 2000).

Almeida (2011) comenta que a disciplina ganhou importância em diversos países, de acordo com o contexto local, e em decorrência do momento histórico e econômico que vivenciavam, observando as necessidades específicas e carências de cada local.

A ergonomia pode ser classificada, de acordo com sua contribuição, em:

- a) ergonomia de concepção: ocorre quando a disciplina presta suas contribuições durante o projeto do produto, do serviço ou do sistema produtivo. Esta é, segundo

¹⁰ A interdisciplinaridade pode ser definida como a troca de conhecimentos entre especialistas de áreas distintas e pelo grau de integração de diferentes disciplinas em um mesmo projeto de estudo, base para abordagens sistêmicas (JAPIASSU, 1976; VILELA; MENDES, 2003).

Lida e Guimarães (2016), a situação ideal, pois todas as alternativas poderão ser verificadas em busca da melhor adaptabilidade entre produto/serviço/métodos ao trabalhador ou usuário. Em contrapartida, exige grande experiência por parte dos profissionais atuantes, pois as decisões são tomadas levando em conta situações hipotéticas. Nesse ponto, sugere-se buscar informações em situações semelhantes já existentes ou construir modelos da realidade, nos quais se pode simular tal situação com custos baixos, como, por exemplo, em ambientes de simulação virtual em computadores;

- b) ergonomia de correção: nesse caso, a ergonomia presta suas contribuições em situações reais e já existentes, buscando resolver problemas relacionados à saúde e segurança do trabalhador ou usuário e à qualidade e eficiência da produção. As soluções nesse ponto podem tornar-se mais custosas, uma vez que muitos problemas podem requerer substituição de máquinas ou métodos de produção. Dessa forma, soluções mais simples como dispositivos de segurança, adoção de ferramentas ou dispositivos como cadeiras, cintos lombares, aumento da iluminação, entre outros, em alguns casos, podem ser mais viáveis do que soluções de grande impacto;
- c) ergonomia de conscientização: nessa fase, a ergonomia busca capacitar, informar e conscientizar trabalhadores e usuários para a identificação e correção dos problemas que ocorrem no dia a dia. A importância aqui deve-se ao fato de que os problemas relacionados à ergonomia podem não ser completamente resolvidos nas duas primeiras fases (concepção e correção), e novos problemas podem surgir a qualquer tempo em razão da dinâmica de produção. Os trabalhadores, nesse caso, devem estar atentos e treinados para identificar problemas e buscar sua solução;
- d) ergonomia de participação: nesse tipo de ergonomia, o trabalhador ou usuário é envolvido na solução dos problemas, tendo como base a ideia de que esses atores possuem conhecimento prático acerca da situação ou produto/serviço, colaborando no detalhamento ao analista (WISNER, 1987; IIDA; GUIMARÃES, 2016).

A disciplina ainda foi dividida quanto às três áreas de especialização ou competência, sendo os aspectos físicos, cognitivos e organizacionais essenciais para a compreensão da relação entre eles. Esses três aspectos são conhecidos como os domínios de atuação da ergonomia e são:

- a) ergonomia física: é a especialização da ergonomia que concerne às características da anatomia humana, antropometria, fisiologia e biomecânica com relação à atividade física, abordando tópicos como postura no trabalho, levantamento de carga e movimentos repetitivos;
- b) ergonomia cognitiva: é a especialização da ergonomia que concerne aos processos mentais, tais como percepção, memória, raciocínio e resposta motora, conforme afetam as interações entre seres humanos e outros elementos de um sistema. Os tópicos relevantes incluem carga mental de trabalho, tomada de decisão, desempenho especializado, interação homem-computador, estresse e treinamento;
- c) ergonomia organizacional: é a especialização da ergonomia que se relaciona às melhorias dos sistemas sociotécnicos, incluindo suas estruturas organizacionais, políticas e processos. Os tópicos relevantes incluem comunicações, gerenciamento de recursos de tripulações (domínio aeronáutico), projeto de trabalho, organização temporal do trabalho, trabalho em grupo, projeto participativo, ergonomia comunitária e trabalho cooperativo, cultura organizacional, organizações em rede, teletrabalho e gestão da qualidade (INTERNATIONAL ERGONOMICS ASSOCIATION, 2018).

Para Falzon (2007), a ergonomia constitui-se a partir da ideia de construir conhecimentos sobre o homem em seu trabalho pelo fato de que esses conhecimentos praticamente inexistiam, em razão da tendência das disciplinas de estudar os processos fora de contexto, fora da tarefa. Porém, os conhecimentos sobre o homem em atividade não são os únicos para cuja construção a ergonomia deve contribuir. Ela deve também elaborar conhecimentos sobre a ação ergonômica, como metodologias de análise e intervenção nas situações de trabalho, metodologias e participação na concepção e avaliação dos dispositivos técnicos e organizacionais.

Dessa maneira, em uma situação real, objeto de avaliação, o ergonomista pode recorrer aos conhecimentos (FALZON, 2007):

- a) conhecimentos sobre o ser humano em ação: são conhecimentos adquiridos por meio da formação, e podem ser provenientes de outras disciplinas, como fisiologia, psicologia, engenharia, informática, etc.;

- b) conhecimentos metodológicos: métodos gerais de ação ergonômica, de análise, desenvolvimento de projetos, coleta de informações, dados e construção do conhecimento, etc. São adquiridos inicialmente pela formação de base, porém se aprimoram e avultam com a experiência;
- c) conhecimentos específicos, relativos à própria situação estudada: resultam da aplicação de métodos conhecidos, que permitem ao ergonomista/pesquisador desenvolver uma representação ou modelo da situação em análise. Esses conhecimentos são construídos conforme as necessidades de ação;
- d) conhecimentos eventuais que têm como base a experiência das situações já encontradas: o enfrentamento de diversos tipos de eventos ao longo da atuação profissional permite ao ergonomista/pesquisador ampliar sua biblioteca mental de situações.

Como conclusão, toda intervenção ergonômica não visa apenas produzir conhecimento acerca de uma situação de trabalho. Compreender o trabalho ganha sentido uma vez que o objetivo é transformá-lo, em busca de um melhor ambiente laboral para o homem e eficiência do sistema (FALZON, 2007).

Duas correntes da ergonomia são descritas por Montmollin (1990): (i) a anglo-saxônica, que considera a ergonomia como a utilização das ciências visando melhorar condições do ser humano em seu trabalho; e (ii) a francofônica, que considera a ergonomia como um estudo específico do trabalho humano com fins de melhorá-lo. Apesar de fato notável em um contexto histórico do desenvolvimento da disciplina, hoje a separação entre essas correntes é pouco considerada na realidade prática e acadêmica, uma vez que ambas são complementares.

No Brasil, segundo Scott (2009), os primeiros trabalhos envolvendo a ergonomia foram influenciados, na década de 1970, pelo pesquisador francês Alain Wisner. De acordo com Souza e Silva (2007), o primeiro livro publicado no País sobre o tema foi de autoria de Itiro Iida e Henri Wierzbicki e foi intitulado *Ergonomia: notas de aulas*.

Ainda sobre seu desenvolvimento no País, a ergonomia insere-se, predominantemente, no campo das engenharias, buscando desenvolver métodos e técnicas (SOUZA; SILVA, 2007).

A criação da Associação Brasileira de Ergonomia (Abergo) ocorreu no ano de 1983. Segundo essa instituição, a ergonomia define-se como o estudo da adaptação do trabalho às características fisiológicas e psicológicas do ser humano.

Outro aspecto histórico importante da ergonomia no Brasil é a criação da NR 17.¹¹ Tal norma foi editada em 1990 pelo Ministério da Saúde, frente ao aumento de casos de doenças ocupacionais no País. Isso introduziu na legislação brasileira conceitos de ergonomia e organização do trabalho de forma a não prejudicar o usuário ou trabalhador.

Hoje, a NR 17 orienta as organizações sobre a aplicação na ergonomia. Tal norma versa sobre aspectos básicos para um trabalho seguro, sendo:

- a) levantamento, transporte e descarga individual de materiais;
- b) mobiliário dos postos de trabalho;
- c) equipamento dos postos de trabalho;
- d) condições ambientais de trabalho;
- e) organização do trabalho.

Ainda apresenta dois anexos:

- a) trabalho dos operadores de checkout;
- b) trabalho em teleatendimento/telemarketing.

Uma importante contribuição da norma é a determinação da adoção da Análise Ergonômica do Trabalho. A AET será abordada na próxima subseção.

2.2.1 Análise Ergonômica do Trabalho (AET)

O item 17.1.2 da NR 17 diz que a Análise Ergonômica do Trabalho deverá ser empregada nas necessidades de avaliar as adaptações psicofisiológicas dos trabalhadores em seu ambiente laboral, não cabendo, para essa ação, faculdade ou arbítrio do empregador, mas sua efetiva realização por exigência normativa.

Dessa maneira, o Ministério do Trabalho e Emprego (MTE) (2002) definiu a AET como um processo construtivo e participativo para a resolução de problemas complexos na relação homem-trabalho, com fins de se atingirem o desempenho e a produtividade exigidos sem incorrências prejudiciais à saúde do trabalhador.

¹¹ A norma NR 17 pode ser encontrada em: www.guitrabalhista.com.br/legislação/nr/nr17.htm. O item referente à Análise Ergonômica do Trabalho encontra-se como Anexo A deste documento.

Nolan (1996, p. 772) aponta que: “trabalho é o esforço humano dotado de um propósito e envolve a transformação da natureza através do dispêndio de capacidades mentais e físicas.”

A Análise Ergonômica do Trabalho é, então, um método de intervenção que permite compreender os fatores determinantes das situações de trabalho e a relação entre ambiente laboral e trabalhador. Para tanto, tem como pressuposto básico distinguir entre o trabalho prescrito, denominado de tarefa, e a atividade, que é o trabalho efetivamente realizado pelo trabalhador, inserido em um determinado contexto (ABRAHÃO; PINHO, 1999).

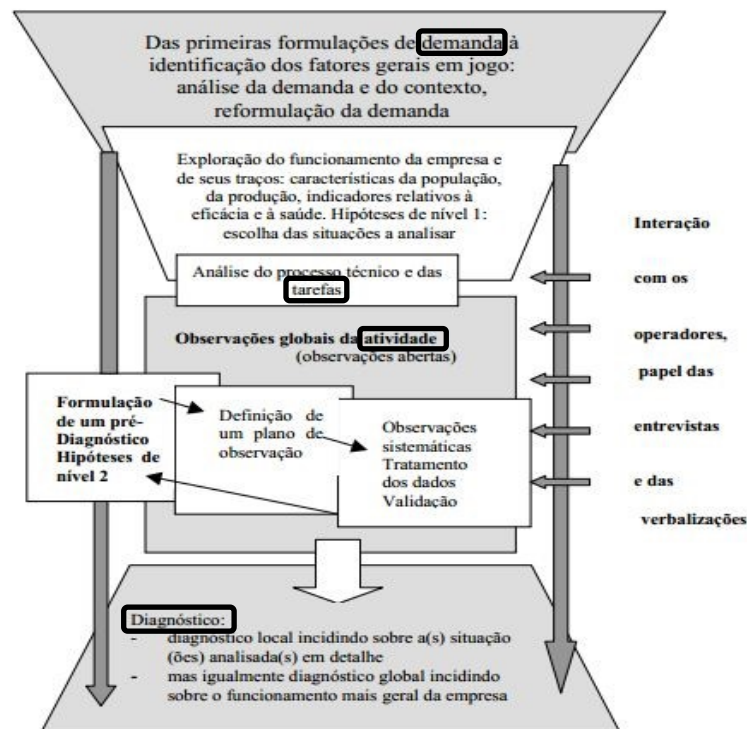
Ao analisar a atividade, consideram-se as características dos trabalhadores, os elementos do ambiente de trabalho e como estes são apresentados aos operadores e percebidos por eles. A articulação desta interação representa o resultado do trabalho. Nesta abordagem, o trabalhador é o sujeito ativo do processo, pois a depender da situação com a qual é confrontado, ele transforma permanentemente a sua atividade, como forma de responder às demandas que se apresentam. A análise ergonômica do trabalho procura identificar como o trabalhador constitui os problemas que tem de resolver em confronto com a situação real de trabalho. (ABRAHÃO; PINHO, 2002, p. 47).

Uma situação de trabalho apresenta, em geral, uma situação complexa, que torna desafiadora sua compreensão. O trabalho é, em si, fruto de um emaranhado de variáveis inseridas em determinado contexto. O desafio de compreender o trabalho humano guiou diversos pesquisadores na busca por um método consolidado que cumprisse tal função. A AET surge como resultado desse esforço e fornece meios de abordar o trabalho visando à sua compreensão e transformação (ABRAHÃO et al., 2009).

Diante disso, a Análise Ergonômica do Trabalho, a partir do ponto de vista dos diversos atores envolvidos em uma situação de trabalho, busca definir, em primeiro plano, o problema que será abordado. A intenção, nesse ponto, é, a partir de um recorte, elaborar um plano de intervenções que colabore para a solução do problema que se apresenta, contribuindo, assim, com a organização (RIBEIRO et al., 2011.)

As etapas da AET sistematizadas estão dispostas conforme a Figura 3 a seguir.

Figura 3 – Fases da AET



Fonte: Guérin et al. (2001, p. 86).

A Figura 3 aponta para as quatro primeiras etapas da AET, que são: Análise da Demanda; Análise da Tarefa; e Análise da Atividade e Diagnóstico. Guérin et al. (2001) ainda acrescentam uma quinta etapa, que diz respeito às Recomendações, na qual ocorrem, além das indicações de melhorias, as implementações e o acompanhamento das modificações apontadas. As cinco etapas delineadas pelos autores (GUÉRIN et al., 2001) são descritas como:

Análise da Demanda: a ação ergonômica tem seu ponto de partida de uma demanda estabelecida. A demanda pode apresentar objetivos ambíguos, escondidos, contraditórios, ou apresentar conflitos entre os atores envolvidos. Nessa fase é importante revisar, reformular, aferir, verificar e confrontar as questões inicialmente colocadas, visando obter uma demanda precisa e confiável. Também se faz necessária a participação de diversos interessados, sendo que todos os integrantes da organização estão potencialmente implicados. Essa etapa visa formalizar diferentes informações, compreender melhor a natureza das questões levantadas, estabelecer um ponto de partida para as próximas fases, avaliar a amplitude do problema levantado e identificar diferentes lógicas acerca do mesmo problema (ABRAHÃO et al., 2009). Nesse ponto, além da identificação geral dos fatores em jogo, a exploração de características da população e indicadores de saúde, segurança, eficácia e eficiência, também se formulam as hipóteses de nível 1, conforme descrito por Guérin et al. (2001). Cabe ressaltar que a demanda

pode ser ajustada com o desenvolvimento da AET. Ou seja, nem sempre a demanda originalmente proposta é a problemática de base que gera o tangenciamento da análise em sua totalidade.

Análise da Tarefa: é a segunda etapa da realização de uma AET e compreende a identificação e compreensão do trabalho prescrito e os requisitos físicos para execução da tarefa. A tarefa é o que o trabalhador deverá realizar conforme lhe é prescrito e que garanta a qualidade do produto/serviço, incluindo a análise de dados relativos à formação e qualificação profissional, o número de trabalhadores em cada posto de trabalho, as regras da divisão do trabalho, a análise dos dados referentes às condições técnicas, como dados das máquinas em que o trabalhador deve atuar, sinalização das máquinas e equipamentos, bem como aspectos relativos ao seu funcionamento, o estudo das condições físico-ambientais do ambiente de trabalho, como organização do espaço e dos postos de trabalho, além das condições de iluminância, acústica, vibração, temperatura e condições toxicológicas (FIGUEIREDO; DUARTE, 2014). Em suma, na análise da tarefa realiza-se uma análise do processo técnico, das exigências e dos meios para se atingir o que foi exigido do trabalhador.

Nessa etapa também se realizam as observações globais, que têm por objetivo elaborar um pré-diagnóstico, sob forma de hipóteses explicativas.

De acordo com Guérin (2001), o universo da tarefa compreende:

- a) as características dos dispositivos técnicos;
- b) as características do produto a transformar ou do serviço a prestar;
- c) os elementos a considerar para atingir os objetivos.

Análise da Atividade: a atividade é, em suma, o trabalho real realizado pelo trabalhador na prática, ou seja, a forma como ele executa o trabalho que lhe foi prescrito pela tarefa (FIGUEIREDO; DUARTE, 2014).

Essa etapa é realizada, de acordo com Abrahão et al. (2009), por meio de observações sistemáticas, documentação e registro, a partir de um recorte das ações dos trabalhadores. Nesse ponto da análise poderão surgir indicadores de dificuldades encontrados pelo trabalhador, como intervenções mais demoradas, hesitações ou precipitações e paradas de máquina. Esses indicadores podem ou não ser verbalizados. Surgem, assim, os mecanismos de regulação,¹² em

¹² De acordo com Falzon (2007, p. 10), “regulação é um mecanismo de controle que compara os resultados de um processo com uma produção desejada e ajusta esse processo em relação à diferença constatada.” Segundo o autor, a existência de mecanismos de regulação pressupõe a existência de um sistema dinâmico.

que o trabalhador, a despeito de recursos ou metas, faz um processo de homeostase do próprio trabalho, utilizando meios próprios não previstos na prescrição da tarefa. Hipóteses de nível 2 são formuladas já com base na demanda, na tarefa e nas observações da atividade.

Diagnóstico: essa etapa tem por finalidade evidenciar os distúrbios ergonômicos da situação analisada por meio do confronto entre a tarefa (o trabalho prescrito) e a atividade (o trabalho realizado), buscando identificar funções e disfunções na relação de trabalho. Segundo Guérin et al. (2001), o diagnóstico ergonômico se apoia nas demandas levantadas no início do estudo e é um produto essencial da AET.

O diagnóstico não se resume à interpretação dos dados coletados nas outras etapas da análise. As hipóteses levantadas durante a demanda podem, inclusive, ser refutadas, e nesse caso é necessário reformular essas hipóteses e reiniciar o trabalho de observação (ABRAHÃO et al., 2009). Ressalta-se que o diagnóstico fornecido pela AET pode ser conclusivo, e se apoia também em outras fontes (leis, estudos científicos, normas etc.).

Recomendações: a última etapa da AET é a elaboração de recomendações para solucionar ou mitigar os problemas encontrados. Essas recomendações serão o guia para a reconstrução ou reformulação dos métodos e ambientes de trabalho. Ferreira (2000) afirma que o objetivo dessa etapa é transformar as condições existentes em busca de bem-estar dos trabalhadores e de melhoria global do sistema. É desejável, então, que haja um equilíbrio entre a saúde do trabalhador e a produtividade.

A caracterização da atividade é um elemento fundamental para instrumentalizar o desempenho dos sistemas de produção, objetivando atingir um funcionamento estável em quantidade e qualidade. A inadequação dos postos de trabalho, à população de trabalhadores, constitui um problema social importante com reflexos nas questões de requalificação, saúde e produtividade. (ABRAHÃO, 2000, p. 49).

Para analisar a atividade, e em convergência com os achados da AET, a ergonomia também desenvolveu métodos, abordagens e ferramentas de avaliação ergonômica. Mateus Junior (2013) afirma que estes são essenciais para o processo de tomada de decisão do ergonomista acerca do direcionamento de seu esforço na resolução de situações e que podem ser utilizados para informação e gerenciamento dos riscos e dos sistemas produtivos.

Nesse ponto, destaca-se o software Ergo-IBV, que proporciona ao avaliador a possibilidade de analisar diferentes situações de trabalho por meio de ferramentas de análise ergonômica específicas, visto que reúne diversas ferramentas de avaliação em uma única

interface. Desse modo, a próxima subseção abordará o software Ergo-IBV, fornecendo um panorama geral de seu uso nas áreas industriais e acadêmicas.

2.2.2 Software Ergo-IBV

O *software* Ergo-IBV foi desenvolvido pelo Instituto de Biomecânica de Valência com intuito de auxiliar profissionais e pesquisadores da área da ergonomia na mensuração de riscos de natureza física, cognitiva e organizacional. Isso possibilita o redesenho de postos de trabalho (INSTITUTO DE BIOMECÂNICA DE VALÊNCIA, 2018).

Para tal, o software dispõe de 13 módulos, contendo cada módulo uma ferramenta de análise que serve a diversas situações laborais. Os módulos da versão 16 do software estão descritos no Quadro 4.

Quadro 4 – Módulos de análise do software Ergo-IBV

Módulo	Descrição
MMC <i>Simple</i>	Analisa atividades de levantar, carregar, empurrar ou puxar cargas. É feito a partir da revisão da equação NIOSH, do guia técnico da INSHT, Snook e Ciriello e da norma UNE-EN 1005-2.
MMC <i>Multiple</i>	Analisa atividades de levantar, carregar, empurrar ou puxar cargas, porém com múltiplas tarefas. É feito a partir da revisão da equação NIOSH, do guia técnico da INSHT, Snook e Ciriello e da norma UNE-EN 1005-2.
MMC Lesionados	Analisa as atividades de elevação manual de cargas por trabalhadores lesionados previamente. Foi desenvolvido a partir de um estudo da Universidade de Ohio (EUA).
Tarefas repetitivas	Analisa atividades com movimentos repetitivos dos membros superiores. Foi desenvolvido a partir de um estudo do IBV em colaboração com outras instituições e sindicatos.
Posturas forçadas (OWAS)	Avalia o nível de risco de posturas inadequadas para costas, membros superiores e membros inferiores pela pontuação OWAS.
Posturas (REBA)	Avalia o nível de risco por adoção de posturas inadequadas em tronco, pescoço e membros superiores e inferiores pela pontuação REBA.
Oficina	Módulo para detectar fatores de risco em ambientes de escritórios associados com o uso de telas de computador e outros.
ErgoMater	Analisa tarefas executadas por trabalhadoras grávidas para detecção de fatores de risco para a mãe e/ou feto. Foi desenvolvido a partir de um estudo realizado pelo IBV em colaboração com a <i>Unión de Mutuas y Muvale</i> .
Psicossocial	Módulo para avaliar a exposição ocupacional a fatores de risco de natureza psicossocial. Usa uma versão compacta do método ISTAS21.
MMC Sequencial	Analisa várias tarefas diferentes de elevação manual de cargas em condições variadas, a partir de uma adaptação da equação NIOSH junto à Escola Politécnica de Milão.
MMC Variável	Analisa as atividades de elevação manual de cargas com uma grande variabilidade nas condições de manuseio. Utiliza um procedimento desenvolvido em conjunto pelos autores da equação NIOSH, do centro Ergonomia da Postura e Movimento de Milão e da Universidade Politécnica da Catalunha.
UNE EM 1005-3 (Forças)	Analisa tarefas que envolvem força no uso de controles, pedais e tarefas de empurrar/puxar objetos sem auxílio de rodas ou guias.
UNE EN 1005-5 (OCRA)	Analisa as atividades com movimentos repetitivos das extremidades superiores, e sua aplicação baseia-se no cálculo do índice OCRA. Utiliza as normas UNE EN 1005-5 sobre segurança das máquinas.

Fonte: o autor, com base em Muñoz (2012).

Ferramentas de avaliação ergonômica como as fornecidas pelo software Ergo-IBV podem prover auxílio ao diagnóstico da AET por quantificar riscos em situações pontuais de trabalho. Na presente pesquisa, o Ergo-IBV foi utilizado tanto para elencar riscos inerentes a situações biomecânicas de trabalho quanto para auxiliar no desenvolvimento dos módulos de simulação de Dinâmica de Sistemas (exclusivamente no estudo de caso). Os critérios de escolha do software, as funções detalhadas de cada módulo, os critérios de escolha do uso do módulo específico e suas contribuições serão detalhadas posteriormente na seção de procedimentos metodológicos.

Ainda, a versão 16 do Ergo-IBV possui, como complemento, uma extensão para uso em dispositivos móveis. A interface do software é apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Interface do software Ergo-IBV



Fonte: Instituto de Biomecânica de Valência (2018).

Para compreender o contexto de uso do Ergo-IBV e direcionar sua utilização como um procedimento técnico no desenvolvimento desta pesquisa, realizou-se uma Revisão Bibliográfica Sistemática acerca de seu uso. Portanto, a subseção a seguir aborda o panorama geral de uso do software com relação a setores produtivos e em âmbito acadêmico.

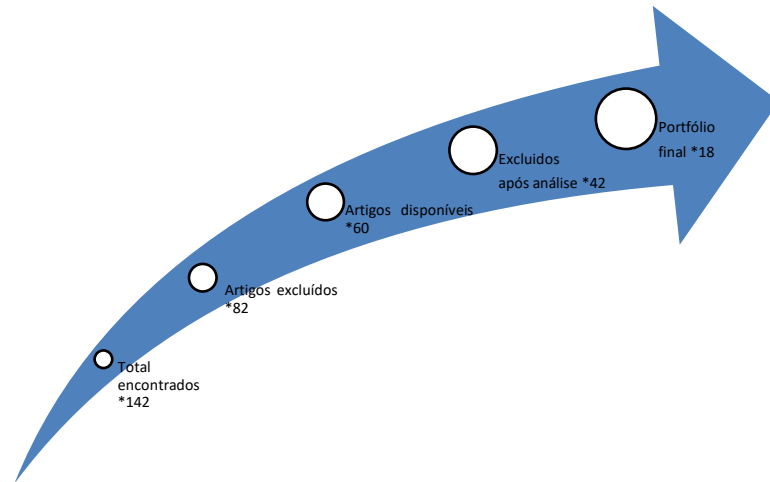
2.2.2.1 Ergo-IBV – Panorama geral

Dados acerca de suas aplicações foram levantados na literatura buscando compreender como o software tem sido utilizado tanto na indústria quanto em trabalhos científicos.

Para tanto, seguiu-se o método *Systematic Search Flow* (SSF), proposto por Ferenhof e Fernandes (2016), para revisão de literatura. O método é composto por quatro fases:

- a) protocolo de pesquisa: primeiramente, o pesquisador desenvolveu um plano de pesquisa que compreende a formulação das questões da pesquisa de interesse, as palavras-chave e um conjunto de critérios de inclusão e exclusão de estudos para determinar o estado atual do conhecimento acerca dos temas. O Google Scholar foi escolhido como base de dados para este estudo. Justifica-se tal escolha, pois nos bancos de dados mais utilizados, *Web of Knowledge* e *Scopus*, não foi possível encontrar documentos referentes ao descritor utilizado. O levantamento foi realizado no dia 4 de maio de 2017 e repetido em 21 de agosto de 2019. A *String* de busca utilizada foi (Ergo-IBV). Os critérios de inclusão ou exclusão foram: artigos disponíveis no banco de dados utilizados, sem arquivos corrompidos e de sites confiáveis; os artigos selecionados continham título, resumo ou a presença de palavras-chave referentes a termos Ergo-IBV no corpo do texto. Restringiu-se, também, o levantamento a artigos em congresso ou periódicos, teses e dissertações, sendo excluídos trabalhos de conclusão de curso de graduação. Os artigos estavam disponíveis com acesso em texto integral por meio da Capes, Google, Google Acadêmico ou foram enviados por e-mail aos autores. O software EndNote X6 foi usado para gerenciar e tratar as referências coletadas. Além disso, um documento de Excel foi criado contendo os aspectos-chave da pesquisa. No caso em questão foram: título do artigo, nome do autor, ano de publicação, revista, instituição e país de origem, método do estudo, principais achados e setor no qual se desenvolveu a pesquisa;
- b) análise: a pesquisa resultou em 142 documentos, sendo todos encontrados na plataforma Google Scholar. Optou-se por priorizar artigos publicados em periódicos, congressos, teses, dissertações e notas técnicas, com a finalidade de obter o máximo de informações sobre o assunto. Desses artigos, 60 foram encontrados em sua versão completa na web. Dos 60 artigos, 42 eram duplicados ou não portavam informações relevantes sobre o tema ou proviam de trabalhos de conclusão de curso e foram excluídos, restando 18 documentos como portfólio final. A Figura 5 demonstra o processo de formação do portfólio;

Figura 5 – Evolução da construção do portfólio II



Fonte: o autor.

- c) síntese: após o levantamento, os dados foram consolidados em planilha Excel, conforme afirmado, buscando as informações de interesse da pesquisa;
- d) escrever: a última etapa consistiu na escrita dos resultados em formato de artigo científico, para análise e publicação.

Um panorama geral com base nos dados levantados é descrito a seguir. Para tanto, organizaram-se as pesquisas em grupos que relacionam o setor produtivo no qual foi aplicada, sendo: (i) Indústria alimentícia – quatro pesquisas; (ii) Indústria de construção civil – duas pesquisas; (iii) Indústria metalúrgica – duas pesquisas; (iv) Indústria calçadista e têxtil – duas pesquisas; (v) Setor rural – duas pesquisas; (vi) Setor de serviços – duas pesquisas; (vii) Design e usabilidade de produtos e serviços – uma pesquisa; (viii) Trabalho de gestantes – uma pesquisa. O Gráfico 1 ilustra a distribuição das pesquisas por setor produtivo:

Gráfico 1 – Distribuição das pesquisas usando o software Ergo-IBV por setor produtivo



Fonte: o autor.

✓ **Indústria alimentícia**

Molina (2000) utilizou o software para analisar as tarefas repetitivas em 10 postos de trabalho de uma empresa de comércio de alimentos. Seus achados apontaram que quase 80% dos postos apresentavam um risco elevado para o acometimento de lesões musculoesqueléticas nas regiões do ombro e do cotovelo, e quase a metade da amostra apresentava risco elevado para as regiões da mão e do punho. Em 35% das tarefas de manipulação manual de cargas o risco de lesão musculoesquelética nas regiões torácica e lombar indicava uma situação que requer mudanças imediatas.

Márquez Gómez e Márquez Robledo (2015) estudaram uma indústria de carne venezuelana. Seus achados apontam para níveis elevados de risco de lesões musculoesqueléticas para membros superiores e coluna lombar. Entre as principais causas desses altos níveis de risco destacam-se o levantamento de produtos acima de 90 graus de flexão e abdução de ombros e manuseio de cargas.

Giraldo (2015) estudou o setor de cafeicultura. Buscou, com uso do software, identificar riscos em várias atividades de uma indústria produtora de café. As posturas foram estudadas principalmente durante o transporte do café e o cultivo das plantas, utilizando o módulo OWAS. O autor identificou, dessa forma, as posturas de maior risco e propôs melhorias e redesenho para as atividades analisadas.

Ferreras Remesal (2002, 2004) realizou duas pesquisas: em uma indústria de coleta e processamento de laranjas e pescados, e outra em uma indústria calçadista. Os achados apontaram que as atividades analisadas (seleção e embalagem de laranjas e armazenagem de pescados para a primeira pesquisa; e corte, confecção, acabamento, embalamento e armazenamento de calçados para a segunda pesquisa) apresentavam, sem exceção, risco de lesões e patologias musculoesqueléticas para membros superiores. O autor pôde, com isso, redesenhar os postos de trabalho, modificando bancadas e desenvolvendo ferramentas para auxílio nas atividades.

✓ **Indústria de construção civil**

Em 2001, Castelló Mercé estudou o setor de construção civil. Com uso dos módulos de tarefas repetitivas e manuseio de cargas, levantou os postos de trabalho que apresentavam riscos musculoesqueléticos aos trabalhadores. Dessa forma, identificou riscos para membros superiores e coluna lombar. Por último, prescreveu melhorias nos postos de trabalho em análise.

O ramo da construção civil também foi estudado por Muñoz (2012). O autor fez uso de diversas ferramentas de análise e considerações acerca das diferenças e vantagens de cada uma.

Segundo o autor, para a avaliação de tarefas repetitivas, o método IBV aplica-se a diversas formas de atividade sem dificuldades. Ainda, destaca a facilidade de uso e a forma intuitiva como se organizam as informações e relata que o software faz com que os resultados sejam fáceis de interpretar.

Zorrilla-Muñoz, Petz e Agulló-Tomás (2019) aplicaram a ferramenta associada a outros métodos (o que chamaram de abordagem multimétodo) em trabalhadores da construção civil na Espanha com objetivo de compreender os riscos associados ao processo desse setor. Concluíram que o risco associado às atividades de levantamento de peso, manipulação de objetos e puxar/empurrar necessita de atenção em vista de melhorar a qualidade do trabalho em estudo.

✓ **Indústria metalúrgica**

López Alonso, Martínez Aires e Martín González (2011) realizaram seus estudos em uma indústria metalúrgica. Seus objetivos foram facilitar ou melhorar os meios de transporte de cargas nesse setor, reduzir as tarefas repetitivas e proporcionar melhor ambiente de trabalho. Para tal fim, fizeram uso dos módulos de tarefas repetitivas e manuseio de cargas para quantificação dos riscos e como referencial comparativo após o redesenho dos postos.

Caraduje (2014), por sua vez, pesquisou postos de trabalho em uma indústria espanhola de pintura e acabamento de estruturas metálicas. O módulo de tarefas repetitivas indicou alto risco para as atividades analisadas. A autora concluiu que melhorias devem ser realizadas nesses postos, com o objetivo de evitar o adoecimento do trabalhador.

✓ **Indústria calçadista e têxtil**

Encarnación e Naranjo (2017) propuseram o uso do módulo OCRA para avaliar três postos de trabalho em uma indústria de calçados equatoriana. Os resultados apontaram que a maioria dos trabalhadores sente desconforto em diferentes partes do corpo, sendo mais recorrente em membros superiores e região posterior do tronco, e que o risco de lesões musculoesqueléticas está em uma faixa de probabilidade entre alto e médio para todos os trabalhos analisados.

Castelló Mercé e García Molina realizaram sua pesquisa no setor têxtil em 2003 na qual avaliaram as atividades de apanhamento do tecido, tecelagem, aplicação de corantes e acabamento e confecção do vestuário. Utilizando o módulo OWAS, observaram altos riscos,

principalmente para membros superiores. Dessa forma, puderam propor melhorias e redesenhar postos de trabalhos de modo a reduzir tais riscos.

✓ **Setor rural**

Costa et al. (2011) usaram o software para estudar as condições de trabalho rural de quatro trabalhadores no Brasil, sendo um portador de deficiência, e encontraram que a tarefa de capinar apresenta alto risco de lesão ou doenças ocupacionais, principalmente na região cervical e membros superiores.

Rio e Nicolás (2004) analisaram postos de trabalho no setor agrícola da região de Murcia, Espanha. Os resultados apontaram que o trabalhador está envolvido em tarefas repetitivas por aproximadamente 93% da jornada laboral. Justifica-se, assim, o uso do módulo de tarefas repetitivas do Ergo-IBV para diagnosticar os riscos associados à situação. No caso em questão, descobriram nível IV (nível mais alto) de risco para ambos os membros superiores, indicando que melhorias urgentes são requeridas.

Martínez et al. (2018) estudaram o uso prolongado de ferramentas manuais como foice no contexto rural. Para tanto, utilizaram o método REBA anexo ao software Ergo-IBV para determinar riscos posturais ao trabalhador exposto a essa atividade e concluíram que existem riscos significativos que requerem mudanças urgentes na atividade em questão.

✓ **Setor de serviços**

Ruiz Ortiz (2012) fez considerações acerca do trabalho administrativo em uma empresa de serviços. O uso do software, nesse caso, ocorreu por meio de análise comparativa e redesenho de postos de trabalho com base nos princípios de usabilidade.

A área da saúde também foi objeto de estudo por meio do software. Salazar et al. (2016) estudaram o risco de lesões musculoesqueléticas em dentistas mexicanos e puderam descrever riscos associando o software a outras ferramentas de pesquisa em ergonomia.

✓ **Design e usabilidade de produtos e serviços**

Aqui se destaca o único trabalho para análise de usabilidade que visa possibilitar melhorias no design de produtos e serviços encontrado dentro dos critérios expostos.

Ferreras Remesal, Escobar Sarmiento e Oltra Pastor (2008) estudaram a usabilidade de uma pá (ferramenta manual). Para tanto, utilizaram o software como referência para os riscos causados pelo trabalho com tal ferramenta. Dessa forma, propuseram um redesenho da

ferramenta. O caso ilustra como o Ergo-IBV pode ser utilizado para analisar o risco de adoecimento inerente ao uso de um produto e serviço a ele atrelado.

✓ Gestantes

Nogareda, Torosa e García (2007) trazem considerações sobre trabalho de gestantes e alguns exemplos de como utilizar o Ergo-IBV nessa situação.

Pode-se destacar, após o levantamento desse panorama de uso, que o Ergo-IBV vem sendo aplicado em diversos setores produtivos.

Cabe ressaltar que os módulos mais utilizados nas pesquisas que compuseram o portfólio da revisão são os módulos de tarefas repetitivas e posturas forçadas (OWAS). Contudo, alguns módulos apresentam poucos estudos evidenciando sua utilização e resultados na prática, como, por exemplo, MMC variável e MMC lesionados, que não foram utilizados em nenhuma pesquisa dentre as selecionadas, conforme aponta o Gráfico 2.

Gráfico 2 – Frequência do uso dos módulos do software Ergo-IBV



Fonte: o autor.

Ainda, convém lembrar que um módulo pode ter sido utilizado mais de uma vez ou concomitantemente a outros módulos em algumas pesquisas.

Conclui-se, após analisar os estudos desta revisão, que o software Ergo-IBV demonstra diversas possibilidades de aplicação práticas e possui um número importante de trabalhos acadêmicos utilizando-o como ferramenta de avaliação.

Softwares contendo ferramentas de avaliação de riscos ergonômicos como o Ergo-IBV auxiliam a complementar as informações que formam a base do diagnóstico ergonômico, conduzido principalmente por métodos sistêmicos, como a AET. A realização de um diagnóstico sistêmico remete à importância da visão global com base na Teoria Geral de

Sistemas, dentro dos métodos desenvolvidos na disciplina. Portanto, a próxima subseção abordará o pensamento sistêmico, seu desenvolvimento, seu impacto na ergonomia e outros métodos/técnicas de análise sistêmica que dela emergiram.

2.3 PENSAMENTO SISTÊMICO: CONCEITOS E DEFINIÇÕES

Três pontos conduzem a abordagem do paradigma tradicional da ciência (também conhecido como método Cartesiano):

- a) a simplicidade, que sugere que os elementos são simples e possuem relações lineares;
- b) a estabilidade do mundo, motivado pela determinação, que sugere que os fenômenos, de forma geral, são previsíveis, o que remete à sua controlabilidade;
- c) a objetividade como critério de cientificidade com a questão única do conhecimento (VASCONCELOS, 2002).

Tal abordagem, conduzida pelo paradigma tradicional, foi necessária de várias formas epistemológicas para o desenvolvimento da ciência moderna, mas não suficiente para o novo paradigma, a visão sistêmica (TABAH; GERA, 2011).

De acordo com Uhlmann (2002, p. 20), a visão Cartesiana relaciona-se “à crença segundo a qual em todo sistema complexo o comportamento do todo pode ser entendido inteiramente a partir das propriedades de suas partes”, atribuída a Descartes. Nessa maneira de pensar, busca-se, fundamentalmente, dividir o todo em partes menores, definindo suas fronteiras para que cada parte separada possa ser estudada de forma isolada das demais (TRACTENBERG, 1999).

De acordo com Tabah e Gera (2011), a ênfase dada ao método Cartesiano inicialmente levou à fragmentação do pensamento e a uma atitude generalizada de reducionismo na ciência. Porém, a evolução do próprio pensamento reducionista de Descartes contribuiu para o surgimento do novo paradigma com olhar sistêmico. Sob a ótica do pensamento Cartesiano, o universo é entendido como um todo unificado que pode, até certo ponto, ser dividido em partes menores, como átomos e moléculas, até que a noção de partes separadas se dissipa. Nesse ponto, surge outra maneira de entender o universo com uma visão de teia dinâmica de eventos que se relacionam. Essa nova forma de abordar os fenômenos implica compreender que todas as partes dessa teia são fundamentais e estão interligadas em um sistema maior.

“Portanto, a abordagem sistêmica analisa a complexidade do todo, em que um ou vários ambientes estão interagindo com o sistema. As metas devem ser as mudanças e o aprendizado, pois o sistema é adaptativo e busca o equilíbrio.” (TABAH; GERA, 2011, p. 199).

Contudo, a abordagem sistêmica não necessita ser uma ideia antagonista à abordagem Cartesiana. A proposta desse novo paradigma na busca pela compreensão da complexidade do todo oferece, de forma geral, um complemento aos métodos tradicionais (LE MOIGNE, 1977).

O pensamento sistêmico ganha força em detrimento aos métodos mecanicistas de pensamento a partir do século XX. Isso ocorreu gradativamente, apoiado em teorias como a Teoria da Complexidade, a Teoria do Caos e a Teoria Geral de Sistemas.

Ballester-Alvarez, Marinho e Santos (2001) propuseram algumas diferenças entre a abordagem cartesiana e o paradigma da abordagem sistêmica. Uma síntese dessas diferenças é apresentada no Quadro 5.

Quadro 5 – Diferença entre a abordagem cartesiana e abordagem sistêmica

Abordagem Cartesiana	Abordagem Sistêmica
Divisão do todo em partes	O todo é conservado como um conjunto indivisível
Cada parte é estudada isoladamente	Os elementos do sistema estabelecem relações e são abordados nesse contexto
As relações de interdependências não são consideradas	Considera-se a relação entre os diversos elementos
Avanço do simples para o complexo	Avanço do complexo para o simples

Fonte: o autor, com base em Silva (2005).

A Teoria Geral de Sistemas define um sistema como um conjunto de elementos que se relacionam entre si. Um sistema, para Wilson (2014), é um conjunto de elementos interligados (como software, hardware, pessoas, espaços, comunidades, edifícios, etc.), com um objetivo em comum e entradas e saídas definidas, cujo comportamento se altera de acordo com essas interações, modificando seu estado. Uhlmann (2002) relata que existem diversos tipos de sistemas, que podem ser classificados como: Sistemas Abstratos; Sistemas Físicos (conjunto de elementos que interagem para atingir um objetivo tangível); Sistema Determinista (sistema previsível); Sistema Probabilista (opera em condições prováveis, aceitando uma margem de erro); Sistema Fechado (não realiza trocas com o ambiente); e Sistema Aberto (realiza trocas com o ambiente).

A Teoria Geral de Sistemas, em suma, apresenta o organismo como um todo bem maior que a soma das partes, portanto um grande sistema de interligações. O pensamento sistêmico, então, aborda como as várias partes de um organismo individual estão interligadas no todo e como essa interligação pode gerar comportamentos diferentes dos comportamentos individuais,

sendo mais relevante que uma abordagem das partes isoladamente (TABAH; GERA, 2011; CAPRA, 1982).

Para Vasconcelos (2002), a cibernética teve grande importância na evolução do pensamento sistêmico em função do desenvolvimento dos mecanismos de feedback e realimentação, fato fundamental para que sistemas continuem ativos.

Definido o conceito de sistemas e pensamento sistêmico, a subseção seguinte aborda os tipos de sistemas.

2.3.1 Tipos de sistemas

Leite (2004) sugere que existem diversas formas de classificar os sistemas, sendo que cada disciplina que faz interface com o tema tem suas próprias definições: a física aborda sistemas lineares, determinísticos, estocásticos e caóticos; a química aborda sistemas dissipativos; a astronomia aborda sistemas evolutivos; a cibernética aborda sistemas especialistas e artificiais; a biologia aborda sistemas vivos e auto-organizados.

A Teoria Geral de Sistemas (BERTALANFFY, 1975) propõe as chamadas Leis Universais dos Sistemas. Essas leis descrevem algumas características básicas de qualquer sistema, sendo:

- a) todo sistema se compõe de subsistemas menores, ou seja, ele se contrai infinitamente. Cada elemento de um sistema é outro sistema. Uma geladeira, por exemplo, é um sistema, e seu motor, um subsistema. Porém, o motor, em menor escala, também é um sistema, composto de elementos menores, que são outros subsistemas;
- b) todo sistema é parte de um sistema maior. Isso significa que ele se expande infinitamente. Em uma análise industrial, por exemplo, uma linha de produção pode ser estudada como um sistema. Contudo, a análise pode ser ampliada levando em conta a demanda do mercado, a economia, políticas públicas e poder de compra do consumidor. Nesse ponto, a linha de produção passa a ser um subsistema que compõe um sistema maior;
- c) todo sistema busca a homeostase. Isso significa que qualquer sistema busca o próprio equilíbrio;
- d) todo sistema apresenta Sinergia. As interações entre as partes e os elementos de um sistema estabelecem que o comportamento do todo se mostra diferente da somatória do comportamento das partes.

A Teoria Geral de Sistemas também estabeleceu a descrição dos sistemas com relação à sua interação com o ambiente onde se insere como:

- a) sistemas fechados, determinísticos ou previsíveis: são sistemas que apresentam nenhuma ou pouca interação com o ambiente;
- b) sistemas abertos, probabilísticos ou imprevisíveis: trocam matéria e energia com o ambiente onde se insere, estabelecendo relações concretas com seu meio. Esses sistemas têm capacidade de crescimento, autorregulação (homeostase) e adaptação (BERTALANFFY, 1975).

A teoria de Bertalanffy (1975) ainda propõe uma diferença entre sistemas estáticos e sistemas dinâmicos:

- a) sistemas estáticos: as partes do sistema e o próprio sistema sofrem poucas mudanças e alterações com relação a seu ambiente de inserção;
- b) sistemas dinâmicos: têm capacidade de alterar seu ambiente de inserção, assim como se modificam por influência desse ambiente.

Apesar da grande variação de classificação e abordagens de sistemas, de maneira geral eles podem ser classificados, de acordo com sua complexidade, em sistemas simples, complicados e complexos (LEITE, 2004).

2.3.1.1 Sistemas simples

Um sistema simples é um sistema cujas entradas, saídas, finalidade, componentes e interconexões podem ser descritos (LEPLAT, 1996).

Pode-se citar como exemplo desse tipo de sistema um computador no plano físico. Um computador pode ser facilmente descrito quanto à sua estrutura física (hardware), o que torna também simples sua compreensão (VIDAL; CARVÃO; BONFATTI, 2011).

2.3.1.2 *Sistemas complicados*

Essa denominação tem relação com uma visão cartesiana da ciência, que está ligada a um paradigma reducionista. Esses sistemas são constituídos por redes complicadas, ligando elementos definidos e identificáveis a comportamentos enumeráveis e pouco numerosos (LEMOIGNE, 1977).

Esse conceito denota algumas conclusões:

- a) sistemas complicados possuem elementos bem definidos e identificáveis;
- b) causas e efeitos dentro desse tipo de sistema podem ser previstos;
- c) causas e efeitos podem ser separados e entendidos de maneira individual, sem prejuízo ao comportamento do todo;
- d) o todo não é mais nem menos que a soma das partes (LEITE, 2004).

A descrição e o tratamento dados aos sistemas denominados complicados são de estabilidade, linearidade, previsibilidade e controle. Eles supõem um conhecimento perfeito e imutável de um universo fechado, o qual não existe na realidade (LEITE, 2004, p. 56).

Um sistema complicado integra grande número de combinações internas e externas e apresenta, também, elevado grau de subdivisões a respeito de subsistemas, componentes e elementos (LEPLAT, 1996).

Apesar de esse tipo de sistema apresentar grande número de componentes e relações entre componentes, eles podem ser identificáveis. Isso pressupõe que se pode separar as causas e os efeitos, de modo a manter os resultados controlados. Em face disso, esse tipo de sistema apresenta possibilidades de melhoria pela otimização das partes (SNOWDEN, 2003).

2.3.1.3 *Sistemas complexos*

Leite (2004) ressalta que durante o século XX diversas descobertas induziram a um questionamento por parte de cientistas acerca dos pressupostos do método reducionista. Principalmente nas áreas da física, em que a mecânica quântica demonstrava, em nível micro, que a previsibilidade e a perfeita relação causalística dentre diversos fenômenos são impossíveis de se atingir. A cibernética e a biologia também revelaram limitações ao estudarem sistemas complexos, por não se apresentarem de maneira linear em seu comportamento.

Com isso, pesquisadores estabeleceram conceitos e critérios para definir um sistema complexo. Leite (2004) abordou alguns desses conceitos, sintetizados a seguir, de acordo com a convergência com o presente estudo:

- a) para Heylighen (1988), um sistema complexo possui três características comuns: quantidade, imprevisibilidade e dificuldade, e possui elementos diferentes e duas ou mais partes, as quais são conectadas ou entrelaçadas, tendo comportamento imprevisível;
- b) segundo Bar-Yam (1997), para compreender o comportamento do sistema complexo, é preciso entender além do comportamento das suas partes individualmente, mas também como elas agem juntas para formar o comportamento do todo;
- c) Casti (1994) define as impressões digitais de um sistema complexo, que, pontualmente, o diferenciam de sistemas simples ou complicados: instabilidade (esses sistemas tendem a assumir diversos modos de comportamento); irredutibilidade (esses sistemas não podem ser compreendidos pela desintegração das partes); adaptabilidade (são compostos de agentes inteligentes que agem com base nas informações e mudam o comportamento do sistema, podendo, inclusive, mudar suas regras de decisão de comportamento conforme as informações adquiridas); e emergência (produzem padrões que não podem ser descritos e previstos pelo conhecimento das partes isoladas, sendo que as partes emergentes são as características mais evidentes de diferenciação entre esses sistemas e sistemas mais simples);
- d) segundo Wu (1999), todo sistema complexo tende a ter um grande número de componentes interagindo de modo complexo. O autor observa que o mundo é repleto desse tipo de sistema, como, por exemplo, sistemas ecológicos, sociais, econômicos ou políticos, incluindo sistemas de produção, comércio, produto-serviço, entre outros.

Em um sistema complexo existem fatores que dificultam ou impossibilitam sua compreensão por meio de um número limitado de variáveis. Incorre, nesse caso, em perder suas características essenciais. Tal tipo de sistema apresenta, em regra, comportamentos complexos,

como emergências e imprevisibilidade (e, às vezes, apresentando comportamento caótico¹³), uma vez que suas interações não são lineares (LEPLAT, 1996).

Segundo Perrow (1984), tais interações e comportamentos não esperados ou não previstos são reflexos da grande interconectividade dos componentes. Essas interações, geralmente, não são facilmente compreendidas ou descritas.

A Dinâmica de Sistemas é um método desenvolvido para modelagem e simulação de sistemas complexos e dinâmicos,¹⁴ baseado na premissa de que o comportamento do todo pode se diferenciar do comportamento das partes isoladamente. Fundamentalmente, o método prevê previsões em um horizonte de simulações, de forma a gerar conhecimento acerca do comportamento do sistema. Isso em função de fornecer modelos que são úteis à compreensão da realidade. A próxima subseção abordará, portanto, a Dinâmica de Sistemas.

2.3.2 Dinâmica de Sistemas

Forrester (1994) afirma que os seres humanos estão, cotidianamente, experimentando mudanças de toda ordem e buscando adaptar-se a todas elas. Porém, segundo o autor, ainda que se tenha uma habilidade intuitiva para compreender tais mudanças em sua dinâmica, essa habilidade é limitada em um sentido de que é mais eficiente em situações simples, nas quais a relação causa e efeito tem capacidade de correlacionar os acontecimentos. A questão, para Souza Junior (2003), é que, quando as situações envolvem maior grau de complexidade, as relações causais não são lineares, dificultando a compreensão e adaptação. Seria, então, necessário, para um entendimento maior acerca da natureza dos sistemas, transpor a ideia de causa e efeito diretamente ligados e passar a observar como uma ação pode ocasionar reações em locais distintos e de formas diferentes e inesperadas.

O termo Dinâmica de Sistemas está relacionado a mudanças que ocorrem no sistema dentro de determinados períodos de tempo. Este princípio leva em consideração a

¹³ Segundo a Teoria do Caos, sistemas caóticos são sistemas complexos que apresentam hipersensibilidade às condições iniciais (RUELLE, 2000). A Teoria do Caos foi desenvolvida a partir das descobertas de Edward Lorenz, pesquisador do MIT no campo da meteorologia. Lorenz desenvolveu simulações do clima do Planeta Terra por meio de modelagem matemática. Ao tentar recriar uma de suas simulações onde havia determinado equilíbrio climático, Lorenz reproduziu as equações com uma pequena diferença: não considerou algumas casas decimais dos números fracionados. Esse detalhe que, inicialmente, pensara o pesquisador, não faria diferença, acabou por criar um planeta com clima completamente distinto do simulado originalmente. A essa hipersensibilidade chamou-se Efeito Borboleta, e, na ocasião, Lorenz concebeu a celebre frase de que o bater de asas de uma borboleta no Brasil pode causar um Tsunami no Texas (CAPRA, 1996).

¹⁴ De acordo com o dicionário Michaelis on-line, a palavra dinâmico refere-se a movimento, dinâmica ou força, ou, conforme o contexto, que evolui permanentemente, mutável. Sistemas dinâmicos, portanto, são sistemas que evoluem ou se modificam com o tempo (FORRESTER, 1968).

própria natureza da palavra dinâmica, fazendo referência a ideia de analisar como interações existentes nos elementos do sistema afetam o comportamento que este produzirá ao longo do tempo, tanto a curto quanto a longo prazo. Muitas análises de curto prazo levam a decisões tomadas que geram resultados positivos neste período de tempo, porém se analisado o resultado esperado no longo prazo, talvez estas ações não seriam tomadas. (SOUZA JÚNIOR, 2003, p. 35).

A Dinâmica de Sistemas foi criada na década de 1950 por Jay W. Forrester a partir de seu trabalho desenvolvido no *Massachusetts Institute of Technology*. O método parte do pressuposto de que a estrutura do sistema gera seu comportamento. Suas principais ferramentas são a modelagem das relações de causalidade das estruturas do sistema e a simulação do comportamento dessas estruturas em um horizonte de tempo. O objetivo é compreender sua relação por meio da influência sobre a estrutura, além de testar decisões e corrigir rumos de forma antecipada nos mais diversos contextos sistêmicos, visando buscar resultados satisfatórios. Alguns exemplos de sistemas que podem ser modelados pelo método são linhas de produção, de lançamento de produtos, de crescimento de cidades e população, de epidemias de doenças e dinâmica de ecossistemas (CORBETT; REIS, 2006).

A evolução do pensamento que induziu a criação do método da Dinâmica de Sistemas ocorreu a partir de trabalhos em sistemas de controle eletrônicos. A natureza dos estudos de sistemas de controle eletrônicos se refletiu na criação de ferramentas que buscam compreender a complexidade envolvida nesses sistemas. Sendo assim, após seu uso inicial para controle de sistemas de engenharia, e pelo fato de utilizarem uma visão integrada, que se alinha aos fundamentos da Teoria Geral de Sistemas, as aplicações do método foram se expandindo para outras áreas. Esse fato, que ganhou força após os anos 1950, levou à sua utilização em campos como da biologia, da economia e de fenômenos sociais (FORRESTER, 1992).

A Dinâmica de Sistemas, portanto, produz conhecimento por meio da simulação, modelagem e análise do comportamento dos sistemas em determinado período, partindo da premissa de que os inter-relacionamentos (dos subsistemas e elementos) e suas estruturas condicionam seu comportamento (CELLI, 2008).

Para Coyle (1996), a Dinâmica de Sistemas é um método de análise de problemas cujo tempo é um fator importante e que envolve o estudo de como o sistema se defende de perturbações externas.

A modelagem é um dos conceitos básicos para a abordagem da Dinâmica de Sistemas. Um modelo é uma abstração da realidade. Tem como intenção representar um comportamento dinâmico, que sofre influência e modificações das várias interações e estímulos que recebe em

certo período. Dessa forma, gera informações acerca de tal comportamento tendo como base as premissas adotadas em sua elaboração (WIAZOWSKI; SILVA; LOURENZANI, 1999).

Segundo Forrester (1961), os modelos podem ser abstratos ou físicos. Quando abstratos, podem ser dinâmicos ou estáticos; quando dinâmicos, podem ser lineares ou não lineares. Modelos lineares podem ser estáveis, ao passo que modelos não lineares podem ser instáveis; ambos podem ser transientes ou de padrão previsível. Quando estáticos, podem ser também não lineares ou lineares; quando lineares, podem ser instáveis (inexistentes) ou estáveis; e quando estáveis, podem ser transientes (inexistentes) ou de padrão previsível. Quando físicos, podem ser dinâmicos ou estáticos.

Conceitualmente, esses modelos podem ser descritos como:

- a) modelos físicos ou abstratos: réplicas em escala reduzida de sistemas, utilizando símbolos ou escrita. Modelos matemáticos são subdivisões de modelos abstratos;
- b) estáticos ou dinâmicos: um modelo estático é utilizado para descrever o comportamento de um sistema que não se altera com o tempo, ou seja, permanece estático. Modelos dinâmicos descrevem sistemas de comportamento dinâmico, que se altera em determinados períodos;
- c) lineares ou não lineares: o comportamento de sistemas lineares é igual à soma das partes do sistema, cujas relações de causa e efeito são previsíveis. A modelagem de sistemas não lineares, os estímulos e as entradas produzem efeitos imprevisíveis;
- d) estáveis ou instáveis: modelos estáveis são aqueles cujo comportamento após um distúrbio retorna ao estado inicial. Modelos de sistemas instáveis tendem a ampliar a ação desse distúrbio;
- e) padrão previsível ou transiente: modelos de padrão previsível apresentam uma repetição do comportamento em determinados períodos. Em modelos de sistemas transientes, o comportamento não se repete ao longo desse período (FORRESTER, 1961; SOUZA JUNIOR, 2003).

Para desempenhar as atividades de modelagem e simulação existem softwares disponíveis no mercado. Em alguns casos, podem ser encontrados como softwares livres. Como exemplo podem-se citar os softwares Stella, iThink, PowerSim e Vensim (CELLI, 2008).

Muitas vezes, para que um modelo seja real e tenha utilidade, faz-se necessário uma complexidade e muitas relações não-lineares, onde a utilização de soluções analíticas não são possíveis. Com nossa capacidade cognitiva também não conseguimos lidar

com tanta complexidade. Então, as simulações são utilizadas para melhor testarmos esses modelos. (CELLI, 2008, p. 34).

As modelagens desenvolvidas por computadores são superiores a modelos desenvolvidos apenas por meio da inteligência humana, pois demonstram dificuldades no que tange à compreensão dos processos de feedback e retroalimentação em horizontes de tempo maiores (MEADOWS et al., 1972; SOBREIRO; ARAÚJO; NAGANO, 2008). Frente a isso, a modelagem computacional utiliza-se de diagramas de realimentação e fluxo-estoque como ferramental em seu escopo. É importante, portanto, para utilização desse tipo de modelagem, considerar quatro conceitos:

- a) estoques: são variáveis armazenadas;
- b) fluxos: são as variáveis que modificam de forma sistemática os estoques;
- c) auxiliares: definem as equações algébricas dos diagramas de fluxo-estoque;
- d) os conectores: inter-relacionam todos os componentes do sistema para formar expressões algébricas e equações (SOBREIRO; ARAÚJO; NAGANO, 2008, p. 29).

O elemento estrutural básico dos sistemas são os ciclos de realimentação de informações. São esses ciclos que representam a estrutura do sistema por relacionarem elementos e definirem seu comportamento, sendo que tal comportamento ocorre em um horizonte de tempo. Nesse sentido, empregam-se modelos qualitativos e quantitativos em busca de compreender quais ciclos de realimentação governam o sistema (COYLE, 1996).

O estado atual do sistema é caracterizado pela produção e percepção de uma informação. Tal informação acarreta o conhecimento do estado atual. A sobreposição do estado atual frente ao estado desejado indica quais são as discrepâncias entre ambos. Isso leva a tomada de decisão a direcionar o sistema ao estado desejado, ato que culminará em adaptações do sistema, caracterizando um novo estado (FORRESTER, 1992).

Coyle (1996) propõe uma abordagem estruturada para a Dinâmica de Sistemas, que consiste em cinco estágios:

- a) reconhecer o problema e as pessoas interessadas;
- b) descrever o sistema por meio do diagrama de influências (ou diagrama de enlace causal);

- c) após desenvolver o diagrama de influências, realiza-se a análise qualitativa, por meio da análise detalhada do diagrama de influências;
- d) se a análise qualitativa não produzir respostas a contento, o quarto estágio propõe a construção de um modelo de simulação, tendo como base o diagrama de influências;
- e) o quinto estágio compreende analisar e testar os resultados obtidos por meio dos testes quantitativos do modelo de simulação. Disso poderão surgir insights em relação a melhorias do sistema.

A Figura 6 sintetiza os estágios para abordagem de Dinâmica de Sistemas proposta por Coyle (1996) adaptada por Ariento Neto (2016):

Figura 6 – Estágios estruturados para abordagem de Dinâmica de Sistemas



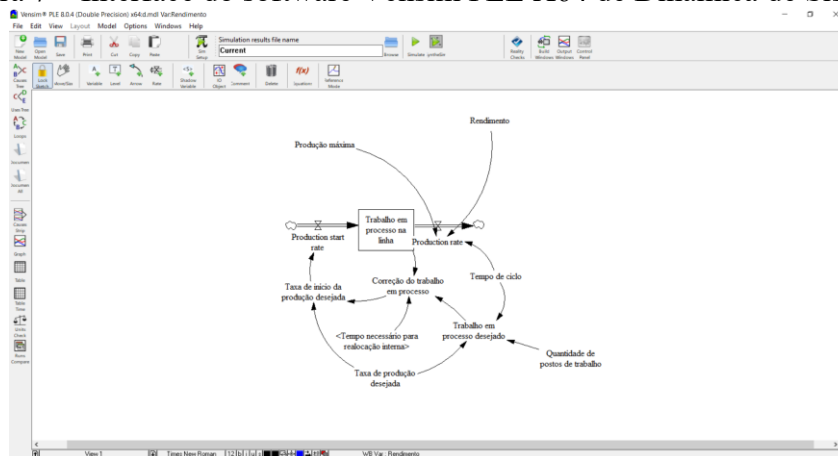
Fonte: Ariento Neto (2016, p. 48), com base em Coyle (1996).

O primeiro estágio refere-se à demanda, tal qual ocorre no processo da AET. Procura-se compreender qual é o problema e quem ele afeta. O segundo e terceiro estágios buscam um entendimento qualitativo dos fatores que compõem o problema em análise, por meio de um diagrama de enlace causal (ou diagrama de causalidade) e hipóteses por ele geradas. Analogamente, a AET apresenta nesse estágio do processo a busca pelas informações qualitativas acerca da tarefa e da atividade que embasem hipóteses de diagnóstico. Quando o conhecimento produzido até esse ponto não é suficiente para a compreensão do problema, o

estágio 4 propõe uma modelagem e simulação quantitativa. Isso permite a compreensão do sistema em horizontes temporais maiores. A AET também se utiliza de ferramentas de avaliação ergonômica para quantificar riscos e prever cenários pontuais, porém com menor alcance sistêmico e temporal, que estabelece a principal diferença entre os métodos e sua possibilidade de integração. O quinto estágio define-se por realizar testes de políticas de intervenção, buscando a eficiência do sistema. Na AET, esse estágio seria contemplado pelas recomendações diante dos problemas encontrados. Testes de sensibilidade dos fatores e elementos podem ser realizados nessa fase, permitindo quantificar sua margem de influência no comportamento do sistema em curto, médio e longo prazos.

A termo de ilustração, a Figura 7¹⁵ apresenta a interface principal do software Vensim (versão PLE X64) de Dinâmica de Sistemas desenvolvido pela Ventana Systems Inc.

Figura 7 – Interface do software Vensim PLE X64 de Dinâmica de Sistemas



Fonte: o autor.

Uma organização produtiva de produtos ou serviços tem, à primeira vista, características básicas de um sistema físico e aberto (KARSH, 2014). Sua tridimensionalidade remete ao sistema sociotécnico. É nesse contexto que atua a disciplina da ergonomia ao buscar adaptar o trabalho ao homem, compreendendo os aspectos impactantes inerentes à situação e descrevendo-os. Portanto, a próxima subseção relacionará a disciplina da ergonomia aos conceitos sistêmicos apresentados.

¹⁵ O modelo de fluxo e estoque que compõe a Figura 7 é meramente ilustrativo e serve apenas ao propósito de apresentar a interface gráfica do software Vensim.

2.3.3 Ergonomia e Pensamento Sistêmico

Para Iida e Guimarães (2016), um sistema produtivo comporta-se de maneira parecida com a de organismos vivos, que constantemente se transformam e se adaptam. Tal afirmação converge com os preceitos da Teoria Geral de Sistemas. Nesse contexto complexo atua a ergonomia. O enfoque ergonômico foi, de fato, desenvolvido sob influência da Teoria Geral de Sistemas. Um sistema pode ser tão amplo como um país ou uma grande empresa, ou focalizado como uma célula ou posto de trabalho. Mas, em todos os casos, é composto pelos elementos a seguir:

- a) fronteira: são os limites do sistema, que podem ser físicos ou não;
- b) subsistemas: são elementos dentro da fronteira do sistema que o compõem;
- c) interações: são relações entre os subsistemas em determinado sistema;
- d) entradas (inputs): são os insumos ou variáveis independentes do sistema;
- e) saídas (outputs): são produtos ou variáveis dependentes do sistema;
- f) processamento: atividades desenvolvidas pelos subsistemas por suas interações para converter entradas em saídas;
- g) ambiente: variáveis que estão dentro ou fora do sistema e podem influenciar no seu comportamento e desempenho (IIDA; GUIMARÃES, 2016, p. 26).

Uma fábrica é um exemplo de um sistema que apresenta entradas (matéria-prima) e saídas (produto final), que são resultados de uma série de transformações (processamento) de diversas operações (subsistemas) (IIDA; GUIMARÃES, 2016).

A ergonomia utiliza-se de métodos apoiados no pensamento sistêmico, considerando os aspectos biopsicossociais das forças humanas nos postos de trabalho. Por operar em ambientes complexos e sistemas abertos, precisa lidar com um número grande de variáveis, dificultando seu controle e análise. Nesse ponto, desconsiderar uma visão sistêmica e abordar o problema de forma reducionista pode levar a uma compreensão equivocada das forças que incidem no trabalho (TEDESCHI, 2002).

O objetivo de uma abordagem sistêmica em ergonomia é aprimorar o desenvolvimento de um sistema específico para melhorar seu desempenho, segurança e o bem-estar das pessoas que interagem com ele, considerando a complexidade envolvida (WILSON, 2014).

A complexidade¹⁶ é uma fonte de comportamento imprevisível do sistema em razão das interações causais entre seus diferentes elementos (técnicos, humanos, organizacionais) e representa um desafio para a ergonomia e para a segurança industrial (BOULOIZ et al., 2013).

Para estudar um sistema, é importante definir sua fronteira, conforme aponta Iida e Buarque (2016, p. 26):

Se desejarmos estudar uma operação em particular, por exemplo, a solda, podemos restringir o sistema colocando a fronteira em torno dessa operação. Assim, esse novo sistema seria composto dos subsistemas soldador e o aparelho de solda. As entradas desse novo sistema seriam as peças a serem soldadas e as saídas, as peças já soldadas. O processamento seria representado pela operação de soldagem. Inversamente, se desejarmos estudar mais amplamente as atividades da fábrica, podemos ampliar a fronteira do sistema. Por exemplo, incluindo-se dentro da fronteira os transportes para a chegada dos materiais e os de saída para a distribuição dos produtos.

De fato, uma abordagem de sistemas é considerada uma característica essencial para a integração dos princípios de ergonomia e/ou fatores humanos dentro de uma organização (DUL et al., 2012).

Os trabalhadores agem como operadores desse sistema por meio de tomadas de decisão. Problemas de segurança e produtividade podem ocorrer quando a ergonomia e/ou fatores humanos não são considerados no desenvolvimento do sistema a ser processado pelo operador (FRUGGIERO et al., 2016).

O sistema homem-máquina-ambiente é a unidade básica do estudo da disciplina da ergonomia. Esse sistema é constituído, basicamente, de um homem e uma máquina interagindo entre si para efetuarem um trabalho, podendo abranger, também, mais homens e mais máquinas, como, por exemplo, uma linha de produção, em um ambiente que também influencia o trabalho (IIDA; GUIMARÃES, 2016).

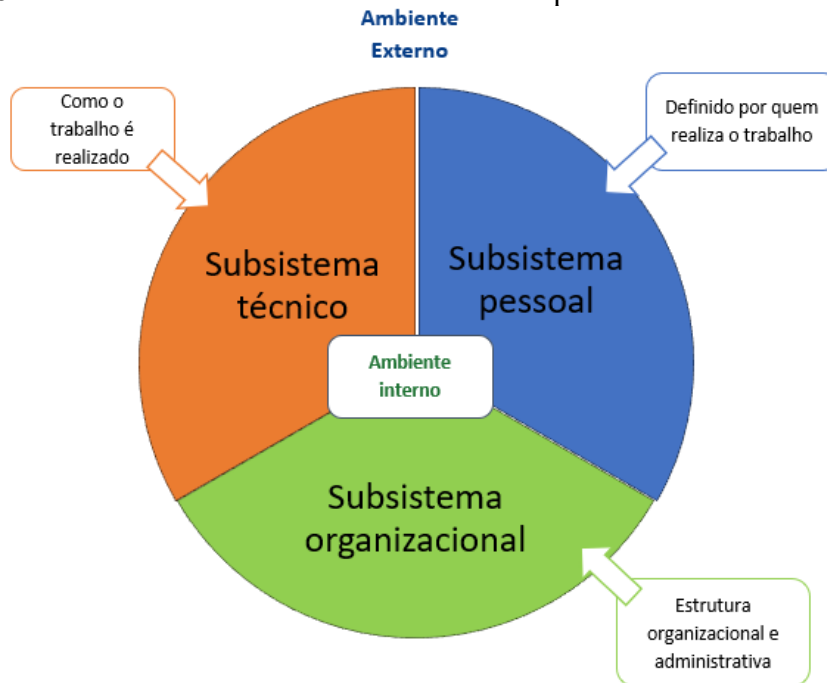
O sistema homem-máquina-ambiente é composto, justamente, por três subsistemas que interagem entre si trocando informações, conforme detalham Iida e Guimarães (2016, p. 28):

O homem, para atuar, precisa das informações fornecidas pela própria máquina, além do estado (situação) do trabalho, ambientes internos e externos e de instruções sobre o trabalho. Essas informações são captadas através dos órgãos sensoriais, principalmente a visão, audição, tato e senso cinestésico (movimento das articulações do corpo), e são processadas pelo sistema nervoso central (cérebro e medula espinhal), gerando uma decisão. Esta se converte em movimentos musculares, comandando a máquina por meio de ações de controle. A máquina emite uma saída, atuando sobre o ambiente externo.

¹⁶ O termo complexidade refere-se a algo que abrange diversas partes ou elementos, que pode ser analisado sob várias perspectivas. Todo trabalho objeto de uma análise ergonômica é, em suma, complexo (VASCONCELOS et al., 2008).

Ressalta-se, também, que, ao realizar sua abordagem, a ergonomia deve levar em conta todos os elementos do cenário analisado. Três subsistemas são citados na literatura: subsistema pessoal; subsistema tecnológico; e subsistema organizacional, conforme a Figura 8.

Figura 8 – Modelo Básico de Sistema de Trabalho pela ótica da Macroergonomia



Fonte: o autor, com base em Attwood, Deeb e Danz-Reece (2004, p. 2) e Kleiner (2006, p.83).

A representação gráfica do modelo básico de sistema de trabalho pela ótica da macroergonomia implica perceber a relação existente entre os elementos estruturais, sendo:

- a) subsistema pessoal: abrange duas ou mais pessoas trabalhando juntas e é definido por aqueles que fazem o trabalho. A relação das pessoas com instalações, equipamentos e ambiente ocorre em função de sua adaptação, compreensão, conforto e segurança;
- b) subsistema tecnológico: tem relação com a interação dos indivíduos com a tecnologia e é definido por como o trabalho é realizado. A relação entre instalações, equipamentos e ambiente e organização estabelece o equilíbrio entre a escolha da tecnologia e equipamentos de produção e os aspectos organizacionais;
- c) subsistema organizacional: toda organização está vinculada a um sistema organizacional, que é caracterizado por suas características culturais e administrativas (KLEINER, 2006).

Ao realizar sua abordagem, a ergonomia deve considerar todos os elementos do cenário analisado, bem como suas interações. A interface que conecta os três elementos estruturais apresenta elevado grau de complexidade, em virtude do grande número de elementos envolvidos. Com isso, percebe-se que a ergonomia atua dentro de um sistema sociotécnico, que tem como característica a não linearidade.

Wilson (2014) sugere que qualquer estudo, investigação, análise ou desenvolvimento em ergonomia necessita de um enfoque sistêmico. Uma análise e/ou proposta de melhoria para uma causa de distúrbios musculoesqueléticos torna-se mais eficiente quando considera também aspectos organizacionais e cognitivos, por exemplo. O ponto levantado pelo autor é que, em geral, todos os aspectos do sistema devem ser considerados, mesmo para a realização de uma análise pontual.

Para Karsh, Waterson e Holden (2014), por exemplo, grande parte da base e motivação do desenvolvimento da macroergonomia¹⁷ deriva da teoria dos sistemas e da aplicação da abordagem de sistemas para compreender aspectos relacionados a segurança, bem-estar e outras variáveis ergonômicas nos ambientes de trabalho.

Baseado nesse contexto sistêmico e na premissa de que existe hoje a necessidade de se ampliar a abordagem sistêmica junto à ergonomia, Guastello (2017) abordou alguns conceitos do pensamento sistêmico e sua interface ou relevância para a disciplina. O autor parte do princípio de que em sistemas não lineares ou complexos existem quatro características fundamentais e que impactam na ação ergonômica:

- a) em primeiro lugar, as funções determinísticas simples podem produzir eventos aparentemente aleatórios; identificar a função pode ser um desafio. A análise da variabilidade é tão importante quanto a análise dos meios que permeia o paradigma linear;
- b) em segundo lugar, existem muitos tipos de mudanças e comportamentos que os sistemas podem produzir, não apenas comportamentos simples. Esses comportamentos podem ser representados por inúmeras estruturas de modelagem,

¹⁷ A Macroergonomia (HENDRICK; KLEINER, 2000) é uma abordagem de ergonomia que analisa a adequação organizacional de organizações produtivas às novas formas e tecnologias de gestão da produção e métodos de organização do trabalho, por meio de análise das condições ambientais, físicas e organizacionais dos postos de trabalho, promovendo a ergonomia participativa. Seu propósito é avaliar, sistemicamente, as variáveis ambientais, tecnológicas e interpessoais que influenciam as relações entre os indivíduos e os dispositivos técnicos, em busca de adaptar o trabalho ao homem e prover eficiência produtiva (KLEINER, 1998).

como atratores, bifurcações, caos, fractais, catástrofes, entropia, auto-organização, emergência e sincronização;

- c) em terceiro lugar, ao contrário da crença comum, os sistemas não estão simplesmente esperando em um estado de equilíbrio até serem perturbados por alguma força externa. Perturbações do sistema podem surgir internamente;
- d) em quarto lugar, o conceito de causalidade muda para os conceitos de controle e emergência. No pensamento mais tradicional, o Evento A, que ocorre hoje, causa o Evento B, amanhã. Se A não acontecesse, B também não aconteceria, e esse seria o fim dos possíveis resultados do comportamento de um sistema. Nos sistemas não lineares, cada agente segue um caminho dinâmico que é fortemente influenciado pelo seu estado anterior. Outras variáveis e eventos externos podem desviar ou redirecionar o caminho do agente, seja por um pouco, seja por muito.

Segundo Guastello (2017), a ergonomia se utiliza de forma positiva do pensamento sistêmico, citando o exemplo do sistema homem-máquina-ambiente. De fato, a Análise Ergonômica do Trabalho também surge com viés sistêmico, além das interações pontuais entre homem e seu ambiente laboral (GUÉRIN, 2001).

Porém, diversos autores, como Salmon et al. (2017), Walker e Manson (2014), Wilson (2014), Dekker (2015) e Leveson (2011), têm relatado preocupação com a rápida evolução em termos de complexidade dos atuais sistemas nos quais se insere a disciplina da ergonomia e sua capacidade de ultrapassar o alcance das ferramentas da análise ergonômica. Sistemas dinâmicos representam um desafio para a compreensão do trabalho. A próxima subseção abordará, portanto, especificamente a inserção da ergonomia em sistemas dinâmicos.

2.3.3.1 Ergonomia e Sistemas Dinâmicos

Conforme já descrito neste estudo, sistemas dinâmicos representam um desafio para a ergonomia, pois a compreensão do trabalho nesses sistemas encontra dificuldade de previsibilidade em médio e longo prazos, em razão, justamente, da dinâmica envolvida em seu comportamento (SALMON, 2016; WALKER, 2014; WILSON, 2014; DEKKER, 2015; LEVESON, 2011).

Esse fato leva diversos autores e pesquisadores da área a buscar formular conhecimentos acerca de métodos, ferramentas e/ou abordagens que desenvolvam capacidade de entendimento quanto aos sistemas dinâmicos. Conforme exposto em seções e subseções anteriores, esse

problema foi centro de discussão do Instituto Britânico de Ergonomia e Fatores Humanos em 2016, ocasião em que os professores Patrick Waterson, David Golightly e Chris Baber debateram acerca das possibilidades e limitações da disciplina no enfrentamento a tal problema. Como saída da conferência, uma edição especial do periódico *Applied Ergonomics* (A2 Qualis-Capes), divulgada também pelo periódico *Journal of Industrial Ergonomics* (B1 Qualis-Capes), foi proposta. Essa edição culminou em sete artigos publicados em 2019 tratando do tema com conceitos teóricos e propostas de abordagens práticas. Dentre eles está o artigo *Simulating the influence of physical overload on assembly line performance: A case study in an automotive electrical component plant* (MATTOS et al., 2019), o qual será descrito em detalhes posteriormente como estudo preliminar desta tese. Nesta subseção, um resumo com os principais pontos dos demais artigos publicados serão expostos:

- a) Hancock (2019) propõe uma discussão teórica acerca de como os *loops* de feedbacks previstos pela cibernética podem ajudar a compreender sistemas complexos com o objetivo de adaptar o trabalho, tornando-o mais humano. Para o autor, ao não se compreender o objetivo e o funcionamento desses *loops*, corre-se o risco de não controlar a direção do comportamento desses sistemas. Ainda de acordo com o autor, é possível que esses ciclos de feedback operem de maneira enganosa, pois o objetivo reivindicado por uma ação ou decisão pode diferir do objetivo real, e que à medida que os dados são coletados e os sistemas regulados em razão desses ciclos de feedback, soluções localmente ideais podem resultar em disfuncionalidade global. O autor conclui, ainda, que se faz necessário que a comunidade de Ergonomia e Fatores Humanos aprofunde seus esforços no entendimento acerca das consequências intencionais e não intencionais das decisões tomadas a respeito de um sistema complexo;
- b) Li et al. (2019) utilizaram uma abordagem integrada entre dois métodos – o *Systems Theoretical Accident Model and Processes* (STAMP) e o *Human Factors Analysis and Classification System* (HFACS) – para descrever o padrão de erros que resultou em um acidente ferroviário na região de Yong-Wen, na China. De forma geral, os autores concluíram que a abordagem resultou em uma análise mais detalhada e sistêmica acerca da sucessão de erros que culminou no acidente. Porém, indicam que o método pode ser melhorado a partir de futuros estudos;

- c) Guastello, Correro e Marra (2019) utilizaram-se de modelos de catástrofe¹⁸ chamados *Cusp Catastrophe Models* para explorar maneiras pelas quais as demandas de trabalho (relacionadas à carga de trabalho mental e à fadiga) são respondidas por meio de estratégias de enfrentamento pelos trabalhadores (regulações) em diferentes condições temporais práticas. Os modelos de catástrofe demonstram como pequenas alterações nos parâmetros que definem o estado de um sistema (neste caso, o sistema é uma equipe de atendimento médico de emergência) podem ter efeitos repentinos na quantificação das atividades. Essa afirmação indica a existência de um sistema caótico (hipersensibilidade às condições iniciais);
- d) Morineau e Flach (2019) propõem uma abordagem heurística à Análise Cognitiva do Trabalho (CWA), por via de integração com o *Dynamic Safety Model* (RASMUSSEN, 1997), que pode auxiliar em um diagnóstico “mais sistêmico” acerca do papel do ser humano em um sistema, enfatizando a relação entre restrições ecológicas e cognitivas. Isso principalmente no tocante aos aspectos de carga cognitiva e de erro humano. O artigo aponta como problema a abordagem CWA não dispor de um meio para retratar a transição entre os constrangimentos (*constraints*) ecológicos e os cognitivos durante a análise do trabalho. Frente ao problema, além da proposta de desenvolver uma versão heurística do CWA, uma aplicação prática foi realizada para teste do incremento metodológico, envolvendo a simulação de uma atividade real (em uma emergência médica);
- e) Wiltshire, Steffensen e Fiore (2019) estudaram a dinâmica da equipe, mais especificamente a *collaborative problem solving* (CPS)¹⁹ entre pares de estudantes utilizando games de simulação de atividades na base lunar virtual da NASA (*Moonbase Alpha simulation*). A análise se realizou pelo movimento corporal (analisado automaticamente a partir de gravações de vídeo) dos membros da equipe, que foi utilizada para inferir dados acerca da coordenação e colaboração entre os membros (incluindo a importância dos aspectos cognitivos). Com isso, os autores puderam descrever os períodos temporais de maior sincronia entre as atividades pelos

¹⁸ A Teoria da Catástrofe (THOM, 1975; ZEEMAN, 1977) fornece um arcabouço teórico e conceitual que tem sido amplamente útil para descrever e prever eventos descontínuos (catastróficos), em que um sistema (normalmente sob estresse) muda seu estado para uma nova configuração (GUASTELLO; CORRERO; MARRA, 2019).

¹⁹ O *collaborative problem solving* pode ser definido como qualquer processo pelo qual dois ou mais agentes tentam resolver um problema. Situação que exige o compartilhamento de habilidades, entendimentos, conhecimentos e esforços para chegar à solução (OCED, 2015; WILTSHIRE, STEFFENSEN e FIORE, 2019).

pares, o que forneceu dados para melhoria do processo e design do trabalho a fim de evitar possíveis erros;

- f) Karwowski et al. (2019) estudaram atividades de vigia em embarcações navais militares americanas. Para estimar a complexidade inerente à tarefa, utilizaram os métodos *0–1 test for deterministic chaos*,²⁰ *Estimation of Lyapunov exponents*²¹ e *Fractal dimensionality*,²² e concluíram que a atividade analisada tem propriedades caóticas e padrões fractais, determinando sistemas de difícil previsibilidade, o que forneceu base para discussões de melhorias no design do trabalho.

Ainda que a edição apresentada possa tangenciar a escolha de métodos e abordagens a sistemas dinâmicos e complexos por profissionais e pesquisadores de ergonomia, pode-se inferir que muito ainda precisa ser realizado para aprofundar a compreensão desses sistemas. Isso tanto no tocante à previsibilidade em horizontes temporais maiores (sendo que a maioria dos trabalhos não atinge previsões de médio e longo prazos), quanto no caráter quantitativo necessário para descrever a não linearidade dos sistemas (sendo que a maioria dos métodos se baseia em análises qualitativas e a mente humana apresenta conhecidas limitações com relação à compreensão e previsão do comportamento desses sistemas), fatores que estão relacionados diretamente ao contexto do problema da presente pesquisa.

Nesse ponto, ressalta-se novamente a importância de buscar e aprofundar formas, abordagens, métodos e ferramentas para compreender comportamentos não lineares de sistemas complexos e dinâmicos, visando melhorias das situações de trabalho. Em tal contexto, pode-se destacar a Dinâmica de Sistemas como potencial método de auxílio da tarefa de suprir a compreensão desses sistemas e seu comportamento. A próxima subseção, portanto, abordará a relação entre Ergonomia e Dinâmica de Sistemas.

²⁰ O método *0–1 test for deterministic chaos* (GOTTWALD; MELBOURNE, 2009a, 2009b) é usado para examinar se os dados observados nas séries temporais exibem comportamento caótico determinístico (KARWOWSKI et al., 2019).

²¹ O Expoente de Lyapunov (LE) pode ser usado para identificar os tipos de sistemas com base em trajetórias dentro de um horizonte de previsão com condições iniciais próximas, provendo inferências acerca do nível de estabilidade e/ou caos desse sistema (IVANCEVIC; IVANCEVIC, 2008; KARWOWSKI et al., 2019).

²² *Fractal dimensionality* é uma propriedade usada na geometria não euclidiana (a geometria fractal também é conhecida como geometria não euclidiada e apresenta formas complexas) para quantificar conjuntos de dados em uma medida relacionada aos chamados padrões de autossimilaridade, também conhecidos nas teorias sistêmicas como fractais (BROWN; LIEBOVITCH, 2010; KARWOWSKI et al., 2019).

2.3.3.2 Ergonomia e Dinâmica de Sistemas

Dois pontos introduzidos anteriormente serão retomados para iniciar essa subseção:

- a) a ergonomia é uma disciplina sistêmica que estuda o ser humano em seu ambiente de trabalho (LEPLAT, 1996; FALZON, 2007; IIDA; GUIMARÃES, 2016);
- b) os sistemas produtivos, em razão da modernização e do incremento tecnológico, apresentam-se cada vez mais complexos, e seu comportamento, dinâmico (STANTON; SALMON; RAFFERTY, 2013; WILSON, 2014; KARSH; WATERSON; HOLDEN, 2014; WALKER et al., 2017; SALMON et al., 2017; GUASTELLO, 2017).

Em uma situação de trabalho estudada pela ergonomia, existem diversos elementos que estabelecem relações entre si. A relação entre os diversos elementos caracteriza a complexidade. Isso pode se refletir em comportamentos não lineares, que geram saídas e resultados inesperados, em face de seu comportamento dinâmico. A tomada de decisão, nesse contexto, é envolta de pouca previsibilidade, principalmente em médio e longo prazos.

Em qualquer situação de trabalho, surgem imprevistos. Cada imprevisto exige tomadas de decisão, às vezes a construção de um problema mais ou menos inusitado, uma resposta a ser dada num determinado prazo de tempo, geralmente o mais curto possível, tendo em vista a preeminência econômica do tempo. Cada tomada de decisão precisa responder a diferentes racionalidades (trabalhador, sistema técnico, empresa, cliente). Entretanto, uma tomada de decisão envolve um risco, porque suas consequências podem ser irreversíveis, tanto para o trabalhador como para a equipe, ou para o sistema. Além disso, a representação que se tem de um mesmo fenômeno do sistema é diferente para cada um dos atores envolvidos nele, pois as racionalidades (expectativas de resposta do sistema) são distintas. (VASCONCELOS et al., 2008, p. 410).

O emprego de uma AET utiliza-se de técnicas que dependem da situação analisada. Dois princípios básicos tangenciam sua viabilização:

- a) a participação do trabalhador no desenvolvimento do estudo, desde a demanda até as intervenções de melhoria;
- b) o estudo em situação real de trabalho (VASCONCELOS et al., 2008).

Os autores ainda complementam que a AET se utiliza da compreensão das atividades das pessoas como fonte de informações para a construção de conhecimentos acerca da situação

de trabalho. Isso visando tornar o trabalho mais saudável e aprimorar o desempenho do sistema técnico.

Ressalta-se que a AET possibilita a descrição do comportamento de um sistema no momento da análise. Contudo, sua abordagem qualitativa pode apresentar limitações ao descrever tal comportamento em médio e longo prazos, conforme apresentado no problema que guia a pesquisa (tendo em vista a importância de métodos quantitativos para a descrição de sistemas complexos).

Com isso definido, é válido lembrar que a ergonomia é uma disciplina científica interdisciplinar que se utiliza de conhecimentos de outras áreas para construir seu conhecimento (DUL; WEERDMEESTER, 2004; IIDA; GUIMARÃES, 2016).

Portanto, ao se analisar sua estrutura sistêmica de abordagem, pode-se perceber que a construção sistemática do conhecimento acerca do trabalho humano feito pela ergonomia, conduzida principalmente pela AET, possibilita o uso da Dinâmica de Sistemas. Isso porque:

- a) a AET fornece um modelo do trabalho cuja descrição permite obter informações acerca dos elementos e subsistemas atuantes e suas relações estabelecidas. Isso em razão de sua abordagem sistêmica e da busca pela compreensão do trabalho real;
- b) a AET pode receber, como retorno da Dinâmica de Sistemas, uma compreensão mais profunda e detalhada das relações de causa e efeito no sistema, em virtude da representação gráfica do diagrama de causalidade, bem como previsões quantitativas, baseada na análise qualitativa prévia.

O objetivo da inserção de uma análise por meio da Dinâmica de Sistemas é, de fato, adicionar um conhecimento mais abrangente acerca do comportamento do sistema. Isso com relação não somente à influência e ao entendimento das realimentações, mas também ampliando seu horizonte temporal de análise.

A tomada de decisão quanto às intervenções de cunho ergonômico encontra imprevisibilidades em médio e longo prazos, em decorrência do comportamento dinâmico e não linear de sistemas complexos. Nesse sentido, a contribuição do uso da Dinâmica de Sistemas reside no fato de fornecer um modelo quantitativo do comportamento do sistema, que permite vislumbrar, antecipadamente, possíveis efeitos relativos às intervenções. Com isso, possibilita-se uma redução da imprevisibilidade do comportamento do sistema, aumentando a confiança para a tomada de decisão.

A ideia de adicionar elementos quantitativos a análises qualitativas para prever o comportamento futuro é explorada de outras maneiras, não somente por meio da Dinâmica de Sistemas. No cerne da questão está, basicamente, a complexidade inerente a sistemas de atuação da ergonomia. Uma das ferramentas utilizadas é a lógica *Fuzzy*.

A lógica *Fuzzy* é “uma ferramenta determinística de gerenciamento de incertezas, que podem ser oriundas de grandezas mensuráveis ou puramente qualitativas.” (BRAGA et al., 2014, p. 63).

Dois exemplos dessa abordagem envolvendo tomada de decisão e riscos inerentes à atividade de trabalho (com relação a acidentes) serão abordados aqui:

- a) Fleming e Garcia (2012) utilizaram a técnica de Análise Preliminar de Perigos (APP) como base para um modelo de análise utilizando a lógica *Fuzzy*. Buscaram, assim, classificar cenários de acidentes e, desse ponto, viabilizar ações para redução do risco aos trabalhadores. O modelo, concluem, é útil para a tomada de decisão com relação às intervenções preventivas;
- b) Braga et al. (2014) desenvolveram um programa computacional com base na lógica *Fuzzy* que visa emular a tomada de decisão e a movimentação humana em um ambiente construído durante uma situação de abandono. Para tanto, levaram em conta aspectos ergonômicos, ambientais e estruturais. A intenção era compreender a tomada de decisão em uma situação crítica, com necessidade de evacuação de um ambiente em risco eminente. O uso do software permitiu avaliar e simular diversos posicionamentos de saídas de emergência, possibilidade de colisões em cada saída e outros aspectos arquitetônicos.

Com esses exemplos, busca-se demonstrar a importância da adição de técnicas quantitativas de prospecção de cenários ao buscar a compreensão de sistemas complexos.

Vasconcelos et al. (2008) afirmam que a complexidade, apesar de estar normalmente associada a trabalhos cujos aspectos cognitivos predominam por conta de sua interação com sistemas de alta tecnologia, também está implícita em questões físicas do trabalho. Contudo, ressaltam que poucos estudos buscam compreender a complexidade que permeia o trabalho físico. Os autores destacam que o trabalho é um objeto multidimensional que pode ser abordado de várias formas e sob diversas perspectivas (econômica, social, física, cognitiva, emocional). Dessa forma, é objeto de estudo de diferentes disciplinas que buscam, para compreendê-lo,

determinar suas fronteiras. Essa multidimensionalidade é que o torna tão complexo, sendo essa complexidade o possível problema central da ergonomia.

A Dinâmica de Sistemas encontra nesse ponto o complemento ao diagnóstico ergonômico fornecido pela AET. Sua capacidade de estabelecer a relação entre vários elementos, mesmo que possuam características abstratas, e de fornecer previsões em um horizonte de simulação possibilita a evolução dos conhecimentos das situações de trabalho para um diagnóstico mais dinâmico e sistêmico.

As informações do diagnóstico inicial, realizado por meio da AET, podem ressaltar os fatores de influência dos elementos do sistema, sendo a base para a estruturação inicial do processo de modelagem. Esses fatores são, comumente, organizados constituindo um contexto sistêmico em um diagrama de causalidade (a modelagem conceitual). Assim, um pré-diagnóstico (que se enquadra nas hipóteses de nível 2 da estrutura proposta por Guérin et al. (2001)) pode ser refinado com a organização das forças que atuam no sistema produtivo em análise, por meio da Dinâmica de Sistemas. No contexto sistêmico, estruturas de malha fechada (os ciclos de realimentação da informação) podem ser identificadas. Esses ciclos são interligados pelas relações entre as variáveis comuns aos ciclos. Essa relação descrita é a base do que será o modelo quantitativo de simulação.

De acordo com a literatura apontada e com a experiência prática no âmbito de atuação da ergonomia por meio da AET, bem como do conhecimento desenvolvido acerca do uso da Dinâmica de Sistemas, espera-se que sua integração possibilite, em termos de implicações prévias em função das primeiras experiências viabilizadas:

- a) que os fatores apontados pelo diagnóstico inicial possam ser organizados em um contexto sistêmico;
- b) a quantificação dos fatores pela descrição matemática das relações;
- c) a prospecção de cenários viabilizando a interpretação do comportamento em relações não lineares.

Especificamente, a simulação computacional estabelece um ambiente de experimentação controlada no qual configurações alternativas podem ser exploradas de forma rápida e sem os riscos de uma implementação experimental piloto.

A ergonomia (AET) e a Dinâmica de Sistemas são os elementos que compõem o tema central da pesquisa. Assim, o uso da Dinâmica de Sistemas no âmbito de atuação da ergonomia

foi objeto de uma revisão sistemática para compreender sua utilização nesse contexto. Os estudos encontrados nessa revisão compõem um panorama útil para a compreensão de como essa integração tem contribuído também em áreas correlatas, como a segurança ocupacional. Os principais achados estão sintetizados nesta subseção.

- a) Rong, Tian e Zhao (2015) avaliaram o incidente ocorrido em 2008 no projeto *Minuteman III*,²³ nos EUA. Seu objetivo foi introduzir o elemento de Probabilidade de Erro Humano (PEH). Para tanto, utilizaram a simulação computacional por meio da Dinâmica de Sistemas, visando modelar as inter-relações entre os fatores nas operações de mísseis que podem contribuir para a ocorrência de acidentes ao longo da implementação do projeto;
- b) Bouloiz et al. (2013) tiveram como objetivo desenvolver um modelo de dinâmica do sistema para formalizar as interdependências causais entre os fatores de segurança (técnicos, organizacionais e humanos) que definem condições de segurança em um sistema industrial complexo. Utilizou-se de uma abordagem sistêmica baseado no uso da Dinâmica de Sistemas. Um estudo de caso foi desenvolvido em uma unidade de armazenamento de produtos químicos localizada no Marrocos, África. O software foi utilizado para avaliar a segurança da unidade de armazenamento, modelando a atividade do sistema industrial, e, por meio da simulação, os usuários puderam definir cenários para melhorar a segurança do sistema industrial e implementar ferramentas gerenciais envolvendo fatores organizacionais, técnicos e humanos;
- c) Kontogiannis (2012) também estudou o erro humano. O autor buscou compreender como o sistema reagia após erros de decisão do usuário, e também como ocorria a relação de recuperação e gerenciamento do erro, por parte de ambos, em interfaces homem-máquina da aviação. A Dinâmica de Sistemas foi usada para analisar e comparar estratégias de recuperação de erros em termos de padrões de interação, recursos do sistema e tipos de planos de recuperação. Para o autor, a Dinâmica de Sistemas oferece uma base promissora para estudar a natureza do gerenciamento de recuperação de erros no contexto. O estudo pode ajudar os profissionais de ergonomia e/ou fatores humanos e especialistas em segurança a desenvolver sistemas resilientes e soluções que atendam ao contexto.

²³ *Minuteman III* trata-se de um projeto americano de Missil Balístico Intercontinental. Em 23 de maio de 2008, ocorreu um incêndio na instalação de lançamento, que fica localizada no estado de *Wyoming*. Apesar de não prejudicar o míssil, o incêndio causou um dano financeiro estimado em 1.029.855,77 de dólares. O erro humano desempenhou um papel importante nas causas do acidente (RONG; TIAN; ZHAO, 2015).

- d) Patterson et al. (2009) analisaram o processo de tomada de decisão dividindo-o em processo analítico e processo intuitivo. Em seu artigo, descrevem um modelo de Dinâmica de Sistemas cuja estrutura se concentra na dinâmica do processo de tomada de decisão. Alguns anos depois, os mesmos autores (PATTERSON et al., 2013) apresentam uma investigação empírica e um modelo de Dinâmica de Sistemas para investigar a tomada de decisão do usuário de veículos. O estudo aborda veículos militares em operação. A simulação revelou que as características básicas do início da decisão dos usuários podem ser simuladas com o modelo proposto. As previsões derivadas do modelo poderiam fornecer informações úteis para o desenvolvimento de interfaces amigáveis;
- e) Melnik (2009) afirma que com a crescente complexidade dos sistemas tecnológicos os erros humanos estão aumentando consideravelmente. Para o autor, o fator humano não tem sido considerado de maneira adequada nos projetos desses sistemas. Propõe, então, a inserção do fator humano na modelagem matemática, de maneira a prever o comportamento do sistema, a fim de evitar o erro. Como resultado, afirma que é possível a integração dos aspectos humanos no projeto de sistemas por meio da simulação matemática, reduzindo os riscos inerentes ao processo para redução de erros e acidentes;
- f) Sharma (2006) afirma que o comportamento e o desempenho do sistema humano-máquina são dinâmicos, não lineares e, possivelmente, caóticos, e que diversas técnicas foram utilizadas para descrever tais características. No entanto, essas técnicas apresentam limitações ao tentarem descrever esse comportamento não linear. O autor, portanto, propõe em seu estudo o uso da teoria dos Sistemas Dinâmicos Não Lineares como uma técnica possível para descrever as características dinâmicas, não lineares e possivelmente caóticas do sistema humano-máquina. Ele descreve brevemente algumas das técnicas disponíveis e ilustra como sua aplicação pode explicar várias propriedades desses sistemas complexos.

Apesar do foco voltado a eventos de acidentes e ao erro humano, os estudos descritos oferecem uma ideia da utilidade da Dinâmica de Sistemas em auxiliar métodos qualitativos e/ou descritivos na compreensão do comportamento do sistema quanto a cenários futuros. Isso porque possui capacidade de estabelecer laços entre os elementos e demonstrar, quantitativamente, como estes se influenciam.

Dentro do âmbito de atuação da ergonomia, tem-se uma oportunidade de complementar as análises sistêmicas com o uso da Dinâmica de Sistemas em associação a métodos e técnicas como a AET. Uma abordagem nesse sentido pode fornecer um entendimento maior em termos temporais para o comportamento de sistemas dinâmicos, complexos e não lineares.

2.4 SÍNTESE DA FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta subseção serão abordados alguns conceitos descritos nas seções anteriores em forma de síntese acerca da fundamentação teórica da pesquisa. Para tanto, organizou-se sua estrutura em subseções menores, cuja descrição concerne a cada assunto desenvolvido nesta seção.

Com relação à evolução da indústria, foram identificados como principais pontos:

- a) a evolução dos sistemas produtivos ocorreu, visando maior eficiência e produtividade dos processos;
- b) após a Revolução Industrial, as ideias de Taylor foram implementadas em diversas organizações e foram responsáveis pelo crescimento produtivo de diversos países, por meio da racionalização do trabalho;
- c) outras formas de organização do trabalho surgiram, mas a Administração Científica do Trabalho estabeleceu o paradigma que foi vigente por grande parte do século XX;
- d) auxiliaram na quebra do paradigma Taylorista: (i) o surgimento da Teoria Geral de Sistemas e o pensamento sistêmico; (ii) conflitos trabalhistas e o surgimento das doenças ocupacionais; (iii) a crise do petróleo na década de 1980 e o surgimento de sistemas de produção mais flexíveis (como o Sistema Toyota de Produção ou Produção Enxuta);
- e) a evolução dos sistemas produtivos até os modernos sistemas tecnológicos acarretou um aumento da complexidade;
- f) um sistema produtivo comporta-se de maneira parecida a organismos vivos, que constantemente se transformam e se adaptam (IIDA; GUIMARÃES, 2016);
- g) tais sistemas apresentam comportamentos dinâmicos e não lineares, cuja previsibilidade guarda uma relação inversamente proporcional com o aumento da complexidade.

Nesse contexto, a Ergonomia se desenvolve como uma disciplina sistêmica. Com relação à Ergonomia, foram identificados como principais pontos:

- a) a ergonomia é o estudo da adaptação do trabalho ao homem (IIDA; GUIMARÃES, 2016), ou a ciência da configuração de trabalho adaptada ao homem com o principal objetivo de desenvolvimento científico para a adequação das condições de trabalho às capacidades das pessoas que o realizam (GRANDJEAN, 1998; KROEMER; GRANDJEAN, 2005);
- b) a ergonomia busca dois objetivos: (i) produzir conhecimento sobre a relação entre trabalho e trabalhador; e (ii) formular conhecimentos, métodos, ferramentas e princípios que possam orientar a transformação das condições de trabalho para criar melhores condições entre ambiente e trabalhador (ABRAHÃO; PINHO, 2002);
- c) a ergonomia utiliza-se de métodos apoiados no pensamento sistêmico, considerando os aspectos biopsicossociais das forças humanas nos postos de trabalho (TEDESCHI, 2002);
- d) o objetivo de uma abordagem de sistemas em ergonomia é aprimorar o desenvolvimento de um sistema específico para melhorar seu desempenho, bem como a segurança e o bem-estar das pessoas que interagem com ele, considerando a complexidade envolvida (WILSON, 2014);
- e) a AET é um método de intervenção, sistematicamente estruturado e de normativa exigência pela NR 17, que permite compreender os fatores determinantes das situações de trabalho e a relação entre ambiente laboral e trabalhador;
- f) para tanto, a AET tem como pressuposto básico distinguir entre o trabalho prescrito, denominado de tarefa, e a atividade, que é o trabalho efetivamente realizado pelo trabalhador, inserido em um determinado contexto (ABRAHÃO; PINHO, 1999);
- g) a AET fornece um diagnóstico sistêmico que serve de base para a tomada de decisão de uma situação de trabalho no momento da análise;
- h) o software Ergo-IBV pode auxiliar a AET em identificar riscos físicos e psicossociais de uma situação de trabalho.

Com relação à Teoria Geral de Sistemas, de Ludwig Von Bertalanffy (1925), foram identificados como principais pontos:

- a) o pensamento sistêmico auxiliou na quebra do paradigma da abordagem Cartesiana, vigente até o início do século XX;
- b) a teoria Geral de sistemas define um sistema como um conjunto de elementos que se relacionam entre si; sistemas podem ser definidos como: (i) simples: sistema cujas entradas, saídas, finalidade, componentes e interconexões podem ser descritas (LEPLAT, 1996); (ii) complicados: são constituídos por redes complicadas, ligando elementos definidos e identificáveis com comportamentos enumeráveis e pouco numerosos (LE MOIGNE, 1977); (iii) complexos: possuem três características comuns: quantidade, imprevisibilidade e dificuldade, e possuem elementos diferentes e duas ou mais partes, as quais são conectadas ou entrelaçadas, tendo comportamento imprevisível (HEYLIGHEN, 1988);
- c) em um sistema complexo existem fatores que dificultam, se não impossibilitam sua compreensão por meio de um número limitado de variáveis. Incorre-se, nesse caso, em perder suas características essenciais. Tal tipo de sistema apresenta, em regra, comportamentos complexos, como emergências e imprevisibilidade, uma vez que suas interações não são lineares (LEPLAT, 1996);
- d) sistemas produtivos (indústria de bens e serviços) estabelecem interrelações entre os diversos elementos e variáveis que o compõem e apresentam comportamentos dinâmicos e não lineares.

Quanto à Dinâmica de Sistemas, foram identificados como principais pontos:

- a) a dinâmica de sistemas foi criada na década de 1950 por Jay W. Forrester a partir de seu trabalho desenvolvido no Massachusetts Institute of Technology;
- b) parte do pressuposto de que a estrutura do sistema gera seu comportamento;
- c) suas principais ferramentas são a modelagem das relações de causalidade das estruturas do sistema e a simulação do comportamento dessas estruturas em um horizonte de tempo;
- d) o objetivo é compreender sua relação por meio da influência sobre a estrutura, além de testar decisões e corrigir rumos de forma antecipada nos mais diversos contextos sistêmicos, visando buscar resultados precisos e detalhados.

Com relação à Ergonomia e Sistemas Dinâmicos, foram identificados como principais pontos:

- a) profissionais e pesquisadores da ergonomia se deparam com sistemas dinâmicos ao longo de sua atuação profissional e acadêmica;
- b) o objetivo da ergonomia, nesses casos, é compreender a dinâmica inerente a esses sistemas para transformar o trabalho;
- c) nesse ponto, dificuldades para a compreensão de sistemas dinâmicos e complexos apontam para a necessidade de se estabelecerem métodos e abordagens com tal finalidade;
- d) alguns trabalhos já estão sendo realizados nesse sentido, mas ainda há muito para evoluir na busca por abordagens de previsão de cenários para a ergonomia em sistemas dinâmicos, principalmente em médio e longo prazos.

A respeito da associação entre a Ergonomia e a Dinâmica de Sistemas, foram identificados como principais pontos:

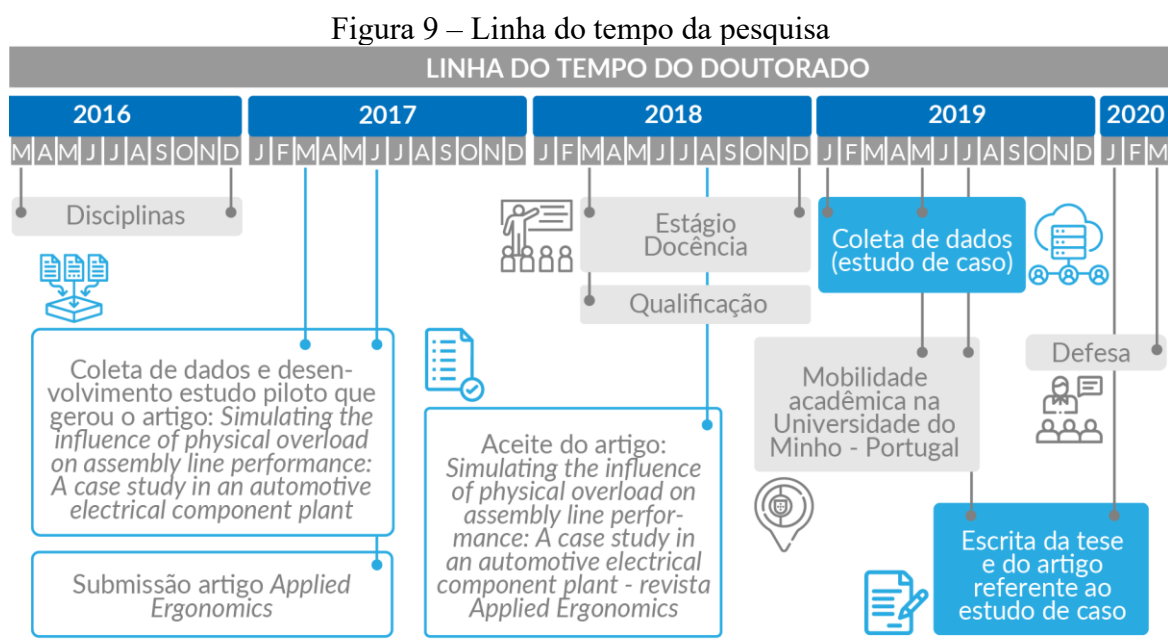
- a) em uma situação de trabalho estudada pela ergonomia, existem diversos elementos que estabelecem relações entre si, com características de complexidade;
- b) isso pode se refletir em comportamentos não lineares, que geram saídas e resultados inesperados, em face do comportamento dinâmico típico desses sistemas complexos. A tomada de decisão, nesse contexto, pode ser dificultada pela pouca previsibilidade em médio e longo prazos;
- c) a AET possibilita a descrição do comportamento de um sistema no momento da análise. Contudo, seu foco qualitativo pode apresentar limitações ao descrever quantitativamente tal comportamento em médio e longo prazos;
- d) ao se analisar sua estrutura metodológica, pode-se perceber que a construção sistemática do conhecimento acerca do trabalho humano feito pela ergonomia, conduzida principalmente pela AET, possibilita o uso da Dinâmica de Sistemas porque: (i) a AET fornece um modelo do trabalho cuja descrição permite obter informações acerca dos elementos e subsistemas atuantes e suas relações estabelecidas; (ii) a AET recebe, como retorno da Dinâmica de Sistemas, uma compreensão mais profunda das relações de causa e efeito no sistema, em razão da representação gráfica do diagrama de causalidade, bem como previsões quantitativas, baseada na análise qualitativa prévia;

- e) o objetivo da inserção de uma análise por meio da Dinâmica de Sistemas é, de fato, adicionar um conhecimento mais abrangente com relação ao comportamento do sistema;
- f) outros estudos buscam auxiliar o diagnóstico de métodos qualitativos com ferramentas quantitativas. Um exemplo disso é o uso da lógica *Fuzzy*;
- g) a Dinâmica de Sistemas tem sido utilizada como apoio ao diagnóstico de situações de acidente de trabalho. Isso fornece uma perspectiva de como se pode usá-la em questões ergonômicas;
- h) uma abordagem nesse sentido pode fornecer um entendimento maior em termos temporais para o comportamento de sistemas dinâmicos, complexos e não lineares, bem como maior previsibilidade para tomadas de decisão em ergonomia.

Com base no problema de pesquisa apresentado anteriormente e na abordagem proposta para responder ao problema levantado, apresenta-se, na seção a seguir, os procedimentos metodológicos do presente estudo.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta seção apresenta a descrição dos procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento da presente pesquisa. Na Figura 9 são apresentadas as atividades realizadas durante o período do doutorado, bem como as fases da pesquisa e as publicações científicas decorrentes. A linha do tempo apresentada contempla o período de fevereiro de 2016 a março de 2020. O primeiro ano (2016) destinou-se à execução das disciplinas exigidas pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da UFSC, e que forneceram o arcabouço teórico de base para a construção da pesquisa. Em 2017 iniciou-se o desenvolvimento teórico (revisões bibliográficas, prospecção das oportunidades de pesquisa relacionadas à lacuna de conhecimentos encontrada e modelo preliminar da proposta de abordagem, abrangendo as etapas 1 e 2 da pesquisa), a coleta de dados do estudo preliminar e a escrita do artigo científico referente a esse estudo. O terceiro ano (2018) destinou-se à completude do estágio docência e à qualificação da tese. Nesse ano o artigo científico referente ao estudo preliminar foi aceito e publicado no periódico *Applied Ergonomics*. Já no último ano ocorreram a formalização gráfica do modelo de abordagem proposto, as coletas e desenvolvimento do estudo de caso, a mobilidade acadêmica junto à Universidade do Minho (Portugal) e a escrita do artigo científico referente ao estudo de caso que está em processo de submissão. Também nesse ano a avaliação da proposta de abordagem foi realizada (abrangendo a fase 3 da pesquisa), bem como a escrita da tese. Em 2020 ocorre a defesa da tese.



Fonte: o autor.

A aplicação prática da proposta de abordagem (etapa 2) ocorreu no maior período destinado ao desenvolvimento geral da tese. As etapas 1 e 3, que abrangem o desenvolvimento da proposta de abordagem e a avaliação da proposta de abordagem, respectivamente, demandaram menor tempo em virtude de dependerem exclusivamente dos dados de posse do pesquisador.

Para a continuação do desenvolvimento desta seção, a subseção correspondente aos Materiais e Métodos é apresentada.

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa foi dividida em três etapas, sendo (i) desenvolvimento (revisão de literatura e proposta de abordagem); (ii) aplicação prática da abordagem; e (iii) avaliação da abordagem, conforme a Figura 10. Cada etapa será abordada em sequência para detalhar os procedimentos metodológicos utilizados.

Figura 10 – As fases utilizadas nessa etapa Etapas da pesquisa

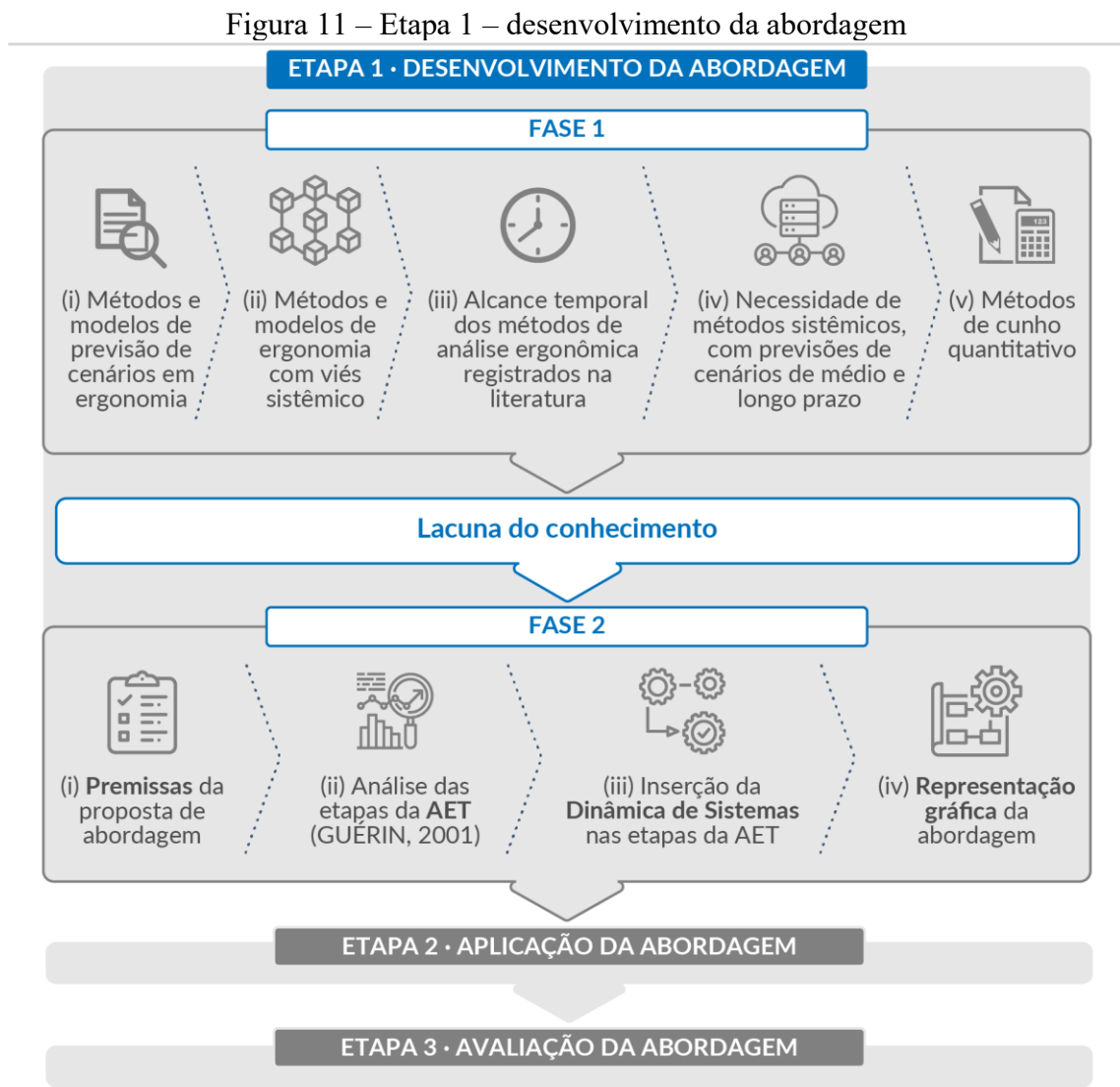


Fonte: o autor.

Etapa 1 – Desenvolvimento (Fundamentação teórica e Sistematização da Proposta de Abordagem): essa etapa compreendeu a revisão da literatura, bem como a formulação do problema, além das premissas e da proposta de abordagem. A revisão sistemática englobou periódicos (bases de dados *Web of Science* e *Scopus*) e teses e dissertações (Base Digital Brasileira de Teses e Dissertações, Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES, *ProQuest*),

com o objetivo de formatar o problema de pesquisa e dar base à proposta de abordagem. Os temas centrais da revisão são a Ergonomia (AET) e a Dinâmica de Sistemas.

As fases utilizadas nessa etapa estão ilustradas na Figura 11.



Fonte: o autor.

Em um primeiro momento (fase 1), os estudos analisados forneceram informações e dados que foram considerados para a construção tanto do problema quanto da proposta de abordagem, cerne desta pesquisa. Para tanto, alguns aspectos dos métodos e pesquisas registrados na literatura foram considerados:

- a) métodos e modelos de previsão de cenários em ergonomia;
- b) métodos e modelos de ergonomia com viés sistêmico;

- c) alcance em termos de horizonte temporal dos métodos de análise ergonômica registrados na literatura;
- d) necessidade identificada pelos pesquisadores em ergonomia sobre métodos sistêmicos, com previsões de cenários de médio e longo prazos;
- e) métodos de cunho quantitativo.

Após a identificação da lacuna que oportuniza a pesquisa, a proposta de abordagem foi sistematizada na fase 2. Essa fase englobou quatro subfases, sendo:

- a) a construção das premissas da proposta de abordagem utilizando a AET e a Dinâmica de Sistemas para responder ao problema de pesquisa;
- b) uma análise acerca das etapas da AET de Guérin (2001) previamente apresentadas. Para tanto, utilizou-se da representação gráfica proposta pelo autor para compreensão de cada etapa;
- c) o passo seguinte ocorreu com relação à inserção da Dinâmica de Sistemas nas etapas da AET, considerando em que etapa a Dinâmica de Sistemas pode contribuir na formação do conhecimento;
- d) por último, uma representação gráfica da abordagem foi construída, apresentando as etapas sistematizadas a serem seguidas na aplicação prática. Essa proposta será apresentada na seção a seguir.

Etapa 2 – Aplicação (Execução Prática da Proposta de Abordagem): essa fase compreendeu a coleta e análise dos dados e foi subdividida em duas situações práticas:

- a) estudo preliminar:²⁴ foi realizado com o objetivo de testar a proposta em uma situação prática antes da efetiva realização do estudo de caso. Esse estudo foi realizado em uma indústria de componentes elétricos automotivos, cujas características estão descritas posteriormente, na seção de aplicação prática. O estudo preliminar serviu como base para melhorias e estruturação da abordagem prática para o estudo de caso realizado à posteriori;

²⁴ Os resultados dessa aplicação foram publicados em formato de artigo no periódico *Applied Ergonomics* sob o título de: *Simulating the influence of physical overload on assembly line performance: A case study in an automotive electrical component plant*, de autoria de Diego Luiz de Mattos, Rafael Ariento Neto, Eugenio Andrés Díaz Merino e Fernando Antônio Forcellini.

- b) estudo de caso: de posse dos resultados do estudo preliminar que indicavam a viabilidade da proposta de abordagem, um estudo de caso foi realizado em uma indústria de embalagens de papelão ondulado, cujas características serão descritas na seção posterior. Os resultados obtidos com o estudo de caso também foram compilados em um artigo que se encontra, nesse momento, em etapa de submissão.

Os critérios para a escolha das organizações nas quais se aplicou a pesquisa prática levaram em conta:

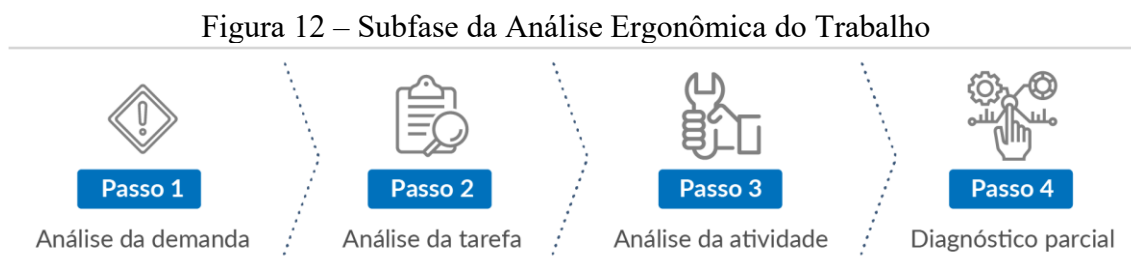
- a) a importância das indústrias para suas respectivas regiões: ambas as indústrias são empregadoras importantes;
- b) características do sistema produtivo: ambas as organizações possuem um sistema produtivo e de gestão estruturado, com base em práticas de produção enxuta e linhas de produção;
- c) facilidade de contato: o pesquisador mantém vínculos com ambas as organizações, fato que facilitou o contato inicial, a autorização para a realização da pesquisa e a coleta de dados;
- d) localização: ambas as organizações estão situadas na região sul do Brasil, o que facilitou o deslocamento do pesquisador.

A opção pela aplicação em duas organizações diferentes ocorreu pela possibilidade de aplicar a proposta de abordagem em diferentes situações e enriquecer os dados acerca de sua viabilidade em diferentes segmentos industriais. Também possibilitou a adaptação, o teste e o reforço dos modelos de simulação, tendo em conta que quanto mais um modelo for testado, maior sua confiabilidade.

Contatos iniciais foram estabelecidos pelo pesquisador. Após o interesse expresso das organizações em abrigar a pesquisa, as demandas foram definidas e apresentadas pelos membros da empresa responsáveis pelos setores produtivos e de saúde e segurança. O local para realização das aplicações práticas, bem como o setor interno da organização no qual se aplicou a pesquisa foram definidos levando em consideração: enquadramento do sistema produtivo com a proposta de abordagem, possibilidade de gerar resultados dentro do prazo previsto e aceite dos gestores para a realização da pesquisa.

Ainda, os procedimentos de aplicação prática, tanto para o estudo preliminar quanto para o estudo de caso, seguiram as mesmas etapas gerais, cada estudo foi dividido em três subfases relacionadas a cada método específico aplicado, sendo (i) Análise Ergonômica do Trabalho, (ii) uso da Dinâmica de Sistemas e Diagnóstico Global e (iii) Recomendações, conforme descrito a seguir. O uso de ferramentas de análise de risco ergonômico, nomeadamente o software Ergo-IBV, módulo REBA, como técnica auxiliar do diagnóstico da AET estabelece um detalhe adicional do estudo de caso em relação ao estudo preliminar. Portanto, o software será também inserido e descrito conjuntamente aos procedimentos de aplicação da AET.

– **Análise Ergonômica do Trabalho:** a Análise Ergonômica do Trabalho, conforme visto, é um método de intervenção que permite compreender os fatores determinantes das situações de trabalho e a relação entre ambiente laboral e trabalhador (ABRAHÃO; PINHO, 1999). Assim, conforme a Figura 12, essa subfase foi dividida em quatro passos (sendo que o passo de Recomendações é utilizado posteriormente), adaptados de Guérin (2001):



Fonte: adaptada de Guérin (2001).

Passo 1 – Análise da Demanda: passo inicial da AET, visando formalizar diferentes informações para estabelecer um ponto de partida para as próximas etapas. Nesse passo o pesquisador buscou estabelecer junto à organização em estudo qual a demanda principal para intervenção ergonômica. Para tanto, indicadores de saúde, segurança, produtividade e qualidade foram levantados, formando um panorama geral destes por setor.

Passo 2 – Análise da Tarefa: compreende a identificação e descrição do trabalho prescrito e os requisitos para a execução do trabalho. Nesse passo o pesquisador buscou identificar o trabalho prescrito em documentos e fluxogramas desenvolvidos pela organização, as expectativas da organização com relação ao rendimento do trabalhador (metas, desempenho) e as ferramentas oferecidas para tanto (layout, EPIs).

Passo 3 – Análise da Atividade: análise do trabalho de fato realizado, ou seja, a forma como o trabalhador executa na prática o que lhe é requisitado. Realizado por meio de

observação direta e documental das AETs previamente desenvolvidas pelas organizações. Nesse passo o pesquisador busca identificar o que de fato o trabalhador necessita realizar a fim de cumprir suas metas, abrangendo suas posturas, movimentação, modo de operação, etc.

Passo 4 – Diagnóstico Parcial: tem por finalidade evidenciar qualitativamente os distúrbios ergonômicos da situação analisada. Nesse passo são identificadas as regulações do trabalho e os reflexos da atividade de forma pontual e global. O software Ergo-IBV, módulo REBA, foi utilizado como ferramenta auxiliar na análise de riscos ergonômicos físicos, conforme indica sua inserção gráfica no respectivo passo da AET. Ainda, para essa tese, o diagnóstico é dividido em Diagnóstico Parcial (que formula hipóteses diagnósticas de cunho qualitativo atribuídas aos achados exclusivos da AET) e Diagnóstico Global (de cunho qualitativo e quantitativo, após a aplicação das técnicas de Definição Conceitual, Descrição Estrutural e Prospecção com uso da Dinâmica de Sistemas) junto às Recomendações;

As Recomendações (que estabelecem o quinto passo proposto por Guérin em 2001), foram desenvolvidos após o uso da Dinâmica de Sistemas.

O objetivo dessa subfase foi compreender a situação de trabalho por meio da identificação e descrição de dados que permitam identificar *loops* de informação. Para a realização da AET, foram utilizados dados fornecidos pela empresa, indicadores de produtividade, afastamento e qualidade, observação da atividade, bem como análise documental acerca do trabalho prescrito.

O software Ergo-IBV foi utilizado para avaliação de riscos musculoesqueléticos relacionados à situação de pesquisa na fase de Diagnóstico da AET no estudo de caso na indústria de embalagens de papelão ondulado.

O Ergo-IBV foi desenvolvido pelo Instituto de Biomecânica de Valência. Trata-se de um software de avaliação e recomendações de melhorias e redesenho relacionados a riscos ergonômicos e psicossociais. Seu desenvolvimento tangenciou-se por quatro princípios:

- a) reunir em um software os métodos de avaliação ergonômica mais utilizados;
- b) ajudar o avaliador a selecionar qual é o método de avaliação mais adequado para cada situação;
- c) fornecer ferramentas para apoiar o desenho e redesenho dos locais de trabalho;
- d) complementar outros métodos e serviços oferecidos pela instituição para análise e melhorias das condições ergonômicas (INSTITUTO DE BIOMECÂNICA DE VALÊNCIA, 2018).

Dessa forma, buscou compilar diversas ferramentas para analisar variadas situações de trabalho em seu escopo. Sua escolha para utilização nesta pesquisa se baseou nos seguintes critérios:

- a) facilidade de acesso ao programa (NGD/LDU mantém uma licença para uso);
- b) possibilita analisar diversas situações de trabalho (físicas, cognitivas e organizacionais);
- c) compila algumas das ferramentas mais utilizadas (REBA, NIOSH, OCRA, etc.);
- d) interface amigável e intuitiva;
- e) bastante utilizada em organizações, principalmente na Europa (conforme dados extraídos da revisão bibliográfica sistemática realizada para esta pesquisa)

O Ergo-IBV na versão v.16 possui 13 módulos de análise. Os módulos estão explicados a seguir:

- a) *MMC Simple* e *MMC Multiple*: esse módulo tem como base a equação NIOSH.²⁵ A equação NIOSH para levantamento de cargas foi desenvolvida em 1981 pelo Instituto NIOSH, nos Estados Unidos. Surgiu da necessidade de um método para identificar riscos no levantamento, transporte e carregamento de cargas, quantificando possíveis distúrbios osteomusculares da coluna lombar por meio de uma equação. Tal equação foi revista em 1991, incluindo fatores de duração da tarefa, frequência de levantamento e qualidade da pega. A equação NIOSH é baseada na premissa de que o risco da ocorrência de distúrbios osteomusculares aumenta com o distanciamento entre o limite de peso recomendado e o peso que de fato é manipulado, estipulando, assim, um Índice de Levantamento (IL) obtido pelo quociente entre o peso real (PR) e o Limite de Peso Recomendado (LPR) (VALL RIBEIRO; ANDRADE TERESO; FUNES ABRAHÃO, 2009). A partir de uma revisão da equação NIOSH com auxílio do guia técnico da INSHT, Snook e Ciriello e da norma UNE-EN 1005-2, atividades de levantar, carregar, empurrar ou puxar carga foram inseridas;

²⁵ NIOSH: National Institute for Occupational Safety and Health.

- b) MMC Lesionados: esse módulo foi desenvolvido a partir de critérios obtidos por um estudo realizado na Universidade de Ohio. Permite avaliar tarefas de levantamento manual de cargas por trabalhadores que apresentam distúrbios ou patologias na coluna lombar;
- c) Tarefas Repetitivas: foi desenvolvida pelo Instituto de Biomecânica de Valência como proposta de um método para avaliação dos riscos aos membros superiores em decorrência de suas posturas. O método considera a movimentação e manutenção de posturas das mãos, punhos, cotovelos, ombros e cervical, bem como posição dos pés e do tronco e equilíbrio para propor um índice de risco de lesão para, exclusivamente, os membros superiores;
- d) posturas forçadas (OWAS): o método OWAS²⁶ foi desenvolvido pelo grupo siderúrgico finlandês denominado *OVAKO Oy* em conjunto com o Instituto Finlandês de Saúde Ocupacional em meados dos anos 1970, pelos pesquisadores Karu, Kansu e Kuorinka. Trata-se de uma ferramenta de avaliação ergonômica utilizada para analisar inadequações posturais durante a atividade. Partiu de uma premissa básica de ser um método simples, de fácil uso e aprendizado, porém com informações concretas e fidedignidade (CARDOSO JUNIOR, 2006);
- e) posturas (REBA): segundo Cardoso Junior (2006), o método REBA²⁷ foi desenvolvido por Hignett & Mcatamney em 2000 com o intuito de quantificar riscos para todo o corpo de acordo com a postura adotada e as exigências da tarefa;
- f) oficina: o módulo de oficina se aplica a postos de trabalho ocupados por um mesmo trabalhador em períodos maiores do que duas horas diárias com uso de telas de visualização e monitores;
- g) ergomater: o módulo Ergomater apresenta-se em formato de questionário. Permite a detecção de riscos ergonômicos para trabalhadoras gestantes, principalmente com relação a fatores físicos da tarefa, condições organizacionais e ambientais que possam representar risco à saúde da gestante e do feto;
- h) psicossocial: o módulo também se apresenta como um questionário que permite medir e valorar a exposição de trabalhadores a riscos psicossociais. Trata-se de uma versão resumida do Questionário de Avaliação de Riscos Psicossociais no Trabalho (CoPsoQ-istas21), que é uma adaptação do Questionário Psicossocial de

²⁶ OWAS: Ovako Working Posture Analysis System.

²⁷ REBA: Rapid Entire Body Assessment.

Copenhague. Tal adaptação foi realizada pelo Instituto Sindical do Trabalho, Ambiente e Saúde (ISTAS) da Espanha;

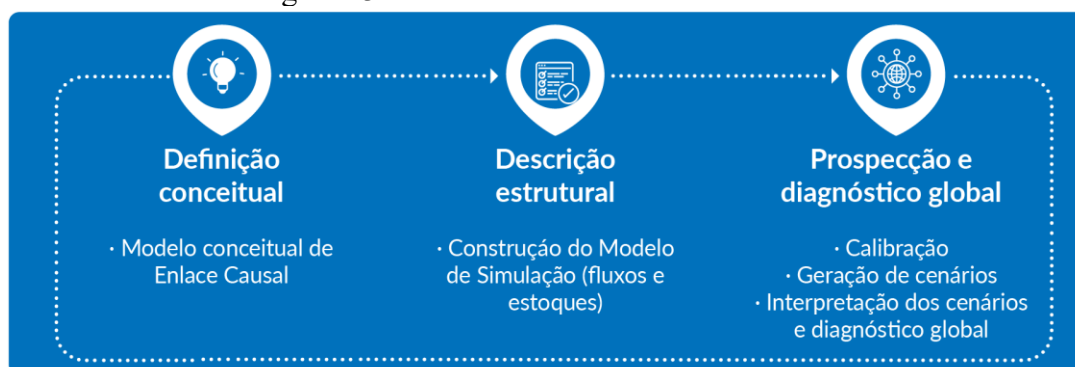
- i) MMC sequencial e Variável: permite avaliar diferentes tarefas de levantamento manual de cargas em uma determinada sequência durante a jornada de trabalho. Considera-se uma tarefa sequencial quando em um turno se realiza uma série de levantamentos em um posto de trabalho específico, em certo período de tempo;
- j) UNE EM 1005-3 (Forças): analisa tarefas que envolvem força no uso de controles, pedais e tarefas de empurrar/puxar objetos sem auxílio de rodas ou guias. É baseado na norma UNE EM 1005-3 de 2009, referente aos limites de força recomendados para utilização de máquinas e equipamentos;
- k) OCRA: desenvolvido pela Escola Politécnica de Milão utilizando as normas UNE EN 1005-5 sobre segurança das máquinas, o método OCRA analisa o risco de lesões e patologias musculoesqueléticas para os membros superiores em contextos de tarefas repetitivas que apresentam ciclos de trabalho claramente definidos.

A versão v.16 do software também dispõe de uma versão para dispositivos móveis.

O módulo utilizado foi o REBA. Esse módulo foi eleito em virtude da situação de trabalho específica que se apresentou ao pesquisador, conforme será detalhado no estudo de caso, e, também, por fornecer base quantitativa para a construção dos estoques de sobrecarga física do modelo de Dinâmica de Sistemas, construído à posteriori. Os sujeitos participantes nessa etapa são os trabalhadores que realizam a atividade em análise e gestores do setor.

– **Modelagem e Simulação por meio da Dinâmica de Sistemas:** o método Dinâmica de Sistemas, conforme visto, trabalha com o comportamento dos sistemas em dependência do tempo e emprega modelos qualitativos e quantitativos objetivando a descrição dos sistemas e o entendimento sobre qual ciclo de realimentação de informação governa seu comportamento (COYLE, 1996). Assim, essa subfase foi dividida em três passos, conforme a Figura 13:

Figura 13 – Subfase da Dinâmica de Sistemas

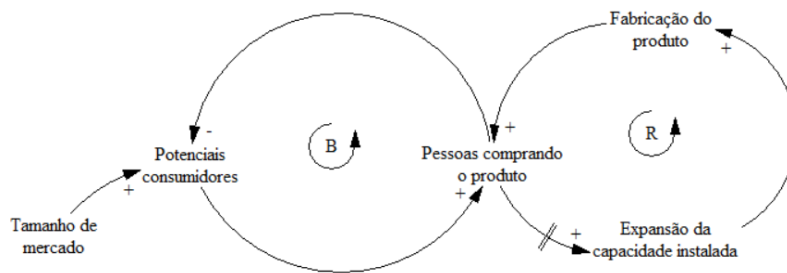


Fonte: adaptada de Coyle (1996).

Passo 1 – Definição Conceitual: essa fase descreve o sistema construindo o conhecimento com o uso de um modelo conceitual (ou interpretativo ou qualitativo). Nessa pesquisa, especificamente, a descrição do sistema tem base no diagnóstico obtido pela AET. O modelo conceitual é chamado de diagrama de enlace causal, que formaliza e delimita o contexto. A construção do modelo é uma atividade de transformação da informação, sequencial ou interativa, contribuindo com a construção do conhecimento em diferentes aspectos. A descrição conceitual do sistema se utiliza do diagrama de causalidade (diagrama de causa e efeito ou diagrama de influências). Consiste basicamente em uma lista de fatores de um problema, sendo que setas e sinais mostram o relacionamento entre esses fatores (COYLE, 1996). Enquanto esse diagrama descreve o sistema, formalizando e delimitando o contexto, também identifica e associa ciclos de realimentação (positiva ou negativa) que conduzem a informação.

As setas do diagrama indicam, basicamente, a direção de causalidade (quem ou o quê influencia quem ou o quê). Um sinal positivo indica uma relação direta (variação do mesmo tipo). Como ilustração, no exemplo da Figura 14, se o número de consumidores potenciais aumentar, o número de pessoas comprando produtos também aumentará. Caso o número de consumidores potenciais diminua, o mesmo ocorrerá com o número de compradores. Já um sinal negativo denota uma relação inversa. Então, no mesmo exemplo, se o número de pessoas comprando aumenta, o número de potenciais consumidores diminui. Ainda, algumas ações demandam um maior tempo para conduzir a um resultado em relação às demais. Quando esse tempo é relevante para o funcionamento do sistema, é representado por um *delay mark*. Um exemplo de *delay mark* é apresentado entre a ação “Pessoas comprando o produto” e seu reflexo “Expansão da capacidade instalada”. A informação em um sistema é conduzida por *loopings* de retroalimentação, que se dividem em dois tipos.

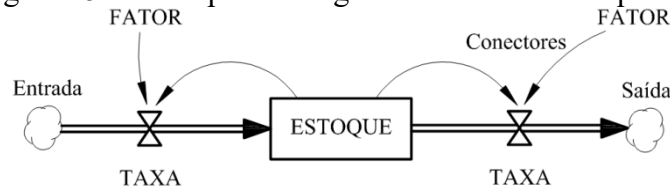
Figura 14 – Exemplo de diagrama de causalidade



Fonte: Mattos et al. (2019).

Passo 2 – Descrição estrutural: essa fase transforma a informação construída anteriormente para uma compreensão mais detalhada com o uso de um modelo estrutural (ou quantitativo) e matemático. Esse modelo é chamado de diagrama de fluxo e estoque e engloba todas as constantes e variáveis necessárias e suficientes, possibilitando a descrição matemática das relações. O diagrama de fluxos e estoques é apresentado conforme exemplo da Figura 15.

Figura 15 – Exemplo de diagrama de fluxo e estoque



Fonte: Sterman (2000).

Portanto, esse passo segue duas etapas:

- a) a construção do modelo de simulação: utilizando dados levantados pela AET já estruturados em um contexto sistêmico pelo diagrama de enlace causal, um modelo que representa os elementos estruturais do sistema é construído no software;
- b) representação matemática: nessa etapa, a linguagem matemática é inserida de modo a reproduzir o comportamento da realidade para cada elemento.

Passo 3 – Prospecção e Diagnóstico Global: essa fase aproveita a representação do diagrama de fluxo e estoque para possibilitar a simulação computacional (em programas específicos de Dinâmica de Sistemas) utilizando o cálculo numérico e gerar gráficos que viabilizam a interpretação do comportamento do sistema e o diagnóstico global. Engloba as atividades de configuração e geração da visualização gráfica do comportamento dos indicadores do estado do sistema em um horizonte de simulação e sua interpretação (somada aos dados da

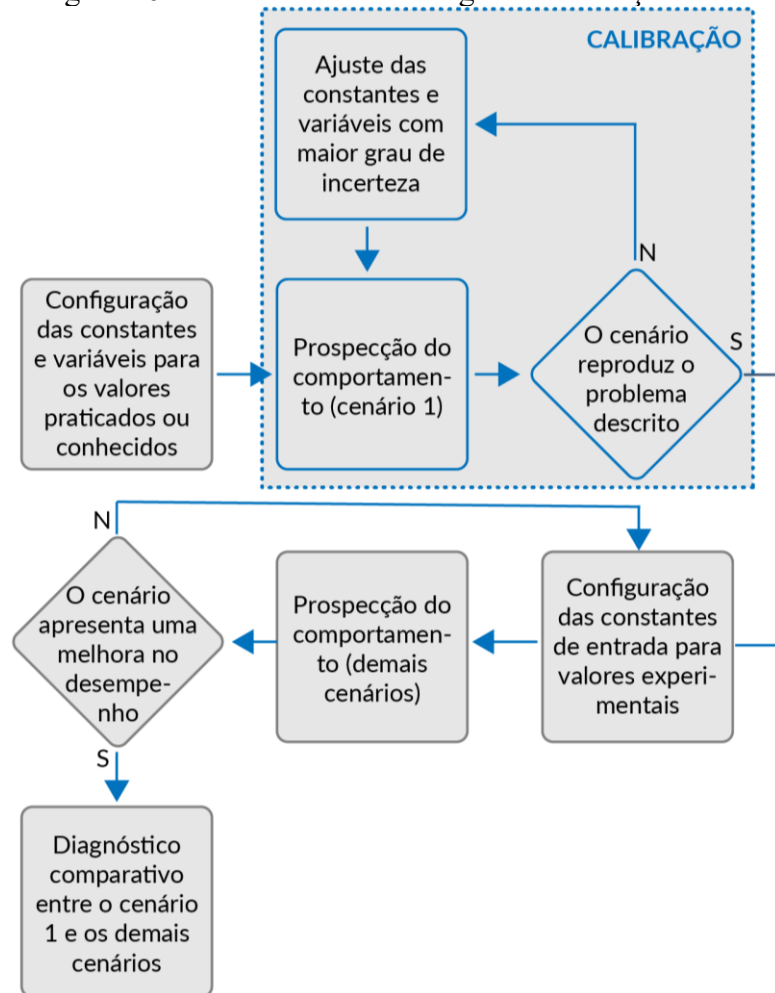
AET). Para tal, foram utilizados programas específicos para a Dinâmica de Sistemas que implementam o cálculo numérico para resolução do modelo matemático e permitem interpretar resultados de testes conduzidos em um ambiente virtual. Ainda, por afinidade do pesquisador e por possuir uma versão acadêmica, o software VenSim® (marca registrada de Ventana Systems Inc.) foi utilizado nessa etapa. Mais detalhes sobre o software são apresentados na sessão Materiais e Métodos.

Esse passo ainda segue três etapas definidas como:

- a) calibração: teste da estrutura matemática para representação da realidade de todas as estruturas agindo individualmente e, posteriormente, juntas, obtendo-se, assim, uma calibração para o modelo. A calibração para cada caso está descrita na sessão de aplicação prática, sendo que os protocolos de calibração e simulação podem ou não se desenvolver por caminhos diferentes;
- b) geração de cenários: após o modelo representar a realidade de forma estrutural e matemática, cenários são gerados para testar políticas sugeridas para a resolução dos problemas;
- c) interpretação dos gráficos que indicam o comportamento do sistema para cada cenário para a realização de um diagnóstico global.

O processo de calibração ainda segue de forma macro o fluxo determinado pela Figura 16.

Figura 16 – Protocolo de modelagem e calibração



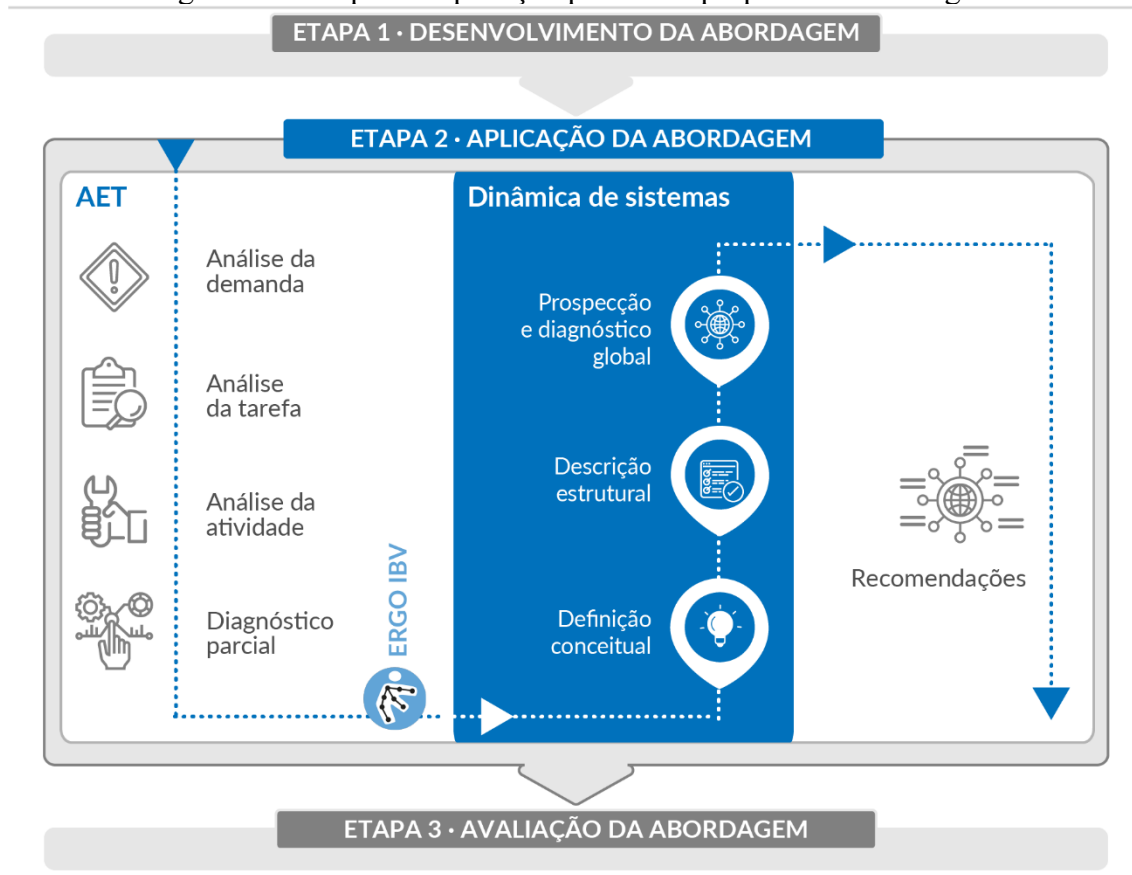
Fonte: Mattos et al. (2019).

Em todos os cenários simulados nos estudos preliminares e de caso o software Vensim foi configurado para utilizar o método de integração tipo Euler. O intervalo de integração (dt) foi definido para 1/5 do valor da menor constante do modelo para cada cenário, atendendo ao especificado por Forrester (1961).

– **Recomendações:** após o desenvolvimento das subfases antecedentes, a subfase 3 foi estruturada. Essa subfase diz respeito às Recomendações, que são definidas como: elaboração de medidas para solucionar ou mitigar os problemas encontrados (esse passo, para esta pesquisa, foi desenvolvido após o uso da Dinâmica de Sistemas, que reforçou a confiabilidade da tomada de decisão com relação às propostas em prazos maiores). Foram estabelecidas e testadas em ambiente computacional.

As etapas previstas para a aplicação prática estão sintetizadas na Figura 17, a seguir.

Figura 17 – Etapas da aplicação prática da proposta de abordagem



Fonte: o autor.

Todas as atividades realizadas durante a fase de modelagem e simulação por meio da Dinâmica de Sistemas contou com o auxílio de pesquisadores especialistas na área de sistemas dinâmicos, em relação de coautoria dos artigos gerados pelos resultados obtidos. As etapas da abordagem ora apresentada deram origem ao modelo geral da proposta de abordagem, cuja representação gráfica está disposta na seção 4 desta tese.

Etapa 3 – Avaliação (da Proposta de Abordagem): essa etapa trata de avaliar a aplicação prática, a viabilidade e os pontos fortes e fracos da proposta de abordagem. Para tanto, utilizaram-se critérios qualitativos baseados nas diferenças em relação a outras abordagens, no sentido de comparar seu alcance no que tange à previsão de cenários em sistemas complexos.

Para a viabilização deste estudo, utilizou-se uma abordagem de método misto, que compreende levantamento de dados de maneira qualitativa e quantitativa (CRESWELL; PLANO CLARK, 2011).

As técnicas adotadas para cada etapa foram:

Etapa 1 – Desenvolvimento (Fundamentação teórica e sistematização da proposta de abordagem): para a etapa de construção da proposta de abordagem, pesquisas bibliográficas

foram realizadas com base em materiais já publicados, fornecendo, assim, subsídios à sistematização da abordagem.

Etapa 2 – Aplicação (Execução Prática da proposta de abordagem): para a etapa de aplicação prática (estudo preliminar e estudo de caso), foi realizada a AET e, posteriormente, na etapa de diagnóstico, fez-se uso da Dinâmica de Sistemas. Para a realização da AET, as técnicas utilizadas foram: análise documental acerca das tarefas; anotações a respeito das situações de trabalho observadas e observações assistemáticas in loco. O software Ergo-IBV versão 16.1 forneceu valores quantitativos quanto aos riscos musculoesqueléticos envolvidos na situação analisada especificamente no estudo de caso. Para o uso da Dinâmica de Sistemas, utilizou-se o software VenSim® (versão 6.1), cujo conjunto de ferramentas permite a modelagem e a simulação computacional do sistema em análise. Ambos os softwares estão instalados em um notebook Dell Inspiron 15, série 7000.

Etapa 3 – Avaliação (da proposta de abordagem): para a etapa de avaliação foram utilizados critérios qualitativos a partir da aplicação prática da abordagem. Dessa forma, foi possível avaliar critérios como alcance sistêmico da análise, abrangência de horizonte temporal da análise, teste de possíveis soluções e níveis de gestão atingidos (operacional, tático e estratégico), utilizando-se da comparação perspectiva com outros métodos propostos pela literatura vigente.

Para a realização da presente pesquisa foram utilizados dados coletados pelas organizações que foram objeto dos estudos preliminar e de caso. As organizações autorizaram seu uso para fins acadêmicos sem a veiculação dos nomes e imagens das empresas e de seus colaboradores.

Os dados das AETs foram coletados e documentados pelos respectivos setores de Saúde, Segurança e Meio Ambiente das organizações. Incluem-se nesses dados as entrevistas semiestruturadas e os indicadores de afastamentos, doenças ocupacionais, queixas dos colaboradores, entre outros. Já os dados de produtividade, qualidade e adjacentes foram coletados e fornecidos pelos líderes dos setores produtivos em estudo.

4 PESQUISA APLICADA

Esta seção detalhará, em primeiro momento, a construção da proposta de abordagem, por meio de suas premissas e sua representação gráfica. Posteriormente, apresentará um estudo preliminar e um estudo de caso que ilustram sua aplicação prática. Por fim, trará uma análise e discussão acerca dos resultados obtidos.

4.1 A PROPOSTA DE ABORDAGEM

Tendo como base as pesquisas realizadas previamente, detalhando o problema de pesquisa, a lacuna de conhecimentos e o estudo das etapas da AET bem como da Dinâmica de Sistemas, percebeu-se uma oportunidade de integração entre os dois métodos citados para abordagem do problema constatado. A proposta de abordagem é formada por premissas e por sua representação gráfica cuja função é direcionar seu funcionamento e guiar sua aplicação prática. As premissas para a proposta de abordagem seguem na subseção a seguir.

4.1.1 Premissas para proposta de abordagem

A principal premissa para o desenvolvimento da proposta de abordagem é de que a ergonomia precisa de métodos sistêmicos que ofereçam previsões de cenários qualitativos e, principalmente, quantitativos em médio e longo prazos, visto que encontra dificuldades para prever o comportamento de sistemas dinâmicos nesses intervalos temporais em razão de sua natureza não linear, o que pode gerar efeitos contraintuitivos (STANTON, 2013; WILSON, 2014; KARSH; WATERSON; HOLDEN, 2014; WALKER et al., 2017; SALMON et al., 2017; GUASTELLO, 2017). Para tanto, foram preconizadas quatro premissas adjacentes:

- a) a ergonomia necessita e faz uso de ferramentas sistêmicas para tomada de decisão. Contudo, com o aumento da complexidade dos sistemas em que a ergonomia atua em função do incremento tecnológico, a demanda por esses métodos experimenta um crescimento importante;
- b) para a tomada de decisão oferecer maior segurança, é necessário compreender o comportamento do sistema no que tange às interações que controlam seu comportamento, dentro dos limites definidos para esse sistema. Essa compreensão,

- entretanto, deve ser feita não apenas de forma qualitativa, mas também quantitativa (modelos matemáticos de previsão, gráficos de comportamento, entre outros);
- c) em sistemas dinâmicos, modelos matemáticos não lineares providos pela Dinâmica de Sistemas, baseados nos achados da AET, podem oferecer previsões de cenários quantitativos de médio e longo prazos, aumentando a segurança na tomada de decisão;
 - d) uma compreensão mais abrangente do sistema pode não apenas influenciar as tomadas de decisão da ergonomia, mas também pode contribuir para a gestão operacional, tática e estratégica da organização de compreender e controlar, de forma mais segura, fatores abstratos que atuam no sistema.

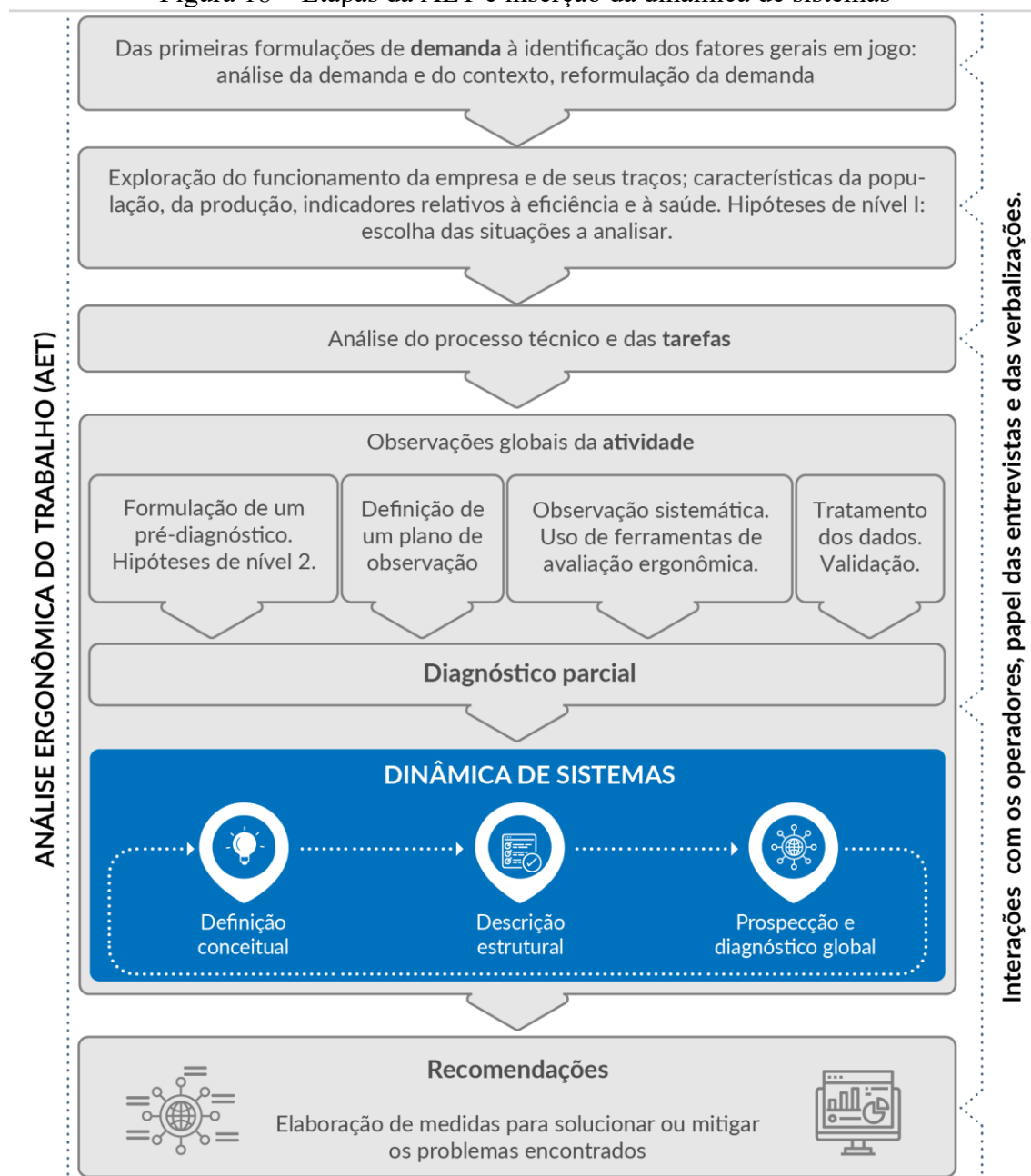
Com as premissas definidas, a próxima subseção apresentará a proposta de abordagem.

4.1.2 Representação gráfica da proposta de abordagem

A representação gráfica da proposta de abordagem foi desenvolvida por meio da análise qualitativa das etapas, previamente apresentadas, da Análise Ergonômica do Trabalho. Para tanto, após elencar cada etapa, buscou-se compreender em que momento a inserção da Dinâmica de Sistemas encontra o ponto ótimo, de forma a aproveitar ao máximo as informações providas pela AET.

Após definir a sistematização das etapas e a inserção da Dinâmica de Sistemas junto à AET, a representação gráfica da proposta de abordagem foi desenvolvida conforme a Figura 18, a seguir.

Figura 18 – Etapas da AET e inserção da dinâmica de sistemas



Fonte: Mattos et al. (2019), com base em Guérin et al. (2001).

A sistematização da AET, detalhada anteriormente na página 58, parte de uma demanda na qual o pesquisador explorará, além do problema apresentado, aspectos do funcionamento da organização, como indicadores de saúde e produtividade, para a formulação das hipóteses de nível 1.

Após isso, as observações globais da atividade fornecem um pré-diagnóstico, cujas hipóteses são chamadas de nível 2. Isso serve de base para a definição de um plano de

observação e coleta de dados, os quais serão tratados e validados para a formação de um diagnóstico parcial.

Conforme a Figura 18, a inserção da Dinâmica de Sistemas deve ocorrer após essa etapa de diagnóstico parcial da AET. Isso porque a Dinâmica de Sistemas atende à análise de contextos complexos mesmo com fatores abstratos e pode levar a uma compreensão mais abrangente do sistema.

A inserção da Dinâmica de Sistemas após o diagnóstico parcial é justificada pelo fato de que nessa etapa já ocorreram os processos de tratamento e validação dos dados das etapas de Análise da Demanda, Tarefa e Atividade da AET, bem como possíveis avaliações por meio de ferramentas e softwares de análise ergonômica. Portanto, conforme explanado nas seções condizentes, nessa etapa já houve a confrontação entre tarefa e atividade, o que pode gerar conhecimentos acerca das regulações do trabalho. As regulações do trabalho, por sua vez, podem oferecer insights sobre o comportamento do sistema (partindo do ponto levantado por Falzon (2007) de que a existência da regulação pressupõe um sistema dinâmico) e sobre possíveis soluções (uma vez que as regulações do trabalho são, segundo Guérin et al. (2001), soluções encontradas pelos trabalhadores para normalizar e melhorar sua situação de trabalho). Isso tudo possibilita ao pesquisador ter posse de uma quantidade suficiente de dados tratados para a formulação de um diagnóstico qualitativo abrangente. A Inserção da Dinâmica de Sistemas oferece, portanto, o auxílio quantitativo que viabiliza simulações do comportamento do sistema observado.

Com a linguagem versátil para a compreensão sistêmica e a simulação do comportamento provida de forma quantitativa pela Dinâmica de Sistemas, o objetivo é evoluir o diagnóstico da AET para uma compreensão mais completa e dinâmica do sistema produtivo. Incluem-se nisso previsões em horizontes de tempo maiores, fornecendo maior confiabilidade acerca da descrição de efeitos em longo prazo do comportamento do sistema em estudo e possíveis ações para melhorias do trabalho a ser analisado.

4.2 APLICAÇÃO PRÁTICA

A aplicação prática da proposta de abordagem ocorreu em dois momentos: (i) estudo preliminar em uma indústria de componentes elétricos automotivos, e (ii) estudo de caso em uma indústria de embalagens de papelão ondulado. Após verificar a viabilidade por meio dos dados obtidos pelo estudo preliminar, o estudo de caso reforçou os aspectos práticos da proposta, permitindo uma avaliação mais profunda dos potenciais e limitações. Ambas as

organizações se situam na região Sul do Brasil, e suas características gerais serão detalhadas nas seções seguintes.

4.2.1 Estudo preliminar: o caso da indústria de componentes elétricos automotivos

A típica linha de produção que envolve um contingente de trabalhadores que seguem uma meta delineada por um tempo de ciclo para cada peça pode apresentar comportamentos não previstos pelos analistas, justamente pela complexidade da interação de todos esses fatores. As organizações da cadeia industrial automotiva são exemplos de iniciativas que se enquadram em um ambiente que demonstra tal nível de complexidade.

O recorte desse estudo preliminar específico direciona-se a uma empresa do ramo de componentes elétricos da cadeia automotiva brasileira, que conta com aproximadamente dois mil trabalhadores, trabalhando em dois turnos: das 6:00 às 15:48 e das 15:48 à 1:09. A organização produz componentes elétricos de automóveis em linhas de produção.

Os setores produtivos contam com várias linhas de produção, com número variável de operadores. Um líder da linha é designado para a gestão imediata e responde ao supervisor do turno. Por sua vez, o supervisor está atrelado hierarquicamente ao gerente do setor e ao gerente da planta.

Além dos setores produtivos, a organização em questão conta com um setor de saúde, segurança e meio ambiente, responsável pela formulação e acompanhamento dos indicadores de acidentes e afastamento de trabalhadores da fábrica. Ainda, possui setores de engenharia de processo, engenharia de produto, melhoria contínua, qualidade e expedição.

Ressalta-se novamente que os resultados desse estudo preliminar em específico foram publicados em formato de artigo no periódico *Applied Ergonomics* sob o título de: *Simulating the influence of physical overload on assembly line performance: A case study in an automotive electrical component plant*, de autoria de Diego Luiz de Mattos, Rafael Ariento Neto, Eugenio Andrés Díaz Merino e Fernando Antônio Forcellini, conforme já descrito na seção de procedimentos metodológicos desta tese. O artigo final encontra-se integralmente no Apêndice A deste documento.

4.2.2 Problema específico do estudo preliminar

Uma linha de produção foi escolhida para o estudo por apresentar alta taxa de afastamento em decorrência da incidência de doenças. No ano de 2016 foram registrados 105 afastamentos de acordo com dados do setor de saúde e segurança da empresa. A linha em questão é responsável pela fabricação da parte de chassi do veículo, conta com 14 pessoas trabalhando e tem meta de produção diária de 260 peças. O processo de fabricação é limitado por um tempo pré-definido para a produção de cada peça, chamado *takt time*, que no caso dessa linha é de 121 segundos. Cada posto de trabalho realiza uma tarefa específica de acordo com sua posição na linha.

Também, ao contrário do que o dimensionamento realizado pela engenharia do processo indicava, a linha de produção precisa trabalhar com um maior número de operadores (trabalhando geralmente no limite de três operadores adicionais) para conseguir processar o trabalho na linha. Contudo, mesmo com operadores adicionais o trabalho em processo tende a elevar-se ao longo do turno, contrastando com uma taxa de produção próxima da metade da planejada.

Além de não atingir os níveis de produtividade planejados operando conforme as definições de subdivisão de tarefa e nivelamento de postos de trabalho repassados pela engenharia de processo, não se compreende, a respeito do balanceamento da linha, até que ponto o ciclo para cada peça pode estar próximo ao *Takt Time* em razão de buscar maior eficiência sem prejudicar o trabalhador por gerar sobrecarga humana física por conta dos poucos intervalos ou do contingente restrito.

Também se observa que existem limitações quanto aos recursos técnicos dos setores de engenharia para levar em conta fatores inerentes ao ser humano (como fatores ergonômicos) e mensurá-los de maneira adequada a fim de realizar o dimensionamento das linhas. Faz-se necessário que, sistemicamente, se busque a compreensão de como esses fatores impactam na produtividade, tendo em vista que esta é um importante fator de sustentabilidade de uma organização.

4.2.3 Resultados do estudo preliminar

Inicialmente, os resultados da Análise Ergonômica do Trabalho (AET) serão apresentados. Os resultados da AET formaram a base para a descrição do diagrama de enlace causal e, portanto, serão apresentados de forma sistêmica, explicitando como as observações da

AET propiciaram o diagnóstico dos *loops* de realimentação do sistema. Posteriormente, serão inseridas as consequências da situação para a saúde do trabalhador e da produção. Em seguida, e de posse dos dados da AET, os resultados da modelagem e simulação com uso da dinâmica de sistemas são inseridos, bem como as recomendações para melhorias da linha.

4.2.3.1 *Análise ergonômica do trabalho*

Conforme descrito nos procedimentos metodológicos, a AET será dividida em: (a) Análise da Demanda, (b) Análise da Tarefa, (c) Análise da Atividade e (d) Diagnóstico Parcial, passos adaptados de Guérin et al. (2001). A etapa de Recomendações é inserida após a modelagem pela Dinâmica de Sistemas.

a) Análise da demanda

Por demanda da empresa, a situação analisada consiste no afastamento do trabalhador, que culmina em deficiências de produtividade da linha (hipótese de nível 1).

Também, relatos e registros de queixas de dores musculoesqueléticas foram apresentados pela organização, embasando a hipótese de nível 1 da demanda.

O acometimento por doenças musculoesqueléticas relacionadas ao trabalho na linha específica escolhida para o presente estudo, na ordem de 105 afastamentos por ano, conforme descrito anteriormente (com um ou mais dias perdidos), norteou a tomada de decisão pela intervenção local. Isso pois essa taxa de afastamento gera impacto sobre a produtividade e sobre os trabalhadores remanescentes, que necessitam suprir a demanda produtiva em menor número.

b) Análise da tarefa

Relativo ao processo técnico e às tarefas, o trabalho da linha divide-se em pré-montagem, montagem (roteamento, inserção de clips ou travas, entubamento e enfitamento), testes de dimensões e/ou teste elétrico. O *conveyor* (mesa onde se posiciona o chicote) locomove-se em sentido horário, desde a pré-montagem até os testes finais. Os trabalhadores ficam posicionados lado a lado, de frente para o *conveyor*, e caminham acompanhando o sentido da máquina até completarem sua função. A subdivisão das tarefas delimita a função de cada trabalhador a manufaturar uma parte isolada do produto, repetindo-a sempre que encerra uma peça. Essa relação cria uma dependência no sentido de que, para que um trabalhador inicie sua tarefa, o trabalhador imediatamente anterior deve finalizar a sua.

O ponto mais alto para o alcance na realização das atividades no *conveyor* é de aproximadamente 1,60 m de altura. O ponto mais baixo é de aproximadamente 1 m.

A seguir, as atividades são divididas em três grupos conforme sua divisão na linha e detalhadas individualmente para melhor compreensão.

Pré-montagem: as atividades requeridas pela organização para a função dos trabalhadores da pré-montagem especificamente, descrita nos registros de processo técnico, são, sequencialmente:

1. posicionar o chicote na mesa;
2. montar peças menores;
3. inserir peças no chicote;
4. retirar o chicote da mesa;
5. inserir o chicote no *conveyor*.

Montagem: as atividades requeridas pela organização para a função dos trabalhadores da montagem especificamente, descrita nos registros de processo técnico, são, sequencialmente:

1. enfitamento dos pontos de fita (calcinhas);
2. entubamento;
3. entubamento menor;
4. enfitamento Central;
5. enfitamento Central, puxa *holder* e corte da fita;
6. enfitamento “Calcinha” (empurra e puxa pino);
7. calcinha;
8. buscar calha;
9. colocar calha;
10. troca a fita (apenas quando acaba);
11. colocar clips;
12. vai para próxima mesa – posicionar fitas para uso quando necessário.

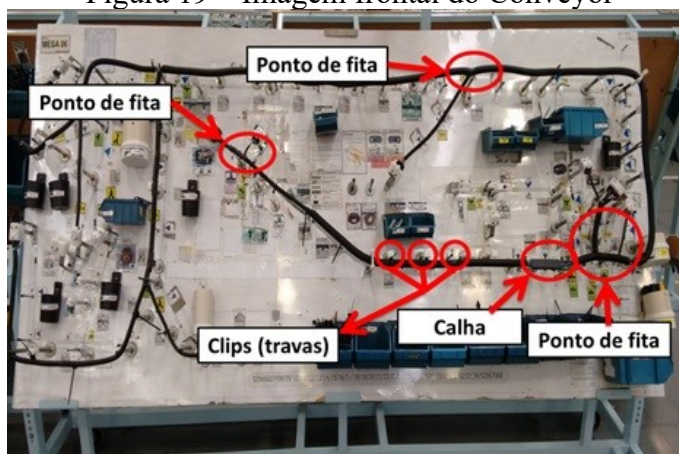
Teste Elétrico e de Dimensionamento: as atividades requeridas pela organização para a função dos trabalhadores dos testes elétrico e dimensional especificamente, descrita nos registros de processo técnico, são, sequencialmente:

1. retirar o chicote do *conveyor*;
2. inserir o chicote na mesa de testes;

3. realizar teste elétrico;
4. realizar teste dimensional;
5. retirar o chicote da mesa de testes;
6. inserir o chicote na embalagem;
7. inserir o chicote embalado na caixa para expedição.

A despeito da complexidade de informações inerentes à tarefa, a atividade não possui mais descrições. Uma foto ilustrativa do *conveyor* segue na Figura 19.

Figura 19 – Imagem frontal do Conveyor



Fonte: o autor.

c) Análise da atividade

A atividade do setor foi separada em três estágios básicos do processo para melhor entendê-lo.

Pré-montagem: a primeira atividade registrada na linha é a pré-montagem. Nesse momento, um operador realiza pequenas montagens pré-determinadas de peças menores que são inseridas no chicote elétrico. Para tanto, o operador permanece parado junto a uma mesa de montagem e utiliza seus membros superiores e sua capacidade de coordenação motora fina para encaixar as peças necessárias.

Necessita, também, conferir a qualidade das peças de pré-montagem que chegam até o seu posto de trabalho.

Montagem: com relação à montagem, basicamente as atividades requeridas para efetivação do processo técnico da tarefa são atividades de roteamento, inserir tubos ou calhas em determinadas partes do chicote, enfiar o chicote (pontos de fita e enfitamento contínuo) e inserção de clips ou travas.

O roteamento diz respeito à inserção do chicote elétrico no *conveyor*. Um operador apanha o chicote da pré-montagem (cuja mesa de preparo se situa no início da linha de montagem e no lado oposto do *conveyor*) e o posiciona no *conveyor* conforme a distribuição requerida. Para tanto, atravessa o espaço da linha a cada novo chicote a ser posicionado e utiliza-se de seus membros superiores para distribuição do chicote ao longo do painel do *conveyor*.

A atividade de enfiar requer do operador uma movimentação de punho e membros superiores em um sentido circular (em torno da superfície do chicote em direção lateral de acordo com a parte a ser enfiada). Para estabilizar o chicote a ser enfiado, utiliza a pega com a mão oposta à utilizada na atividade de enfiamento. O operador, de forma geral, caminha junto ao *conveyor* e na direção por ele seguida, realizando o processo de enfiar partes do chicote elétrico. Como caminha junto ao *conveyor*, direciona-se ao posto de trabalho subsequente. As partes que exigem enfiamento em torno de alguma haste são chamadas calcinhas (o enfiamento, nesse caso, é realizado de modo a atingir três pontos, um abaixo e dois acima, como uma letra V).

O processo de inserção de tubos ou calha do chicote elétrico segue o mesmo princípio. O operador caminha junto e na direção do *conveyor*. A diferença nesse ponto é que o operador necessita pegar os tubos que ficam estocados no lado oposto do *conveyor* em prateleiras específicas, realizando uma movimentação sinuosa pela linha, conforme ilustra a Figura 20.

Figura 20 – Movimentação do operador



Fonte: o autor.

Todo o processo é realizado na postura em pé e em movimentação junto ao *conveyor*, conforme descrito.

A inserção de clips e travas segue o mesmo princípio operacional da inserção de tubos ou calhas. O operador necessita apanhar as peças requeridas no lado oposto ao *conveyor* e

inseri-las, conforme a demanda, com uso de movimentação em sinuosidade e membros superiores.

Teste elétrico e de dimensionamento: por fim, os testes elétricos e de dimensão requerem que o último operador da linha retire o chicote do *conveyor* e insira-o em uma mesa de testes que fará uma leitura acerca da funcionalidade do chicote (passando uma corrente elétrica e testando sua condutividade) e de suas dimensões. Quando ocorre a inconformidade com as especificações do cliente, o chicote é realocado no início da linha (em um sistema *first in, first out*) para ser retrabalhado.

d) Diagnóstico

Os postos individuais possuem características próprias de acordo com a parte do produto que o trabalhador processa. Essa subdivisão da tarefa acarreta uma estereotipia de movimento, acentuada pelos ciclos de trabalhos curtos e rápidos, necessários para atendimento do *takt time*. O afastamento do trabalhador em decorrência de doenças ocupacionais gera sobrecarga maior ao sistema.

De fato, o afastamento do trabalhador pode prejudicar a linha duplamente: por um lado necessita produzir a mesma quantidade com menos trabalhadores, e normalmente a eficiência cai; por outro, para se produzir mais com menos trabalhadores, aumenta-se a demanda de trabalho em processo dos trabalhadores que permanecem na linha. A pressão exercida pela velocidade da linha e a exigência do líder da linha são fatores que podem sobrecarregar o trabalhador.

O aumento da estereotipia de movimento pode incidir em uma sobrecarga muscular que reduz a recuperação fisiológica, pois envolve, basicamente, os mesmos músculos em todas as ações. Esse processo pode culminar no afastamento do trabalhador, e no caso em questão, é o principal motivo desses afastamentos, tendo em vista que os laudos médicos decorrentes apontam para doenças musculares por esforço repetitivo de membros superiores. Isso determina um *looping* de reforço, pois, sem medidas gerenciais, a sobrecarga humana física que gera o afastamento fica sempre maior à medida que os trabalhadores se afastam.

Também se observam perdas no sentido de conhecimento/habilidade da atividade em decorrência do trabalhador que se ausenta, sendo uma atividade que requer determinada prática e demanda tempo para atingir as metas individuais eficazmente. Portanto, quando há afastamento de um ou mais trabalhadores, e se faz necessária a realocação de trabalhadores de outras linhas, ocorre uma perda de habilidade que se reflete em menor produtividade, em razão dos atrasos gerados no posto de trabalho substituído. Isso se configura como outro *looping* e,

novamente, observa-se impacto desse *looping* na sobrecarga humana física, uma vez que o trabalho em processo demanda aumento do ritmo de trabalho para ser consumido. Ressalta-se que, enquanto aumenta a sobrecarga, ocorre um decréscimo no rendimento do trabalhador, pois a fadiga muscular o impede de manter o mesmo ritmo de quando há uma situação de trabalho cuja exigência não gera fadiga.

A mecanização do movimento pela estereotipia e ciclos curtos e rápidos, benéfica pelo lado produtivo, pode gerar estresse na musculatura utilizada para realização desses movimentos. De toda forma, não existem pausas previstas para recuperação muscular, exceto as pausas para lanche e ginástica laboral. A intensidade do ritmo de trabalho exige do trabalhador movimentação física durante todo o tempo de atividade, apesar de não adotar posturas extremas de tronco ou membros superiores por períodos prolongados. Ademais, as pausas para descanso existentes não atendem aos intervalos de oito minutos para cada 50 minutos trabalhados,²⁸ preconizados por autores como Colombini, Occhipinti e Fanti (2008) e utilizados pelos órgãos fiscalizadores brasileiros. Com o tempo acelerado de produção, há pouco espaço para o trabalhador regular seu trabalho, ficando ele sujeito às nuances do processo.

Quando o trabalho atrasa porque os trabalhadores não acompanham o ritmo da máquina (*conveyor*), existe a opção de pará-la, porém, ao parar a produção, indicadores de *downtime* são gerados. As lideranças cobram por eficiência, portanto, por pressão das lideranças, raramente ocorrem as paradas, com ressalvas para situações especiais ou extremas, como problemas de qualidade, falha mecânica, grandes atrasos, emergências, acidentes e pausas já previstas anteriormente. Como mecanismo para entregar suas atividades quando estão atrasados, os líderes da linha realocam trabalhadores de outra linha, visando normalizar o fluxo de trabalho. Isso ocorre apenas quando há atraso visível da linha. Evidencia-se, com essa forma de regulação, um problema organizacional que deve ser entendido. Quando há problemas de atraso em outras linhas, em razão de absenteísmo ou aumento de demanda, os trabalhadores

²⁸ Com relação ao período fisiológico de recuperação, de acordo com Colombini, Occhipinti e Fanti (2008) não existem dados ou critérios unívocos e definidos, porém estudos de Byström (1991) contribuem para definir parâmetros aceitáveis por meio de um modelo de relação ideal de trabalho/repouso quando estiverem envolvidas ações musculares estáticas intermitentes. Outra experiência nesse sentido, segundo os autores, ocorreu na Austrália, por meio da *Repetitive Strain Injuries*, em que um *draft* específico da *Health and safety Commission* australiana estabelece que não seriam aceitáveis períodos de trabalho com movimentos repetitivos que se prolonguem, sem recuperação, por mais de 60 minutos, fornecendo um modelo de relação trabalho/repouso de pelo menos 5:1, ou seja, 50 minutos trabalhados e 10 descansados. Essa relação pode ser diluída em um ciclo menor, sendo 50 segundos trabalhados e 10 segundos descansados, mas não poderia ser menor do que o estabelecido (4:1 não seria aceitável, 10:1 seria aceitável). Esse critério foi utilizado pelos autores (Colombini, Occhipinti e Fanti) no desenvolvimento do método OCRA, que é hoje bastante difundido para avaliação de riscos de membros superiores para situações de movimentação estereotipada.

necessitam aumentar seu ritmo ainda mais para normalizar seu trabalho em processo. Eventualmente, os trabalhadores utilizam tempos de pausa para regularizar seu trabalho quando atrasado, perdendo os benefícios da recuperação fisiológica em meio à jornada.

Quanto à produtividade, na ocorrência de sobrecarga humana física e afastamento, os trabalhadores perdem eficiência no processo, diminuindo o rendimento da linha que, segundo o gestor, atinge em média a ordem de 58% da taxa da produção esperada.

As consequências para o trabalhador relacionam-se ao próprio adoecimento. O atendimento ao *takt time*, o trabalho em processo e a exigência dos líderes determina a sobrecarga humana física, que culmina em doenças ocupacionais, principalmente, nesse caso, doenças musculoesqueléticas em decorrência de fadiga e repetitividade. Ressalta-se que com o adoecimento e afastamento do trabalho, podem ocorrer outros problemas, como a queda de motivação e satisfação com o trabalho.

Com relação à produtividade, na ocorrência de sobrecarga humana física e afastamento, os trabalhadores perdem eficiência no processo, diminuindo o rendimento da linha. Existem, nesse ponto, prejuízos em termos financeiros, mas também sociais, pois manter uma linha de produção cuja demanda determina tal sobrecarga, adoecimento e afastamento pode prejudicar a imagem da empresa perante a sociedade, de acordo com os princípios da Qualidade Social descritos por Taguchi, Elsayed e Hsiang (1990).

Esses dados, conforme visto, indicam que existem *loops* de realimentação que moldam a estrutura do sistema. Após a compreensão do trabalho e levantamento dos fatores que determinam tal estrutura de realimentação, cada *looping* observado foi desdobrado e inserido em um contexto sistêmico, em forma de diagrama de enlace causal. Esse é o primeiro passo para a modelagem por meio da Dinâmica de Sistemas e servirá como base para a etapa seguinte, que trata do detalhamento desse diagrama para inserção de equações que representam as relações do sistema em questão.

4.2.3.1 Modelagem e simulação com uso da Dinâmica de Sistemas

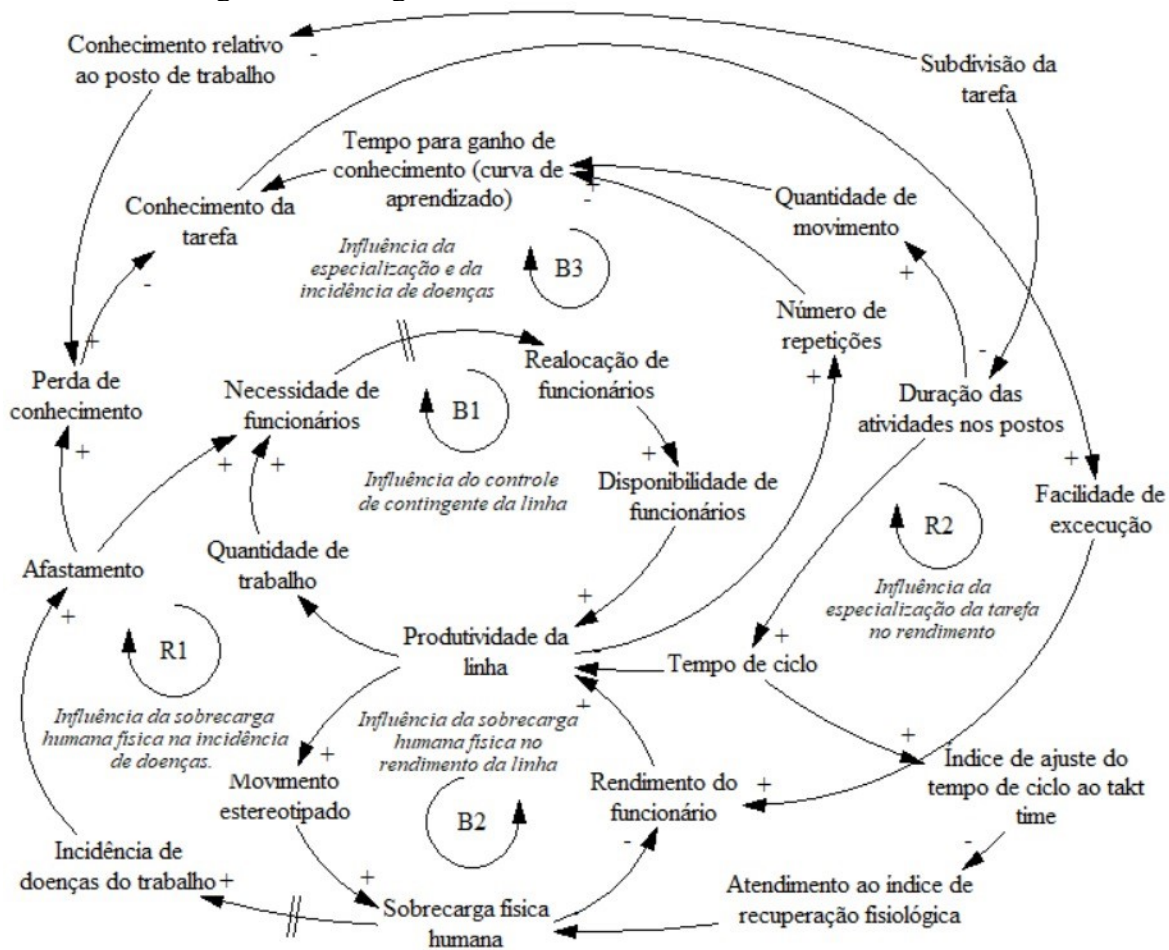
Conforme descrito nos procedimentos metodológicos, o uso da Dinâmica de Sistemas para modelagem e simulação de cenários será dividida em (a) Definição Conceitual, (b) Descrição Estrutural e (c) Prospecção e Diagnóstico Global, adaptados de Sterman (2000). A etapa de Recomendações é inserida após a prospecção e o diagnóstico global viabilizados pela Dinâmica de Sistemas.

a) Definição conceitual

Para a construção do Diagrama de Enlace Causal foram utilizadas as informações levantadas pela AET. Os fatores de influência que emergem do diagnóstico foram identificados e organizados na condição de forças que agem na linha tanto como deficiências quanto como ações de controle. Dessa forma, foi construído o contexto sistêmico do modelo conceitual.

Em um contexto sistêmico, estruturas de malha fechada (os ciclos de realimentação da informação) podem ser identificadas. Esses ciclos são interligados pelas relações entre as variáveis comuns aos ciclos. O Diagrama de Enlace Causal completo é apresentado na Figura 21. Contudo, para facilitar a compreensão esses ciclos são descritos a seguir, individualmente.

Figura 21 – Diagrama de Enlace Causal do contexto sistêmico



Fonte: Mattos et al. (2019).

Primeiramente, referente ao subsistema “Controle de Contingente da Linha” (B1²⁹), observa-se que a subdivisão da tarefa influencia diretamente na duração da atividade nos postos

²⁹ A letra B significa que o ciclo identificado é um ciclo de “Balanço”. Já a letra R indica que o ciclo identificado é um ciclo de “Reforço”.

de trabalho, sendo que, quanto mais subdividida, maior é a habilidade do trabalhador para a tarefa e menor a duração dessa atividade, em uma relação inversa. A duração das atividades relaciona-se diretamente ao tempo de ciclo que, por sua vez, impacta na produtividade da linha. A produtividade, por seu turno, é influenciada diretamente pelo rendimento individual do trabalhador, e, uma vez que a produtividade da linha cresça, aumenta a quantidade de trabalho. O aumento do trabalho em processo faz aumentar a necessidade de trabalhadores para suprir esse aumento na demanda e ocorre, conseqüentemente, aumento na realocação de operadores para a linha. Por fim, quanto maior a realocação de operadores, maior será a disponibilidade destes na linha, o que pode aumentar a produtividade desta.

Outro ciclo que compõe o contexto apresentado na Figura 21 é o de “Influência da Sobrecarga no Rendimento” (B2). Observa-se, com relação a esse ciclo, que a produtividade impacta em movimentação estereotipada, o que pode ser consequência da subdivisão excessiva da tarefa. Quanto maior a movimentação estereotipada, maior a sobrecarga humana física e menor o rendimento do trabalhador. Se há queda no rendimento do trabalhador, decresce a produtividade da linha. O tempo de ciclo influencia também a produtividade da linha. Quanto maior o índice de ajuste do tempo de ciclo ao *takt time*, menor o atendimento ao índice de recuperação fisiológica do trabalhador e maior a sobrecarga humana, o que, ao fim, retorna ao menor rendimento individual e à queda da produtividade da linha.

Outro subsistema descrito na Figura 21 descreve a “Influência da Sobrecarga Humana Física na Incidência de Doenças” (R1). Esse subsistema pode ser influenciado pelo atendimento ao índice de recuperação fisiológica e pelo tempo de ciclo. Com relação ao atendimento do índice de recuperação fisiológica, quanto menor esse índice de adequação, maior a sobrecarga humana física, o que pode acarretar a geração de doenças do trabalho, aumentando sua incidência e, conseqüentemente, o afastamento do trabalho. Quanto maior o afastamento do trabalho, maiores as perdas de conhecimento que são inerentes à experiência do trabalhador e maior a necessidade de trabalhadores para suprir a ausência dos afastados, o que demanda um aumento na realocação de trabalhadores para a linha que perdeu contingente. Porém, quanto maior a realocação de trabalhadores, maior a disponibilidade destes, o que impacta em aumento da produtividade. A produtividade também é influenciada pelo tempo de ciclo, pois quanto menor o tempo de ciclo, maior a produtividade da linha e, em consequência, maior movimentação estereotipada, culminando novamente em sobrecarga humana física.

No que se refere ao subsistema de “Influência da Especialização da tarefa no Rendimento” (R2) (um *looping* de reforço), também descrito na Figura 21, observa-se que a

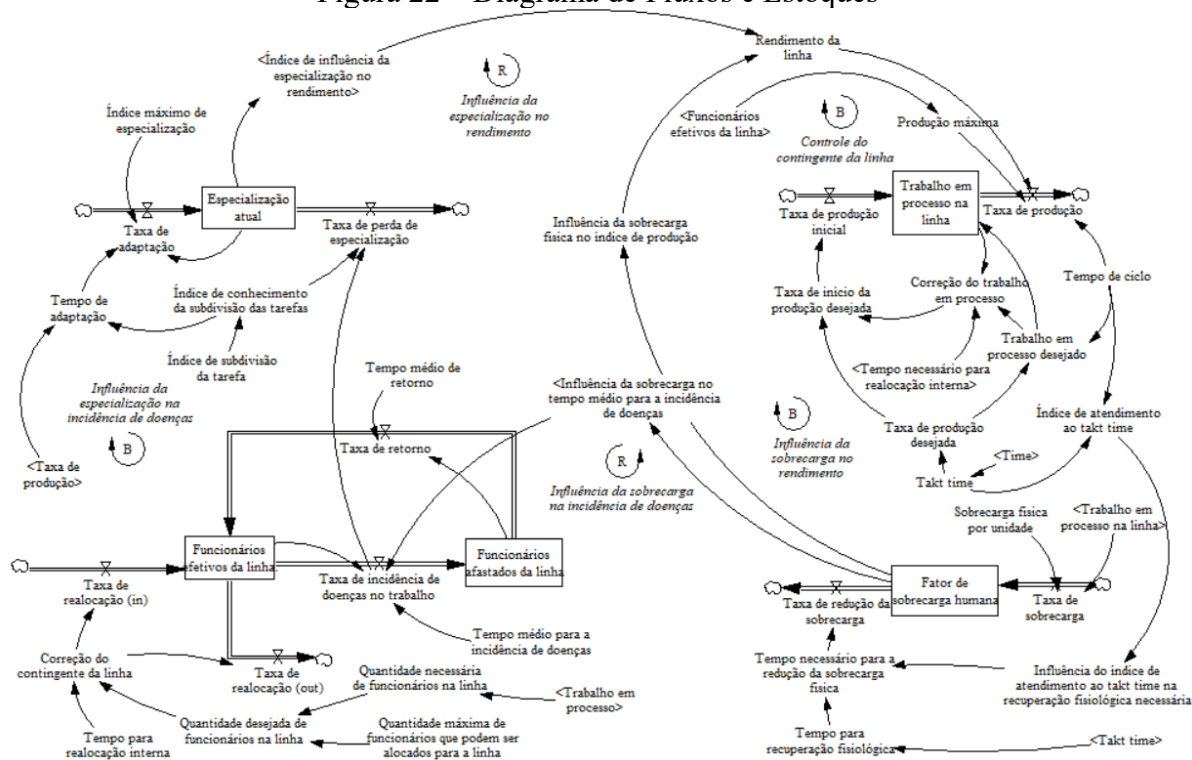
sobrecarga humana impacta negativamente no rendimento do trabalhador, de modo que quanto menor a sobrecarga, maior o rendimento individual. Quando o rendimento do trabalhador aumenta, a linha, como um todo, melhora sua produtividade, aumentando também a quantidade de repetições da atividade. Esse aumento nas repetições gera uma necessidade menor de tempo para ganho de conhecimento do trabalhador em relação à tarefa/atividade. Por outro lado, a subdivisão da tarefa reduz a duração das atividades nos postos. Essa redução aumenta o tempo de ciclo, diminuindo a produtividade da linha. A duração das atividades nos postos também impacta na quantidade de movimentos e, conseqüentemente, no tempo para ganho de conhecimento.

Quanto ao subsistema de “Influências da Especialização e da Incidência de Doenças” (B3) da Figura 21 (também caracterizado com um *looping* de controle), observa-se que o conhecimento relativo do posto de trabalho está sendo impactado por tal subdivisão, sendo que quanto menor a subdivisão, menor o conhecimento relativo. Essa perda de conhecimento relativo do posto de trabalho pode gerar perdas de conhecimento e, conseqüentemente, menor conhecimento da tarefa. O tempo para ganho de conhecimento pode aumentar o conhecimento da tarefa, quanto maior for. Isso reflete diretamente em facilidade de execução, o que aumenta o rendimento do trabalhador e a produtividade geral da linha. Porém, pode aumentar, com isso, a movimentação estereotipada, fator que aumenta também a sobrecarga humana física, aumentando a incidência de doenças do trabalho e o afastamento do trabalhador. Esse aumento no afastamento gera perdas de conhecimento, menor conhecimento da tarefa e menor facilidade de execução e impacta negativamente no rendimento do trabalhador e da linha. A queda do rendimento diminui também a demanda por movimentos estereotipados, reduzindo a sobrecarga humana física, a incidência de doenças e o afastamento, equilibrando novamente o conhecimento da tarefa, o rendimento e sobrecarga.

b) Descrição estrutural

O contexto conceitual descrito compreende cinco ciclos de realimentação. Partindo disso, a estruturação detalhada do modelo objetiva explorar o contexto englobando todas as constantes e variáveis dos mecanismos de controle e de falha. Contudo, no diagrama detalhado se mantêm os caminhos da informação assim como foram retratados pelos ciclos no diagrama de causalidade. O diagrama foi dividido em blocos (os subsistemas representados pelos módulos de fluxo e estoque) para viabilizar sua exposição. Nos diferentes subsistemas podem ser identificadas variáveis comuns pelas quais estabelecem relações. O Diagrama de Fluxos e Estoques está descrito na Figura 22.

Figura 22 – Diagrama de Fluxos e Estoques



Fonte: Mattos et al. (2019).

Conforme descrito, o Diagrama de Fluxos e Estoques está estruturado em quatro blocos que descrevem: (i) a representação da “Linha de Produção”; (ii) a “Sobrecarga” (sobrecarga humana física no trabalho); (iii) a “Força de Trabalho” (o contingente da linha, afastamentos, retornos e realocações); e (iv) o “Conhecimento da Tarefa”.

A representação da “Linha de Produção” (primeiro bloco) é simplificada, com base no apresentado por Sterman (2000). Mesmo com alguns aspectos simplificados essa representação da linha de produção permite compreender o comportamento da interação entre os fatores que compõem o diagrama conceitual. Nessa linha não são gerados estoques intermediários, então o indicador de trabalho em processo corresponde à quantidade de trabalho em processamento ao longo dos postos. Esse subsistema detalha como o trabalho em processo é corrigido.

O subsistema referente à “Sobrecarga” (segundo bloco) possui somente um indicador, a sobrecarga humana física, inserido como um fator variando de 0 a 100%. A taxa de entrada determina a sobrecarga e é influenciada por fatores do subsistema da linha de produção. A taxa de saída é responsável pela redução da sobrecarga, influenciada por fatores fisiológicos (como pausas e descanso).

O subsistema correspondente à “Força de Trabalho” (terceiro bloco) utiliza dois estoques: os trabalhadores efetivamente na linha e os trabalhadores afastados por doença. Esse

subsistema descreve o processo de correção do contingente considerando as perdas e o processo de alocação.

O último subsistema descrito é o subsistema referente ao “Conhecimento da Tarefa”. Nesse caso é utilizado um único indicador, o conhecimento atual. Esse indicador também é inserido como um índice, variando de 0% (nenhum conhecimento da tarefa) a 100% (conhecimento pleno da tarefa). Atividades de naturezas diferentes podem apresentar comportamentos distintos com relação à retenção do conhecimento por parte do trabalhador. Nesse caso, considerou-se, em concordância com uma linha produtiva que processa sempre o mesmo produto executando sempre a mesma atividade, que o conhecimento se acumula de forma exponencial de primeira ordem em relação ao valor máximo.

O detalhamento do modelo pelo diagrama de fluxos e estoque está diretamente relacionado com a estruturação matemática do modelo. No software Vensim as equações são inseridas descrevendo cada variável.

Com isso, a etapa de estruturação do modelo está concluída. Na próxima seção são expostos os resultados da simulação e prospecção do comportamento do sistema.

c) Prospecção e diagnóstico global

O modelo engloba fatores cujos valores podem ser facilmente obtidos pelos registros históricos da gestão da linha, ou mesmo valorados conforme os requisitos operacionais da linha. Contudo, o modelo também engloba fatores com maior incerteza (de difícil percepção por parte de líderes e trabalhadores). Esses fatores são referentes à sobrecarga humana física sofrida pelos trabalhadores. Portanto, a prospecção dos comportamentos que quantificam os indicadores no intervalo temporal foi conduzida conforme um protocolo que considera dois cenários, conforme descrito na Figura 16 na página 114 (procedimentos metodológicos). O cenário 1 objetiva reproduzir o problema descrito e, com isso, calibrar o modelo, já o cenário 2 explora os reflexos da intervenção no sistema.

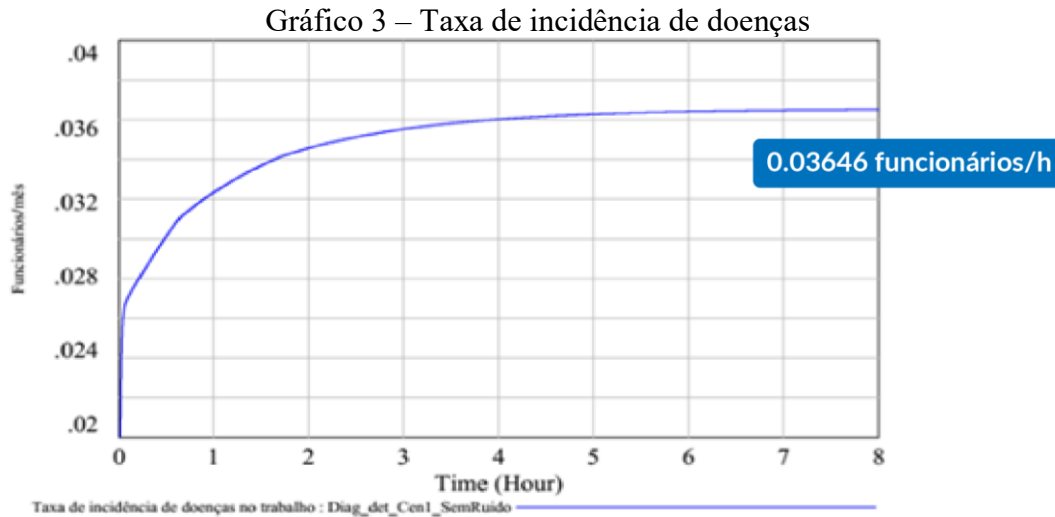
Então, para a prospecção do cenário 1 as constantes são configuradas com o valor pelo qual a linha opera na condição atual (“tempo de ciclo”, “índice de subdivisão da atividade”, “tempo necessário para realocação interna”) ou com os valores registrados historicamente (“tempo de adaptação” e “tempo médio de retorno”). Alguns fatores variáveis, como o “tempo de adaptação” (que depende da taxa de produção e da “proporção da subdivisão do conhecimento”) e a “produção máxima” (que depende da quantidade de “trabalhadores efetivos na linha”), também foram valorados conforme os registros históricos da linha de produção em função de suas respectivas entradas. Os valores aproximados para os fatores com maior grau de incerteza (“sobrecarga por unidade” de produto e “influência do índice de ajuste ao *takt time*”

no tempo de redução da sobrecarga”) também são inseridos. A simulação é realizada e os valores desses últimos fatores são refinados até que o cenário 1 reproduza o problema descrito. Com a reprodução do problema é obtida a coerência entre o valor das constantes com maior grau de incerteza e o comportamento do sistema. Desse modo, tal valor pode ser mantido para a prospecção do cenário que representa uma nova condição para o sistema.

Para a prospecção do cenário 2, uma nova configuração para as variáveis de entrada (“tempo de ciclo” e “índice de subdivisão da atividade”) é fornecida. Para isso, solicitou-se à equipe de engenharia de processo o tempo de ciclo que a linha teria para o caso de um posto de trabalho adicional.

Para todos os cenários deste estudo específico o horizonte de simulação foi definido para oito horas (um dia de trabalho). Isso porque os ciclos descrevem efeitos de curto prazo relacionados às ações (a percepção do estado do sistema e a ação de correção) do líder da linha. E assim as recomendações são direcionadas à gestão em curto prazo. Além disso, salienta-se que para ambos os cenários o valor inicial do indicador “trabalho em processo” foi estabelecido como igual ao “trabalho em processo desejado”, e o do indicador “trabalhadores efetivos na linha” foi estabelecido como igual à “quantidade desejada de trabalhadores na linha”. Essas configurações atribuem ao comportamento inicial do modelo uma proximidade ao equilíbrio, tornando mais fácil o diagnóstico do comportamento. Ainda, o indicador de “*human overload factor*” foi estabelecido como igual a zero, considerando que não há sobrecarga no início do trabalho. O indicador “trabalhadores afastados da linha” foi estabelecido como igual a zero, considerando um estado inicial ideal. E o indicador de “conhecimento atual” foi estabelecido como 100%, considerando que os trabalhadores atualmente na linha (não havendo saídas e entradas) têm pleno conhecimento da tarefa. Por fim, uma importante restrição quanto à alocação de trabalhadores foi inserida. Para a configuração atual da linha (cenário 1) o líder da linha de produção pode alocar um máximo de três trabalhadores para não comprometer os demais processos da empresa. Para a prospecção do comportamento do cenário 2 essa mesma restrição foi mantida.

No Gráfico 3 é apresentada a taxa de incidência de doenças. Essa taxa tende a equilibrar-se em 0.03646 trabalhadores/h, que equivale, nesse horizonte de simulação, aos 105 afastamentos registrados ao longo do último ano.



Fonte: Mattos et al. (2019).

O modelo também reproduz uma taxa de produção abaixo da esperada pelo dimensionamento da linha. O *gap* de 58% da taxa de produção em relação à taxa de produção esperada corresponde ao descrito pelo líder da linha. O comportamento da taxa de produção para o cenário 1 é mostrado no Gráfico 4.

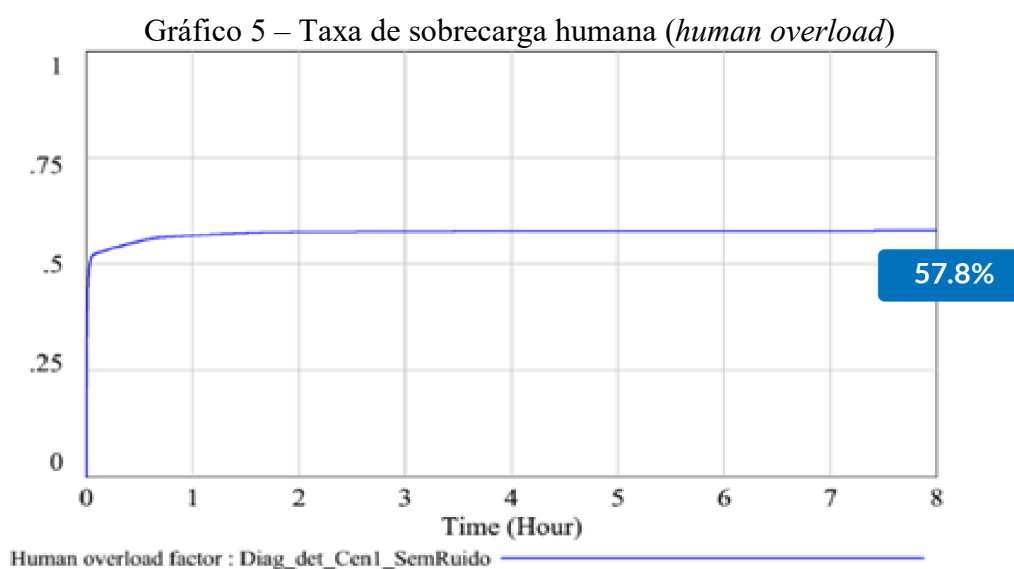


Fonte: Mattos et al. (2019).

Conforme os comportamentos apresentados, a configuração e o ajuste das constantes e variáveis possibilitou o alinhamento da representação gráfica do comportamento com o problema. Com isso, a análise do comportamento dos demais indicadores possibilita a compreensão do mecanismo, que resulta nos *gaps* de desempenho.

Nesse sentido, ressalta-se que os indicadores apontam um aumento da sobrecarga humana até estabilizar na ordem de 57.8%. Esse comportamento é mostrado no Gráfico 5.

Nesse contexto, o comportamento da sobrecarga está diretamente relacionado ao rendimento da linha. Por isso, o rendimento decresce rapidamente, estabilizando na ordem de 42.2%, como é mostrado pelo Gráfico 6. O comportamento simulado indica que o rendimento da linha é quase que exclusivamente influenciado pela sobrecarga humana. Portanto, é o baixo rendimento em razão da sobrecarga por movimentação estereotipada que infere a redução da taxa de produção. Essa é a indicação da ação do ciclo de realimentação “influência da sobrecarga humana física no rendimento”.



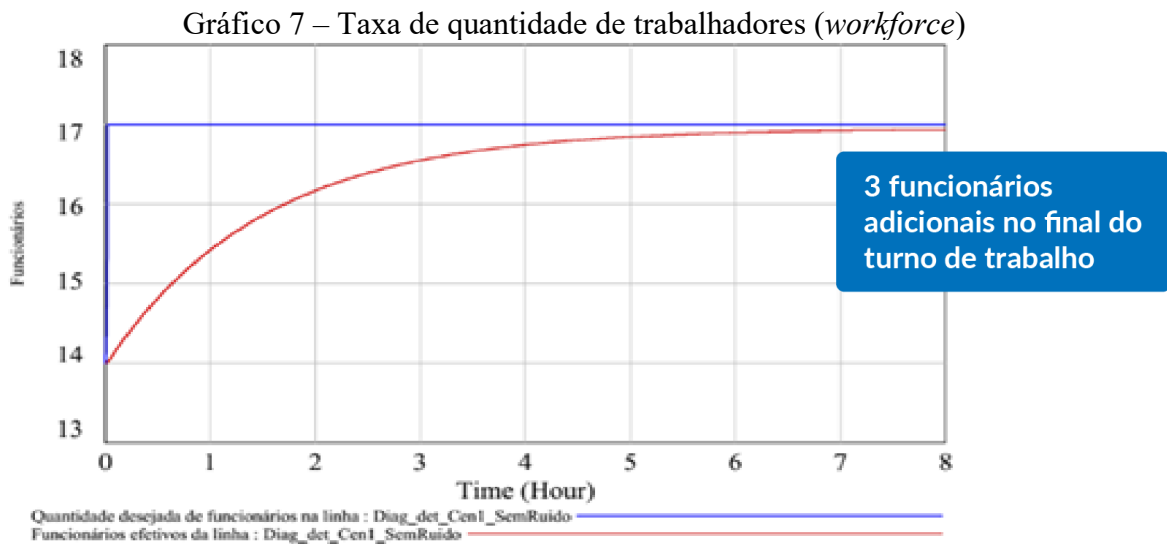
Fonte: Mattos et al. (2019).



Fonte: Mattos et al. (2019).

A ação sistêmica da sobrecarga humana no contexto descrito se reflete também na taxa de afastamentos pela incidência de doenças. Assim, as correções pelas ações de alocação de

operadores para o controle do contingente precisam compensar a necessidade de uma maior produção e as perdas por afastamento. Nesse cenário, a necessidade de operadores gera a alocação gradual até o máximo permitido. O Gráfico 7 apresenta a evolução da quantidade de operadores na linha ocorrendo ao longo do trabalho diário. Novos operadores são alocados desde o início do turno, chegando a ter três operadores adicionais no final do turno de trabalho.



Fonte: Mattos et al. (2019).

Assim, enquanto o reflexo da sobrecarga no rendimento reduz a taxa de produção, a alocação de operadores adicionais é insuficiente para suprir as demandas de reposição pelos afastamentos e para efetivar o processamento do trabalho em processo. Ou seja, o controle do contingente da linha não tem sucesso em reconduzir a taxa de produção para um valor mais próximo ao desejado.

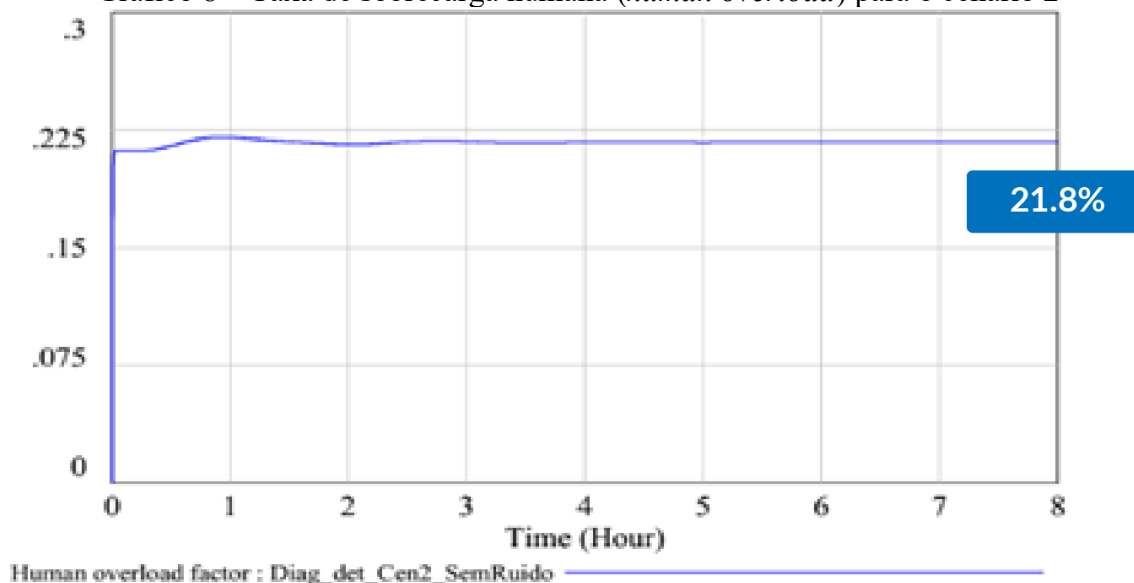
Portanto, pela análise do sistema na configuração do cenário 1 se percebe que o ciclo “influência da sobrecarga no rendimento” domina o comportamento do sistema. A ação desse ciclo, auxiliada ainda pela ação do ciclo “influência da sobrecarga na incidência de doenças”, impede que o ciclo de “controle do contingente da linha” seja eficiente em manter o nível de produtividade próximo ao esperado.

Para a comparação com esse primeiro cenário, a seguir são apresentados e discutidos os comportamentos dos indicadores para o cenário 2. Esse cenário considera um posto de trabalho adicional. Com a nova divisão da atividade o tempo de ciclo passa a ser de 0.0228h (79,7% do *takt time*).

Pode ser constatado no cenário 2 que, apesar de a redução do tempo de ciclo acarretar a redução da taxa de produção, o efeito sistêmico dessa redução também reduz a sobrecarga de

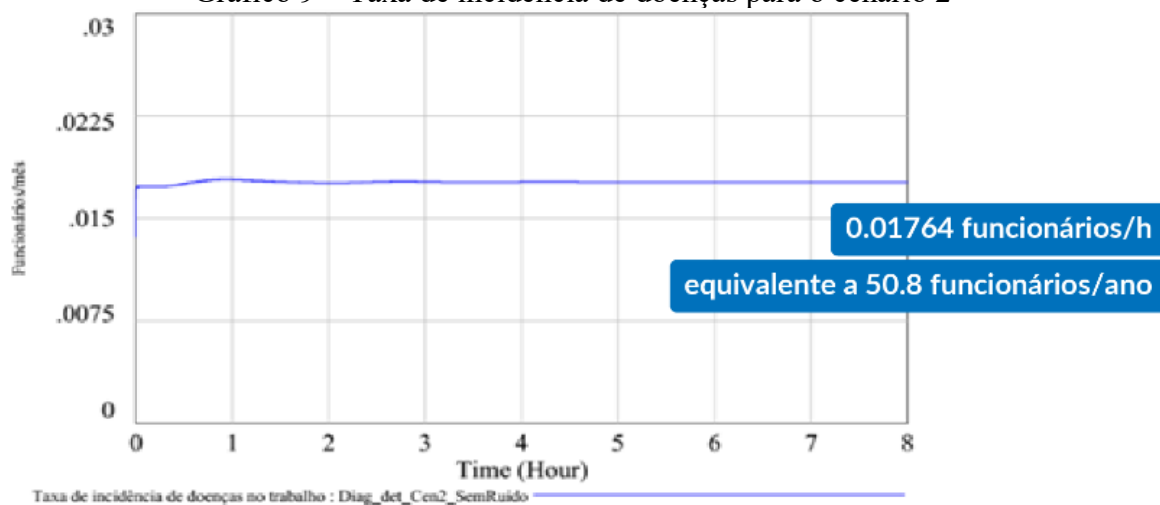
trabalho. O Gráfico 8 mostra uma considerável redução da sobrecarga humana, que se estabiliza em 21.8%. Isso se reflete na taxa de incidência de doenças por movimentação estereotipada. A previsão pelo modelo é de que essa taxa se situe em 0.01764 trabalhadores/h, equivalente a 50.8 trabalhadores/ano, como mostra o Gráfico 9. Essa nova condição representa uma redução de 51.6% desse tipo de afastamento.

Gráfico 8 – Taxa de sobrecarga humana (*human overload*) para o cenário 2



Fonte: Mattos et al. (2019).

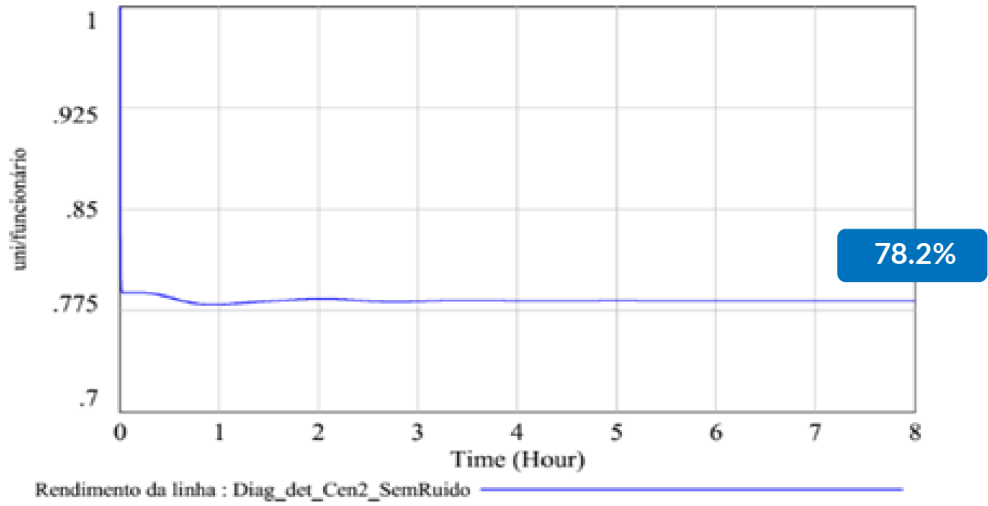
Gráfico 9 – Taxa de incidência de doenças para o cenário 2



Fonte: Mattos et al. (2019).

Além disso, o efeito sistêmico da redução da sobrecarga de trabalho promove o aumento do rendimento da linha. O Gráfico 10 mostra o rendimento da linha, nesse cenário estabilizado em 78.2%.

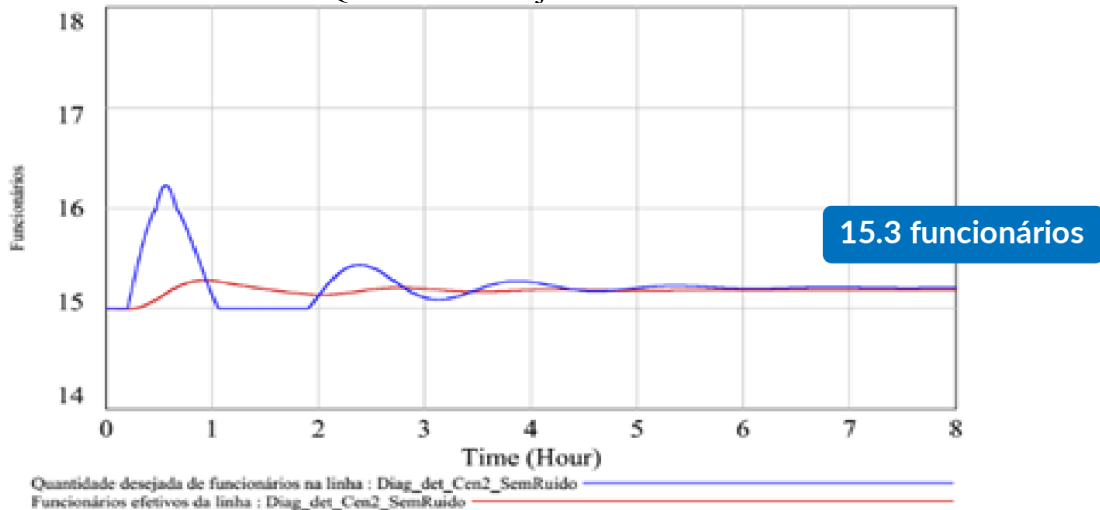
Gráfico 10 – Taxa de rendimento da linha para o cenário 2



Fonte: Mattos et al. (2019).

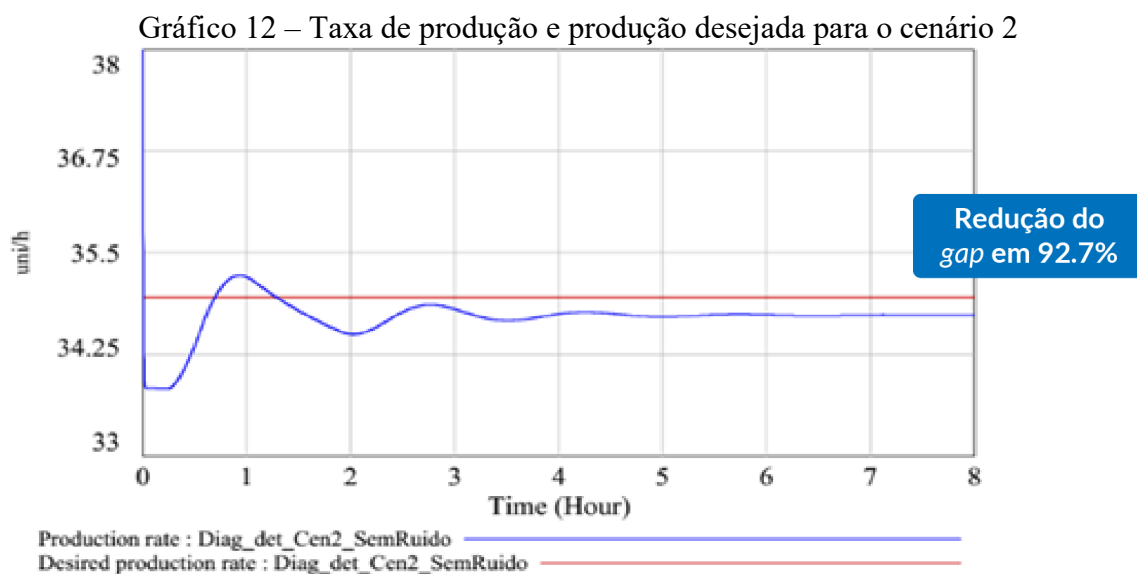
Com isso, dois aspectos do sistema são favorecidos. A menor taxa de incidência de doenças culmina em uma menor necessidade do sistema em repor trabalhadores. Conjuntamente, o aumento do rendimento torna o sistema mais eficaz em executar o trabalho em processo na linha. Isso torna possível a linha operar muito próxima à quantidade de trabalhadores para a qual foi dimensionada. Pelo modelo se tem a previsão de que, idealmente, a linha precisa operar com 15.3 trabalhadores, conforme mostra o Gráfico 11.

Gráfico 11 – Quantidade desejada de trabalhadores na linha



Fonte: Mattos et al. (2019).

Portanto, o ciclo de “controle do contingente da linha” possui maior relevância no comportamento geral do sistema. Pela alocação de trabalhadores o controle do contingente atua corrigindo a discrepância entre a taxa de produção e a taxa de produção desejada. No cenário 2 a atuação do controle do contingente conduz a taxa de produção para 99% do valor desejado. Essa condição representa uma melhoria em relação ao cenário 1 de 92.7% da quantidade de unidades produzidas por hora, conforme o Gráfico 12.



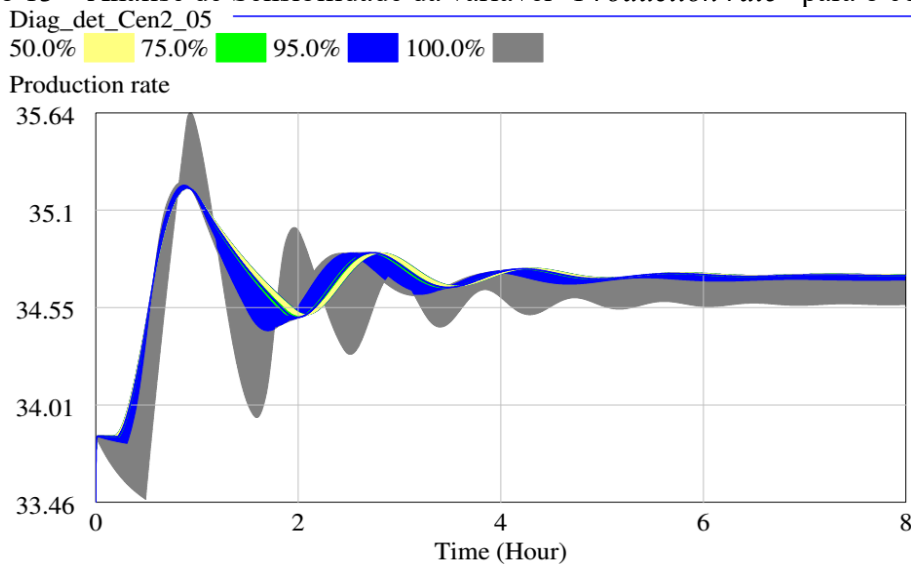
Fonte: Mattos et al. (2019).

Portanto, em contraste com o cenário 1, no cenário 2 os ciclos de “influência da sobrecarga humana física no rendimento” e “influência da sobrecarga humana física na incidência de doenças” também atuam, porém em menor intensidade. Por isso ainda pode ser observada uma discrepância com o estado desejado. Mas a dominância do comportamento é dada pelo ciclo de “controle do contingente”. Essa é a razão fundamental para o comportamento mais favorável prospectado.

Contudo, os dados referentes aos afastamentos da linha utilizados para as simulações anteriores são valores médios. Os dados reais coletados apresentam discrepâncias que podem ser analisadas estatisticamente de modo a estabelecer seus valores superiores, inferiores e seu desvio padrão. Então, para aproximar os resultados da realidade estabelecendo uma compreensão das bordas do comportamento nas quais os valores podem estar situados, realizou-se a Análise de Sensibilidade. Essa análise também serve como um teste adicional para verificar quanto o modelo é sensível a mudanças de alguns de seus parâmetros.

Para realização dessa análise o software Vensim utiliza a simulação de Monte Carlo, atribuindo valores aleatórios a um fator, mas respeitando as características estatísticas da variação. Especificamente para esse teste, decidiu-se utilizar como fator para atribuição da variação aleatória a “taxa de produção” (*production rate*), que influencia o “Tempo médio para adoecimento no trabalho”, por apresentar o maior desvio padrão entre os dados coletados e também por estar diretamente relacionada ao problema de afastamentos que motivou esse estudo preliminar. O software foi configurado para utilizar o padrão de distribuição gaussiana normal.

Gráfico 13 – Análise de Sensibilidade da variável “*Production rate*” para o cenário 2



Fonte: Mattos et al. (2019).

De modo geral, os valores da taxa de produção reais em até 75% de probabilidade de ocorrência situam-se muito próximos do valor prospectado sem a aplicação desse teste. Até as quatro horas de trabalho da linha de produção a dispersão da taxa de produção com 95% de probabilidade é maior, mostrando maior variabilidade dessa taxa quando apresenta um padrão oscilatório de comportamento. Ao longo desse período de simulação os valores da taxa de produção com 100% de probabilidade de ocorrência situam-se entre 33,46 e 35,64 uni/h. Após as quatro horas de funcionamento se percebe que a maior influência da variabilidade no tempo de incidência de doenças está na dispersão dos valores para baixo da média da taxa de produção. A dispersão nesse sentido provoca uma variação na taxa de produção, sendo que valores reais dessa taxa com 100% de probabilidade se situam entre 34,5 e 34,75 uni/h. Com isso percebe-se que, quanto maior o desvio padrão no tempo de incidência de doenças, maior será a probabilidade de os valores da taxa de produção estarem abaixo da média estimada.

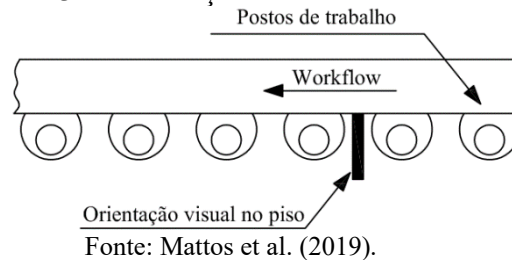
4.2.3.2 Recomendações para o estudo preliminar

Na subseção anterior o comportamento prospectado para ambos os cenários foi explicado com base no comportamento dos indicadores. Com isso, foi possível constatar qual ciclo atuava com maior intensidade e formular o diagnóstico global. As recomendações são estabelecidas com base nas observações sobre as condições que determinam a dominância de determinado ciclo de realimentação no comportamento do sistema.

Primeiramente, salienta-se que o comportamento dessa linha de produção é determinado pelas ações dos ciclos de “influência da sobrecarga no rendimento”, “influência da sobrecarga humana física na incidência de doenças” e “controle do contingente”. Como esses ciclos conduzem o sistema a um equilíbrio (são ciclos de balanço), a sobrecarga apresentará uma estabilização. Em um cenário desfavorável essa sobrecarga estabilizará em razão da regulação do próprio sistema.

Um comportamento mais favorável ao sistema é obtido quando a ação do ciclo de “controle do contingente” passa a ter relevância no comportamento. Contudo, a identificação do estado da linha (pela quantidade de trabalho em processo) e a posterior ação para correção do estado (pela alocação de recursos humanos) que caracterizam esse ciclo geram oscilações, como pode ser visto no Gráfico 12. Essas oscilações são prejudiciais, visto que podem levar o líder da linha a uma interpretação errônea do seu estado real. A previsão do modelo, resultante de uma simulação contínua em um horizonte temporal, indica que a linha operará normalmente com 15 trabalhadores, contudo o pequeno acúmulo de trabalho em processo exigirá que esporadicamente um trabalhador adicional preste auxílio no processamento. Essa é a interpretação da indicação de 15.3 trabalhadores. Com a intenção de reduzir a geração de tais oscilações, uma recomendação consiste na utilização de uma orientação visual para que o líder antecipe a ação de alocação. Como o aumento do trabalho em processo ocasiona uma aproximação dos postos de trabalho, essa orientação pode ser feita no sentido de indicar a aproximação limite. Um esquema ilustrativo de como essa orientação poderia ser implantada é apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Orientação visual recomendada



Uma segunda recomendação se sustenta no fato de que, para a configuração da linha, especificamente a condição de uma grande divisão da tarefa, os ciclos de “influência da especialização na incidência de doenças” e “influência da especialização da tarefa no rendimento” não influenciam o comportamento do sistema de modo significativo. Nesse sentido, objetivando uma redução ainda maior da sobrecarga humana pela movimentação estereotipada (dados os reflexos sistêmicos dessa força no comportamento), sugere-se a implantação de um sistema de alternância de postos de trabalho. Com isso, os operadores executariam atividades diferentes, quebrando o padrão estereotipado da atividade como é realizada atualmente.

Definidas as Recomendações, a próxima subseção realiza uma discussão acerca dos achados do estudo preliminar.

4.2.4 Discussão acerca do estudo preliminar

Esta subseção apresenta a relação dos resultados da pesquisa com a literatura corrente. Tal relação ocorre no sentido de destacar as implicações dos resultados obtidos pelo presente estudo no entendimento de como a sobrecarga humana física ocorre em sistemas produtivos. No tocante ao método utilizado, a simulação computacional em um horizonte temporal permitiu que fosse observado o comportamento da variação da sobrecarga humana física e, com isso, possibilitou uma compreensão mais precisa do período de mudança/transição entre duas condições de trabalho: (i) a situação inicial e (ii) a configuração após a aplicação de novas políticas.

É importante ressaltar que existem trabalhos consolidados analisando os efeitos da sobrecarga humana física, da movimentação repetitiva e da exposição do trabalhador ao risco, propondo explicações e métodos de avaliação desse fenômeno (como, por exemplo, Silverstein, Fine e Armstrong (1986), Putz-Anderson (1988), Moore e Garg (1995), Colombini (1998), Kumar (2001), Rashedi e Nussbaum (2016), Greene et al. (2017) e Sandlund et al. (2017)).

Também se podem observar diversos trabalhos relacionando a sobrecarga a outros fatores que compõem um sistema produtivo, como ritmo, qualidade e satisfação, como os de Landsbergis, Cahill e Schnall (1996), Neumann et al. (2006), Koukoulaki (2014), Arezes, Dinis-Carvalho e Alves (2015) e Sood et al. (2017)). A consequência das relações entre ambiente de trabalho e trabalhador cujos fatores culminam em sobrecarga humana física são, sabidamente, importantes para a qualidade e a eficiência da produção (LIN; DRURY; KIM, 2001; VILLAGE; SALUSTRI; NEUMANN, 2017).

Ao abordar o sistema específico em questão, utilizando dados empíricos vindos de relatórios técnicos, expressados pelos gestores, ou mesmo levantados pela AET, esta pesquisa viabilizou correlações quantitativas entre esses fatores, já observados em literatura e que se apresentam também no sistema em estudo. Com isso, técnicas de simulação puderam ser empregadas, possibilitando a visualização de como ocorrem tais relações por meio da prospecção de cenários.

Enquanto como resultado se pode observar que existe, no sistema estudado, uma sobrecarga humana física do trabalhador quando ocorrem problemas de balanceamento, em razão da aceleração das atividades para reduzir o trabalho em processo acumulado na linha, corrobora-se a afirmação de Lin, Drury e Kim (2001) de que a maioria das tarefas de montagem baseadas na produção em linha, na qual predominantemente existem características de um tempo condutor constante para a conclusão de cada tarefa, qualquer variabilidade entre os postos de trabalho com relação ao tempo levará à sobrecarga de alguns trabalhadores e à ociosidade de outros. A aceleração no ritmo para consumir o trabalho em processo que ocorre, nesse caso, junto aos trabalhadores sobrecarregados aumenta a repetitividade da tarefa em um contexto físico de movimentação estereotipada, o que os expõem ao risco de desenvolver lesões por traumas cumulativos (COLOMBINI, 1998; KUMAR, 2001; KOUKOULAKI, 2014; SANDLUND et al, 2017).

Enquanto do aumento do trabalho em processo, pode-se constatar, por meio do emprego da Análise Ergonômica do Trabalho, que para alcançar os objetivos traçados pela empresa, mesmo havendo lacunas quanto às condições ideais para viabilização do atingimento dessas metas, os trabalhadores buscam meios alternativos, como: (i) para o líder, tomar ações gerenciais no sentido de trazer trabalhadores de outra linha para ajudar a reduzir o atraso; (ii) para os demais trabalhadores, utilizar seu tempo de descanso para regularizar o trabalho em processo acumulado. Esse processo de regulação do trabalho foi descrito por autores como Guérin et al. (2001), e sua identificação é relevante para a transformação do trabalho. O

processo de regulação do trabalho, nesse caso, faz parte de um mecanismo maior de homeostase do sistema, o qual, com isso, busca um equilíbrio interno em decorrência de um desequilíbrio externo, processo descrito também por Ashby (1957) nos fundamentos da cibernética.

Sobre os aspectos físicos, Silverstein, Fine e Armstrong (1986) consideram tarefas repetitivas aquelas cujos movimentos idênticos ou estereotipados são realizados mais de quatro vezes por minuto ou qualquer ciclo de trabalho de duração menor de 30 segundos. Contudo, mesmo em situações de ciclos maiores que 30 segundos, a atividade poderia ter características de repetitividade em função da ocorrência de um mesmo movimento que ocupasse mais de 50% do ciclo. O fator pausa/descanso como tempo de recuperação fisiológica também é citado como relevante no processo de adoecimento do trabalhador em razão da repetitividade e estereotipia (PUTZ-ANDERSON, 1998; MOORE; GARG, 1995; COLOMBINI; OCCHIPINTI; FANTI, 2008); Com base nisso, identifica-se que a atividade em análise pode causar problemas musculoesqueléticos nos membros superiores em decorrência de sua natureza repetitiva e de movimentação estereotipada (LECLERC et al., 2004; NORDANDER et al., 2008; COSTA; VIEIRA, 2009). Isso corrobora a previsão do modelo com relação à incidência de doenças ocupacionais em decorrência da repetitividade e estereotipia de movimentação, em que ambas surgem de um aumento do ritmo para consumir o trabalho em processo acumulado na linha desbalanceada.

Nesse ponto, ressalta-se que o redesenho do trabalho para torná-lo mais satisfatório para o próprio trabalhador encontra apoio em uma linha balanceada, que minimamente não ofereça sobrecarga humana física além do que já é exigido em circunstâncias normais; por isso, este estudo foi delineado como a etapa base para a transformação do trabalho da linha em questão.

O aumento do ritmo para suprir a demanda de processamento da linha reflete outro problema relevante: o ritmo imposto por um *takt time* pode impedir regulações do trabalho por constrição da autonomia do trabalhador. O ritmo imposto, comum em sistemas de produção enxuta ou em massa, dessa forma, pode impactar diretamente a motivação e a satisfação acerca do trabalho, uma vez que o trabalhador experimenta redução do controle de sua atividade, conforme apontam autores como Parker (2003), Dul e Neumann (2009) e Arezes, Diniz-Carvalho e Alves (2015). O modelo aponta não apenas para esses aspectos, por meio do adoecimento e afastamento previsto do trabalhador, mas também indica que isso se reflete novamente na produtividade e na qualidade produtiva, corroborando os apontamentos de Neumann, Kolus e Wells (2016).

Tendo em foco os dados coletados, podem-se inferir duas contribuições deste estudo em dois diferentes aspectos: (i) uma contribuição da compreensão da sobrecarga humana física do

trabalhador e como ela ocorre em um contexto sistêmico e complexo, afetando fatores importantes de um sistema produtivo, como o conhecimento da atividade e a produção em si, bem como sendo afetada por esses fatores, em efeitos de feedback; (ii) a viabilidade de um método sistêmico e quantitativo para abordar questões de ergonomia e fatores humanos em ambientes industriais cujo comportamento se apresenta não linear em razão do alto grau de interação entre os diversos elementos, que caracteriza a complexidade, objetivando apoio à tomada de decisão.

4.2.5 Conclusões acerca do estudo preliminar

Especificamente para o caso da indústria de componentes elétricos automotivos (MATTOS et al., 2019), existe um *trade off* entre o que se preconiza na visão do setor de engenharia da organização em relação à máxima eficiência, buscando aproximar o ciclo de trabalho ao *takt time*, e a sobrecarga, podendo impactar tanto na saúde do trabalhador quanto na produtividade da linha de forma geral. Isso indica que a consideração de fatores relacionados ao ser humano (como a sobrecarga de trabalho abordada neste estudo) no dimensionamento e configuração de uma linha de produção pode incidir de modo positivo no seu desempenho. Além disso, o uso de ferramentas e modelos que consideram os fatores humanos e os relacionam de modo sistêmico com os indicadores de produtividade pode ser útil não somente para o dimensionamento da linha, mas também para justificar, frente à direção, questões a princípio intuitivamente desfavoráveis, como o caso de um posto de trabalho adicional. Essa justificativa, inclusive, poderia, em um ponto de vista sistêmico mais amplo, estimular a consideração dos fatores humanos na cultura organizacional, refletindo nas diversas práticas e modelos de gestão da organização.

A aproximação do ciclo de cada peça ao *takt time* pode, do ponto de vista produtivo, reduzir tempo ocioso da produção, resultando em ganhos em termos de eficiência e produtividade. Do ponto de vista do fator humano, a aproximação demasiada do ciclo ao *takt time* pode ser um fator de sobrecarga que se reflete na redução dos tempos de recuperação do trabalhador ao final de cada ciclo. Se for considerado o fator humano no dimensionamento da produção dessa linha, o tempo ocioso entre o final do processo de uma peça até o início da próxima peça deve ser considerado não apenas como tempo ocioso, mas também como tempo de recuperação do trabalhador. Isso implica buscar um ponto de equilíbrio que satisfaça as necessidades dos trabalhadores e da produção. Compreender o limite entre tempo improdutivo

e descanso pode ser estratégico no dimensionamento global da linha, uma vez que na prática isso pode influenciar no bom desempenho por reduzir a sobrecarga, fator corresponsável na queda da produtividade em razão de perdas inerentes ao afastamento do trabalhador.

No modelo construído para o estudo preliminar, o dimensionamento da linha de produção não considerando os fatores sistêmicos fez com que o *loop* de feedback “influência da sobrecarga no rendimento da linha” governasse o comportamento do sistema, resultando em uma taxa de produção de somente 42% da capacidade. O dimensionamento alternativo foi responsável pelo *loop* de feedback “controle do contingente”, que passou a governar o sistema (compensando as perdas por atestado médico), sendo responsável pelo incremento de 92,7% na produção. A atuação da sobrecarga na produção apresentou um comportamento de feedback de primeira ordem, mas resultou em um comportamento oscilatório da taxa de produção nos instantes iniciais de funcionamento da linha.

Ainda, como os resultados sugerem um reflexo positivo no desempenho da linha, salienta-se que o modelo de simulação específico para o caso pode ser expandido, verificando *trade offs* adicionais, como, por exemplo, a relação de custo-benefício final, sob os indicadores financeiros da empresa, em se ter um trabalhador adicional na linha. Contudo, destaca-se que, além de indicadores financeiros, a expansão do modelo também deve abordar reflexos como o favorecimento de indicadores financeiros em detrimento da saúde do trabalhador, tendo em vista que o impacto social do afastamento pode onerar não apenas a organização, mas também órgãos ligados ao governo que arcariam com os custos do trabalhador afastado.

Por fim, em razão da recomendação da direção ao líder da linha de produção de não realizar a parada da linha para que o sistema se regule, consumindo o trabalho já em processo e reiniciando-se, este estudo preliminar em específico se limitou às ações de regulação pela alocação de trabalhadores adicionais. Salienta-se, também, que os resultados da simulação para o segundo cenário (a configuração alternativa) não foram confrontados com os resultados práticos de uma efetiva alteração na linha e, ainda, que a sobrecarga abordada no estudo se refere apenas à sobrecarga humana física, não incluindo as sobrecargas cognitiva e mental.

4.2.6 Estudo de caso: indústria de caixas de papelão ondulado

O presente estudo de caso realizou-se em uma indústria de caixas de papelão ondulado cujas características assumem caráter de complexidade e apresentam comportamento dinâmico, tal qual o estudo preliminar.

A organização funciona em três turnos, conta com, aproximadamente, 480 colaboradores e é dividida em sete setores, sendo: onduladeira, cartonagem, manutenção, expedição, comercial, qualidade e melhoria contínua. O setor de cartonagem desenvolve processos de transformação de chapas de papelão ondulado em caixas, sendo o maior setor produtivo da empresa. Foi escolhido como setor de estudo pois é apontado como o de maior demanda por intervenções ergonômicas (alto número de absenteísmo) e de melhoria pela própria organização (é o setor mais populoso da planta e desenvolve o processo de maior agregação de valor). O setor é composto de seis impressoras, porém apenas quatro delas funcionam cotidianamente em três turnos, e foram a amostra utilizada em razão de sua rotina estável. Cada impressora abriga uma média de cinco trabalhadores (sendo que esse número pode apresentar variações de acordo com a flutuação de colaboradores disponíveis, o que ocorre por diversas causas, sendo a mais comum o absenteísmo por doenças ocupacionais). Os postos possuem características individuais, porém se assemelham quanto às exigências físicas (movimentação estereotipada e ciclos curtos e rápidos), visto que o trabalho se concentra na ação dos membros superiores e, por vezes, da coluna lombar.

As funções desempenhadas pelos colaboradores nas impressoras dividem-se em: (a) dois formateiros, que são responsáveis pelo abastecimento da máquina com chapas de papelão ondulado; (b) dois auxiliares de produção: um na saída da impressora, responsável pela retirada de refis (pedaços de papelão aderidos em razão de falhas no processo de corte), pela organização das caixas em blocos e pelo controle de qualidade (de corte e tinta), e um paletizador, responsável por formatar paletes e direcioná-los à expedição; e (c) um líder da linha, cuja função é controlar os parâmetros e indicadores da máquina, além de desempenhar papel de apoio em todos os processos realizados na máquina.

A empresa tem uma carteira de clientes variada que, em sua maioria, são organizações do ramo alimentício, como frigoríficos e laticínios. Uma característica que se apresenta relevante para o desenvolvimento e as discussões deste estudo é que a organização em foco possui, como característica, flexibilidade de processos e se propõe à produção tanto de lotes grandes quanto de lotes pequenos, atendendo a uma grande variedade de organizações.

Este estudo de caso é uma continuidade de Mattos et al. (2019) em um aspecto específico. O estudo preliminar remete a aspectos mais operacionais da interação com um sistema industrial complexo. Já o caso agora em questão abordará como os aspectos táticos podem impactar, por meio de *loopings* de feedback, os aspectos ergonômicos e produtivos em face da tomada de decisão dos gestores.

Os resultados deste estudo específico estão em processo de submissão para o periódico *Applied Ergonomics* sob título *Influência de ações táticas na performance operacional e ergonomia: estudo de caso em uma indústria de caixas de papelão ondulado*, de autoria de Diego Luiz de Mattos, Rafael Ariento Neto, Eugenio Andrés Díaz Merino e Pedro Miguel Arezes.

4.2.7 Problema específico do estudo de caso

O problema apresentado pela organização diz respeito, em um primeiro momento, à produtividade do sistema e ao afastamento do trabalhador por doenças ocupacionais. Porém, ampliando o problema para uma visão mais sistêmica, percebe-se que ações tomadas em âmbito tático resultam em efeitos contraintuitivos em âmbito operacional. No caso em questão, um número elevado de *set ups*, ocasionado por um grande volume de vendas de pequenos lotes de produção, causa instabilidade no ritmo produtivo (com registro de *downtime* médio na casa dos 35% até agosto de 2019). Essa instabilidade conduz a produção a patamares abaixo do prescrito. Para reconduzir a produção real aos valores desejados, ocorre um aumento no ritmo produtivo por parte dos trabalhadores, o que pode elevar a sobrecarga de trabalho e reduzir os tempos de pausa e recuperação fisiológica. Mesmo com essa ação, os valores de produção não atingem a meta traçada. Decorre dessa situação uma hipótese sistêmica: a estratégia de vender mais lotes menores pode estar impactando as questões ergonômicas e, assim, influenciando a produtividade em efeitos contraintuitivos, pois a sobrecarga emergente desse estado possivelmente controla o comportamento do sistema. Apesar disso, há previsão realizada pelo departamento de inteligência de mercado de uma elevação do volume produtivo por aumento da demanda, o que gera dúvidas acerca da reação do sistema produtivo por parte da organização.

Isso possibilitou testar, em um ambiente de simulação computacional, como as decisões tomadas pelos gestores em âmbito tático, especificamente com relação às vendas (aumento de volume produzido e, conseqüentemente, do número de *set ups*), podem impactar os aspectos ergonômicos e novamente a produtividade, em razão do problema que será descrito na próxima subseção. Para tanto, utilizaram-se a Análise Ergonômica do Trabalho e a análise de riscos ergonômicos com o módulo REBA do software Ergo-IBV na fase Diagnóstico Parcial, e, ainda, inseriu-se o uso da Dinâmica de Sistemas após essa fase, a fim de obter uma compreensão mais abrangente do comportamento do sistema por meio da modelagem matemática. Com isso, pretende-se aumentar a margem de segurança e controle para tomadas de decisão.

4.2.8 Resultados do estudo de caso

Inicialmente os resultados da Análise Ergonômica do Trabalho (AET) são demonstrados tal qual no estudo preliminar, seguindo as etapas de (a) Análise da Demanda, (b) Análise da Tarefa, (c) Análise da Atividade e (d) Diagnóstico Parcial. Esses resultados formaram a base para a descrição do diagrama de enlace causal e, portanto, serão apresentados de forma sistêmica, explicitando como as observações da AET propiciaram o diagnóstico dos *loops* de realimentação do sistema. Posteriormente, serão apontadas algumas consequências da situação para a saúde do trabalhador e para a produção. Em seguida, e de posse dos dados da AET, os resultados da prospecção e simulação com uso da dinâmica de sistemas são apresentados, formando um Diagnóstico Global. A etapa de Recomendações é inserida após essa etapa.

4.2.8.1 Análise Ergonômica do Trabalho

Conforme descrito no parágrafo anterior, a AET será dividida em (a) Análise da Demanda, (b) Análise da Tarefa, (c) Análise da Atividade e (d) Diagnóstico Parcial, de acordo de Guérin et al. (2001). A etapa de Recomendações é inserida após a modelagem pela Dinâmica de Sistemas.

a) Análise da Demanda

A demanda apresentada pela organização consiste no afastamento do trabalhador (32,8 por ano por impressora) e em deficiências de produtividade da linha (*gap* de 9% em relação à produção planejada, sendo que a produção real está em 91%) (hipótese de nível 1). Junta-se a isso a instabilidade quanto ao ritmo do processo, que tem como provável causa um grande número de *set ups* (média de oito *set ups* por dia com um tempo médio de 11,48 minutos por *set up*).

Ainda, segundo registros do setor de Saúde e Segurança da organização, 100% dos colaboradores do setor já apresentaram, em algum momento de seu período trabalhando na função, alguma queixa de dor musculoesquelética, sendo os ombros e punhos as regiões mais acometidas.

Uma demanda secundária exposta pela organização é de um desalinhamento estratégico entre o setor produtivo, o Planejamento e Controle da Produção e o setor comercial. Esse ponto também será explorado adiante no desenvolvimento da AET.

b) Análise da Tarefa

Com relação ao trabalho prescrito para cada função (Formateiro, Auxiliar de Produção – saída da impressora e paletização – e Operador), as informações nesta subseção compiladas foram fornecidas pela empresa.

1. Operador de Impressora

- ✓ Recolher a Ordem de Produção (OP) no processo anterior e recebe do PCP o Boletim da Cartonagem;
- ✓ De acordo com o Boletim da Cartonagem, analisar e interpretar a Ordem de Produção (OP) para execução da produção. Caso haja divergência ou dúvidas, deve consultar o supervisor da Cartonagem;
- ✓ De acordo com os dados constantes na Ordem de Produção (OP) e Ficha de Impressão (FI), inicia-se o ajuste da máquina. Para o ajuste de máquina são observadas as seguintes instruções: dimensão da caixa; cor (catálogo); e outras informações constantes no campo “observação da Ordem de Produção – OP”.
- ✓ Conferir a Ficha de Impressão (FI) e compara com a Ordem de Produção (OP), verificando: referência da caixa; cor (catálogo); dimensões; esquadro; entalhe; fechamento; e outras informações constantes no campo “observação da Ordem de Produção – OP”, e, após, inicia a produção;
- ✓ Retirar uma amostra, faz a montagem da caixa e confere o layout e os dados citados;
- ✓ Retirar uma caixa para realização dos testes físicos;
- ✓ Durante a produção são realizadas inspeções visuais que devem cumprir com os critérios listados no monitoramento dos produtos durante a produção;
- ✓ Material não conforme deve ser segregado em local específico para descarte;
- ✓ Após a conclusão das etapas do fluxo 1 a 6, é realizado o empilhamento nos paletes de acordo com os dados da Ordem de Produção (OP).
- ✓ O operador deve anotar na Ordem de Produção (OP) a quantidade produzida, assinar, apontar no sistema “Simula” e liberar a produção para o processo subsequente.
- ✓ Nota: havendo divergência nas quantidades, deve-se consultar o supervisor da Cartonagem.
- ✓ Realizar todas as outras funções da impressora enquanto ocorre a atividade de impressão, auxiliando os demais colaboradores.

2. Formateiro

- ✓ É responsável pelo abastecimento, ajustes da mesa e máquina, controle das tintas utilizadas para impressão e clichês; também, em algumas vezes, substitui o Operador da máquina conferindo as dimensões, esquadro, impressão e ajustes necessários das máquinas;
- ✓ Lavar o recipiente de tinta localizado dentro da impressora (tinteiro) para eliminar resíduos de tintas utilizadas em outro pedido de produção;
- ✓ Fixar os clichês no cilindro porta clichês;
- ✓ Colocar o recipiente de tinta na impressora, colocar o filtro dentro do recipiente e baixar a bomba de sucção, para abastecer a impressora de tinta;
- ✓ Trazer para próximo da impressora as pilhas de chapas que serão convertidas em caixas e ajustar o esquadro da máquina com as medidas da chapa;
- ✓ Regular o aplicador automático de cola, de acordo com a medida da caixa, conforme pedido do cliente;
- ✓ Manter limpo seu ambiente de trabalho, recolhendo paletes, refis e baldes de tinta e colocando-os nos lugares determinados.

3. Auxiliar de Produção

- ✓ Dobrar caixas, saídas das impressoras, preparando-as para serem grampeadas pela grampeadeira ou para serem coladas manualmente;
- ✓ Colar manualmente as caixas;
- ✓ Limpar as caixas que passaram pelo processo de corte e vinco, retirando os refis e fazendo pacotes de caixas conforme o número solicitado pelo cliente;
- ✓ Limpar a área de trabalho, varrendo o chão e recolhendo os paletes e outros materiais residuais do processo;
- ✓ Amarrar os pacotes de caixas, utilizando a amarradeira, de acordo com o pedido do cliente;
- ✓ Empilhar os pacotes de caixa amarrados, formando os paletes para envio à expedição;
- ✓ Empilhar as caixas grampeadas, formando os paletes para passarem pela amarradeira ou pela paletizadora.

c) Análise da Atividade

A natureza de trabalho dos trabalhadores desse setor é dinâmica. Exige movimentação em pé ao longo da máquina (cerca de 95% do tempo), manutenção em posturas estáticas e, com

frequência, a movimentação manual de cargas. Os detalhes são apontados separadamente em cada função:

1. Operador da Impressora

Como líder da máquina e responsável direto por seu desempenho, esse profissional aciona os dispositivos de funcionamento, confere as caixas na saída da impressora e monitora o bom funcionamento da máquina. Por sua interface direta com indicadores de produção e com seus superiores, está exposto às demandas para corresponder à meta produtiva. Além disso, é o responsável por distribuir as atividades entre os auxiliares de produção, o que acaba lhe exigindo uma correta gestão dessas pessoas.

Como responsável pelo apontamento do desempenho produtivo na interface computacional ali disponível, utiliza os softwares de ERP da empresa, o que lhe exige competência para a atividade. Outro fator importante diz respeito à transferência de tecnologia, pois algumas máquinas são importadas e seus painéis de controle estão em inglês ou outros idiomas.

Observa-se também a permanência na postura em pé durante a jornada. Eventualmente colabora com os auxiliares de produção na paletização.

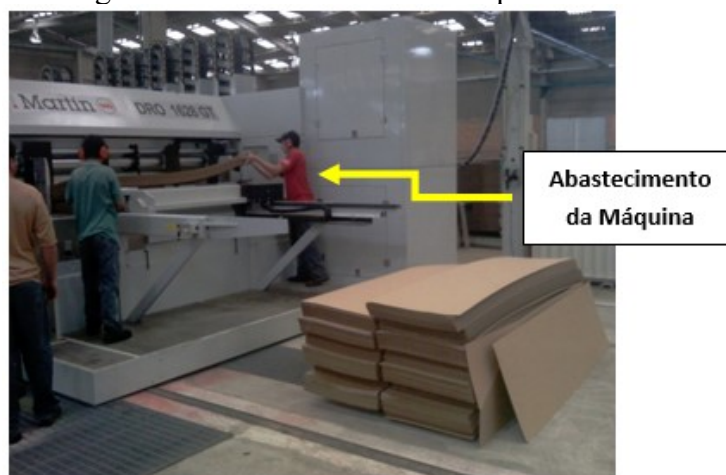
2. Formateiro

Responsável por abastecer a impressora e fazer ajustes grosseiros na máquina. A atividade pode ser dividida em dois momentos distintos:

- a) abastecimento: retirar as chapas de papelão das mesas paletizadas e colocá-las na entrada da impressora. A impressora recebe diferentes tamanhos e pesos de chapas que variam de 200 a 400 gramas. O formateiro controla a quantidade de chapas retiradas por fardo pela velocidade da máquina e por sua capacidade física. Não há orientação ou descrição em seu procedimento sobre qual seria o tamanho desejável do fardo. A velocidade de movimentação também é de acordo com a indicada pela máquina. Após terminar a transferência das chapas para as impressoras ele retira o palete de madeira e o posiciona lateralmente a ela;
- b) ajuste grosseiro: está relacionado ao controle da velocidade de entrada de chapas e à troca e limpeza dos insumos para um novo pedido. A atividade de maior solicitação física é a de transporte das formas que vão dar formato às chapas e transformá-las em caixas.

A Figura 24 demonstra a atividade de abastecimento da máquina realizada pelo formateiro.

Figura 24 – Abastecimento da impressora



Fonte: o autor.

3. Auxiliar de Produção

A atuação dessa função se realiza basicamente na saída das impressoras, e o trabalhador eventualmente ajuda o formateiro no abastecimento. Apesar de estar lotado em uma máquina específica, pode ser deslocado para outra impressora ou outro setor do acabamento. Todas as ações que compõem sua rotina de trabalho envolvem a solicitação física e são realizadas na postura em pé.

De forma geral, o trabalhador posicionado na amarradeira organiza os fardos de caixas e retira os possíveis refis de papelão. Feito isso, posiciona novamente o fardo na mesa de roletes para ser amarrado e conduzido para a paletização. Eventualmente o operador pode designar revezamentos nessa situação de acordo com alguma solicitação gerencial. Pode ser considerado um posto estratégico por ser uma “barreira” para a avaliação por atributos do produto. A Figura 25 ilustra o posto de trabalho do auxiliar de produção na amarradeira.

Figura 25 – Auxiliar de produção – Amarradeira



Fonte: o autor.

Realiza, também, a limpeza da área de trabalho, varrendo o chão e recolhendo paletes e outros materiais residuais do processo.

No empilhamento dos pacotes de caixa amarrados e na formação dos paletes para envio à expedição, necessita ter conhecimento das especificações indicadas pelos clientes. Uma dessas especificações, a de altura de empilhamento, eventualmente ultrapassa a altura da linha média dos ombros.

Utiliza um esquadrejador para alinhar as caixas e facilitar sua paletização. A Figura 26 ilustra o posto de trabalho do auxiliar de produção na paletização.



Fonte: o autor.

4. Atividades Gerais e de *Set Up*

Nas atividades gerais, como limpeza ao final do turno e repasse de informações aos próximos turnos, todos os colaboradores desempenham uma função similar.

Nas atividades de *set up* todos os colaboradores auxiliam nas atividades a seguir descritas:

- ✓ Trocar facas: os colaboradores retiram a chapa que contém as facas cuja função é cortar e formatar as caixas e está posicionada dentro da impressora. Posteriormente, recolocam a nova faca de acordo com o lote a ser produzido subsequentemente. As facas ficam posicionadas em uma região da impressora cujas dimensões verticais vão, aproximadamente, da linha de cintura até a linha dos ombros. O processo de retirar e recolocar facas exige a atividade de soltar e apertar mecanismos de encaixe, como parafusos, e movimentação de carga com membros superiores na maioria do período de realização da tarefa.
- ✓ Trocar tintas: assim como ocorre a troca de facas, o novo lote demanda tintas diferentes. A troca de tintas é feita por meio de transporte manual de baldes e

abastecimento utilizando mangueiras e bomba a vácuo em compartimento específico na máquina.

Todas as atividades são realizadas com os membros superiores e na postura em pé ou com inclinação anterior de tronco.

d) Diagnóstico Parcial

Na prática, o processo técnico das atividades do setor consiste em receber chapas de papelão ondulado (que previamente passaram pelo respectivo processo em uma máquina chamada onduladeira), inserir as chapas de papelão na impressora e, após sair da impressora, conferir a qualidade, retirar refiles, paletizar e enviar à expedição. O ritmo de produção é ajustado na máquina de acordo com a capacidade dos operadores e com a meta, além de obedecer a critérios de qualidade. Para atingir a velocidade ideal (chamada velocidade de cruzeiro), os operadores vão ajustando o equipamento após cada *set up* e realizando a conferência de qualidade (quantidade de refiles, qualidade de tinta, corte, entre outros). A comparação entre a qualidade esperada e a qualidade obtida determina o ritmo de aceleração da impressora. Contudo, há uma meta estabelecida quanto à média dos três melhores tempos para a curva de subida do ritmo da máquina até a velocidade de cruzeiro.

A velocidade de cruzeiro determina um ritmo ótimo para atingimento da meta. Nesse ponto a impressora trabalha próximo da sua eficiência máxima. Ressalta-se que ela não representa, necessariamente, a capacidade máxima da impressora com relação à velocidade produtiva (guarda-se uma capacidade como *buffer*, que é utilizada em momentos de atraso). Porém, a velocidade de cruzeiro sofre impactos do elevado número de *set ups*. Esse número se deve a pedidos de lotes cada vez menores, denotados pela tendência dos clientes em flexibilizar sua própria produção. Vale salientar que existe um painel em frente à saída da impressora cujo mostrador se refere à produção imediata e sua relação com o *gap* entre meta e produção real, possibilitando que a velocidade máxima, ou o *buffer*, seja utilizada como forma de regulação da produção por parte dos trabalhadores.

O tempo de *set up* também é incisivo para manter um ritmo constante em velocidade ótima. Quando a meta se distancia da produção real, há um aumento da velocidade acima da velocidade de cruzeiro (utilizando o *buffer*) para correção da produção real em relação à traçada. Ocorre, então, possível sobrecarga do trabalhador determinada pelo ritmo acelerado e pelo aumento da movimentação estereotipada (pois os movimentos são repetidos e os ciclos são curtos e rápidos).

A velocidade de cruzeiro, medida em batidas/minuto, determina diretamente o atendimento da meta. Quando não ocorre o atendimento, conforme já descrito, há aumento da pressão gerencial pelo cumprimento da meta via aumento do ritmo de trabalho. Por vezes, essa ação de gestão reconduz o sistema ao atendimento da meta e, conseqüentemente, reduz novamente a pressão e o ritmo de trabalho. Isso pode, em um segundo momento, mais uma vez levar à produção abaixo da meta, caracterizando, assim, um ciclo curto de balanço. Ainda, o não atendimento da meta leva à necessidade de horas extra, que habitualmente acontecem em pelo menos um dia com dois turnos a cada mês, além do previsto. Isso implica maior tempo de exposição dos trabalhadores à sobrecarga e menor período de descanso semanal para recuperação.

Ainda que a movimentação estereotipada também aumente com o incremento do ritmo de trabalho, um ciclo maior surge em decorrência dessa situação. Desse aumento da movimentação estereotipada surge um aumento na sobrecarga humana física, gerando afastamento do trabalhador (com *delay*) em razão de doenças ocupacionais. Isso, por sua vez, implica uma necessidade de realocação de trabalhadores e, conseqüentemente, perda de conhecimento sobre a atividade. De acordo com os dados coletados pelo gestor de produção, há uma queda de 5% de rendimento, em média, quando alguém de outro setor precisa ser deslocado para auxiliar em atividades diferentes da sua rotina, e perdas de até 10% quando não há possibilidade dessa realocação (o que ocorre em 30% das vezes, de acordo com o próprio gestor do setor). Essa perda de conhecimento impacta novamente na produtividade, derrubando-a em um ciclo de reforço cuja resposta ocorre com certo atraso.

A quantidade de *set ups* é influenciada por dois fatores: (a) pedidos de lotes (do cliente); e (b) falhas de qualidade (interna). Quanto menor o tamanho dos pedidos, maior o número de *set ups*. Por outro lado, quanto maior o número de *set ups*, maior a possibilidade de falhas de qualidade, que ocorrem, normalmente, nas primeiras unidades processadas de um pedido após o *set up*. Isso pode acontecer por duas vias: (a) quando a falha é identificada pelo próprio operador da impressora (nesse caso um número de unidades extra referentes àquele lote é acionado para suprir as unidades de refugo); e (b) quando a falha não é captada internamente, mas pelo cliente. Isso gera um novo pedido com *delay*, dessa vez por parte do cliente, e um novo lote é fabricado, gerando mais *set ups*. Também é válido saber que a capacidade (capacidade das máquinas de atingir um percentual de qualidade mínimo e suficiente exigido pelo cliente) hoje se encontra em torno de 90%, contra os 95% esperados pelos clientes, resultando em um *gap* de qualidade de 5%.

Já a quantidade de *set ups* influencia também a produtividade, e isso ocorre, novamente, por duas vias. Destaca-se que nesse ponto se pode realizar um raciocínio que leva a efeitos contraintuitivos, pois, em primeiro momento, a atividade de *set ups* parece quebrar o padrão de estereotípias na movimentação. Porém, apesar de prover de fato uma pequena quebra desse padrão, os grupos musculares exigidos para a troca de ferramental durante a atividade de *set up* são os mesmos, e a recuperação fisiológica – pausa entre as atividades para que a musculatura se recupere à normalidade – não é atendida totalmente. Isso impacta na sobrecarga humana física que, com *delay*, resulta no afastamento do trabalhador e queda de produtividade, caracterizando-se como a primeira via de impacto. A segunda via se realiza por meio da parada de máquina gerada pelos *set ups*, visto que, quanto maior o número de paradas, menor a disponibilidade de máquina e, conseqüentemente, menor a produtividade e maiores as não conformidades com relação à qualidade.

Por fim, há uma relação paradoxal entre os setores de Produção (do setor de cartonagem), Programação e Controle de Produção e do setor Comercial a respeito do número de tamanho dos lotes. Por um lado, o setor comercial busca vender o maior número de pedidos possível, independentemente do tamanho do pedido. Por outro, há uma reclamação do setor de produção com relação ao tamanho dos lotes, pois, segundo os gestores do setor de produção, o tamanho reduzido dos lotes, que leva a grande número de *set ups*, conduz a produção a um percentual baixo de sua capacidade máxima (reduzindo o tempo ativo de máquina em relação à sua efetiva capacidade). E um terceiro lado diz respeito ao setor de Programação e Controle da Produção, que busca equilibrar ambas as necessidades. Assim, fica eminente a possibilidade de efeitos contraintuitivos quanto às vantagens de vendas de lotes tão pequenos em detrimento da fidelização de alguns clientes regulares, o que pode, como hipótese, impactar a produção e o trabalhador; assim, também surge a necessidade de, metodicamente, buscar resposta para a situação em conflito.

Contudo, paralelamente à situação descrita, há uma tendência por parte da gestão tática de promover um aumento produtivo em função do aumento de demanda e volume de vendas previsto para os próximos meses pelo setor de inteligência de mercado. A tendência de produção flexibilizada por pequenos lotes, no entanto, é mantida.

Com relação à demanda física, foi utilizada a ferramenta REBA do software Ergo-IBV para analisar o risco a que o trabalhador está exposto. Ressalta-se que os resultados da utilização do software também serviram como base para cálculos acerca da sobrecarga humana física do trabalhador na etapa de modelagem matemática. O módulo REBA busca captar o risco postural

de membros superiores e coluna inerente às atividades requeridas. Para tanto, oferece uma escala de 1 a 15 (sendo que 1 corresponde a nenhum risco, 2 e 3 a risco baixo, 4 a 7 a risco médio, 8 a 10 a arisco alto, e 11 a 15 a risco muito alto), sendo esse o diagnóstico para cada situação analisada após preencher os campos requeridos pelo software com características da atividade. No caso em questão as atividades foram divididas em processo e *set up*, sendo processo a atividade requerida para funcionamento da máquina, e *set up* a troca de ferramental para produção de um novo lote de produtos. Dessa forma, utilizou-se o software para análise dessas duas atividades, tendo como base o fato de que a movimentação durante o processo é bastante similar para todas as funções. Os resultados obtidos com uso do módulo REBA do software Ergo-IBV estão detalhados na Figura 27 a seguir:

Figura 27 – Análise das atividades de processo e set up com módulo REBA do software Ergo-IBV

RIESGO de las POSTURAS				
Subtarea	Postura	Frecuencia	Puntuación REBA	Nivel de Riesgo
operación	normal	alta	8	Alto
set up	actividades gerais set up	baja	7	Medio

Fonte: o autor.

Conforme observado na Figura 27, existe risco importante de acometimento dos trabalhadores por doenças ocupacionais nas atividades de processo (índice 8 – risco alto). Já as atividades de *set up* constituem um risco menor, mas não irrelevante (índice 7 – risco médio).

Esses índices obtidos pelo uso de um software de avaliação ergonômica reforçam a evidência de um problema que pode estar ligado às adversidades de produtividade: o afastamento do trabalhador (absenteísmo) em razão de doenças ocupacionais. Destaca-se que o afastamento do trabalhador pode repercutir de duas maneiras: (a) prejuízos financeiros; (b) prejuízos sociais. Cabe lembrar que, conforme Taguchi (1990) e os princípios da qualidade social, a imagem da empresa em situações como de grande número de afastamentos por doenças ocupacionais pode ser prejudicada com relação à sociedade e aos clientes. Isso ocorre pois há uma percepção de insustentabilidade no que tange à saúde dos colaboradores em organizações com altos índices de afastamento e adoecimento.

Com os dados descritos, percebe-se a existência de *loops* de realimentação. Esses *loops* denotam a estrutura do sistema e governam seu comportamento. Com base nisso, foi desenvolvido um diagrama de enlace causal, cuja função é a descrição qualitativa dos fatores observados. Isso serve de base para a posterior modelagem matemática da relação entre esses

fatores, o que permite a prospecção de cenários para a tomada de decisão. A subseção a seguir aborda, portanto, a modelagem e o comportamento do sistema.

4.2.8.2 Modelagem e simulação com uso da dinâmica de sistemas

Conforme descrito nos procedimentos metodológicos (página 95), o uso da Dinâmica de Sistemas para modelagem e simulação de cenários será dividida em (a) Definição Conceitual, (b) Descrição Estrutural e (c) Prospecção e Diagnóstico Global, adaptados de Sterman (2000). A etapa de Recomendações é inserida após a prospecção e o diagnóstico global viabilizados pela Dinâmica de Sistemas.

a) Definição conceitual

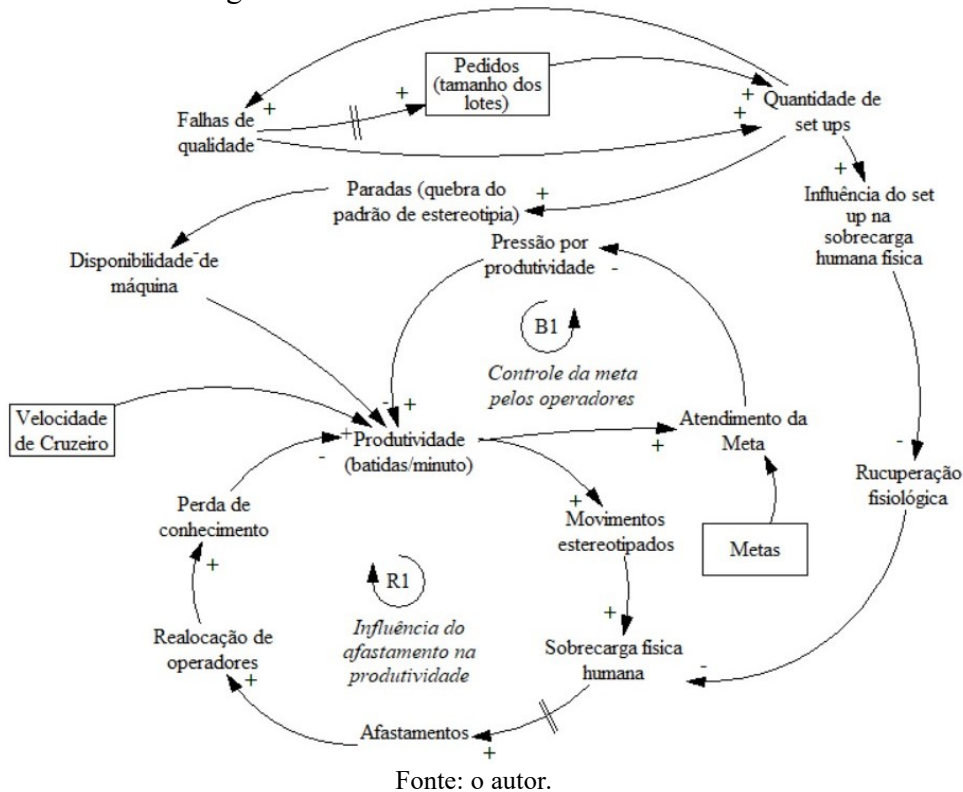
Nessa abordagem, conforme o método já estabelecido, a modelagem segue as informações coletadas da AET. Desse modo, a base da modelagem está condicionada à interpretação do sistema. Os fatores de influência desse contexto correspondem às forças que coordenam o sistema não somente no âmbito operacional, mas também em termos táticos. Com isso, os limites do sistema são expandidos no sentido hierárquico, mesmo que o sistema continue simplificado em termos da quantidade de fatores considerados em cada nível como uma necessidade para viabilizar a representação do sistema em um modelo computacional.

Cabe destacar que para a modelagem do problema específico do sistema em questão, uma linha de produção (ou máquina) foi pega como amostra em relação aos postos de trabalho, pois o trabalho em todas as linhas é bastante similar, o que leva à possibilidade da expansão do modelo para as demais máquinas sem perdas expressivas e facilita a obtenção de dados para uma modelagem mais veloz e eficiente. Com relação aos indicadores, foram utilizados médias representativas para todas as linhas ou máquinas, ampliando a aplicabilidade e representatividade dos resultados.

O modelo conceitual representado conforme o diagrama de causalidade é mostrado na Figura 28. Fundamentalmente, dois ciclos caracterizam o contexto. O ciclo “controle da meta pelos trabalhadores” (B1) representa o controle exercido pelos próprios trabalhadores. Pelas orientações visuais da linha de produção, eles identificam o ajuste do ritmo para o atendimento da meta, podendo acelerar conforme a pressão ao cumprimento da meta emerge. O segundo ciclo surge da oportunidade de atuação do gestor no sistema. Com a sobrecarga humana física culminando no afastamento do operador, o gestor realoca operadores de outras linhas ou

atividades para a atividade de impressão. O ciclo “influência do afastamento na produtividade” (R1) descreve o reflexo que o afastamento e a ação de realocação têm no sistema. Além dessa ação o contexto contempla a ação tática identificada: a colocação de pedidos de lotes pequenos. Essa ação tem por intenção o aumento da produção da linha. Mas, como descrito pelo contexto, impacta primeiramente uma maior quantidade de falhas de qualidade. Além disso, também foi considerada uma influência da atividade de *set up* na sobrecarga humana física já que, apesar de a estereotipia da atividade de impressão ser interrompida, o trabalhador continua a realizar uma atividade, não respeitando o tempo para a recuperação fisiológica. Por último, as atividades de *set up* determinam falhas de qualidade, que determinam mais *set ups* para recompensar as falhas, em um ciclo que a princípio não será explorado neste trabalho.

Figura 28 – Contexto conceitual da análise



Assim, a etapa de definição conceitual está concluída, fornecendo os dados necessários para a estruturação detalhada do modelo de fluxos e estoques.

b) Descrição Estrutural

O contexto descrito compreende dois ciclos de realimentação. Partindo desse ponto, a estruturação detalhada do modelo objetiva explorar o contexto englobando todas as constantes e variáveis dos mecanismos de controle e de falha. Contudo, no diagrama detalhado se mantêm os caminhos da informação da forma como foram retratados pelos ciclos no diagrama de

causalidade. O diagrama foi dividido em subsistemas para viabilizar sua exposição. Nos diferentes subsistemas podem ser identificadas variáveis comuns pelas quais estabelecem relações.

O primeiro subsistema do diagrama de fluxo e estoques é o da linha de produção (ou da máquina em questão). O detalhamento desse conceito buscou representar como a produção acontece e quais decisões estão envolvidas. Essa parte do modelo detalhado é composta por dois estoques, pois além do trabalho em processo também foi necessário considerar o montante de produção final, já que as não conformidades incidem sobre esse montante e a estrutura decisória depende também desse indicador. Portanto, essa parte do modelo tem base em uma versão mais completa da representação de Sterman (2000).

O segundo subsistema descreve a sobrecarga humana física que acomete o trabalhador. Para este estudo a sobrecarga humana física é modelada para retornar um índice variando entre 0 e 1. Para esse indicador o valor nulo representa a ausência de sobrecarga, enquanto o valor 1 representa o nível máximo (100%) de sobrecarga humana física.

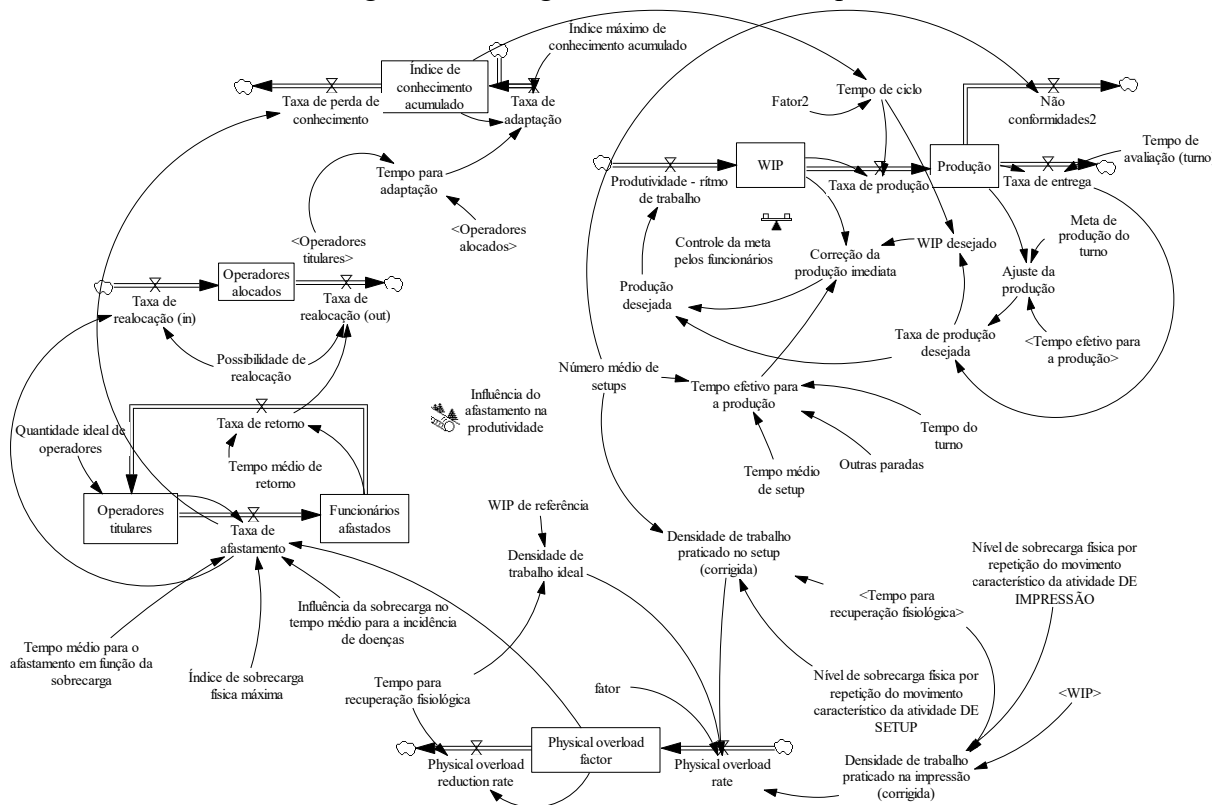
Já a parte que corresponde à simulação do comportamento do afastamento dos trabalhadores na linha, que é o terceiro subsistema, é composta por três estoques. Dois deles estabelecem um circuito fechado em que os trabalhadores fluem entre o estado de operadores titulares (os operadores originais da linha e que dominam a mecânica da atividade) e os operadores afastados a partir de uma “taxa de afastamento” influenciada pelo nível de sobrecarga. Paralelamente há um estoque de operadores alocados. A modelagem foi conduzida dessa forma principalmente porque a influência exercida no montante de conhecimento da tarefa é diferente em termos quantitativos vinda de um operador titular ou de um operador alocado. Esses estoques são correlacionados pelas suas taxas. Portanto, o detalhamento completo do modelo na linguagem do diagrama de fluxos e estoques é mostrado na Figura 29.

O quarto subsistema descreve o conhecimento da tarefa pelo trabalhador, respectivamente. Para este estudo o conhecimento sobre a tarefa é modelado para retornar um índice variando entre 0 e 1. Para esse indicador, o valor nulo representa a ausência de conhecimento, enquanto o valor 1 representa o nível máximo (100%) ou pleno conhecimento da tarefa.

É importante salientar que no “tempo efetivo para a produção” estão subtraídos os tempos destinados às realizações dos *set ups*. Como já destacado no diagrama conceitual, os *set ups* ainda incidem em exigências ergonômicas, não podendo ser considerados uma parada para recuperação fisiológica. O modelo detalhado também associa ao tempo efetivo para a produção

a variável de “tempo para recuperação fisiológica” que, para os cenários simulados que contemplarem a pausa, passa também a reduzir o tempo de produção. E ainda, a variável “outras paradas” formaliza apenas um fato recorrente na linha. Contudo, não se pode afirmar que sempre tais paradas convergem com pausas para recuperação fisiológica. Portanto, nesse modelo, a contemplação desse fator tem por objetivo apenas aproximar o resultado dos cenários à realidade (para a reprodução do comportamento observado) e atribuir maior confiança aos cenários futuros, não influenciando a sobrecarga humana física.

Figura 29 – Diagrama de fluxos e estoques



Fonte: o autor.

Tal qual ocorre no estudo preliminar (MATTOS et al., 2019) na página 121, o detalhamento do modelo pelo diagrama de fluxos e estoque está diretamente relacionado com a estruturação matemática do modelo. No software Vensim as equações são inseridas descrevendo a relação entre cada variável. Portanto, para assegurar que esta pesquisa possa ser replicada pela comunidade científica, todas as equações inseridas no software Vensim são apresentadas nos apêndices do trabalho.

Com isso, a etapa de estruturação do modelo está concluída. Na próxima seção são expostas considerações relativas à simulação e prospecção do comportamento do sistema.

c) Prospecção e Diagnóstico Global

Esse modelo engloba tanto fatores técnicos de fácil obtenção, como as questões de configuração da linha de produção, quanto fatores abstratos. Junto aos registros históricos da linha e do departamento de gestão de pessoas foram obtidos os dados quanto à incidência de doenças do trabalho e à quantidade de afastamentos ao longo do último ano. Outros dados foram obtidos junto ao gestor e com os registros operacionais, como os *gaps* de produtividade entre a meta e a produção obtida por turno, a quantidade de operadores no equipamento ou na linha, o tempo de ciclo praticado, o número médio de *set ups* e o tempo médio de *set up*. Esses dados alimentaram diretamente o modelo. Mas, ainda, os dados específicos da exigência ergonômica do trabalho foram coletados em campo por medição direta. Por esses dados recaírem em questões da interação humana com a máquina, foram tratados pelo software Ergo-IBV e exigiram etapas de calibração da parte específica do modelo que reproduz o comportamento da sobrecarga.

Com isso, e precedendo a prospecção dos cenários, o modelo foi calibrado. Como protocolo de calibração foi mantido o utilizado por Mattos et al. (2019) e mostrado anteriormente na Figura 16. Como ressaltado, a parte do modelo correspondente à reprodução do comportamento da sobrecarga foi calibrada isoladamente para posteriormente compor a calibração geral do modelo. Com referência ao protocolo de simulação, a calibração da sobrecarga contemplou a etapa inicial e o *loop* de ação (inscrita pelo retângulo tracejado) para produção de um cenário condizente com o esperado. Nessa tarefa utilizou-se das informações tratadas pelo software Ergo-IBV acerca de posturas de membros superiores e coluna e da quantidade de ciclos em função de unidades produzidas por turno, de forma que quando a “taxa de sobrecarga humana física” passa a receber uma informação de quantidade de ciclos de repetição da tarefa (seja da impressão ou da realização do *set up*) ao longo do período que caracteriza as unidades utilizadas (nesse caso, sendo as unidades temporais e especificamente o tempo para recuperação fisiológica mensuradas em “dias”, utilizou-se a unidade de repetição em ciclos/dia), o horizonte de tempo para que a sobrecarga atinja seu nível máximo fica condicionada ao nível de exigência informado pelo Ergo-IBV. Assim, a calibração foi feita de modo que, quando o módulo é estimulado por solicitações referentes à atividade de *set up* (caracterizada pelo Ergo-IBV com nível II), o tempo para que a sobrecarga atinja o nível máximo consiste no dobro do tempo em que ele ocorre com o estímulo por solicitações referentes à atividade de impressão (com nível IV).

Com o modelo calibrado, a estratégia de simulação consistiu em manter no primeiro mês de simulação as condições iniciais da linha representando um sistema já implementado, como é o caso em estudo. Então, foram inseridas as novas condições conforme os possíveis planos de produção. O horizonte de simulação usado foi de um ano (288 dias de trabalho efetivo) adicionado do primeiro mês, totalizando 312 dias.

Os cenários prospectados correspondem a novas condições para a linha, dadas a partir da redefinição dos fatores táticos de “meta de produção” e sua consequência na “quantidade de *set ups*” e a adoção do “tempo para recuperação fisiológica”. Os cenários estão identificados por uma numeração e correspondem a possibilidades de ação cogitadas junto aos responsáveis. O cenário 1 apenas implementa o tempo para recuperação fisiológica conforme proporção recomendada. O cenário 2 representa uma decisão tática de aumento da produção sem o tempo para recuperação fisiológica, acrescentando pequenos lotes (aumentando a quantidade de *set ups*). Esse cenário foi escolhido para ajudar a esclarecer como o sistema produtivo em questão poderá se comportar diante da previsão do aumento do volume produtivo previsto. O cenário 3 representa o mesmo aumento, porém com pausas para recuperação fisiológica. Esse cenário específico determina o teste de uma medida de ergonomia com função de tentar contrabalancear o aumento produtivo previsto. Os cenários são caracterizados resumidamente (somente apresentando as variáveis que diferenciam os planos) na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de configuração dos cenários prospectados

Plano (cenário)	Meta de tempo de ciclo (s)	Tempo para recuperação fisiológica (montante) (dias)	Quantidade de <i>set ups</i>	Meta de produção (uni)
1	0,63	0,13333	8	6422
2	0,63	0	9 ou 10	6600
3	0,63	0,13333	9 ou 10	6600

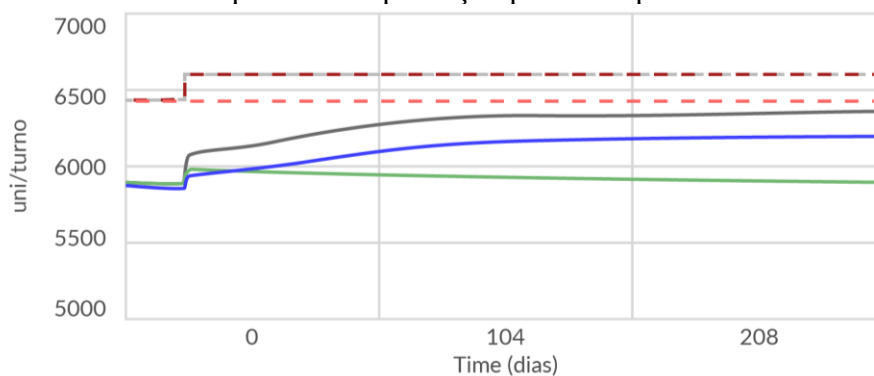
Fonte: o autor.

Em todos os cenários o software Vensim foi configurado para utilizar o método de integração tipo Euler. O intervalo de integração (dt) foi definido para 1/5 do valor da menor constante do modelo para cada cenário, atendendo ao especificado por Forrester (1961). Para todos os cenários o horizonte de simulação foi definido para 288 dias (um ano de trabalho efetivo). Isso porque os ciclos descrevem efeitos de médio e longo prazos relacionados às ações (a percepção do estado do sistema e a ação de correção) do gestor em nível tático.

Como início para a análise, o Gráfico 14 apresenta o principal indicador (o resultado da ação em termos de produção da linha) para que, na sequência, os demais indicadores agreguem as explicações do observado. Nesse sentido, o Gráfico apresenta o comparativo entre os

cenários contendo a meta de produção e a produção prospectada. Em razão das perdas por não conformidades existentes, em nenhum cenário a produção obtida converge com a produção desejada, porém é possível apontar cenários favoráveis e desfavoráveis quanto ao volume de produção. Logo de início, no cenário 2, no qual se pretendia aumentar a produção sem atenção aos aspectos fisiológicos, de fato é verificado um aumento produtivo. Porém, esse aumento não se sustenta ao longo do horizonte de simulação, passando a apresentar uma gradativa redução até tender a um equilíbrio. Mesmo assim, o montante final de produção é maior que a condição anterior do sistema. Porém, por outro lado, tanto no cenário 1, quanto no cenário 3 é observado um aumento da produção, sendo o cenário 1 a condição que mais aproxima a produção obtida da desejada. Em ambos os cenários, de forma muito similar, a produção não obtém o patamar mais elevado nos primeiros momentos da simulação. Em vez disso, há um crescimento inicial abrupto (pelas limitações do modelo) e um aumento gradativo no qual atuam os reflexos sistêmicos da ação tática.

Gráfico 14 – Comparativo de produção por turno para os três cenários



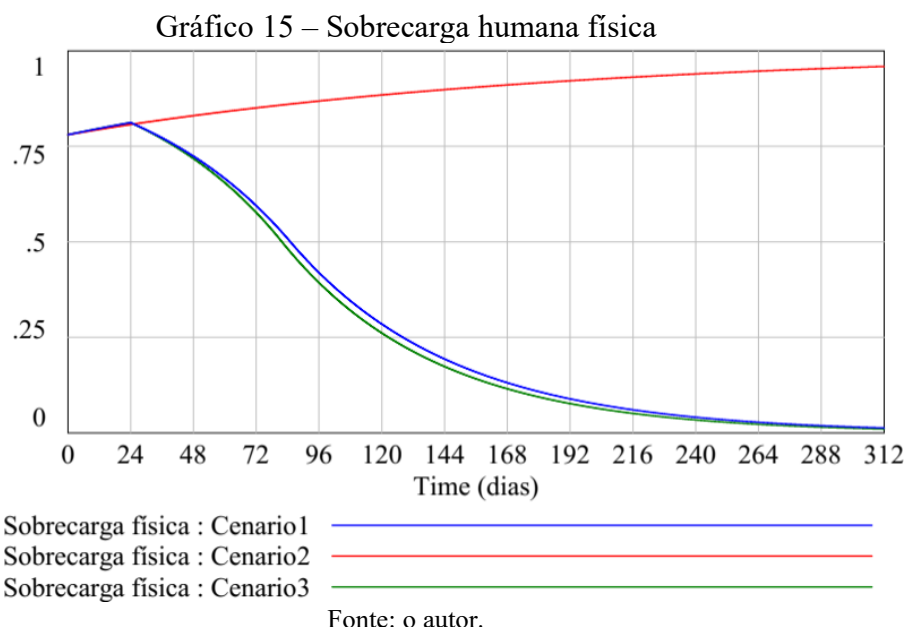
— Produção: Cenário 1 - - - - Meta de produção do turno: Cenário 1
 — Produção: Cenário 2 - - - - Meta de produção do turno: Cenário 2
 — Produção: Cenário 3 - - - - Meta de produção do turno: Cenário 3

Fonte: o autor.

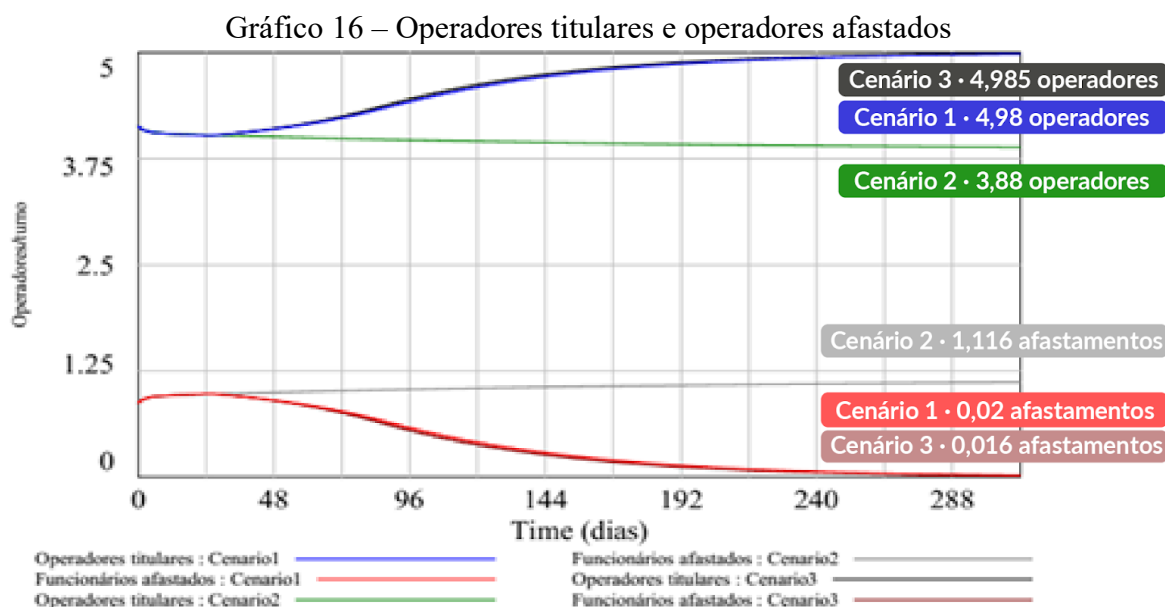
No cenário 1 a produção (sem aumento da meta e com inserção da recuperação fisiológica) alcançou 6.198,14 unidades em relação a uma meta de 6.422 unidades ao longo do horizonte de simulação. O cenário 2 (sem recuperação fisiológica e com aumento da meta) apresentou uma produção de 5.899, em contraste à meta de 6.600 no mesmo horizonte. Já no cenário 3 (com inserção da recuperação fisiológica e aumento da meta), a produção atingiu 6.368 unidades da meta de 6.600 unidades também nesse horizonte temporal.

A razão da não sustentação da produção no cenário 2 pode ser explicada pelo acúmulo de sobrecarga humana física. Como o modelo de simulação parte de uma condição em que já

são relatados afastamentos por adoecimento, a sobrecarga inicia em uma condição elevada. Porém, com o aumento do trabalho e sem as devidas recuperações fisiológicas, essa sobrecarga apenas se eleva. Essa situação está representada no Gráfico 15 e contrasta com os cenários que previram recuperação fisiológica. Nestes, não somente o montante de sobrecarga é muito próximo como o padrão de comportamento é exatamente o mesmo: a sobrecarga humana física se reduziu até próximo ao valor nulo. O acúmulo ou redução da sobrecarga humana física é o primeiro reflexo colateral sistêmico da ação de aumento da produtividade relacionado diretamente com o afastamento de trabalhadores por adoecimento.



Nesse sentido, a sobrecarga humana física exerce um efeito inversamente proporcional no montante de trabalhadores efetivos (titulares) e diretamente proporcional no montante de trabalhadores afastados. O comportamento resultante dessa influência é mostrado no Gráfico 16. Como se prevê pelo comportamento da sobrecarga humana física nos cenários 1 e 3, nos quais o tempo para recuperação fisiológica foi respeitado, o afastamento em decorrência do adoecimento foi reduzido (4,98 trabalhadores titulares no cenário 1 e 4,985 no cenário 3), sendo que ao término de um ano esse problema teria sido quase que totalmente mitigado. Em contrapartida, para o cenário 2, em que o afastamento continua a ocorrer ao longo do horizonte de simulação (3,88 trabalhadores titulares), o gestor continua a atuar na alocação de operadores.

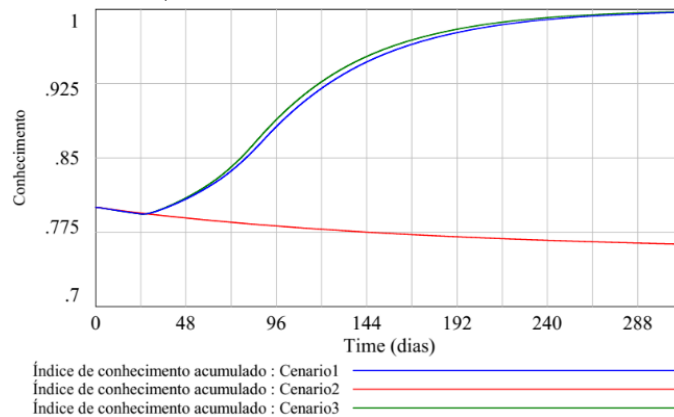


Fonte: o autor.

Assim, o afastamento do trabalhador em razão da sobrecarga humana física evidencia-se maior no cenário 2, conforme o Gráfico 16. No cenário 1, no qual há o mantimento da meta com a inserção de pausas, observa-se o montante de 0,02 operadores afastados por dia, equivalente a um afastamento a cada 50 dias. No cenário 2, no qual há aumento da meta com inserção da pausa, ocorre 1,116 afastamento por dia, ou seja, a cada 0,9 dias um operador se afasta em razão da sobrecarga humana física. Isso indica quase um afastamento por dia. No cenário 3, em que há aumento da meta com inserção de pausas, observa-se 0,016 afastamentos por dia, o que equivale a um afastamento a cada 62,5 dias. Esses cenários apontam para um agravamento da situação de afastamento do trabalhador quando da não inserção das pausas para recuperação fisiológica, que se torna mais evidente ao aumento da meta.

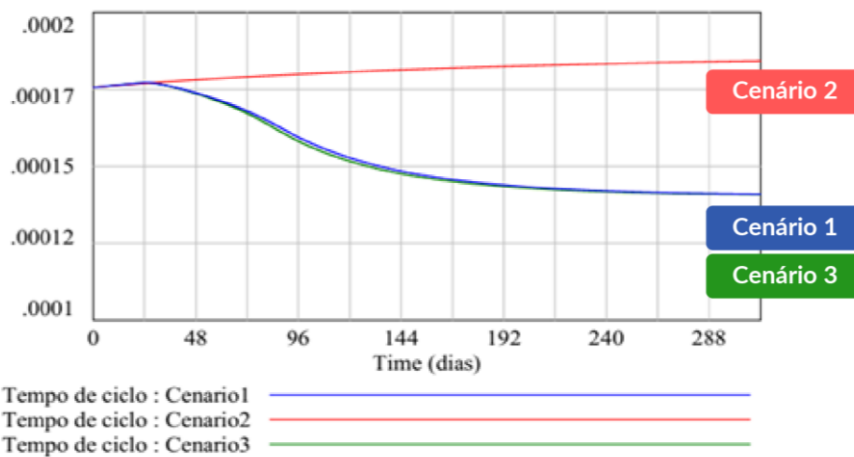
O reflexo do afastamento dos operadores pode ser visto no conhecimento acumulado da linha e no tempo de ciclo, nos Gráficos 17 e 18. Nos cenários 1, em que há a recuperação fisiológica adequada, e 3, no qual há aumento da produção com a devida inserção dessa recuperação, e em razão da manutenção dos operadores na linha ao longo do horizonte de tempo, o conhecimento acumulado se mantém elevado. Isso se reflete diretamente em um tempo de ciclo mais rápido, que emerge da facilidade em virtude do conhecimento dos trabalhadores ao operarem o equipamento. Já no cenário 2, no qual há aumento da produção sem recuperação fisiológica, o conhecimento acumulado apresenta queda em decorrência da perda dos operadores titulares. Isso eleva o tempo de ciclo, reflexo de maiores dificuldades do trabalho com operadores alocados ou operadores a menos.

Gráfico 17 – Conhecimento acumulado da tarefa



Fonte: o autor.

Gráfico 18 – Tempo de ciclo



Fonte: o autor.

O que se evidencia como diagnóstico global nesse caso é que a sobrecarga humana física inerente à atividade e aumentada pela necessidade de amplificar o ritmo produtivo e pela falta de recuperação fisiológica determina que o ciclo de “influência do afastamento na produtividade” governe o comportamento do sistema. Fato esse que deve ser levado em conta para a concepção de soluções para o problema apresentado.

As informações obtidas dos cenários de simulação, cujas saídas descrevem o comportamento do sistema e os testes de políticas de melhorias, fornecem os subsídios para as Recomendações, que se iniciam na próxima subseção.

4.2.8.3 Recomendações

Diante da possibilidade de aumento da demanda e volume produtivo previsto pela organização, o modelo indica a importância de viabilizar medidas ergonômicas para

contrabalancear a sobrecarga que poderá incidir sobre os trabalhadores nesse possível novo estado do sistema. Isso pois a sobrecarga tem importante influência no comportamento desse sistema, e modificações do volume produtivo podem induzir aumento dessa sobrecarga via aumento do número de *set ups*, instabilidade de ciclo e aumento de *downtime*, que levam a um aumento do ritmo dos trabalhadores para atingir a meta de produção.

Uma recomendação, com base nas informações fornecidas pelo modelo e nos preceitos da Ergonomia, seria a inserção de tempos de pausas de oito minutos a cada 50 minutos trabalhados (ou diluídos em segundos, conforme Colombini, Occhipinti e Fanti (2005)). Essa recomendação toma como fundamento a existência de movimentação repetitiva e estereotipada observada na linha e registrada pelo software Ergo-IBV, mesmo em atividades de *set up*. Para tanto, uma nova configuração de ciclos da linha necessita ser arranjada, o que exige uma estabilidade maior com relação ao balanceamento da máquina.

Para se obter tal estabilidade, outra recomendação é de aumentar o tempo de agregação de valor da máquina por reduzir o tempo de *downtime*. Com um tempo maior de máquina ativa, os ciclos poderão se tornar mais estáveis, e a organização dos tempos de fabricação de cada peça ficaria mais viável. Isso pode ser atingido por meio de reduções de tempos de *set ups*. Portanto, *kaizens* visando um *set up* mais curto e rápido emerge como uma possível ferramenta na mitigação do problema.

Uma terceira recomendação centra-se na possibilidade de maior alinhamento entre a gestão comercial e a industrial. Fidelizar clientes mais frequentes que demandam fabricação de lotes maiores pode impactar na estabilidade produtiva e demais fatores, como ergonômicos e de qualidade. Nesse ponto, níveis táticos e estratégicos são atingidos. Contudo, mais testes do modelo e análises de mercado devem ocorrer para uma decisão nesse nível.

Tais ações poderiam permitir que o ciclo de “controle da meta pelos trabalhadores” equilibre o comportamento do sistema. Por si só, se houver um aumento da atividade de influência desse ciclo, pode-se facilitar a redução da sobrecarga e, conseqüentemente, do afastamento do trabalhador, além de melhoria da performance produtiva e de qualidade.

4.2.9 Discussão para o estudo de caso

Esta subseção apresenta a relação dos resultados da pesquisa com a literatura corrente. Tal relação ocorre no sentido de destacar as implicações dos resultados obtidos pelo presente estudo no entendimento de alguns pontos, como: (i) as diferenças estabelecidas entre o estudo

preliminar (MATTOS et al., 2019) e o presente estudo de caso que ocorrem, principalmente, nos níveis de gestão da planta e nas diferenças da prática de modelagem; (ii) como a sobrecarga humana física ocorre no sistema produtivo em questão e qual sua relação com a produtividade; (iii) as implicações do uso do software Ergo-IBV no método e como auxiliar no módulo de simulação acerca da sobrecarga humana física, em contraste com o estudo preliminar.

Tal como visto em Mattos et al. (2019), no que tange ao método utilizado, a simulação computacional em um horizonte temporal permitiu que fosse observado o comportamento da variação não apenas da sobrecarga humana física, mas também das questões de produtividade nesse horizonte. Com isso, possibilitou uma compreensão mais precisa do período de mudança/transição entre três condições de trabalho além da condição inicial: (i) a situação inicial com inserção de pausas fisiológicas em relação 5:1; (ii) a configuração após um aumento do volume produtivo sem inserção de pausas fisiológicas; e (iii) a configuração após um aumento do volume produtivo com inserção de pausas fisiológicas em relação 5:1.

Algumas diferenças foram estabelecidas neste estudo em relação ao estudo preliminar no tocante aos níveis de gestão abordados. Em Mattos et al. (2019), apesar de o modelo ter base em uma decisão do gestor (o nivelamento da linha em termos de *takt time*), o foco foi a interação operacional do trabalhador (refletida na sobrecarga humana física) com o sistema. A saída centra-se no desempenho geral. Já nesse caso, apesar de o modelo reproduzir um contexto produtivo, a discussão é centrada na decisão dos gestores. A gestão operacional se apresenta principalmente nas relações de regulação orgânica da meta pelos trabalhadores (cujo monitoramento imediato se realiza por letreiros de gestão visual que apontam a meta, o total produzido no momento e o ritmo necessário para atingir a meta em razão desses indicadores), mas também na tomada de decisão por parte do gestor na realocação de operadores para a máquina, que se origina de uma decisão tática emergente de uma demanda de ajuste operacional. Já ações táticas nesse contexto apresentam-se estabelecendo ajustes operacionais em função de decisões estratégicas, como metas de produção para atendimento dos clientes cujo impacto ocorre nos *set ups* necessários para tal, no *staff* de colaboradores requerido, entre outros. Tais ações repercutem no sistema de forma geral, podendo ocasionar efeitos contraintuitivos em razão da imprevisibilidade inerente a sistemas dinâmicos em médio e longo prazos, inclusive em fatores ergonômicos (WALKER et al., 2017). Ou seja, a discussão toma como fulcro a interação do gestor com o sistema para o seu desempenho geral. Com isso, o estudo de caso aqui apresentado estabelece um novo nível em termos de alcance de gestão, ultrapassando níveis operacionais em direção a níveis táticos.

É oportuno salientar que o presente estudo de caso se delimitou aos âmbitos operacionais e táticos de gestão, sendo que um terceiro estudo poderá explorar um nível estratégico acima. A interação da direção pelas decisões estratégicas com o sistema, como, por exemplo, buscar cativar clientes, poderia, em primeira análise, resultar em fabricação de lotes maiores, sendo que o tamanho dos lotes teria implicações na posição no mercado. Isso pode culminar novamente em diferenças com relação ao desempenho esperado do sistema em longo prazo.

A abordagem a diferentes níveis de gestão se reflete no horizonte de análise. Em Mattos et al. (2019), o horizonte de simulação era de um dia. No presente estudo, o horizonte de simulação se amplia para um ano. Um estudo cuja abrangência perpassa as esferas operacionais e táticas, atingindo o nível estratégico, deverá requerer um horizonte de simulação de cinco anos ou mais.

Outra diferença estabelecida por este estudo de caso diz respeito à prática de modelagem. O modelo construído para o presente estudo de caso busca representar o sistema produtivo e contemplar as possibilidades de atuação nesse sistema. As diferenças entre o sistema analisado no estudo preliminar (MATTOS et al., 2019) e o sistema ora apresentado designam a prática de modelagem. Algumas diferenças entre os sistemas que impactaram nos constructos do modelo podem ser destacadas: (i) no primeiro caso, o trabalho em processo era visível. No caso presente a máquina trabalha por bateladas, o que implica menos trabalho acumulado (menor WIP); (ii) no primeiro caso, o realocamento de operadores ocorria para ajustar o trabalho momentâneo. No caso presente isso ocorre apenas quando há afastamento do trabalhador em decorrência, principalmente, de doenças ocupacionais; (iii) no caso presente o fator de “sobrecarga humana física” não é influenciado somente pela “recuperação fisiológica” (fator de curto prazo) como no primeiro caso, mas o modelo também engloba um fator em longo prazo (o tempo de exposição ao risco ao longo do mês); (iv) o modelo do sistema do primeiro caso considerava uma “subdivisão da tarefa” para a aprendizagem. Isso porque a quantidade de postos de trabalho no sistema produtivo (e, conseqüentemente, a divisão da tarefa) poderia ser alterada. No caso presente a tarefa é subdividida em decorrência dos postos de trabalho que a máquina possui e não pode ser alterada.

As metas de produção e tamanho dos lotes estipulados em nível tático determinam o ritmo do trabalho e o número de *set ups* em nível operacional. Em razão do grande número e tempo de *set ups*, ocorrem falhas de qualidade ou não conformidades, e o tempo de operação efetivo se reduz. Isso impacta em aumento do ritmo no período final do turno. Tal aumento de

ritmo pode ser descrito como regulação do próprio trabalho (GUÉRIN et al., 2001), uma vez que se trata de um recurso do colaborador para cumprir uma meta imposta. De um ponto de vista sistêmico, isso ocorre na medida que o sistema busca o próprio equilíbrio.

Os ciclos observados para a efetivação do trabalho são rápidos, apesar de algumas oscilações serem observadas, e exigem movimentação estereotipada superior a quatro ciclos por minuto, em conformidade com as definições de Silverstein, Fine e Armstrong (1986) acerca de movimentação repetitiva. Diversos autores descreveram riscos relacionados aos mesmos fatores encontrados no sistema ora estudado, como Landsbergis, Cahill e Schnall (1996), Neumann et al. (2006), Koukoulaki (2014), Arezes, Diniz-Carvalho e Alves (2015) e Sood et al. (2017). Isso corrobora o diagnóstico realizado pela AET, pelo próprio software Ergo-IBV e pelos números registrados quanto ao afastamento do trabalhador.

Se por um lado a sobrecarga humana física por si só gera ônus à organização, por outro lado ela afeta também diretamente a produção. Observou-se, no sistema em estudo, que quando há um aumento da sobrecarga, a produtividade tende a oscilar ou decrescer até estabilizar-se abaixo da meta estipulada em nível tático, pois em nível operacional a eficiência produtiva depende diretamente do conhecimento do colaborador sobre o processo realizado na máquina. Ao ocorrer o afastamento do trabalhador por motivos de adoecimento, verifica-se um déficit de conhecimento com relação ao conhecimento total ideal para a operação da máquina. Salienta-se que um colaborador substituto necessita tempo para desenvolver o conhecimento normal para a operação à altura de um operador titular (curva de aprendizado). Dessa forma, estabelece-se uma relação causal semelhante à observada em Mattos et al. (2019), em que a produção impacta no aumento da sobrecarga, que, por sua vez, se reflete no afastamento do trabalhador e na perda de conhecimento da atividade, influenciando, conseqüentemente, de forma negativa, a produção novamente e exigindo mais esforço físico para a normalização do cumprimento da meta. Isso caracteriza-se como um *looping* de reforço. Da mesma forma, também corrobora outros autores que citam a sobrecarga como fator preponderante para a qualidade e produtividade (entre eles Lin, Drury e Kim (2001) e Village, Salustri e Neumann (2017)).

Conforme os cenários de simulação, a não inserção da pausa para recuperação fisiológica estabelece uma diferença nos números finais da produção, não permitindo um aumento mesmo em cenários de aumento de meta. Isso porque o ciclo de influência do afastamento na produção sofre forte influência da sobrecarga do trabalhador. Tal fato demonstra que esse ciclo controla o funcionamento do sistema. A pausa para recuperação fisiológica estabelece, portanto, importante mecanismo de regulação da sobrecarga humana no trabalho, tal qual descrito por Byström (1991) e Colombini, Occhipinti e Fanti (2005). De todo modo,

há, segundo se observa no modelo e no diagnóstico pela AET, uma relação entre a sobrecarga e outros fatores atuantes no sistema produtivo, com laços de influência mútua, corroborando achados de autores como Landsbergis, Cahill e Schnall (1996), Neumann et al. (2006), Koukoulaki (2014), Arezes, Diniz-Carvalho e Alves (2015), Sood et al. (2017) e Mattos et al. (2019).

Também se observa, no sistema em estudo, que o ritmo é ditado pela máquina. Isso implica que a variabilidade entre um posto de trabalho e outro pode levar à sobrecarga de um trabalhador e à ociosidade de outro (LIN; DRURY; KIM, 2001). Além de prejudicar a fluidez produtiva, o aumento do ritmo para consumir o trabalho em processo ou atingir a meta denota maior movimentação estereotipada que, no caso em questão, não é quebrada nem em razão dos *set ups* (pois, apesar de uma tarefa diferente, exige os mesmos grupos musculares, por um período rápido e com frequência parecida das tarefas do período de produção propriamente dito). Somada à ausência de recuperação fisiológica, a movimentação estereotipada gera uma situação de repetitividade, que pode ser a causa primária do afastamento do trabalhador por doenças musculoesqueléticas e traumas cumulativos (COLOMBINI, 1998; KOUKOULAKI, 2014; SANDLUND et al., 2017), e corrobora os achados relacionados aos indicadores setoriais de afastamento do trabalhador fornecidos pela empresa (em geral, por doenças musculoesqueléticas, representadas pelo Código Internacional de Doenças – CID M).

Outra diferença metodológica em relação ao primeiro estudo foi a utilização do software Ergo-IBV. De uma perspectiva de modelagem, o módulo REBA serviu como parâmetro de comparação entre diferentes atividades (nomeadamente operação e *set up*), além de levantar dados quantitativos acerca da exigência física e dos riscos ergonômicos inerentes ao processo. Ressalta-se, por outro lado, que o software oferece uma escala de avaliação de risco de apenas seis níveis, subdivididos entre 1 e 15. Também não oferece uma visibilidade do comportamento da evolução do adoecimento do trabalhador e/ou com previsões temporais em uma linguagem adequada ao método proposto, por trazer hipóteses probabilísticas lineares. Portanto, seu uso limitou-se à análise das posturas adotadas durante a efetivação do trabalho, sendo que não foram inseridos detalhes do ritmo de trabalho no software. Isso para normalizar todas as atividades analisadas em função unicamente das posturas adotadas. A inserção dos valores relativos ao ritmo de trabalho ocorreu externamente aos valores obtidos pela avaliação do software. O uso dos valores do software em convergência com a relação atividade/pausa registrada tornou, ainda assim, o modelo mais sensível do que em Mattos et al. (2019).

Por fim, e estabelecida a discussão acerca dos achados, as conclusões acerca do estudo de caso são apresentadas.

4.2.10 Conclusões acerca do estudo de caso

Tal como no caso da indústria de componentes elétricos automotivos (MATTOS et al., 2019), *trade offs* puderam ser verificados no entendimento das inter-relações de alguns subsistemas nesse caso. Um ponto importante nesse sentido reside na diferença entre a definição de performance produtiva e performance de vendas para a gestão da organização em questão. Se para o primeiro setor a medição da performance ocorre em função de peças produzidas, para o segundo ocorre por quantidade vendida. Porém, o número crescente de vendas de lotes menores impacta em prejuízos ao setor produtivo, visto que mais lotes exigem mais *set ups*, cujo tempo não agrega valor e tampouco representa uma recuperação fisiológica real.

A recuperação fisiológica também apresenta um *trade off* com relação a seu entendimento. A princípio, e intuitivamente, o trabalho de *set up* parece representar uma recuperação pela mudança de atividades. Porém, observa-se que na referida atividade os mesmos grupos musculares são exigidos e há uma alteração pequena nos padrões de estereotipia. Ainda, em razão das posturas de membros superiores, da repetitividade de movimentos e do tempo de duração dessa atividade, o *set up* também representa risco à saúde do trabalhador, segundo a avaliação do software Ergo-IBV, mesmo que em menor escala. Compreender o tempo de *set up* como recuperação fisiológica total não apenas denota entendê-lo erroneamente como pode levar a percepções ambíguas e contraintuitivas na concepção de modelos de simulação e na adoção de políticas de melhorias (nesse caso, o modelo poderia indicar de forma equivocada que tempos longos de *set up* poderiam favorecer a saúde do trabalhador por interromper o processo de fadiga e, conseqüentemente, melhorar a performance produtiva).

Ainda, o ciclo de “controle da meta pelos trabalhadores” é sobreposto pelo ciclo de “influência do afastamento na produtividade”, que governa o comportamento do sistema. Ressalta-se a importância de diagnosticar esses ciclos e seus fatores de influência para destacar em qual dos ciclos as ações gerenciais podem ter mais impacto. Com isso, as políticas adotadas podem ser mais efetivas em sua função.

Como em todas as propostas de melhorias sugeridas existe a necessidade de uma mobilização financeira, uma evolução desse modelo de simulação poderia se realizar no sentido de contemplar fatores econômicos e de custo/benefício das políticas adotadas. Ressalta-se que

soluções simples, como *kaizens* para redução de tempos de *set up*, podem ser efetivas e representar risco financeiro baixo em relação a outras medidas mais complexas.

Por fim, uma vez que o modelo represente de forma satisfatória o comportamento real do sistema, fica clara a importância de considerar a sobrecarga dos trabalhadores e seu reflexo na produtividade, bem como a importância da recuperação fisiológica para o desempenho ótimo do sistema. De posse dessa compreensão, ações sistêmicas para mitigação dos problemas apresentados como demanda podem ser tomadas com maior precisão e segurança em relação a horizontes temporais maiores.

4.3 ANÁLISE DA PROPOSTA DE ABORDAGEM E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O objetivo principal deste estudo é desenvolver uma abordagem integrada entre AET e Dinâmica de Sistemas que possibilite compreender, em horizontes temporais de médio e longo prazos, o comportamento dinâmico de sistemas produtivos e/ou industriais para melhorias ergonômicas e de performance. A discussão e análise dos resultados será, portanto, conduzida de modo a englobar alguns aspectos relevantes para isso e também aspectos inerentes ao desenvolvimento da abordagem, como o desdobramento da viabilização teórica e aplicação prática do modelo, análise da capacidade de alcance (capacidade sistêmica, possibilidade de previsão de cenários, horizonte temporal de alcance, viés qualitativo e quantitativo), limitações e observações acerca das dificuldades e potencialidades de sua aplicação prática. As fases da proposta de abordagem também serão analisadas, separadamente e em conjunto. Métodos, abordagens e ferramentas propostas dentro da disciplina serão a base comparativa para tanto. As análises partem de uma perspectiva sistêmica e se embasam, também, na Teoria de Sistemas e no arcabouço teórico a ela adjacente. Assim, como os dados pontuais de cada caso foram discutidos anteriormente, alguns pontos serão retomados nesta subseção para a construção de uma análise sistêmica e geral dos achados da aplicação prática.

4.3.1 Análise das fases da proposta de abordagem

No tocante às fases da proposta de abordagem, podem-se destacar alguns pontos com relação a três etapas de base distintas e importantes para sua prática: (i) a Análise Ergonômica do trabalho; (ii) a modelagem qualitativa da Dinâmica de Sistemas (diagrama de enlace causal); e (iii) a modelagem quantitativa da Dinâmica de Sistemas (diagrama de fluxos e estoques).

A AET desempenhou um papel essencial na abordagem: elencou os fatores sistêmicos que impactam na saúde e no afastamento do trabalhador e sua ligação com outros fatores, como a produção. Isso é possibilitado pela sistemática do método que, ao sobrepor o trabalho prescrito ao trabalho real, permite compreender as regulações do trabalho (GUÉRIN et al., 2001). As regulações são, conforme Falzon (2007), o indicativo de um sistema dinâmico e podem ser entendidas, conforme a Teoria de Sistemas, como o próprio sistema buscando sua homeostase ou equilíbrio. Partindo das regulações, pode-se traçar uma relação de causa e efeito cíclica dos fatores que determinam os problemas relacionados à ergonomia e/ou performance produtiva. O diagnóstico da AET serve como base para as modelagens qualitativa e quantitativa pela Dinâmica de Sistemas.

No caso da indústria de componentes elétricos automotivos (MATTOS et al., 2019), estudo preliminar da aplicação prática da proposta de abordagem, o uso da AET possibilitou verificar que em determinados momentos havia uma aglomeração de trabalhadores em alguns postos de trabalho, em evidente desbalanceamento da linha de produção. Como regulação, o líder da linha convocava um colaborador a mais (vindo de outra linha) para consumir o trabalho em processo, no intuito de evitar parar a linha, o que gera indicadores de *downtime* e consequente aumento da pressão gerencial.

No caso da indústria de caixas de papelão ondulado, estudo de caso da aplicação da proposta de abordagem, o *downtime* elevado em razão de grande número e tempo de *set ups* determinava um aumento do ritmo produtivo para atingir a meta. Esse aumento do ritmo é a estratégia de regulação encontrada pelos trabalhadores, mesmo que isso signifique, de forma contraintuitiva, aumento no número de falhas de qualidade. O que, por sua vez, gera novos pedidos de pequenos lotes para restituição das falhas e, assim, mais *set ups* e mais *downtime* na linha.

Especificamente no estudo de caso da indústria de caixas de papelão ondulado, o uso de ferramentas de avaliação ergonômica, nomeadamente o software Ergo-IBV, constitui uma diferença importante em relação ao estudo preliminar. No caso da indústria de componentes elétricos automotivos, a relação fadiga/recuperação fisiológica determinou toda a sobrecarga humana física. Já no estudo de caso, cujo software Ergo-IBV foi utilizado, o uso de uma ferramenta de análise ergonômica permitiu a inserção de valores separados para as posturas corporais adotadas (pelo módulo REBA) e para a relação fadiga/recuperação (pelo ritmo produtivo e número de peças produzidas por minuto). Isso estabelece uma configuração mais avançada em relação ao estudo preliminar, o que pode culminar em uma aproximação maior da realidade e uma resposta mais sensível do modelo de simulação aos testes.

Já a fase de modelagem qualitativa pelo diagrama de enlace causal teve importante papel no sentido de organizar os fatores encontrados pela AET e ligá-los em uma relação de reforço ou equilíbrio. Com isso, foi possível obter uma visão sistêmica organizada dos sistemas produtivos, e ciclos de feedbacks ficaram evidenciados.

Por último, a modelagem quantitativa pelo diagrama de fluxos e estoques permitiu a previsão de cenários, teste de políticas e a compreensão de efeitos contraintuitivos. Isso em função de sua estrutura (para Sterman (2000), a estrutura governa o sistema) e da inserção de equações diferenciais que captam as não linearidades observadas no comportamento desse sistema.

4.3.2 Análise do alcance da proposta de abordagem

A respeito do alcance sistêmico da proposta de abordagem, a inserção da Dinâmica de Sistemas na fase de diagnóstico da AET possibilita uma compreensão sistêmica aprofundada do ambiente de trabalho. Isso pois a Dinâmica de Sistemas se utiliza dos achados da AET para traçar relações qualitativas de causa e efeito não lineares entre os fatores atuantes do sistema e, por meio da quantificação desses fatores, prever cenários relativos ao problema levantado e suas possíveis soluções. A interligação de fatores ou subsistemas atuantes também foi utilizada por Li et al. (2019), Morineau e Flach (2019) e Guastello, Corroero e Marra (2019) para compreender as influências mútuas e complexas de modo sistêmico. Nesse ponto, a modelagem qualitativa da Dinâmica de Sistemas por meio do diagrama de enlace causal possibilita a descrição dos *loops* de feedback, cujo entendimento é tido como essencial para a compreensão desses sistemas, de acordo com Hancock (2019). Isso representa um avanço no sentido de previsão de cenários para a ergonomia, principalmente em médio e longo prazos.

No tocante ao alcance temporal das análises e de previsões da proposta de abordagem, a própria modelagem matemática da Dinâmica de Sistemas permitiu traçar possíveis cenários para horizontes temporais de médio e longo prazos. Ressalta-se que a necessidade do alcance depende do sistema em análise. Por exemplo, no estudo preliminar (MATTOS et al., 2019), no qual as decisões envolviam aspectos mais operacionais do processo, com laços de realimentação curtos (de um dia ou menos), e a gestão do sistema demandava ações imediatas, o horizonte temporal limitou-se a horas ou dias. Já no estudo de caso, as ações são tomadas em âmbito tático e seus impactos denotam mais tempo até sua percepção. Por isso, o horizonte de simulação aumentou para aproximadamente um ano de trabalho. Da mesma forma, em futuros

estudos, cuja abrangência cresce para o âmbito estratégico, horizontes temporais maiores (três, quatro, cinco anos ou mais) podem ser exigidos. A simulação computacional permite que esses horizontes temporais sejam analisados com maior segurança. Vale lembrar que modelos são representações mais simples da realidade e não devem necessariamente representá-la à perfeição, mas, sim, serem úteis dentro de um contexto de tomada de decisão (STERMAN, 2000). Novamente, isso estabelece um avanço em relação a outras formas de abordagem para prever cenários sistêmicos em ergonomia.

Os testes de sensibilidade realizados no estudo preliminar por meio da simulação de Monte Carlo servem, nesse ponto, como uma ferramenta na função de reduzir a incerteza inerente à modelagem, visto que possibilita efetuar a análise de risco por meio da distribuição de probabilidades. Assim, reduz o risco de incerteza das variáveis do modelo, tornando-o mais sensível e seguro para a tomada de decisão.

Acerca do viés qualitativo da abordagem, podem-se salientar pontos importantes a respeito da interligação de fatores na modelagem de enlace causal. Alguns autores destacam a relação de influência entre a produção e a sobrecarga (PARKER, 2003; DUL; NEUMANN, 2009; AREZES; DINIZ-CARVALHO; ALVES, 2015), principalmente quando o ritmo de trabalho é imposto por uma máquina ou um tempo *takt*. Tal ocorrência se realiza pela movimentação repetitiva e estereotipada emergente dessas situações e pela ausência de pausas e recuperação fisiológica (PUTZ-ANDERSON, 1998; MOORE; GARG, 1996; COLOMBINI, OCCHIPINTI; FANTI, 2008). Posteriormente, isso se reflete na quantidade e qualidade da produção (NEUMANN; KOLUS; WELLS, 2016). A modelagem qualitativa de enlace causal provido pela Dinâmica de Sistemas, que teve como base a própria AET, demonstrou visualmente essas interligações e laços de influência, já observados separadamente por esses autores. Com isso, possibilita a posterior modelagem matemática desses fatores para previsão de cenários.

Com relação ao viés quantitativo, Wiltshire, Steffensen e Fiore (2019), Karwowski et al (2019) e Guastello, Corroero e Marra (2019) também utilizaram a modelagem matemática e/ou estatística para análise sistêmica. De forma geral, a modelagem matemática permite criar cenários de previsão do comportamento do sistema, mas, para sistemas complexos, exige uma matemática não linear. A Dinâmica de Sistemas utiliza-se de equações diferenciais, que possibilitam o cálculo numérico representativo aos sistemas complexos, e, conseqüentemente, pode captar as não linearidades do comportamento desses sistemas. Ressalta-se novamente que isso fornece cenários úteis à tomada de decisão e representa uma evolução em comparação a outras abordagens.

Ainda, quanto ao alcance dos níveis de gestão da empresa, a proposta de abordagem representa uma possível forma de aprofundar o impacto das ações ergonômicas além do nível operacional. Vários autores, como Dul e Neumann (2009), Burgess-Limerick et al. (2007), Neumann, Ekman e Winkel (2009), Mateus Junior (2013) e Mattos (2015), afirmam que fazer com que a ergonomia alcance níveis táticos e estratégicos da empresa é um dos grandes desafios da disciplina na atualidade. Atingir tais níveis poderia significar ações ergonômicas mais efetivas e maior assimilação da ergonomia na cultura organizacional (MATEUS JUNIOR, 2013; MATTOS, 2015). As estratificações táticas e estratégicas da organização podem ser alcançadas pela ergonomia via integração entre AET e Dinâmica de Sistemas, pois a proposta de abordagem permitiu (i) demonstrar como problemas de cunho ergonômico impactam e são impactados por fatores como produção, qualidade, vendas, entre outros fatores, e, (ii) pela evidenciação que emerge dos modelos de simulação, compreender que adotar medidas ergonômicas pode ser favorável para todos esses fatores, apresentando um viés estratégico das intervenções. Dessa forma, ações táticas e/ou estratégicas podem se utilizar beneficentemente de melhorias ergonômicas, promovendo uma aproximação entre a Ergonomia e os níveis de gestão tático e estratégico da organização.

Por fim, as análises sistêmicas permitiram, conforme já mencionado, a identificação dos mecanismos de regulação (p. 134), que são importantes indicadores de problemas na organização do trabalho (GUÉRIN et al., 2001; FALZON, 2004). Regulações do trabalho dão indicativos de como um sistema produtivo se equilibra em razão de perturbações internas ou externas. A Teoria de Sistemas (BERTALANFFY, 1968) define esse tipo de comportamento como “propriedades emergentes” de um sistema, as quais surgem quando, em busca do próprio equilíbrio, o sistema assume uma nova configuração estrutural ou comportamental. Esse comportamento, percebido em ambos os casos aqui estudados (como no acúmulo do trabalho em processo que causa um desbalanceamento da linha e requer um trabalhador extra para ser consumido ou parada temporária da produção, no caso da indústria de componentes elétricos automotivos), só pôde ser identificado por um viés sistêmico. Ao se analisar um posto de trabalho isoladamente, seria possível apenas identificar fatores pontuais referentes àquele posto, como as posturas adotadas, a repetitividade, a movimentação estereotipada ou o tempo de ciclo. Ao se ampliar a análise aumentando as fronteiras do sistema em estudo, consegue-se identificar a linha funcionando com um sistema maior e mais complexo. Seguindo o exemplo da linha produtiva da indústria de componentes elétricos automotivos, observa-se, ao ampliar a borda de análise do sistema, os trabalhadores se acumulando em determinada região da linha em razão

de não vencerem o trabalho em processo, chegando ao ponto de três ou quatro trabalhadores ocuparem o mesmo espaço de trabalho, adotando posturas extremas, até culminar na parada da linha ou na chegada de um trabalhador extra. Isso demonstra a necessidade de, além das análises pontuais já utilizadas em ergonomia, se fazer uso de análises sistêmicas, sob risco de deixar passar dados importantes acerca do comportamento do sistema produtivo, partindo do pressuposto de que o comportamento do todo é maior que o comportamento das partes isoladas.

4.3.3 Análise da aplicação prática da proposta de abordagem

A aplicação prática da proposta de abordagem permitiu a realização de inferências acerca das nuances relativas à sua inserção nos sistemas produtivos estudados e de características inerentes a esses sistemas.

Com relação ao estudo preliminar (indústria de componentes elétricos automotivos), percebe-se que a redução dos tempos ociosos entre o processamento de cada peça gerou um efeito contraintuitivo, que é a sobrecarga humana física. Dessa situação decorrem os afastamentos do trabalho, perda de conhecimento na linha de produção e queda de performance produtiva e qualidade.

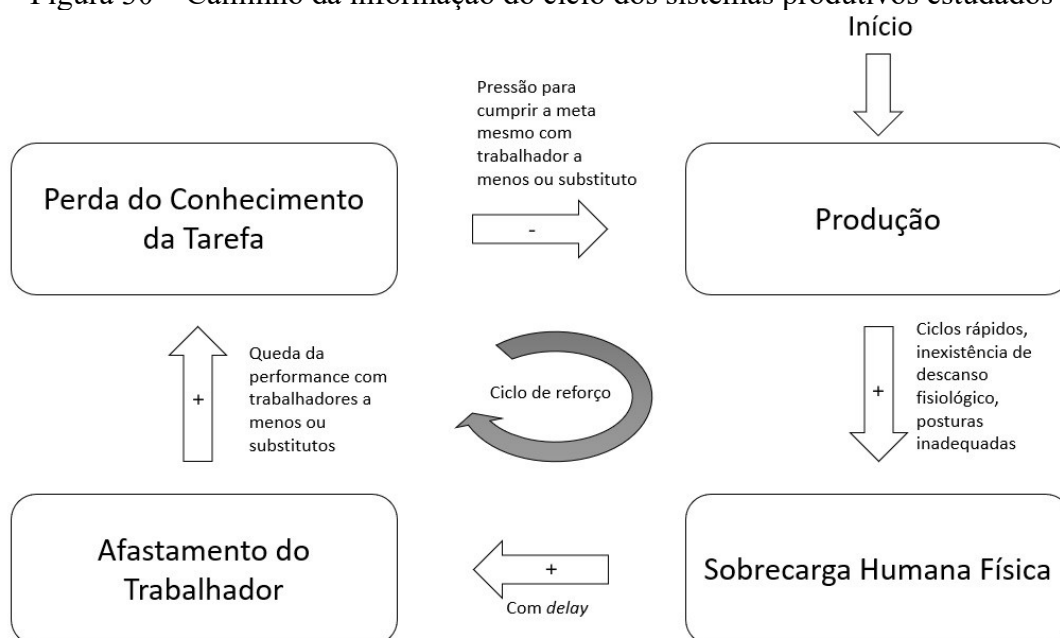
No estudo de caso (indústria de caixas de papelão ondulado), esse mesmo efeito ocorre com relação a vendas de pequenos lotes. A flexibilização para atendimento de lotes menores em detrimento da fidelização de clientes maiores determina uma grande quantidade de *set ups*, que gera períodos de *downtime*. Para compensar o tempo de máquina parada, aumenta-se o ritmo produtivo e dos ciclos, impossibilitando pausas, gerando sobrecarga humana física. A partir disso, o caminho da informação é basicamente o mesmo do caso da indústria de componentes elétricos automotivos: a sobrecarga humana física gera afastamento do trabalhador, e a linha retém menos conhecimento da tarefa e, conseqüentemente, perde em produtividade e qualidade. Isso, por sua vez, culmina em maior número de *set ups* para restituir lotes danificados, mais *downtime* e, novamente, aumento do ritmo produtivo para compensação.

Em ambos os casos, o caminho da informação é traçado por um ciclo³⁰ semelhante, conforme descrito e ilustrado na Figura 30, sendo:

³⁰ Nesse caso, o fator “Produção” foi mantido na posição em que se encontra nos modelos de simulação para não confundir o leitor. A partir dele emergem os fatores em sequência, no sentido horário. Não há, de forma geral, regra para ordenar a posição dos fatores de influência do caminho da informação em processo gráfico.

- a) produção: um aumento do ritmo produtivo reduz as pausas e a recuperação fisiológica;
- b) sobrecarga humana física: o aumento do ritmo produtivo e a ausência de pausas determina sobrecarga humana física por movimentos repetitivos, estereotipados, posturas inadequadas e recuperação fisiológica insuficiente;
- c) afastamento: sobrecarregado, o trabalhador afasta-se do trabalho em decorrência de doenças musculoesqueléticas laborais;
- d) perda do conhecimento: ao ocorrer o afastamento do trabalho, a linha de produção deixa de reter mão de obra com conhecimento acerca da tarefa e necessita repô-la com outro trabalhador que não possui o mesmo conhecimento ou, em algumas situações, produzir a mesma quantidade com menos trabalhadores. Disso emerge um *loop* que realimenta a produção, interferindo na qualidade e ritmo necessários para o atendimento da meta, e culmina em maior sobrecarga novamente, caracterizando um ciclo de reforço.

Figura 30 – Caminho da informação do ciclo dos sistemas produtivos estudados



Fonte: o autor.

Isso demonstra que a sobrecarga humana física que acomete o trabalhador atua no sistema como um feedback *looping* de primeira ordem, agindo com *delay*. Também se torna explícito que a sobrecarga pode controlar o comportamento desses sistemas.

Cabe ressaltar que o caminho da informação observado e ilustrado remete apenas aos sistemas que foram objeto de estudo desta pesquisa. Para a descrição de outros sistemas são necessários estudos específicos que determinem o caminho da informação em cada situação.

Ações táticas e estratégicas são tomadas na tentativa de gerenciar esse ciclo cujo impacto notado ocorre na performance produtiva, como horas extra para normalização da produção e até políticas de incentivo financeiro. Porém, tais ações não impactam nos subsistemas que governam o comportamento do sistema e, portanto, representam pouca efetividade para os fins traçados.

A abordagem via AET e Dinâmica de Sistemas permitiu, de forma geral e conforme já mencionado, uma aproximação importante da ergonomia com camadas mais profundas da gestão industrial. No caso da indústria de componentes elétricos automotivos, ações operacionais puderam ser sugeridas. No caso da indústria de caixas de papelão ondulado, as análises perpassaram a gestão operacional e atingiram níveis táticos. Com isso, vislumbra-se a possibilidade de chegar ao nível estratégico de gestão, fruto de possíveis trabalhos futuros (no caso da indústria de caixas de papelão ondulado, pode-se estudar o impacto das vendas de lotes maiores ou menores na posição de mercado, na produção e na ergonomia, e como isso retorna às decisões estratégicas em um efeito sistêmico).

5 CONCLUSÕES

A seção de conclusão da presente tese está dividida em três subseções, sendo:

- a) conclusões gerais: essa subseção aborda o problema e os objetivos da pesquisa, os procedimentos metodológicos, as contribuições científicas, industriais e sociais deste trabalho e as limitações e potenciais do método;
- b) percepções do pesquisador: essa subseção aborda as análises e a perspectiva do pesquisador enquanto acadêmico e com base em sua atuação profissional na indústria;
- c) futuros estudos: essa subseção aborda as oportunidades para estudos que decorrem da realização desta pesquisa.

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

Considerando o problema levantado por esta pesquisa, que culmina na oportunidade de mostrar como possibilitar que ações ergonômicas sejam tomadas em sistemas complexos, evitando efeitos contraintuitivos e provendo segurança e previsibilidade em médio e longo prazos, a resposta sugerida pela presente tese é de uma abordagem integrada entre a Análise Ergonômica do Trabalho e a Dinâmica de Sistemas. Com sua estrutura, a AET permite captar nuances às vezes imperceptíveis do trabalho, como regulações, de maneira sistêmica, e fornece para a Dinâmica de Sistemas a base para modelagem e simulação computacional para geração de cenários. A Dinâmica de Sistemas, por sua vez, retorna para a AET uma análise qualitativa de enlace causal e quantitativa pelo cálculo numérico, reforçando e aprofundando o diagnóstico em horizontes temporais maiores.

Esta tese produziu, além da própria abordagem proposta, os seguintes resultados: (i) um modelo de simulação para a indústria de componentes elétricos automotivos; (ii) um modelo de simulação para a indústria de caixas de papelão ondulado; e (iii) inferências teóricas acerca do caminho da informação nesses sistemas específicos. Cabe ressaltar que para a replicação em sistemas semelhantes, alguns detalhes necessitarão ajustes, porém, de forma geral, o caminho da informação tende a se repetir. Essa replicação é, inclusive, uma recomendação de estudos futuros que será descrita adiante.

A modelagem qualitativa provida pela AET e pelo diagrama de enlace causal mostraram-se úteis no entendimento da influência mútua entre fatores distantes, como, por exemplo, a sobrecarga do trabalhador e a venda de lotes pequenos para atender maior diversidade de mercado. Essa ligação causalística, cujo diagnóstico se torna complexo sem o uso de ferramentas de análise sistêmica, demonstra como subsistemas que aparentemente não estão ligados podem ser impactados por decisões de ambos os lados. Abre-se, com isso, uma perspectiva para que a ergonomia penetre nos setores estratégicos das organizações, tornando-se uma possível abordagem para mitigar o desalinhamento entre a própria ergonomia e a gestão estratégica organizacional, que determina, muitas vezes, limitações às ações ergonômicas em nível operacional e tático.

Já a modelagem quantitativa complementa essa perspectiva por oferecer possibilidades de tomada de decisão em todos os níveis de gestão, com maior segurança, em razão das previsões de cenários decorrentes da simulação computacional e cálculo numérico.

A utilização conjunta dos métodos seguindo as etapas propostas permite o desenvolvimento de uma ferramenta satisfatória para abordagem de sistemas dinâmicos. Assim, ajuda na mitigação do problema da imprevisibilidade de seu comportamento e insegurança nas tomadas de decisão, estabelecendo uma evolução em relação aos métodos e abordagens atuais em âmbito industrial.

O uso de ferramentas de avaliação ergonômica, especificamente o software Ergo-IBV, permitiu para o caso no qual foi utilizado, maior sensibilidade nas simulações de sobrecarga do trabalhador por prover saídas quantitativas em termos de risco de adoecimento.

Especificamente a utilização da Dinâmica de Sistemas após o diagnóstico da AET permitiu: (i) que os fatores apontados pelo diagnóstico inicial pudessem ser organizados em um contexto sistêmico; (ii) a quantificação dos fatores pela descrição matemática das relações; e (iii) a prospecção de cenários possibilitando a interpretação do comportamento do sistema em relações não lineares em horizontes temporais médio e longo. A simulação computacional estabelece um ambiente de experimentação controlada no qual configurações alternativas podem ser exploradas de forma rápida e sem os riscos de uma implementação experimental piloto.

Ainda, pode-se perceber a relevância da influência da sobrecarga humana física dos trabalhadores em sistemas de produção. A fadiga, em ambos os casos, apresentou-se como um elemento que atua de forma não linear em um *loop* de feedback de primeira ordem e produz efeitos em longo prazo em decorrência de um acúmulo cujo impacto não pode ser percebido

precocemente. Esse *delay* cria dificuldades de compreensão e análise e culmina em efeitos contraintuitivos em horizontes temporais alongados.

Com isso, ressalta-se a importância de observações sistêmicas paralelamente às análises pontuais, pois propriedades emergentes do sistema surgem paralelamente às regulações em razão de desequilíbrios, assumindo novas configurações de comportamento. Tais propriedades não são observáveis em análises estritamente pontuais e estabelecem importante fonte de informação para a real percepção do comportamento sistêmico do trabalho.

Tendo em conta a perspectiva de empregar o arcabouço teórico fornecido pela Teoria Geral de Sistemas para embasamento das intervenções ergonômicas, e uma vez posta a importância de se utilizarem os postulados dessa teoria na busca pela compreensão de sistemas produtivos, cabe observar que os ergonomistas, enquanto profissionais da indústria e/ou pesquisadores, vão se deparar com sistemas dinâmicos e complexos em toda sua atuação profissional/acadêmica. Sistemas simples são raramente encontrados na realidade. Ter ciência das bases das teorias sistêmicas e adjacências, incluindo a Teoria da Catástrofe e a Teoria do Caos, pode ser de grande valia para os profissionais e pesquisadores da área no anseio de abordar, modelar e melhorar o ambiente de trabalho imerso em complexidade inerente ao comportamento sistêmico.

Dito isso, importa saber que modelos são representações mais simplificadas da realidade e que o que de fato se modela é o problema. Não havendo demanda ou problema, não há razão para modelar um sistema nesse contexto.

As contribuições científicas deste estudo recaem sobre o fato de possibilitar uma nova abordagem aos sistemas complexos dentro da ergonomia. O viés quantitativo como complemento aos métodos qualitativos convencionais da ergonomia possibilitou uma compreensão sistêmica com maior segurança dos sistemas produtivos em estudo. Isso gera, além de dados científicos sobre o comportamento desses sistemas, subsídios para a tomada de decisão de gestores em âmbito industrial. Nesse ponto reside a contribuição para a indústria que emerge deste trabalho. Ainda, há a contribuição social, uma vez que com a compreensão sistêmica do trabalho aumenta-se a possibilidade de melhorá-lo de um ponto de vista humano.

Durante o processo de desenvolvimento do estudo também foi possível deduzir acerca de potenciais e limitações da abordagem. Como potencial, pode-se pontuar que se trata de uma abordagem flexível, que pode se ajustar a todo tipo de sistema e/ou segmento produtivo. Também apresenta potencial no sentido de responder problemas complexos, o que se configura como importante demanda para a disciplina da ergonomia. Contudo, como limitação se pode

pontuar que o uso, tanto da AET quanto da Dinâmica de Sistemas, requer certo grau de experiência do profissional/pesquisador que irá aplicá-las. Especificamente para a Dinâmica de Sistemas, o domínio da linguagem matemática é essencial para a modelagem, além do conhecimento relacionado ao próprio uso do software. Portanto, dependendo da experiência do usuário, os resultados podem exigir longos períodos de testes e estudos. Também cabe ressaltar que, além das avaliações qualitativas, a abordagem proposta requer coleta de grande número de dados quantitativos para a construção do modelo de simulação. Sem isso, incorre-se no risco de desenvolver análises tendenciosas, de acordo com a visão do profissional/pesquisador. Tais dados também se fazem necessários para retratar a realidade do sistema da maneira mais fidedigna possível e obter segurança às políticas testadas.

Por fim, conclui-se que a abordagem apresenta um avanço no alcance temporal e quantitativo em relação a outros métodos usados para prever cenários em ergonomia. Também estabelece uma análise sistêmica satisfatória, com flexibilidade de ampliação ou redução de bordas do sistema, e possibilidade de englobar diversas variáveis que influenciam em seu comportamento (mesmo que abstratas), mostrando-se promissora na tratativa das questões advindas do tema da complexidade.

5.2 PERCEPÇÕES DO PESQUISADOR

Enquanto profissional que atuou na indústria³¹ com ergonomia, e por se tratar de uma pesquisa de cunho não somente quantitativo, mas também qualitativo, acredita-se que seja importante o apontamento de algumas percepções do pesquisador, principalmente com relação à aplicação prática da abordagem.

Um importante ponto nesse sentido diz respeito ao viés sistêmico e quantitativo contido na abordagem proposta. A questão sistêmica como definidora de problemas ergonômicos surgiu em todas as organizações produtivas por onde o pesquisador desenvolveu sua experiência profissional. A título de exemplo, em determinada organização, a localização da comunidade no entorno da empresa influenciava o adoecimento do trabalhador. Isso porque a organização em questão situa-se em uma região de interior, uma pequena vila, e a maioria das pessoas a trabalhar na linha de produção eram mulheres casadas (normalmente com outros trabalhadores de setores de manutenção ou de máquinas cujo processo é mais automatizado e exige

³¹ O pesquisador atuou como profissional consultor da área de ergonomia em diversos segmentos da indústria. Dentre eles: indústria de papel e celulose; indústria de caixas de papelão ondulado; indústria de resinagem; indústria de componentes elétricos automotivos; indústria alimentícia; indústria metal-mecânica; e indústria madeireira.

conhecimento técnico) e com filhos, em complemento de renda (informações obtidas pelo próprio RH da organização em questão). Isso determinava uma dificuldade em recrutar trabalhadores em razão da distância das cidades maiores da região. No geral, essas pessoas realizavam jornada dupla de trabalho (na empresa e em casa ou com serviços informais após o expediente), o que aumentava a chance de adoecimento por sobrecarga e afastamento. As perguntas relacionadas à dificuldade de análise que acometiam o pesquisador na ocasião eram, por exemplo: (i) como provar essa relação e determinar sua influência no adoecimento? (ii) como convencer a organização a tratar esse problema para otimizar a própria performance? (iii) como testar políticas para mitigação desse problema? (iv) qual é o real impacto desse problema na produção e na própria saúde geral dos colaboradores? (v) qual é o impacto social decorrente dessa situação?

Por esse ângulo, a proposta de abordagem integrada entre AET e Dinâmica de Sistemas, principalmente em decorrência da previsão de cenários pela modelagem matemática, pode oferecer meios para abordar problemas complexos entre fatores interligados, mas aparentemente distantes, como o problema agora apresentado. Isso abre uma perspectiva de responder a um problema comum que determina uma limitação do alcance da ergonomia em muitas situações e em muitas organizações: o desalinhamento estratégico da ergonomia em relação à visão estratégica da organização, conforme anteriormente citado.

Outra percepção importante diz respeito aos efeitos contraintuitivos evidenciados que são característicos de situações de complexidade. Muitas ações ergonômicas (e de outras áreas, como produtivo ou de qualidade) em sistemas complexos apresentam efeitos não esperados, normalmente em médio e longo prazos. O pesquisador vivenciou e/ou teve contato com experiências de colegas, em sua atuação profissional, que ilustram tal situação. Como exemplo, o caso de um setor de costura de uma organização do ramo de vestuário, cujo adoecimento do trabalhador por movimentação estereotipada e repetitiva era um problema a ser mitigado. Na ocasião, uma redução do tempo da jornada de trabalho para o setor foi proposta com a finalidade de reduzir a sobrecarga humana física dos trabalhadores, proporcionando tempo de recuperação. O que aconteceu em médio prazo foi que uma parte dos trabalhadores buscou uma segunda jornada de trabalho para complemento de renda, por terem obtido maior tempo disponível em seu dia. Esse fato, ao contrário do previsto, aumentou o número de adoecimentos e afastamentos. A proposta de abordagem desta pesquisa pode não apenas tentar prever alguns efeitos contraintuitivos nesse sentido, mas também testar várias soluções antes de sua efetiva implantação, reduzindo seu risco de falha. A simulação computacional permite, nesse ponto,

uma abordagem mais segura e menos custosa à organização, pois o ambiente virtual pode substituir projetos pilotos experimentais ou soluções radicais.

A respeito da aplicação prática, ressalta-se que muitos dados que necessitam ser obtidos não são, normalmente, controlados pela empresa. Isso significa que de acordo com cada situação e contexto produtivo, o profissional ou pesquisador que se utilizará da abordagem proposta na prática necessitará elaborar um protocolo de coleta de dados específico. Alguns dados que foram importantes para a modelagem matemática e não eram registrados pelas organizações abordadas neste estudo são: perda média efetiva de produção por ter um trabalhador substituto na linha; perda média efetiva de produção por ter um trabalhador a menos na linha; tempo médio para afastamento do trabalho por doença ocupacional a partir da entrada na organização (ou seja, tempo médio de adoecimento no trabalho), entre outros. Reforça-se, então, com isso, que como a modelagem serve especificamente para simular a realidade do sistema em foco, cada organização a ser analisada exigirá dados especificamente diferentes e protocolos adaptados a cada realidade.

5.3 FUTUROS ESTUDOS

Uma recomendação para estudo futuro é a aplicação prática da proposta de abordagem em outras organizações dos mesmos setores que as organizações já abordadas nesta pesquisa, no intuito de traçar comparativos entre as organizações e reforçar o entendimento global das características produtivas de um setor ou segmento industrial, podendo convergir informações para uma modelagem abrangente e sistematizada, porém aproximada, de uma atividade produtiva como um todo. Uma vez que esse ponto seja alcançado, o modelo torna-se mais confiável e ganha em replicabilidade e escalabilidade.

Com relação aos casos abordados nesta pesquisa, em razão de as propostas de medidas poderem gerar custos para as empresas, outra proposta de estudo futuro é a de evoluir os modelos de fluxo e estoques com a inserção de módulos para simulação de impacto econômico, conforme já salientado em ambos nas seções pertinentes a cada caso. Isso poderá possibilitar o comparativo entre o custo de determinada medida e o retorno que se poderá obter com ela, critério importante para a tomada de decisão (considerando sempre que o foco é a saúde do trabalhador).

Outra indicação de estudo futuro diz respeito à expansão dos modelos para a consideração de fatores subjetivos, como a motivação e satisfação no trabalho, bem como o esgotamento mental (*burn out*) e questões cognitivas inerentes ao cotidiano laboral. Com isso,

propriamente o redesenho do trabalho também pode ser realizado efetivando-se a transformação ergonômica completa.

Ainda, como forma de reforçar a perspectiva proposta por este estudo, recomenda-se a aplicação da abordagem em diferentes sistemas produtivos e setores da indústria, como produção agrícola e/ou de serviços, frigorífico, metalúrgico, entre outros.

REFERÊNCIAS

- ABRAHÃO, Júlia *et al.* **Introdução à ergonomia**: da teoria à prática. São Paulo: Edgard Blücher, 2009.
- ABRAHÃO, Júlia Issy; PINHO, Diana Lúcia Moura. Teoria e prática ergonômica: seus limites e possibilidades. **Escola, Saúde e Trabalho**: estudos psicológicos, Brasília, DF, p. 229-239, 1999.
- ABRAHÃO, Júlia Issy; PINHO, Diana Lúcia Moura. As transformações do trabalho e desafios teórico metodológicos da ergonomia. **Estudos de Psicologia**, Brasília, DF, v. 7, p. 45-52, 2002. Número especial.
- ABRAHÃO, Júlia Issy. Reestruturação produtiva e variabilidade do trabalho: uma abordagem da ergonomia. **Psicologia: Teoria e Pesquisa**, Brasília, DF, v. 16, n. 1, p. 49-54, jan./abr. 2000.
- ALMEIDA, Rodrigo Gomes. A ergonomia sob a ótica anglo-saxônica e a ótica francesa. **Vértices**, Campos dos Goytacazes, v. 13, n. 1, p. 115-126, jan./abr. 2011.
- ANTUNES, Junico *et al.* **Sistemas de produção**: conceitos e práticas para projeto e gestão da produção enxuta. Porto Alegre: Bookman, 2008.
- APPLIED ERGONOMICS. Amsterdã: Elsevier, 2017. ISSN: 0003-6870.
- AREZES, Pedro M.; DINIS-CARVALHO, José; ALVES, Anabela Carvalho. Workplace ergonomics in lean production environments: A literature review. **Work**, v. 52, n. 1, p. 57-70, 2015.
- ARIENTE NETO, Rafael. **Modelo para avaliar o comportamento dinâmico da agregação de serviços no contexto de PSS**. 2016. 230 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/122974/323804.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 dez. 2017.
- ASHBY, W. Ross. **An Introduction to Cybernetics**. London: Chapman & Hall Ltd., 1999.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. **Áreas e sub-áreas de engenharia de produção**. Disponível em: <https://www.abepro.org.br/index.asp>. Acesso em: 10 dez. 2017.
- ATTWOOD, Dennis A.; DEEB, Joseph M.; DANZ-REECE, Mary E. **ergonomic solutions for the process industries**. Nova York: Elsevier, 2004.
- BABER, Chris; GOLIGHTLY, David; WATERSON, Patrick. Editorial: The cybernetic return in Human Factors and Ergonomics. **Applied Ergonomics**, v. 49, p. 86-90, 2019.

- BALLESTERO-ALVAREZ, Maria Esmeralda; MARINHO, A. C. R.; SANTOS, A. D. Organização como processos. *In*: BALLESTERO-ALVAREZ, M. E. (coord.). **Administração da qualidade e da produtividade**: abordagens do processo administrativo. São Paulo: Atlas, 2001.
- BAR-YAM, Yaneer. **Dynamics of complex systems**. Reading, MA: Addison-Wesley, 1997.
- BASTOS, Alexandre Antunes Parreiras. **A Dinâmica de Sistemas e a compreensão de estruturas de negócios**. 2003. 122 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Departamento de Administração, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- BERTALANFFY, Ludwig von. **Teoria geral dos sistemas**. Petrópolis: Vozes, 1975.
- BERTALANFFY, Ludwig Von. **Teoria geral dos sistemas**. 1. ed. Tradução: Francisco M. Guimarães. Petrópolis: Vozes, 1968.
- BITTENCOURT, Wastony; ALVES, Anabela Carvalho; AREZES, Pedro. Revisão bibliográfica sobre a sinergia entre Lean Production e Ergonomia. *In*: CONGRESSO LUSO-MOÇAMBICANO DE ENGENHARIA (CLME2011), 6., 2011, Maputo. **Anais [...]** Maputo: Edições INEGI, 2 set. 2011. p. 1-13. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/18865>. Acesso em: 10 set. 2017.
- BOULOIZ, Hafida *et al.* A system dynamics model for behavioral analysis of safety conditions in a chemical storage unit. **Safety science**, v. 58, p. 32-40, 2013.
- BRAGA, Henrique Costa *et al.* Simulação da movimentação de pessoas em situações de emergência: aspectos ergonômicos e computacionais com autômatos Fuzzy e sua aplicação ao projeto arquitetônico. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 2, p. 61-77, 2014.
- BROWN, Clifford T.; LIEBOVITCH, Larry S. **Fractal analysis**. Thousand Oaks, CA: Sage, 2010.
- BUENO, Adauto Farias; OLIVEIRA, Rodrigo Alessandro de. Sistema volvo de produção: uma evolução na manufatura automobilística ou uma tentativa fracassada de produção sociotécnica?. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 29., 2009, Salvador. **Anais [...]** Salvador: ABEPRO, 2009. p. 1-13. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2009_tn_sto_091_615_14658.pdf. Acesso em: 17 jan. 2018.
- BURGESS-LIMERICK, Robin *et al.* Implementation of the participative ergonomics for manual tasks. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 37, p. 144-155, 2007.
- BYSTRÖM, Syen E. G. Physiological response and acceptability of isometric intermittent handgrip contractions. **Arbete och alsa – NIOSH**, Sweden, p. 38, 1991.
- CAMPOS, Marcelo Luís de. **A gestão participativa como uma proposta de reorganização do trabalho em um sistema de produção industrial**: uma estratégia de ampliação da eficácia sob a ótica da ergonomia. 2000. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/78377/170805.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 18 out. 2017.

CARDOSO JUNIOR, Moacyr Machado. Avaliação ergonômica: revisão dos métodos para avaliação postural. **Revista produção online**, v. 6, n. 3, 2006.

CASTELLÓ MERCÉ, Purificación. Análisis ergonómico de puestos de trabajo en una empresa fabricante de equipamiento para el sector de la construcción. **Revista de Biomecánica**, n. 33, p. 23-25, 2001.

CASTELLÓ MERCÉ, Purificación; GARCÍA MOLINA, Carlos. Estudio ergonómico de puestos de trabajo en el sector textil. **Revista de Biomecánica**, n. 39, p. 27-32, 2003.

CASTI, Jonh. **Complexification**: explaining a paradoxical world through the science of surprise. New York: Harper Collins, 1994.

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

CAPRA, Fritjof. **O ponto de mutação**. São Paulo: Cultrix, 1982.

CARADUJE, Noelia Bravo. **Evaluación de riesgos ergonómicos específicos en los puestos de trabajo de chorro y pintor de superficies metálicas**. 2014. 117 f. Dissertação (Mestrado em Prevención de Riesgos Laborales) – Universidad de Oviedo, Oviedo, Espanha, 2014.

CELLI, Cassiane das Graças. **Mapeamento de variáveis para desenvolvimento de um modelo conceitual de melhoria do gerenciamento de mudanças em pequenas empresas de engenharia**. 2008. 134 f. Tese (Doutorado em Produção e Sistemas) – Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2008.

CHAIN, Ricardo Matos. **Modelagem, simulação e dinâmica de sistemas**. Gestão da Segurança da Informação e Comunicações, CEGSIC, 2009-2011. Disponível em: http://home.ufam.edu.br/regina_silva/CEGSIC/Textos%20Base/Modelagem_Simulacao_e_Dinamica_de_Sistemas_CEGSIC_2009_2011.pdf. Acesso em 17 jan. 2018.

CHIAVENATO, Idalberto. **Introdução à teoria geral da administração**. 4. ed. São Paulo: Makron, 1993.

CHIAVENATO, Idalberto. **Introdução à teoria geral da administração**. 6. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2000.

CHIAVENATO, Idalberto. **Introdução à teoria geral da administração**: uma visão abrangente da moderna administração das organizações. 7. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003.

CILLIERS, Paul. 'Complexity and postmodernism. Understanding complex systems' Reply to David Spurrett. **South African Journal of Philosophy**, v. 18, n. 2, p. 275-278, 1999.

COLOMBINI, Daniela. An observational method for classifying exposure to repetitive

movements of the upper limbs. **Ergonomics**, v. 41, n. 9, p. 1261-1289, 1998. DOI:10.1080/001401398186306

COLOMBINI, Daniela *et al.* **Método OCRA para análise e a prevenção do risco por movimentos repetitivos**: manual para avaliação e gestão do risco. São Paulo: LTr, 2008.

COLOMBINI, Daniela; OCCHIPINTI, Enrico; FANTI, Michele. **Il metodo OCRA per l'analisi e la prevenzione del rischio da movimenti ripetuti**: Manuale per la valutazione e la gestione del rischio. Milão: FrancoAngeli, 2005.

CORBETT, Thomas; REIS, Leonardo M. Dinâmica de sistemas. **Revista de Administração de Empresas**, v. 46, n. 2, p. 122-122, 2006.

COSTA, Bruno R. da; VIEIRA, Edgar R. Risk factors for work-related musculoskeletal disorders: a systematic review of recent longitudinal studies. **Am. J. Ind. Med.**, v. 53, n. 3, p. 285-323, 2009.

COSTA, Christiane Kelen Lucena da *et al.* Avaliação ergonômica do trabalhador rural: enfoque nos riscos laborais associados à carga física. **Gepros: Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, v. 6, n. 2, p. 101, 2011.

COYLE, Robert Geoffrey. **System dynamics modelling**: a practical approach. London: Chapman & Hall, 1996.

CRESWELL, Jonh W.; PLANO CLARK, Vicki L. **Designing and conducting mixed methods research**. 2. ed. Los Angeles: SAGE Publications, 2011.

DALMOLIN, Adriane *et al.* Teoria clássica da administração e sua utilização na administração moderna. **Synergismus Scyentifica Utfpr**, Pato Branco, v. 2, p. 1-4, 2007.

DEKKER, Sydney W. A.; HANCOCK, Peter A.; WILKIN, Peter. Ergonomics and sustainability: towards an embrace of complexity and emergence. **Ergonomics**, v. 56, n. 3, p. 357-364, 2013.

DELWING, Eduardo Becker. **Análise das condições de trabalho em uma empresa do setor frigorífico a partir de um enfoque macroergonômico**. 2007. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: [http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/publicacoes/139_Eduardo becker delwing AN.pdf](http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/publicacoes/139_Eduardo%20becker%20delwing%20AN.pdf). Acesso em: 17 jan. 2018.

DIANAT, Iman; VAHEDI, Abdollah; DEHNAVI, Sara. Association between objective and subjective assessments of environmental ergonomic factors in manufacturing plants. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 54, p. 26-31, 2016.

DUL, Jan *et al.* A strategy for human factors/ergonomics: developing the discipline and profession. **Ergonomics**, v. 55, n. 4, p. 377-395, 2012.

DUL, Jan; NEUMANN, W. Patrick. Ergonomics contributions to company strategies. **Applied Ergonomics**, v. 40, 2009.

DUL, Jan; WEERDMEEESTER, Bernard. **Ergonomia prática**. São Paulo: Edgard Blücher, 2000.

ENCARNACIÓN, Márjorie; NARANJO, Armas. **Carga física de trabajo y su influencia en los trastornos musculoesqueléticos de los trabajadores en las áreas de corte, montaje y terminado de Creaciones GUSMAR**. 2017. Dissertação (Maestría en Seguridad e Higiene Industrial y Ambiental) – Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Equador, 2017.

FALZON, Pierre. **Ergonomia**. Tradução: Giliane M. J. Ingratta *et al.* São Paulo: Blucher, 2007.

FERENHOF, Helio Aisenberg; FERNANDES, Roberto Fabiano. Desmistificando a revisão de literatura como base para redação científica: método SFF. **Revista ACB**, v. 21, n. 3, p. 550-563, 2016.

FERREIRA, Mário César. Atividade, categoria central na conceituação de trabalho em ergonomia. **Alethéia**, v. 1, n. 11, p. 71-82, 2000.

FERRERAS REMESAL, Alberto. Analisis ergonómico de puestos de trabajo en el sector del calzado. **Revista de Biomecánica**, v. 42, p. 27-30, 2004.

FERRERAS REMESAL, Alberto; ESCOBAR SARMIENTO, Elkin; OLTRA PASTOR, Alfonso. Análisis ergonómico básico de la herramienta SUPERMANG. **Revista de Biomecánica**, n. 50, p. 39-41, 2008.

FERRERAS REMESAL, Alberto. Estudio ergonómico de puestos de trabajo en almacenes de naranjas y de conservas de pescado. **Revista de Biomecánica**, n. 37, p. 29-33, 2002.

FIGUEIREDO, Michele Pereira; DUARTE, Francisco José de Castro Moura. A análise ergonômica do trabalho numa indústria do setor offshore: uma reflexão sobre a prática e seus limitantes. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, 10., 2014, Rio de Janeiro. **Anais** [...] Rio de Janeiro: Excelência em gestão, ago. 2014. p. 1-11. Disponível em: http://www.excelenciaemgestao.org/Portals/2/documents/cneg10/anais/T14_0004.pdf. Acesso em: 19 jun. 2017.

FLEMING, Paulo Victor; GARCIA, C. De B. Avaliação de riscos industriais e ambientais com a análise preliminar de perigos (APP) e lógica Fuzzy. **UNIFACS. PRINCIPIA. Salvador-BA**, 2012.

FORRESTER, Jay Wright. **Industrial dynamics**. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology Press, 1961.

FORRESTER, Jay Wright. **Principles of systems**. Waltham, MA: Pegasus Communications, 1968

FORRESTER, Jay Wright. **System dynamics and learner-centered-learning in kindergarten through 12th grade education**. Technical Report D-4337, MIT System Dynamics in Education Project. [S. l.: s. n.], 1992.

FORRESTER, Jay Wright. **Road map 1: a guide to learning system dynamics**. Technical Report D-4501-7, MIT System Dynamics in Education Project. [S. l.: s. n.], 2005.

FORRESTER, Jay Wright. **Learning through system dynamics as preparation for the 21st century**. [S. l.: s. n.], 1994. Disponível em: <http://sysdyn.mit.edu/Sdep/Roadmaps/RM8/D-4434-1.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2000.

FRUGGIERO, Fabio *et al.* Incorporating the human factor within manufacturing dynamics. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 12, p. 1691-1696, 2016.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1991.

GIRALDO, Juan Davi Jaramillo. **Estudio ergonómico de las prácticas agrícolas durante el crecimiento y trasplante de plantas de café**. 2015. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciencias em Estudios Ambientales y de La Sustentabilidad) – Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios Sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Instituto Politécnico Nacional, México Df, 2015.

GOTTWALD, Georg A.; MELBOURNE, Ian. On the implementation of the 0-1 test for chaos. **SIAM J. Appl. Dyn. Syst.**, v. 8, n. 1, p. 129-145, 2009a.

GOTTWALD, Georg A.; MELBOURNE, Ian. On the validity of the 0-1 test for chaos. **Nonlinearity**, v. 22, p. 1367-1382, 2009b.

GRANDJEAN, Etienne. **Manual de ergonomia: adaptando o trabalho ao homem**. Porto Alegre: Bookman, 1998.

GREENE, Runyu L. *et al.* Visualizing stressful aspects of repetitive motion tasks and opportunities for ergonomic improvements using computer vision. **Applied ergonomics**, v. 65, p. 461-472, 2017.

GROTE, Gudela, WEYER, Johannes, STANTON, Neville A. Beyond human centred automation—concepts for human-machine interaction in multi-layered networks. **Ergonomics**, v. 57, n. 3, p. 289-294, 2014.

GUASTELLO, Stephen J.; CORRERO II, Anthony N.; MARRA, David E. Cusp catastrophe models for cognitive workload and fatigue in teams. **Applied ergonomics**, v. 79, p. 152-168, 2019.

GUASTELLO, Stephen J. Nonlinear dynamical systems for theory and research in ergonomics. **Ergonomics**, v. 60, n. 2, p. 167-193, 2017.

GUÉRIN, François *et al.* **Comprender o trabalho para transformá-lo: a prática da ergonomia**. São Paulo: Edgar Blucher, 2001.

HANCOCK, Peter A. The humane use of human beings?. **Applied ergonomics**, v. 79, p. 91-97, 2019.

HENDRICK, Hal W.; KLEINER, Brian M. **Macroergonomics: introduction to work system design**. Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society, 2000.

HEYLIGHEN, Francis. Building a science of complexity. *In: ANNUAL CONFERENCE OF THE CYBERNETICS SOCIETY*, London, 1988. **Proceedings** [...] London, 1988. Disponível em: <http://pespmc1.vub.ac.be/POSBOOK.html>. Acesso em: 17 jan. 2018.

HEYLIGHEN, Francis; CILLIERS, Paul; GERSHENSON, Carlos. **Complexity and Philosophy. Complexity, Science and Society**. Oxford, UK: Radcliffe, 2007.

HIGNETT, Sue; MCATAMNEY, Lynn. Rapid entire body assessment (REBA). **Applied ergonomics**, v. 31, n. 2, p. 201-205, 2000.

HOLLNAGEL, Erik; WOODS, David D. **Joint cognitive systems: foundations of cognitive systems engineering**. Flórida: CRC Press, 2005.

IIDA, Itiro; BUARQUE, Lia. **Ergonomia: projeto e produção**. São Paulo: Editora Blucher, 2016.

IIDA, Itiro; GUIMARÃES, Lia Buarque de Macedo. **Ergonomia: projeto e produção**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2016.

INSTITUTO DE BIOMECÂNICA DE VALÊNCIA. Disponível em: <http://www.ibv.org/en/>. Acesso em: 11 jan. 2018.

INTERNATIONAL ERGONOMICS ASSOCIATION. **Welcome to IEA**. Disponível em: www.iea.cc. Acesso em: 17 jan. 2018.

INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION. Disponível em: <https://ilostat.ilo.org/>. Acesso em: 17 jan. 2018.

IVANCEVIC, Vladimir G.; IVANCEVIC, Tijana T. **Complex nonlinearity: chaos, phase transitions, topology change and path integrals**. Berlin: Springer-Verlag, 2008.

JAPIASSU, Hilton. **Interdisciplinaridade e patologia do saber**. Rio de Janeiro: Imago, 1976.

KARSH, Ben-Tzion; WATERSON, Patrick; HOLDEN, Richard J. Crossing levels in systems ergonomics: a framework to support 'mesoergonomic' inquiry. **Applied ergonomics**, v. 45, n. 1, p. 45-54, 2014.

KARWOWSKI, Waldemar *et al.* The complexity of human performance variability on watch standing task. **Applied ergonomics**, v. 79, p. 169-177, 2019.

KIM, Joon Ho. Cibernética, ciborgues e ciberespaço: notas sobre as origens da cibernética e sua reinvenção cultural. **Horizontes antropológicos**, v. 10, n. 21, p. 199-219, 2004.

KLEINER, Brian M. Macroergonomics: analysis and design of work systems. **Applied Ergonomics**, Elsevier Science, v. 37, 2006.

KLEINER, Brian. M. Macroergonomic analysis of formalization in a dynamic work system. **Applied Ergonomics**, Elsevier Science, v. 29, n. 4, p. 255-259, 1998.

KONTOGIANNIS, Tom. A systems perspective of managing error recovery and tactical re-planning of operating teams in safety critical domains. **Journal of safety research**, v. 42, n. 2, p. 73-85, 2011.

KOUKOULAKI, Theoni. The impact of lean production on musculoskeletal and psychosocial risks: An examination of sociotechnical trends over 20 years. **Applied ergonomics**, v. 45, n. 2, p. 198-212, 2014.

KROEMER, Karl H.; GRANDJEAN, Etienne. **Manual de ergonomia**: adaptando o trabalho ao homem. Porto Alegre: Bookman Editora, 2005.

KUMAR, Shrawan. Theories of musculoskeletal injury causation. **Ergonomics**, v. 44, n. 1, p. 17-47, 2001. DOI:10.1080/00140130120716

LANDSBERGIS, Paul A.; CAHILL, Janet; SCHNALL, Peter. New systems of work organization: impacts on job characteristics and health. **Job Stress Network**, v. 1, n. 1, p. 1-10, 1996.

LE MOIGNE, Jean-Louis. **A teoria do sistema geral**: teoria da modelização. Tradução: Jorge Pinheiro. Lisboa, Portugal: Instituto Piaget, 1977.

LECLERC, Annette *et al.* Incidence of shoulder pain in repetitive work. **Occup. Environ. Med.**, v. 61, n. 1, p. 39-44, 2004.

LEITE, Maria Silene Alexandre. **Proposta de uma modelagem de referência para representar sistemas complexos**. 2004. 420 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/87521/211343.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 dez. 2017.

LEPLAT, J. Quelques aspects de la complexité en ergonomie. L'ergonomie en quête de ses principes. **Débats épistémologiques**, p. 57-76, 1996.

LEVESON, Nancy G. Applying systems thinking to analyze and learn from accidents. **Safety Science**, v. 49, n. 1, p. 55-64, 2011.

LI, Chenling *et al.* A hybrid human and organisational analysis method for railway accidents based on STAMP-HFACS and human information processing. **Applied ergonomics**, v. 79, p. 122-142, 2019.

LIKER, Jeffrey K.; MEIER, David. **O Modelo Toyota**: manual de aplicação. São Paulo: Bookman, 2007.

LIMA, Maria Letícia Souza Correia; ZAWISLAK, Paulo Antônio. A produção enxuta como fator diferencial na capacidade de fornecimento de PMEs. **Revista Produção**, São Paulo, v. 13, n. 2, p. 57-69, 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/prod/v13n2/v13n2a06.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2018.

LIN, Li; DRURY, Colin G.; KIM, S.-W. Ergonomics and quality in paced assembly lines. **Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries**, v. 11, n. 4, p. 377-382, 2001.

LÓPEZ ALONSO, Mónica; MARTÍNEZ AIRES, Maria; MARTÍN GONZÁLEZ, Esther. Análisis de los riesgos musculoesqueléticos asociados a los trabajos de ferrallas: Buenas prácticas. **Revista ingeniería de construcción**, v. 26, n. 3, p. 284-298, 2011.

MÁRQUEZ GÓMEZ, Mervyn; MÁRQUEZ ROBLEDO, Miguel. Factores de riesgo biomecánicos y psicosociales presentes en la industria venezolana de la carne. **Ciencia & trabajo**, v. 17, n. 54, p. 171-176, 2015.

MARTÍNEZ, Juan Carlos Cayán *et al.* Evaluación ergonómica y prototipo de mejoras en molestias generadas a nivel osteomuscular por una guadaña en la agricultura. **3C Tecnología**, v. 7, n. 4, p. 10, 2018.

MATEUS JUNIOR, José Roberto. **Modelo de gestão da ergonomia integrado as práticas da produção enxuta**: o caso de uma empresa de embalagem de papelão ondulado. 2013. 137 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

MATOS, Eliane; PIRES, Denise. Teorias administrativas e organização do trabalho: de Taylor aos dias atuais, influências no setor saúde e na enfermagem. **Texto & Contexto Enfermagem**, Florianópolis, v. 15, n. 3, p. 508-514, set. 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/tce/v15n3/v15n3a17.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2018.

MATTOS, Diego Luiz de. **Avaliação de um modelo de gestão de ergonomia baseado em práticas da produção enxuta**: enfoque no índice de absenteísmo em uma empresa de embalagens de papelão ondulado catarinense. 2015. 195 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

MATTOS, Diego Luiz de *et al.* Simulating the influence of physical overload on assembly line performance: a case study in an automotive electrical component plant. **Applied ergonomics**, v. 79, p. 107-121, 2019.

MEADOWS, Donella H. *et al.* **The limits to growth**. New York: Universe Books, 1972.

MEDEIROS, Rochele Reis; ALVES, Rafaela Cunha; RIBEIRO, Sidney Roberto. Turnover: uma análise dos fatores que contribuem para a decisão de sair da empresa dos colaboradores da Alfa Comércio Ltda. **Connexio**, v. 2, n. 1, p. 115-126, 2012.

MELNIK, Roderick V. N. Coupling control and human factors in mathematical models of complex systems. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 22, n. 3, p. 351-362, 2009.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Manual de Aplicação da Norma Regulamentadora nº 17**. 2. ed. Brasília, DF: TEM, SIT, 2002. Disponível em: http://www.ergonomia.ufpr.br/MANUAL_NR_17.pdf. Acesso em: 17 jan. 2018.

MOLINA, Carlos García. Riesgos asociados a la carga física en el sector comercio-alimentación, en el que pueden consultarse los puestos analizados, la información sobre los riesgos detectados, los factores de riesgo principales y las recomendaciones. **Revista de biomecânica**, n. 28, p. 29-32, 2000.

MONTEIRO, Luiz Henrique Alves. **Sistemas dinâmicos**. 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.

MONTMOLLIN, Maurice. **A ergonomia**. Lisboa: Instituto Piaget, 1990.

MOORE, J. Steven; GARG, Arun. The strain index: a proposed method to analyze jobs for risk of distal upper extremity disorders. **Am. Ind. Hyg. Assoc. J.**, v. 56, n. 5, p. 443-458, 1995. DOI:10.1080/15428119591016863

MORAES, Anamaria de; MONT'ALVÃO, Cláudia. **Ergonomia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: 2AB, 2000.

MORAY, Neville. "De maximis non curat lex" or how context reduces science to art in the practice of human factors. *In: HUMAN FACTORS AND ERGONOMICS SOCIETY ANNUAL MEETING. Proceedings [...]* Los Angeles, CA: SAGE Publications, 1994. p. 526-530.

MORINEAU, Thierry; FLACH, John M. The heuristic version of Cognitive Work Analysis: a first application to medical emergency situations. **Applied ergonomics**, v. 79, p. 98-106, 2019.

MOTTA, Fernando C. Prestes; VASCONCELOS, Isabella F. Gouveia. Situando o pensamento administrativo: as escolas de administração e o paradigma desenvolvimentista. *In: MOTTA, Fernando C. Prestes; VASCONCELOS, Isabella F. Gouveia. Teoria geral da administração*. São Paulo: Thomson, 2012. p. 1-30. Introdução.

MUÑOZ, Vanesa Zorrilla. **Trastornos musculoesqueléticos de origen laboral en actividades mecánicas del sector de la construcción. Investigación mediante técnicas de observación directa, epidemiológicas y software de análisis biomecánico**. 2012. 373 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica, Energética e dos Materiais) – Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de Los Materiales, Universidad de Extremadura, Extremadura, Espanha, 2012.

MURRELL, Hywel K. F. The Ergonomics research society the society's lecture 1969 given at the University of Bristol on 27th March. **Ergonomics**, v. 12, n. 5, p. 691-699, 1969.

NEUMANN, W. Patrick *et al.* Production system design elements influencing productivity and ergonomics: a case study of parallel and serial flow strategies. **International journal of operations & production management**, v. 26, n. 8, p. 904-923, 2006.

NEUMANN, W. Patrick; KOLUS, Ahmet; WELLS, Richard W. Human factors in production system design and quality performance – a systematic Review. **IFAC-PapersOnLine**, 2016.

NOGAREDA, Silvia; TORTOSA, Lourdes; GARCÍA, Carlos. Ergomater: método para la evaluación de riesgos ergonómicos en trabajadoras embarazadas. **Notas Técnicas de Prevención**, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, n. 785, p. 1-6, 2007.

NOLAN, Peter. Trabalho. *In*: OUTHWAITE, William; BOTTOMORE, Tom. **Dicionário do Pensamento Social do Século XX**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 1996. p. 773-774.

NORDANDER, C. *et al.* Gender differences in workers with identical repetitive industrial tasks: exposure and musculoskeletal disorders. **Int. Arch. Occup.**, 2008.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 3. ed. São Paulo: ADPDEA, 1998.

PARKER, Sharon K. Longitudinal effects of lean production on employee outcomes and the mediating role of work characteristics. **J. Appl. Psychol.**, v. 88, n. 4, p. 620-634, 2003. DOI:10.1037/0021-9010.88.4.620

PARSONS, K. C. Environmental ergonomics: a review of principles, methods and models. **Applied ergonomics**, v. 31, n. 6, p. 581-594, 2000.

PATTERSON, Robert Earl *et al.* System dynamics modeling of sensory-driven decision priming. **Journal of Cognitive Engineering and Decision Making**, v. 7, n. 1, p. 3-25, 2013.

PATTERSON, Robert Earl *et al.* System dynamics modeling of the time course of the recognition-primed decision model. **Journal of Cognitive Engineering and Decision Making**, v. 3, n. 3, p. 253-279, 2009.

PERROW, C. **Normal accidents: living with high-risk technologies**. Princeton: Princeton University Press, 1984.

PUTZ-ANDERSON, Vern. **Cumulative Trauma Disorders: a Manual for Musculoskeletal Diseases of the Upper Limbs**. London: Taylor & Francis, 1988.

RASHEDI, Eshan; NUSSBAUM, Maury A. Cycle time influences the development of muscle fatigue at low to moderate levels of intermittent muscle contraction. **J. Electromyogr. Kinesiol.**, v. 28, p. 37-45, 2016. DOI:10.1016/j.jelekin.2016.03.001

RASMUSSEN, J. Risk management in a dynamic society: a modelling problem. **Saf. Sci.**, v. 27, n. 183-213, 1997.

RIBEIRO, Ana Luiza Santos *et al.* Construção das demandas ergonômicas e modelagem: estudo de caso da atividade dos funcionários de uma lavanderia industrial em um hotel do RN. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 31., 2011, Belo Horizonte. **Anais [...]** Belo Horizonte, out. 2011. p. 1-13. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2011_tn_stp_138_877_18894.pdf. Acesso em: 17 jan. 2018.

RÍO, María Ángeles Villanueva; NICOLÁS, Rosario Verdú. Intervención ergonómica en un hospital: evaluación de la carga física en el sector hortofrutícola. Comparación de diferentes métodos de evaluación. **INSHT**, n. 31, p. 15-22, 2004.

RONG, Hao; TIAN, Jin; ZHAO, Tingdi. Temporal uncertainty analysis of human errors based on interrelationships among multiple factors: a case of Minuteman III missile accident. **Applied ergonomics**, v. 52, p. 196-206, 2016.

RUELLE, David. **Acaso e caos**. São Paulo: Unesp, 2000.

RUIZ ORTIZ, Manuel Ricardo *et al.* **Propuesta metodológica para la valoración de la usabilidad del puesto de trabajo del personal administrativo**. Tese (Doutorado) – Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2012.

SALAZAR, Karla Lizbeth Fimbres *et al.* Trastornos musculoesqueléticos en odontólogos. **BENESSERE - Revista de Enfermería**, Valparaíso, Chile, v. 1, n. 1, jul./dic. 2016.

SALMON, Paul M. *et al.* Fitting methods to paradigms: are ergonomics methods fit for systems thinking? **Ergonomics**, v. 60, n. 2, p. 194-205, 2017.

SANDLUND, Jonas *et al.* Differences in motor variability among individuals performing a standardized short-cycle manual task. **Human movement science**, v. 51, p. 17-26, 2017.

SAURIN, Tarcisio Abreu; GONZÁLEZ, Santiago Sosa. 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, 2013.

SAVI, Marcelo Amorin. **Dinâmica não-linear e caos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora E-papers, 2006.

SCOTT, Patrícia A. **Ergonomics in developing regions: needs and applications**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2009.

SHARMA, Sanjeev. An exploratory study of chaos in human-machine system dynamics. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans**, v. 36, n. 2, p. 319-326, 2006.

SHOAF, Cristian *et al.* Improving performance and quality of working life: A model for organization health assesment in emerging enterprises. **Human Factors and ergonomics in Manufacturing & Service Industries**, USA, v. 14, n. 1, p. 81-95, winter 2004.

SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2005. Disponível em: https://projetos.inf.ufsc.br/arquivos/Metodologia_de_pesquisa_e_elaboracao_de_teses_e_dissertacoes_4ed.pdf. Acesso em: 17 jan. 2018.

SILVA, Germannya D'garcia de Araújo. **Estudo comparativo entre três metodologias de intervenção ergonômica**: proposta preliminar para um modelo híbrido de intervenção. 2005. 280 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005. Disponível em:

http://repositorio.ufpe.br/bitstream/handle/123456789/5931/arquivo7479_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 4 nov. 2017.

SILVERSTEIN, Bárbara A.; FINE, Lawrence J.; ARMSTRONG, Thomas. J. Hand wrist cumulative trauma disorders in industry. **Occup. Environ. Med.**, v. 43, n. 11, p. 779-784, 1986.

SNOWDEN, Dave. A nova forma de ser simples. **Revista HSM Management**, v. 4, n. 39, p. 98-106, 2003.

SOBREIRO, Vinicius Amorim; ARAÚJO, Pedro Henrique de Sousa Leão; NAGANO, Marcelo Seido. Aplicação de sistemas dinâmicos na previsão de custos da produção. **Revista Eletrônica Produção & Engenharia**, v. 1, n. 1, p. 27-39, 2008.

SOOD, Deepti *et al.* Predicted endurance times during overhead work: Influences of duty cycle and tool mass estimated using perceived discomfort. **Ergonomics**, v. 60, n. 10, p. 1405-1414, 2017.

SOUZA, Francisco das Chagas; SILVA, Paula Senhudo. Trabalho do bibliotecário e os riscos potenciais a sua saúde integral: considerações em torno do campo da Ergonomia. **Em Questão**, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 127-146, jun. 2007.

SOUZA JUNIOR, Celso. **O uso da dinâmica de sistemas na simulação da estrutura do processo de desenvolvimento de produtos**. 2003. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.

SPEAR, Steven; BOWEN, H. Kent. Decoding the DNA of the Toyota production system. **Harvard Business Review**, Boston, v. 77, n. 5, p. 97-106, out. 1999.

STANTON, Neville *et al.* **Manual de fatores humanos e métodos ergonômicos**. 1. ed. Organização: Neville Stanton *et al.* Tradução: Samantha Stamatou. São Paulo: Phorte, 2016.

STANTON, Neville; SALMON, Paul M.; RAFFERTY, Laura A. **Human factors methods: a practical guide for engineering and design**. Farnham: Ashgate Publishing, 2013.

STERMAN, John D. Appropriate summary statistics for evaluating the historical fit of system dynamics models. **Dynamica**, v. 10, n. 2, p. 51-66, 1984.

STERMAN, John D. **Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world**. New York: McGraw-Hill, 2000.

TABAH, June; GERA, Maria Zita Figueiredo. Uma abordagem sistêmica da ergonomia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS, 7., 2011, Franca. **Anais [...]** Franca: Unifacef, 2011. p. 197-208. Disponível em: http://eventos.unifacef.com.br/cbs/2011/7CBS_LIVRO_ELETRONICO.pdf. Acesso em: 17 jan. 2018.

TAGUCHI, Genichi; ELSAYED, Ensayed A.; HSIANG, Thomas C. **Quality engineering in production systems**. New York: McGraw-Hill, 1990.

TEDESCHI, Marcos Antonio. Ergonomia: antropocentrismo versus teoria sistêmica. **Revista Fisioterapia Brasil**, Rio de Janeiro, p. 1-177, 2002.

THOM, René. **Structural Stability and Morphogenesis**. New York: Addison-Wesley, 1975.

TRACTENBERG, Leonel. A complexidade nas organizações: futuros desafios para o psicólogo frente à reestruturação competitiva. **Psicol. cienc. prof.**, Brasília, v. 19, n. 1, p. 14-29, 1999. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-98931999000100003&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 15 jan. 2018.

UHLMANN, Günter Wilhelm. **Teoria geral dos sistemas: do atomismo ao sistemismo, uma abordagem sintética das principais vertentes contemporâneas desta proto-teoria**. São Paulo: [s. n.], 2002. Disponível em: http://www.cisc.org.br/portal/biblioteca/teoria_sistemas.pdf. Acesso em: 17 jan. 2018.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Pós-graduação em engenharia de produção. **Ergonomia**. Disponível em: <http://ppgep.ufsc.br/ergonomia/>. Acesso em: 10 dez. 2017.

VALL RIBEIRO, Ivan Augusto; ANDRADE TERESO, Mauro José; FUNES ABRAHÃO, Roberto. Análise ergonômica do trabalho em unidades de beneficiamento de tomates de mesa: movimentação manual de cargas. **Ciência Rural**, v. 39, n. 4, 2009.

VASCONCELOS, Eduardo Mourão. **Complexidade e pesquisa interdisciplinar: epistemologia e metodologia operativa**. Petrópolis, RJ: Vozes, 2002.

VASCONCELOS, Renata Campos *et al.* Aspectos de complexidade do trabalho de coletores de lixo domiciliar: a gestão da variabilidade do trabalho na rua. **Gestão & Produção**, v. 15, n. 2, p. 407-419, 2008.

VIDAL, Mario Cesar; CARVÃO, José Mario; BONFATTI, Renato. Ação ergonômica em sistemas complexos. Proposta de um método de interação orientada em situação: a conversação. **Revista ação ergonômica**, v. 1, n. 3, 2011.

VIEIRA, Valter Afonso. As tipologias, variações e características da pesquisa de marketing. **Revista Fae**, Curitiba, v. 5, n. 1, p. 61-70, abr. 2002. Disponível em: http://www.fae.edu/publicacoes/pdf/revista_da_fae/fae_v5_n1/as_tipologias_variacoes_.pdf. Acesso em 22 ago. 2017.

VILELA, Elaine Morelato; MENDES, Iranilde José Messias. Interdisciplinaridade e saúde: estudo bibliográfico. **Rev. Latino-Am. Enfermagem**, Ribeirão Preto, v. 11, n. 4, p. 525-531, ago. 2003.

VILLAGE, Judy; SALUSTRI, Filippo Arnaldo; NEUMANN, W. Patrick. Using action research to develop human factors approaches to improve assembly quality during early design and ramp-up of an assembly line. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 61, p. 107-119, 2017.

WALKER, Guy H. *et al.* Quantum ergonomics: shifting the paradigm of the systems agenda. **Ergonomics**, v. 60, n. 2, p. 157-166, 2017.

WALKER, Guy H.; MANSON, Alastair. “Telematics, Urban Freight Logistics and Low Carbon Road Networks.” **Journal of Transport Geography**, v. 37, p. 74-81, 2014.

WIAZOWSKI, Boris Alessandro; SILVA, Carlos Arthur Barbosa da; LOURENZANI, Wagner Luiz. O uso de sistemas dinâmicos como ferramenta de aprendizagem. **Economia Rural**, v. 3, n. 10, 1999.

WILSON, John R. Fundamentals of systems ergonomics/human factors. **Applied ergonomics**, v. 45, n. 1, p. 5-13, 2014.

WILTSHIRE, Travis J.; STEFFENSEN, Sune Vork; FIORE, Stephen M. Multiscale movement coordination dynamics in collaborative team problem solving. **Applied ergonomics**, v. 79, p. 143-151, 2019.

WISNER, Alain. Por dentro do trabalho. Ergonomia: método e técnica. *In*: WORKSHOP GESTÃO INTEGRADA: RISCO E SUSTENTABILIDADE, 2., 1987, São Paulo. **Anais [...]** São Paulo, 1987.

WISNER, Alain. Questões epistemológicas em ergonomia e em análise do trabalho. *In*: DANILEU, François (Coord). **Ergonomia em busca de seus princípios**: debates epistemológicos. Tradução: Maria Irene Stocco Betiol. São Paulo: Editora Edigard Blücher, 2004.

WOODS, David; DEKKER, Sidney. Anticipating the effects of technological change: a new era of dynamics for human factors. **Theor. Issues Ergon.**, v. 1, n. 3, p. 272-282, 2000.

WOOD JUNIOR, Thomaz. Fordismo, Toyotismo e Volvismo: os caminhos da indústria em busca do tempo perdido. **Revista de Administração de Empresas**, São Paulo, v. 32, n. 4, p. 7-18, out. 1992.

WU, Jianguo. Hierarchy and scaling: extrapolating information along a scaling ladder. **Canadian journal of remote sensing**, v. 25, n. 4, p. 367-380, 1999.

ZEEMAN, Erik Christopher. **Catastrophe Theory**: Selected Papers 1972-1977. Reading, MA.: Addison-Wesley, 1977.

ZORRILLA-MUÑOZ, Vanesa; PETZ, Marc; AGULLÓ-TOMÁS, María Silveria. Análisis de factores de riesgo ergonómico con enfoque multi-metodológico: evaluando actividades de trabajadores en construcción de edificios. **DYNA-Ingeniería e Industria**, v. 94, n. 3, 2019.

ANEXO A – ITEM 17.1 E 17.2 DA NORMA REGULAMENTADORA 17**NR 17 - NORMA REGULAMENTADORA 17****ERGONOMIA**

17.1. Esta Norma Regulamentadora visa a estabelecer parâmetros que permitam a adaptação das condições de trabalho às características psicofisiológicas dos trabalhadores, de modo a proporcionar um máximo de conforto, segurança e desempenho eficiente.

17.1.1. As condições de trabalho incluem aspectos relacionados ao levantamento, transporte e descarga de materiais, ao mobiliário, aos equipamentos e às condições ambientais do posto de trabalho e à própria organização do trabalho.

17.1.2. Para avaliar a adaptação das condições de trabalho às características psicofisiológicas dos trabalhadores, cabe ao empregador realizar a análise ergonômica do trabalho, devendo a mesma abordar, no mínimo, as condições de trabalho, conforme estabelecido nesta Norma Regulamentadora.

17.2. Levantamento, transporte e descarga individual de materiais.

17.2.1. Para efeito desta Norma Regulamentadora:

17.2.1.1. Transporte manual de cargas designa todo transporte no qual o peso da carga é suportado inteiramente por um só trabalhador, compreendendo o levantamento e a deposição da carga.

17.2.1.2. Transporte manual regular de cargas designa toda atividade realizada de maneira contínua ou que inclua, mesmo de forma descontínua, o transporte manual de cargas.

17.2.1.3. Trabalhador jovem designa todo trabalhador com idade inferior a dezoito anos e maior de quatorze anos.

17.2.2. Não deverá ser exigido nem admitido o transporte manual de cargas, por um trabalhador cujo peso seja suscetível de comprometer sua saúde ou sua segurança.

17.2.3. Todo trabalhador designado para o transporte manual regular de cargas, que não as leves, deve receber treinamento ou instruções satisfatórias quanto aos métodos de trabalho que deverá utilizar, com vistas a salvaguardar sua saúde e prevenir acidentes.

17.2.4. Com vistas a limitar ou facilitar o transporte manual de cargas deverão ser usados meios técnicos apropriados.

17.2.5. Quando mulheres e trabalhadores jovens forem designados para o transporte manual de cargas, o peso máximo destas cargas deverá ser nitidamente inferior àquele admitido para os homens, para não comprometer a sua saúde ou a sua segurança.

17.2.6. O transporte e a descarga de materiais feitos por impulsão ou tração de vagonetes sobre trilhos, carros de mão ou qualquer outro aparelho mecânico deverão ser executados de forma que o esforço físico realizado pelo trabalhador seja compatível com sua capacidade de força e não comprometa a sua saúde ou a sua segurança.

17.2.7. O trabalho de levantamento de material feito com equipamento mecânico de ação manual deverá ser executado de forma que o esforço físico realizado pelo trabalhador seja compatível com sua capacidade de força e não comprometa a sua saúde ou a sua segurança.



Simulating the influence of physical overload on assembly line performance: A case study in an automotive electrical component plant

Diego Luiz de Mattos^{a,*}, Rafael Ariento Neto^{b,**}, Eugenio Andrés Díaz Merino^a, Fernando Antônio Forcellini^b

^a Production Engineering Department, Federal University of Santa Catarina (UFSC), Campus Universitário Trindade, CEP 88040-970, Florianópolis, SC, Brazil

^b Mechanical Engineering Department, Federal University of Santa Catarina (UFSC), Campus Universitário Trindade, CEP 88040-970, Florianópolis, SC, Brazil

ARTICLE INFO

Keywords:

Physical overload
System dynamics
Ergonomics
Human factors
Production line balance

ABSTRACT

Although the workstations of a Brazilian automotive electrical harness production line are set close to TAKT time (the production rate required to meet demand), factory performance is compromised regarding: (i) sick leaves due to occupational disease (105 employees last year) and (ii) a production rate at only 42% of capacity. Our objective was to simulate the performance of a production line balanced against physical overload by the addition of an extra workstation. Based on ergonomic work analysis, the study applied System Dynamics at the global observation stage to obtain a systemic interpretation of the factors involved in production line performance. According to the indicators, the alternative configuration reduced physical overload by 36%, which would result in a sick leave rate of 50.8 employees/year (51.6% lower than the current configuration), as well as a production rate at 99% of capacity (a 92.7% increase over the current configuration). We found that inducing physical overload allows the “workforce control” loop to govern the system, producing favorable results. We conclude that setting the work cycle overly close to TAKT time leads to overload, due to the shorter recovery times at the end of each cycle. Thus, it is necessary to seek a balance between efficiency gains through downtime reduction and the physiological recovery of workers.

1. Introduction

Due to recent advances in industrial technology, ergonomics is faced with increasingly complex environments and systems (Wood and Dekker, 2000; Dekker et al., 2013; Grote et al., 2014; Salmon et al., 2017). Salmon et al. (2017) argues that complexity has been implicit in work systems since the very beginning of the discipline, but the paradigm shift to a more systemic view has begun to expose the reductionism inherent in many ergonomics methods. Thus, a number of authors have discussed the importance of transposing fragmented forms of situation analysis to systemic diagnosis (Wilson, 2014; Karsh et al., 2014; Salmon et al., 2017; Walker et al., 2017; Guastello, 2017). Wilson (2012) and Karsh et al. (2014) urge that ergonomic study should always involve a systemic view, with any analysis or interventions considering the context as a whole.

Walker et al. (2017) point out that simple component-level behaviors can impact a system over time in a non-linear fashion. The dynamics of this behavior can produce counterintuitive effects. Thus, the system as a whole should be taken into account, since its behavior may

differ from the sum of the parts (Walker et al., 2017; Salmon et al., 2017). In fact, all activity analyzed in ergonomics occurs in a larger context, and it is important for the discipline to understand and explain such context, defining the boundaries of the system and how its elements interact (Moray, 1994; Wilson, 2014).

There is thus a demand for ergonomics methods and tools and human factor analysis that not only consider the constituent elements of a system but describe it as a whole. Simply put, the dynamics of human interaction with the work environment is relevant to understanding the environment's impact on workers (Dianat et al., 2016). The industrial environment involves a complex system that determines the non-linear behavior of its elements. According to Parsons (2000) and Dianat et al. (2016), the dynamics between worker and work environment can lead to a range of physiological responses that directly or indirectly affect health and productivity.

The typical production line, whose workforce follows a goal determined by the cycle time for each piece, can involve behaviors that are unpredicted by analysts, precisely due to the complexity of interacting factors. Manufacturers in the automotive industry chain

* Corresponding author.

** Corresponding author.

E-mail addresses: diegoelrigo@yahoo.com.br (D.L.d. Mattos), rafael.ariantoneto@gmail.com (R. Ariento Neto).

<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.08.001>

Received 30 June 2017; Received in revised form 30 June 2018; Accepted 3 August 2018
0003-6870/ © 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

exemplify the type of environment that involves such a level of complexity.

The focus of this study was on a Brazilian automotive electrical components company, whose structure allows a systemic analysis of such factors. Its production line was chosen for analysis due to its high rate of absenteeism due to work-related illness. According to the company's health and safety sector, there were 105 medical leaves last year. Moreover, contrary to process engineering size recommendations, the production line requires extra workers (usually up to three) to handle the pace of the work. However, even with these additional workers, the work-in-process tends to accumulate during the shift, resulting in production at less than half of the planned rate. Besides failing to achieve planned productivity levels according to the task subdivisions and job leveling planned by process engineering, it is not known how close to TAKT time the production line cycles can be set (i.e. by reducing breaks and/or increasing quotas) without causing physical overload in the workers. A lack of available engineering resources for appropriately measuring human factors in staff sizing was also observed. Thus, a systematic understanding of how these factors impact productivity is necessary, given that productivity is a key factor in an organization's sustainability.

As is known, shorter cycle times (i.e., near TAKT) can increase the incidence of worker injury and illness due to repetitive movement (Arenas et al., 2015; Saurin and Ferreira, 2009). This is because repeated stereotyped movements often result in muscle fatigue and represent a significant risk of cumulative trauma disorders (Silverstein et al., 1986; Stock, 1991; Hales and Bernard, 1996; Malchaire et al., 1996; Latko et al., 1999; Kumar, 2001; Bartlett et al., 2007; Sandlund et al., 2017). This also impacts worker motivation due to restricted autonomy, which is directly linked with job satisfaction (De Treville and Antonakis, 2006; Arenas et al., 2015). This can culminate in worker sick leave, which, as a number of studies have shown, affects production, creating a feedback loop resulting in either non-linear or counter-intuitive reactions within the system.

It was hypothesized that adding a workstation to the production line could increase the gap between cycle time and TAKT time (thus reducing the above-mentioned unfavorable outcomes). Therefore, the objective of this study was to test, in a controlled experimental environment, the effects an extra workstation would have on the behavior of the system. This intervention was considered the initial stage of an ongoing research project, since reducing worker sick leaves would help stabilize the behavior of the system. Stabilizing a system is a precondition for understanding it and determining how it can be transformed. Thus, one of this study's contributions is to combine method-time measurement and ergonomics methodologies, establishing a systemic vision of how the two disciplines are related. Moreover, being based on a practical case, this study directly contributed to managerial performance in a specific production line.

Ergonomic work analysis (EWA) and system dynamics were applied in a global activity observation stage to systemically interpret the factors involved in production line performance. The factors found to impact productivity were determined by constructing a model that represents the system's behavior and previews the resulting scenarios. After this analysis and in agreement with the above-cited authors, a systemic perspective provided insight into the problem, as well as the tools needed to practically and effectively apply this vision to the scenarios dealt with in ergonomics. System dynamics complements EWA in a way that is aligned with systems theory (von Bertalanffy, 1968) and is associated with control theory, which is a subject addressed by cybernetics (Ashby, 1999).

The rest of this paper is organized as follows: section 2 includes the materials and research methods used in this study; section 3 included the results, analysis of the simulations and recommendations; section 4 includes the discussion; and section 5 includes the conclusions and suggestions for future research.

2. Materials and methods

This section describes (i) the environment in which the study took place, (ii) the stages into which the study was divided for the sake of feasibility, and (iii) how the method was configured. Emphasis was placed on the details of the method since system dynamics was used in addition to the EWA traditionally used in ergonomic studies.

2.1. Study locale

This study was conducted at a Brazilian company that produces electrical harnesses for the automotive sector. The company has approximately 2000 employees who work in two shifts: 6:00 a.m. to 3:48 p.m., and 3:48 p.m. to 01:09 a.m. The selected sample was a harness production line with the highest rate of absenteeism due to work-related illness (105 sick leaves in the year prior to the study). This specific line produces a chassis harness, involves 14 workers, and has a daily production target of 260 pieces. The manufacturing process is limited by a predetermined production time for each piece, called TAKT time, which in this case is 121 s per harness. Each workstation performs a specific task according to its position on the line.

2.2. Steps

The study was divided into three stages consisting of:

1. Literature review and definition of the problem;
2. Practical application of the study (in situ);
3. Analysis of collected data and results.

2.3. Method

The method, based on EWA, serves as a complement to system dynamics analysis. System dynamics addresses complex contexts, even those involving abstract factors. After EWA, which can point out factors such as the physical overload of workers, was used to produce an initial diagnosis, system dynamics, with its versatile language for systemic comprehension and behavior simulation, was employed to further develop this diagnosis, since it involves more complete understanding of the production line's dynamics. The study's methods are illustrated in Fig. 1, which contextualizes the use of system dynamics.

2.3.1. Ergonomic work analysis

EWA is a transformative intervention method that reveals the determinant factors in work situations by distinguishing between the prescribed task and the actual work performed by employees (Guérin et al., 2007). Through the overlap of the prescribed task and the actual work, the mechanisms of labor regulation can be identified. According to Falzon (2004), labor regulation is a mechanism of control that the worker uses to compare results of a process with desired production in order to make adjustments according to the observed difference, which presupposes the existence of a dynamic system.

According to Guérin et al. (2007), EWA is subdivided into five essential stages: demand analysis, task analysis, activity analysis, diagnosis and recommendations. The present study included all these stages, although the diagnosis is presented as a summary, involving only the main observations. EWA was conducted between January and June 2016, resulting in the data collection that served as a basis for further diagnosis and system dynamics modeling.

2.3.2. System dynamics

System dynamics was developed by Jay W. Forrester at MIT in 1950 to address problems inherent in dynamic systems, assuming that the structure of the system generates its behavior. It should be pointed out that there is a difference between dynamic systems (systems with non-linear behavior) and system dynamics (set of tools and procedures for

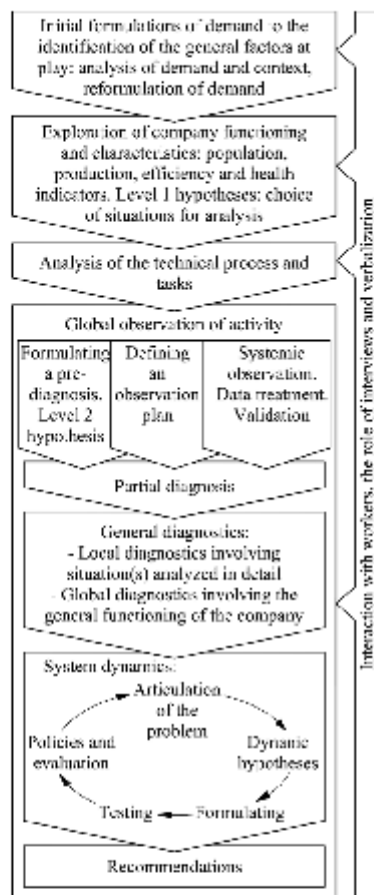


Fig. 1. Research method, including EWA stages and their integration with system dynamics. Source: Adapted from Guérin et al. (2007).

modeling and analyzing dynamic systems). System dynamics is related to the behavior of time-dependent systems and uses qualitative and quantitative models to describe them and understand which feedback loops govern their behavior (Coyle, 1996). By means of modeling, which is basically viewing the structure of causal relations between elements of a system, and simulation of the behavior of these structures along a time horizon, system dynamics seeks to understand the behavior and influence of the loops that form the subsystems, as well as to test decisions and make preemptory corrections in different contexts. This system dynamics analysis was divided into three phases:

- **Conceptual definition:** this phase describes the system, providing insight through the use of a conceptual (or interpretative or qualitative) model. In the present study, the system description is based on the EWA diagnosis. The conceptual model is called a causal loop diagram (CLD), which formalizes and delimits the context. This diagram outlines the relationships among the factors or variables of the system using a system of lines and arrows. The arrows indicate the direction of causality (who or what influences who or what). A

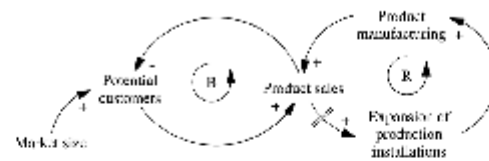


Fig. 2. Example of a causal loop diagram.

plus sign denotes a direct relation (i.e., a variation of the same type). As an illustration, Fig. 2 shows that as the number of potential consumers increases, product sales will also increase. If the number of potential consumers decreases, the same will occur for sales. A minus sign denotes an inverse relation. Thus, using the same example, if sales increase, the number of potential consumers decreases. Nevertheless, certain actions require more time than others to bring about a result. When this time is relevant to system operations, it is represented by a delay mark. A sample delay mark has been placed between “product sales” and its result “expansion of production installations”. The information in the system is driven by feedback loops. There are only two types of feedback loops: a positive loop is the systemic structure responsible for amplifying the system state and is denoted by the letter R (reinforcement); a negative loop provides balance to the system and is denoted by the letter B (balance).

- **Structural description:** this phase provides concrete detail to the previously-developed conceptual framework by applying structural and mathematical (i.e. quantitative) modeling. This model is called a stock and flow diagram (SFD) and includes all the necessary and sufficient constants and variables for a mathematical description of the system's relationships. This diagram provides a thorough analysis of systems for which common sense understanding has become insufficient. Fig. 3 provides an example of an SFD.
- **Quantification and projection:** Based on stock and flow diagram, this phase involves mathematical calculations to produce computational simulations in specific system dynamics software. The system's variables and constants are configured and the behavior of system state indicators is graphically visualized within the framework of a simulation. Thus, the system state indicators can be defined and their behavior predicted through the use of different values for each variable in a controlled trial environment. We used Vensim® software (Ventana Systems Inc., Harvard, MA, USA) for this purpose.

3. Results

First, the EWA results were demonstrated objectively. These results formed the basis for the CLD and are thus presented systematically, including explanation of how EWA led to a diagnosis of the system's feedback loops. Subsequently, some these results will be linked with worker health and production. The EWA data will then be used to model and simulate results in conjunction with system dynamics.

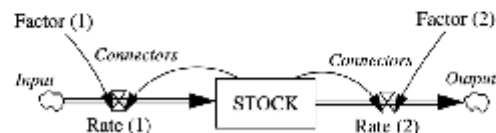


Fig. 3. The language of stock and flow diagrams for structural modeling. Source: Sterman (2000).

3.1. Initial diagnostic

The participating company stipulated that the analyzed problem should be absenteeism due to illness/injury, since it results in line productivity losses (level 1 hypothesis). Regarding the production line's technical process and tasks, the work is divided into pre-assembly, assembly (routing, splicing, piping and tapping), dimension testing and electrical testing. The harness moves clockwise on the conveyor system from pre-assembly to final testing. The workers stand side by side, facing the conveyor belt, and move along it as they complete their tasks. Due to task subdivision, each worker's function is limited to an isolated part of the product, repeating the procedure as soon as a piece is completed. This setup creates a situation of interdependence, since for one worker to begin his task the immediately preceding one must have completed his.

The features of the individual workstations vary according to the section of the harness that the worker processes. Such task subdivision entails stereotyped movement, accentuated by the short rapid work cycles required to meet TAKT time. The pressure exerted by the line speed and the demands of the line leader can overwhelm workers. Increases in stereotyped movement lead to greater muscular demand, which reduces physiological recovery, since the tasks generally involve the same muscles in every action. This can result in worker absenteeism, and in the participating company this is the major reason for sick leaves: medical reports frequently indicate muscle disease due to repetitive upper limb effort. Sick leaves due to work-related illness increase the burden on the system. In fact, absenteeism can do double damage to line productivity: on the one hand, the same quota must be met by fewer workers, which usually has negative effects on efficiency; on the other hand, producing more with fewer workers increases the work demand on those who remain on the production line. Without necessary interventions by the management this becomes a feedback loop, since the physical overload that leads to sick leaves only increases as more workers miss more shifts.

The lost knowledge and skills of absent workers is also felt, since each activity requires a certain amount of practice to effectively meet individual goals. Therefore, when one or more workers are absent and it is necessary to relocate workers from other lines, the loss of skill results in lower productivity. This creates another loop which further exacerbates physical overload, since the work-in-process requires a faster pace to be completed. It should be pointed out that the greater the overload, the lower the worker production rate, since muscular fatigue prevents them from maintaining the same pace as under normal, non-fatiguing conditions.

The mechanization of movement by stereotypy and short rapid cycles, although beneficial for productivity, can stress the muscles used to perform these movements. The company provides no pauses for muscle recovery other than snack breaks and the company fitness program. The pace is intense, requiring movement throughout the shift, although extreme trunk or upper limb postures are not required for long periods. Additionally, the break schedule does not obey the norm of 10 min rest per 50 min worked recommended by authors such as Colombini et al. (2005). With the accelerated production time, there is little room for the worker to regulate his work, being subject to the minutiae of the process.

When production is delayed because the workers cannot keep pace with the conveyor, the only option is to stop it. However, when production halts, downtime indicators occur. Nevertheless, because the management demands efficiency, production rarely stops, except for extreme circumstances, such as quality problems, mechanical failures, large backlogs, emergencies, accidents and previously-scheduled breaks. To catch up, line leaders reallocate workers from other lines to normalize the workflow, although this occurs only when there is a visible delay. Since such forms of regulation are required, it should be inferred that an organizational problem exists. Moreover, when other lines are behind schedule due to absenteeism or increased demand and

cannot spare workers, the remaining workers in the harness line must increase their pace even more to normalize the work-in-process. Workers often use break times to catch up on production, thus sacrificing the benefits of physiological recovery during their shift. In the event of physical overload and sick leave, workers lose efficiency in the process, reducing line output which, according to the manager, reaches on average 58% below the expected production rate.

The consequences for these workers are illness and injury. Adherence to TAKT time, the work-in-process and the leaders' demands result in physical overload, which culminates in occupational diseases, especially musculoskeletal diseases due to fatigue and repetitiveness. It should be pointed out that with illness and absenteeism, other problems can occur, such as lower motivation and work satisfaction.

With respect to productivity, when physical overload and absenteeism occur, workers lose efficiency, which decreases the efficiency of the line. There are financial and social losses at this point, since maintaining a production line whose demand leads to overload, illness and absenteeism can damage the company's public image, according to Taguchi et al.'s (1990) principles of social quality.

These data indicate that there are feedback loops that shape the structure of the system. After understanding the work and surveying the factors that determine such a feedback structure, each observed loop was contextualized within the system in a CLD. This is the first step of system dynamics modeling, and serves as a basis for the next step, which adds further detail to this diagram so that its relationships can be represented with equations.

3.2. Behavior modeling and simulation

The CLD was constructed using the information collected from the EWA. The factors of influence that emerged in the diagnosis were identified and organized as forces acting on the line, both as deficiencies and means of control. Thus, the systemic context of the conceptual model was constructed.

In the systemic context, closed-loop structures (information feedback loops) can be identified. These loops are interconnected by the relationships between the variables common to loops. The complete CLD is shown in Fig. 4. However, to facilitate understanding, these loops are described individually below.

First, regarding the "production line workforce" control loop, it was observed that task subdivision directly influenced workstation activity duration in an inverse relationship: the more subdivided the task, the greater each worker's skill and the less time it took to accomplish it. Activity duration is directly related to cycle time, which in turn affects line productivity. Productivity, on the other hand, is directly influenced by individual worker output, and with increased line productivity the amount of work also increases. Increased work-in-process requires more workers to meet the demand, which leads to greater worker reallocation. Finally, greater worker reallocation creates a greater availability of workers for the production line, which increases its productivity.

Another loop that is part of this context is shown in Fig. 4: "the influence of physical overload on output". It was observed that productivity is associated with stereotyped movement, which could be a consequence of excessive task subdivision. Thus, the greater the stereotyped movement, the greater the physical overload and the lower the worker output. If a worker's output drops, line productivity decreases. Cycle time also influences line productivity: the closer the cycle is adjusted to TAKT time, the lower the workers' physiological recovery rate and the greater the physical overload, which leads to lower individual output and line productivity.

The influence of physical overload on the incidence of work-related illness is also described in Fig. 4. The loop involving "influence of physical overload on illness incidence" is influenced by adherence to the physiological recovery index and by cycle time. With respect to the physiological recovery index, the lower the adequacy, the greater the physical overload, which can lead to increased incidence of work-

sick leave”). Variable factors such as “adaptation time” (which depends on the production rate and the “proportion of knowledge subdivision”) and “maximum output” (which depends on the “production line workforce size”) were also entered from production line records. Approximate values were ascribed to factors that had the greatest degree of uncertainty (“physical overload per unit” and “influence of TAKT time adjustment on physical overload reduction index”). The simulation was performed and the values of the latter factors were refined until Scenario 1 replicated the problem as originally described. Thus, by reproducing the problem, consistency between system behavior and the constants with the highest degree of uncertainty is obtained. Such values can then be maintained while prospecting new conditions for the system.

Scenario 2 involved a new configuration for the input variables (“cycle time” and “task subdivision index”). To obtain these values, the process engineering team was asked to calculate the production line’s cycle time with the addition of an extra workstation.

In both scenarios, Vensim was configured to use an Euler-type integration method. The integration interval (dt) was set to 1/5 of the lowest constant of the model for each scenario, as specified by Forrester (1961). For both scenarios the simulation horizon was set to 8 h (one work shift), since the cycles describe short-term effects related to the actions of the line leader (i.e., perception of the system state and corrective actions). Thus, the recommendations are directed to management in the short term. In addition, it should be noted that the initial “work-in-process” indicator value in both scenarios was equated with “desired work-in-process” and the indicator “production line workforce size” was equated with “desired staff size”. These settings put the models’ initial behavior in close proximity to equilibrium, making it easier to diagnose behavior. Additionally, the “physical overload” indicator was set to zero, given that there is no physical overload at the beginning of the shift. The “sick leave” indicator was also set to zero to consider an ideal initial state. Moreover, the “current knowledge” indicator was set at 100%, given that current production line workers (with no absences or substitutes) are fully aware of the task. Finally, an important restriction on worker allocation was added. Since in the current production line configuration (Scenario 1), the line leader can reallocate up to three workers without compromising other company processes, this same allowance was maintained while behavior prospecting for Scenario 2.

The simulation was performed according to protocol. The incidence rate of work-related illness is shown in Fig. 7. This rate tends toward equilibrium at 0.03646 workers per hour, which is equivalent, in this simulation horizon, to the 105 medical leaves registered in the last year.

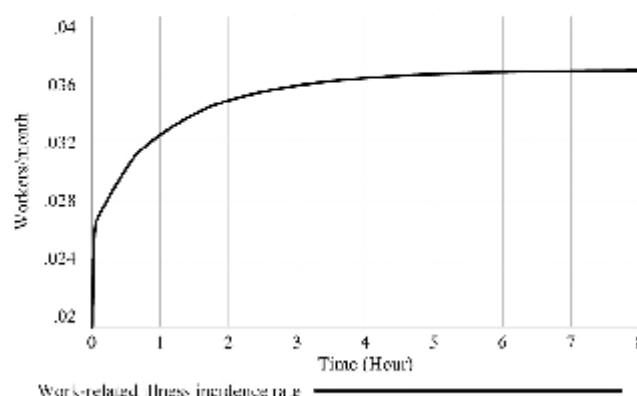


Fig. 7. Work-related illness incidence rate.

The model also involves a lower production rate than expected according to line size. The 58% gap between current and expected production rates corresponds to that described by the line leader. The production rate behavior for Scenario 1 is shown in Fig. 8.

Based on the presented behaviors, the configuration and adjustment of the constants and variables aligned the model with the problem. This, combined with analysis of the behavior of the other indicators, the mechanism responsible for the performance gap became apparent.

Importantly, according to these indicators physical overload increased to around 57.8% and then plateaued. This behavior is shown in Fig. 9. Thus, physical overload is directly related to production line output. For this reason output decreased rapidly, stabilizing at around 42.2%, as shown in Fig. 10. The simulated behavior indicates that line output is almost exclusively influenced by physical overload. Thus, the low output was due to physical overload from stereotyped movement. This is the function of the feedback loop “influence of physical overload on output”.

The systemic action of physical overload is also reflected in the rate of sick leaves due to work-related illness. Workforce control through worker reallocation should compensate for losses due to medical leaves and keep production high. In this scenario, the need for workers leads to a gradual increase in reallocation up to the permitted maximum. Fig. 11 shows the evolution of the production line workforce over the course of a shift. New workers are allocated at the beginning of the shift, as well as three additional workers by the end of the shift.

Thus, although physical overload reduces the production rate, the allocation of additional workers is insufficient to meet the demand created by absences on the work-in-process. That is, the workforce control procedures are unsuccessful in bringing production rates to the desired level.

Therefore, the system analysis as configured in Scenario 1 shows that the “influence of physical overload on performance” loop dominates system behavior. The action of this loop, combined with the “influence of physical overload on work-related illness incidence” loop, prevents the “production line workforce control” loop from keeping productivity close to target level.

As a comparison with the original scenario, the system behavior in Scenario 2, which considers an additional workstation, will be presented and discussed below. With the new task division, the cycle time becomes 0.0228 h (79.7% of TAKT time).

It was observed that although the lower cycle time led to a lower production rate, the systemic effect of this reduction also reduced work overload. Fig. 12 shows the considerable reduction in human overload, which stabilized at 21.8%. This is also reflected in the work-related

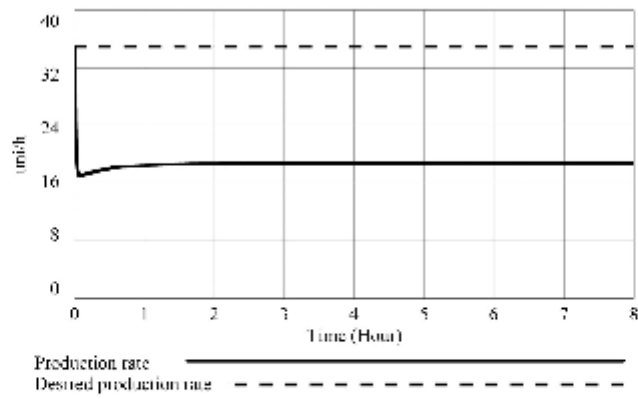


Fig. 8. Current and desired production rates.

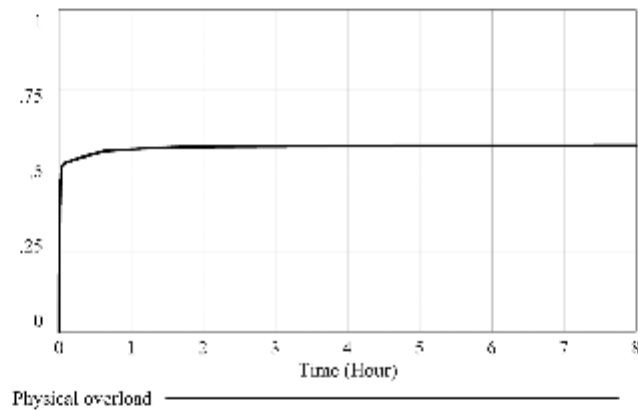


Fig. 9. Physical overload.

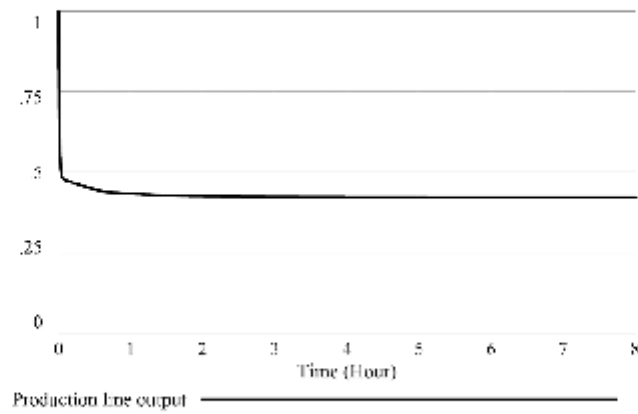


Fig. 10. Production line output.

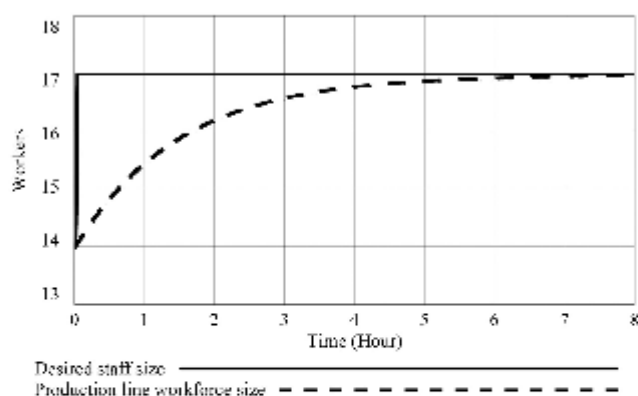


Fig. 11. Desired staff size and production line workforce size.

illness incidence rate due to stereotyped movement. The model predicts that this rate will fall to 0.01764 employees/h, which is equivalent to 50.8 employees per year (Fig. 13). Thus, this new condition represents a 51.6% reduction in work-related sick leaves.

The systemic effect of reducing physical overload also led to increased line output. Fig. 14 shows that production line output stabilized at 78.2% in this scenario.

Thus, two aspects of the system are favored in this configuration. The lower work-related illness rate resulted in a lower demand for re-allocated workers, while the increased output made the system more effective at completing the work-in-process. This would allow the line to operate with a workforce very close to the originally designed size. The model predicts 15.3 workers for ideal operation, as shown in Fig. 15.

Therefore, the “production line workforce control” loop is quite relevant to the general behavior of the system. By allocating workers, workforce control acts to correct the discrepancy between the current and desired production rates. In Scenario 2, workforce control led to a production rate of 99% of the desired value. This condition represents a 92.7% improvement over Scenario 1 in units produced per hour.

Of course, the “influence of physical overload on output” and the “influence of physical overload on illness incidence” loops are also at

work in Scenario 2, but to a lesser extent than in Scenario 1. Furthermore, there is still a small shortfall compared to the desired state. However, the dominant behavior comes from the “workforce control” loop, which is the fundamental in the more favorable prospected behavior.

It should be pointed out the data on worker absences used in previous simulations are mean values. The actual data present discrepancies that can be statistically analyzed to establish upper and lower values and standard deviation. Then, using these values we can more closely approximate the actual results, performing a “sensitive analysis”. This analysis serves as an additional test of the model’s sensitivity to change in some of its parameters.

For this analysis we used the Monte Carlo simulation in Vensim, assigning random values to a factor but respecting the statistical characteristics of the variation. The factor “mean time until work-related illness” was selected for testing since it had the highest standard deviation among the collected data and due to its direct relation to the absenteeism problem that motivated this study. The software was configured to use a normal Gaussian distribution pattern.

There was up to a 75% probability that the real production rate values were close to the prospected value without applying this test. Fig. 17 shows that until the fourth hour of production, there is greater

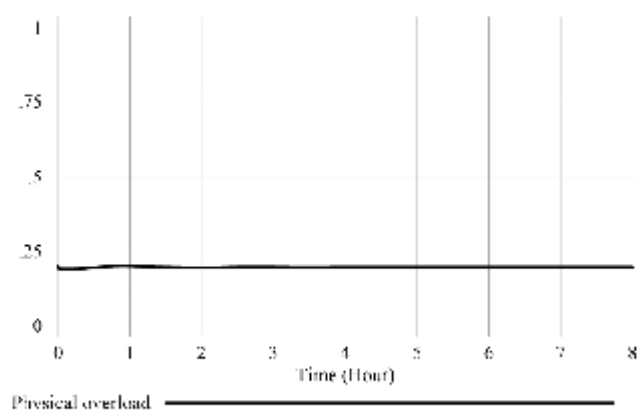


Fig. 12. Physical overload for Scenario 2.

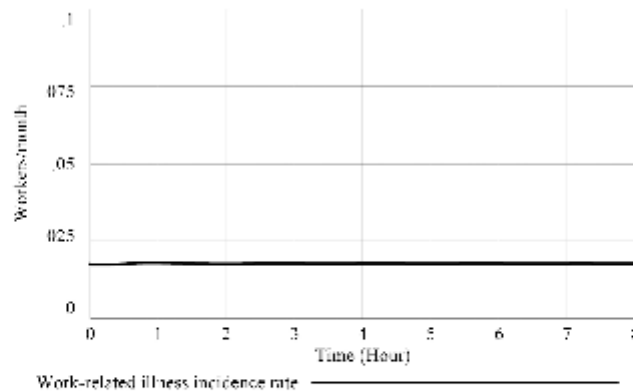


Fig. 13. Work-related illness incidence rate for Scenario 2.

variability in the production rate, indicated by the oscillatory pattern. During this simulation period, the production rate values at 100% probability of occurrence were between 33.46 and 35.64 units/h. After 4 h of operation, it was observed that the greatest influence of variability was on illness occurrence, reflected in the below-average production rate values. The dispersion in this direction leads to a variation in the production rate, and real values for this rate (at 100% probability) were between 34.5 and 34.75 units/hr. This indicates that the higher the standard deviation regarding illness/injury incidence, the greater the probability that the production rate values will be below the estimated average.

3.4. Simulation analysis and recommendations

In the previous section, the behavior prospected for both scenarios was explained by the behavior of the indicators. It was thus possible to determine which loop acted with greater intensity. The following discussion and recommendations are based on observations about the conditions that determine the dominance of a given feedback loop on system behavior.

First, the behavior of this production line is determined by the "influence of physical overload on output", the "influence of physical

overload on illness incidence" and the "workforce control" loops. As these loops lead the system to equilibrium (they are self-balancing loops), physical overload will also stabilize. Even in an unfavorable scenario, physical overload will stabilize due to system self-regulation.

More favorable system behavior is obtained when the "production line workforce control" loop becomes more relevant. However, identifying the state of the production line (by the amount of work-in-process) and the measures taken to correct it (by allocating human resources) can create oscillations in the system, as can be seen in Fig. 16. Such oscillations are detrimental, since they can lead erroneous interpretations of the actual state of the production line. The model's prediction of 15.3 workers, the result of a continuous simulation over time, means that the line will operate normally with 15 workers, although an additional worker will sporadically be required to help process the small accumulation of work-in-process. To reduce system oscillations, the line leader should be positioned with a point of view that allows allocations to be anticipated. Since increased work-in-process will lead to closer workstation placement, the line leader would be best positioned toward the input end of the line, as shown below in Fig. 18.

A second recommendation, regarding line configuration or, specifically, task division, is that the "influence of specialization on work-related illness incidence" and "influence of specialization on output"

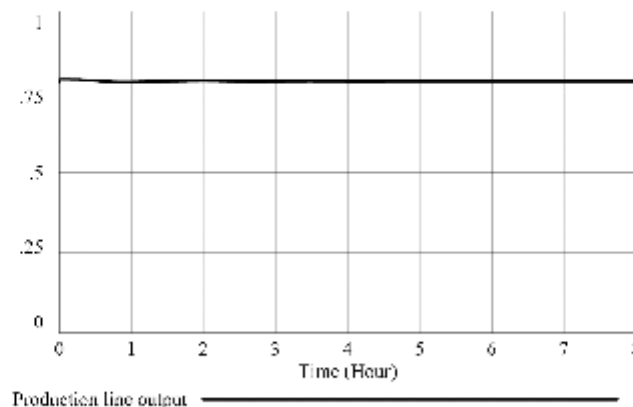


Fig. 14. Production line output for Scenario 2.

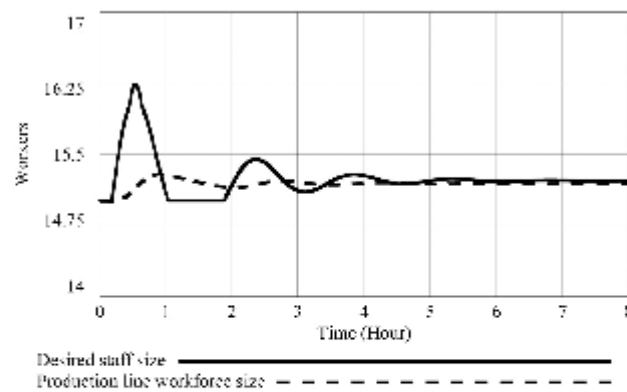


Fig. 15. Desired staff size and production line workforce size for Scenario 2.

loops do not significantly influence system behavior. Thus, in an effort to further reduce physical overload from stereotyped movement (given its effects on system behavior), a system of task alternation is suggested. In such a system, workers would periodically perform different tasks, breaking the stereotyped activity pattern of the current configuration.

4. Discussion

This section contextualizes the results of our case study in the current literature to highlight their implications regarding physical overload in production systems. Simulation along a time horizon allowed variations in physical overload behavior to be observed and enabled a more precise understanding of the change/transition period between two working conditions: (i) an initial situation and (ii) the results of an intervention.

It is important to point out that a number of studies have analyzed the effects of physical overload, repetitive movement and risk exposure among workers, proposing various explanations and methods for evaluating this phenomenon (e.g. Silverstein et al., 1986; Putz-Anderson, 1988; Moore and Garg, 1995; Colombini, 1998; Kumar, 2001; Rashedi and Nussbaum, 2016; Greene et al., 2017; Sandlund et al., 2017). Other studies have associated physical overload with different production system factors, such as pacing, quality and

satisfaction (Landsbergis et al., 1996; Neumann et al., 2006; Koukoulaki, 2014; Arezes et al., 2015; Sood et al., 2017). It has been shown that factors in the relationship between workers and the work environment which result in physical overload are important for production quality and efficiency (Lin et al., 2001; Vilagge et al., 2017).

By analyzing the sample system using empirical data from technical reports, management and EWA, this study found quantitative correlations between factors that had been previously reported in the literature. Thus, simulations could be run to demonstrate how these relationships interact in prospective scenarios.

The results of these simulations indicated that physical overload occurred among workers when attempting to catch up with accumulated work-in-process on the line, which corroborates Lin et al. (2001) statement that in most assembly line production tasks with a constant lead time, any production variability between the workstations will lead to physical overload in some workers and idleness in others. The accelerated pace required to complete the work-in-process increases the repetitiveness of the task in a context of stereotyped movement, which exposes workers to the risk of injury from cumulative trauma (Colombini, 1998; Kumar, 2001; Koukoulaki, 2014; Sandlund et al., 2017).

Regarding the increased work-in-process, EWA revealed that to achieve company goals, despite the less-than-ideal conditions,

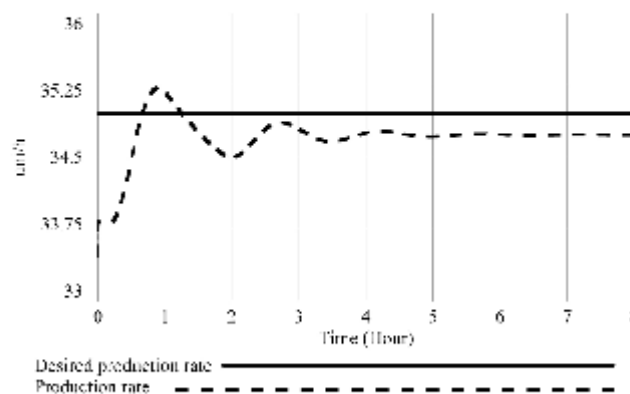


Fig. 16. Production rate and desired production rate for Scenario 2.

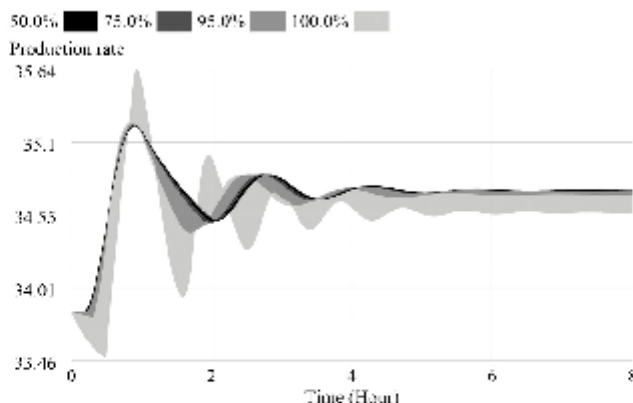


Fig. 17. Sensitivity analysis of the variable "production rate" for Scenario 2.

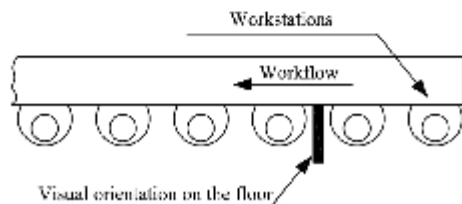


Fig. 18. Recommended line leader visual orientation.

alternatives were sought, such as (i) managerial decisions to redirect workers from another line to help reduce backlog, and (ii) worker decisions to forego breaks to help reduce backlog. Similar work regulation processes have been described by authors such as Guérin et al. (2007), and their identification is relevant for transforming the system. The work regulation process is, in this case, part of a larger homeostasis mechanism within a system seeking to counter an external imbalance, a process that has also been described by Ashby (1999) with regard to cybernetics.

Regarding physical aspects, Silverstein et al. (1986) define repetitive tasks as involving repetitive or stereotyped movements performed more than four times per minute or any work cycle of less than 30 s. However, even in cycles longer than 30 s, an activity could be considered repetitive if same movement occupied more than 50% of the cycle. To avoid worker illness/injury due to repetitive or stereotyped movements, the relevance of breaks as physiological recovery time has also been repeatedly pointed out (Putz-Anderson, 1988; Moore and Garg, 1995; Colombini et al., 2005). The activity analyzed in this study has been shown to cause musculoskeletal disorders in the upper limbs due to its repetitive nature and stereotyped movements (Lederc et al., 2004; Nordander et al., 2008; da Costa and Vieira, 2009). This corroborates the model's prediction about the incidence of occupational diseases due to repetitive or stereotyped movements, since both arise from the increased pace necessary to catch up with backlogged work-in-process in an imbalanced line. We point out that redesigning the production line to make it more suitable for workers resulted in a more balanced line with little physical overload beyond that which is found under normal circumstances. Bringing a system closer to equilibrium can serve as an initial step in a production line's complete transformation process.

Increasing the work rhythm to meet the demand reflects another

relevant problem: the pace imposed by TAKT time may prevent work regulation by constricting worker autonomy. The pace imposed in lean or mass production systems can directly impact motivation and job satisfaction, since workers experience less control over their activity (Parker, 2003; Dul and Neumann, 2009; Arezes et al., 2015). The model not only points out these aspects by forecasting worker illness/injury and absenteeism, but also indicates their effects on productivity and quality, which corroborates Neumann et al. (2016).

Our study provides two main contributions: (i) an understanding of physical overload among production line workers and how this overload can occur in a complex systemic context, including its effects on important factors within a production system, and (ii) a systemic and quantitative method for addressing ergonomics issues and human factors in industrial environments that involve non-linear behavior due to the high degree of interaction between the various factors.

The proposed method is based on the premise that the dynamic issues permeating the relationship between workers and the work environment must be understood in order to improve this relationship (Dianat et al., 2016). The non-linearity implicit in these systems impedes prediction of their behavior (Perrow, 1984) and complicates decision-making about practical interventions. This is because such decisions are tied to medium- and long-term uncertainty, which could culminate in counter-intuitive effects and the failure of proposed interventions (Perrow, 1984; Gilliers, 1999; Woods and Hollnagel, 2005; Heylighen et al., 2007). This study considered such factors as a way of prospecting specific behavior along a time horizon, with system complexity determined through loops of information feedback, resulting in interventions that may be less prone to medium- and long-term uncertainties.

5. Conclusions

There is a tradeoff between engineering's idea of maximum efficiency (i.e. a work cycle close to TAKT time) and physical overload, which can impact both worker health and general line productivity. This demonstrates that considering human-related factors (such as work overload) in the design and configuration of a production line can have a positive impact on performance. The use of tools and models that consider human factors and relate them systematically to productivity indicators can be useful not only for determining staff size, but to clarify counterintuitive issues for management, as in the case of the additional workstation. From a systemic point of view, this could stimulate consideration of human factors in organizational culture and resonate throughout an organization's management practice.

Although setting the work cycle close to TAKT time can, from a production point of view, reduce downtime and result in efficiency and productivity gains, from a human-factor point of view, such a pace can result in overload, as reflected in the lower worker recovery times allowed at the end of each cycle. However, when the human factor is considered in production line sizing, pauses between the completion of one piece and the beginning of the next could be counted as worker recovery time, rather than mere downtime. This implies a search for balance that would satisfy both the workforce and production goals. Understanding the limit between unproductive time and rest can be strategic in determining the overall size of a production line since, in practice, reducing physical overload can stimulate better performance and avoid decreased productivity due to absences.

In the model constructed for this study, production line sizing that did not consider systemic factors caused a feedback loop that influenced system behavior, resulting in a production rate of only 42% of capacity. Alternative sizing produced a “workforce control” feedback loop that brought the system under control (compensating for losses due to illness/injury) and was responsible for a 92.7% production increase. The effects of physical overload on production presented a first-order feedback loop, resulting in an oscillating production rate in the initial period of line operation.

The use of system dynamics after EWA diagnosis allowed: (i) the systemic contextualization of factors pointed out in the initial diagnosis; (ii) the quantification of these factors through a mathematical description of their interrelationship and (iii) the exploration of scenarios for interpreting the behavior of non-linear relationships. Specifically, computer simulations create a controlled experimental environment in which alternative configurations can be explored quickly and without the risks of a pilot project.

However, due to the management's recommendation that line leaders not stop and restart the line to catch up on work-in-process, this

study limited itself to scenarios involving the allocation of additional workers. The study was also limited by the fact that the simulated Scenario 2 results could not be compared with a real-world application. We should also point out that the overload addressed in the study does not include cognitive or mental aspects.

Furthermore, since the Scenario 2 simulation resulted in a positive change in line performance, it should be pointed out that this model could be expanded by verifying additional tradeoffs, such as the final cost-benefit ratio of having an extra worker on the line. However, it is emphasized that such an expanded model should also address the social impact of improving financial indicators to the detriment of worker health, given that sick leaves burden not only the company, but also the government agencies that bear their costs.

Other recommendations for future research include expanding the model to include subjective factors, such as worker motivation and job satisfaction, enlargement and enrichment. This study could be redesigned to achieve a complete ergonomic transformation of the production line. To reinforce the perspective proposed in this study, we recommend applying these methods to different industry sectors.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), the Center for Design Management and the Universal Design Laboratory of (NGD-LDU/UFSC) and the of Engineering Group on Products, Processes and Services of the Universidade Federal de Santa Catarina (GEPPS/UFSC), who made this study possible. We would also like to thank the reviewers, whose comments led to substantial improvements in the manuscript.

Appendix A

Presentation of model equations.

Label	Equation	Unit
Work in process (WIP)	$WIP = \int_0^t [PSr - Pr]dt + WIP_0$	units
Production rate (Pr)	$Pr = \left(\frac{MP}{\text{Cycle time}} \right) \cdot PO$	units/h
Maximum production (MP)	$MP = f(PWF)$	units/h
Production line output (PO)	$PO = ISOi \cdot IOOi$	
Influence of specialization on output index (ISOi)	$ISOi = CK/100$	
Influence of physical overload on output index (IOOi)	$IOOi = 1 - Of$	
Production start rate (PSr)	$PSr = DPSr \text{ for } f(x) \geq 0$	units/h
Desired production start rate (DPSr)	$DPSr = DPr + WIPaj$	units/h
Adjustment for work in process (WIPaj)	$WIPaj = \frac{(DWIP - WIP)}{\text{WIP adjustment time}}$	units/h
Desired work in process (DWIP)	$DWIP = DPr \cdot \text{Cycle time}$	Units
Desired production rate (DPr)	$DPr = \frac{1}{\text{Takt time}}$	units/h
TAKT time adjustment index (TAI)	$TAI = \frac{\text{Cycle time}}{\text{Takt time}}$	
Influence of TAKT time adjustment index on required physical overload reduction time (IOR)	$IOR = f(TAI)$	
Time required to reduce physical overload (ORt)	$ORt = PRt \cdot IOR$	h
Physiological recovery time (PRt)	$PRt = \text{Takt time} \cdot 0.166$	h
Physical overload rate (Or)	$Or = \text{Overload per unit} \cdot Pr$	Physical overload d/h
Physical overload reduction rate (ORr)	$ORr = \frac{Of}{ORt} \text{ for } f(x) \geq 0$	Physical overload d/h
Physical overload factor (Of)	$Of = \int_0^t [Or - ORr]dt + Of_0$	Physical overload

Influence of physical overload on mean time until work-related illness (IWI)	$IWI = 1 - Cf$	
Required production line staff size (RWF)	$RWF = f(WIP)$	workers
Desired staff size (DWF)	$DWF = f(RWF, \text{Maximum staff that can be allocated to the production line})$	workers
Adjustment for production line workforce (WPa _j)	$WPa_j = \frac{(DWF - RWF)}{\text{Interval reallocation time}}$	workers/h
Reallocation rate (in) (RrI)	$RrI = f(WPa_j)$	workers/h
Reallocation rate (out) (RrO)	$RrO = f(WPa_j)$	workers/h
Work-related illness incidence rate (WIr)	$WIr = \frac{PWF}{(\text{Mean time until work related @ illness} + IWI)}$	workers/h
Return rate (Rr)	$Rr = \frac{SML}{\text{Mean time until return after sick leave}}$	workers/h
Production line workforce size (PWF)	$PWF = \int_{t_0}^t [RrI + Rr - WIr - RrO]dt + PWF_{t_0}$	workers
Staff on sick leave (SML)	$SML = \int_{t_0}^t [WIr - Rr]dt + SML_{t_0}$	workers
Knowledge loss rate (KLr)	$KLr = KS * WIr \text{ for } f(x) \geq 0$	knowledge
Proportion of knowledge subdivision (KS)	$KS = 100 - \text{Activity subdivision index}$	
Adaptation time (At)	$At = Pr * KS$	h
Adaptation rate (Ar)	$Ar = \frac{(\text{Maximum knowledge index} - CK)}{At} \text{ for } f(x) \geq 0$	knowledge/h
Current knowledge (CK)	$CK = \int_{t_0}^t [Ar - KLr]dt + CK_{t_0}$	knowledge

References

- Amos, P.M., Ditis-Carvalho, J., Alves, A.C., 2015. Workplace ergonomics in lean production environments: a literature review. *Work* 52 (1), 57–70. <https://doi.org/10.3233/wor-141941>.
- Ashby, W.R., 1998. *An Introduction to Cybernetics*. Chapman & Hall Ltd.
- Bardot, R., Whoot, J., Robins, M., 2009. Is movement variability important for sports biomechanists? *Sports BioMech.* 6 (2), 224–243. <https://doi.org/10.1080/14763140701322994>.
- Billon, P., 1999. Complexity and postmodernism. Understanding complex systems of reply to David Spurrett. *S. Afr. J. Philos.* 18 (2), 275–278. <https://doi.org/10.1080/02580136.1999.10878188>.
- Colombini, D., 1998. An observational method for classifying exposure to repetitive movements of the upper limbs. *Ergonomics* 41 (9), 1261–1289. <https://doi.org/10.1080/001401398186306>.
- Colombini, D., Occhipinti, E., Fanti, M., 2005. Il metodo OCRA per l'analisi e la prevenzione del rischio da movimenti ripetitivi. Franco Angeli, Milano.
- Coyle, R.G., 1996. *System Dynamics Modelling: a Practical Approach*. Chapman & Hall.
- da Costa, B.R., Vieira, E.R., 2009. Risk factors for work-related musculoskeletal disorders: a systematic review of recent longitudinal studies. *Am. J. Ind. Med.* 53 (3), 285–323. <https://doi.org/10.1002/ajim.20750>.
- De Tevelde, S., Antonakis, J., 2006. Could lean production job design be intrinsically motivating? Contextual, configurational and levels-of-analysis issues. *J. Oper. Manag.* 24 (2), 99–123. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2005.04.001>.
- Dekker, S.W.A., Hancock, P.A., Wilkin, P., 2013. Ergonomics and sustainability: towards an embrace of complexity and emergence. *Ergonomics* 56 (3), 357–364. <https://doi.org/10.1080/00140139.2012.718794>.
- Díaz, L., Vahedi, A., Dohmavi, S., 2016. Association between objective and subjective assessments of environmental ergonomic factors in manufacturing plants. *Int. J. Ind. Ergon.* 54, 26–31. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2015.12.004>.
- Dul, J., Neumann, W.P., 2009. Ergonomics contributions to company strategies. *Appl. Ergon.* 40 (4), 745–752. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2008.07.001>.
- Falzon, P., 2004. *Ergonomie*. Presses Universitaires de France, Paris.
- Forrester, J.W., 1961. *Industrial Dynamics*. Massachusetts Institute of Technology Press, Boston.
- Gomez, R.L., Azar, D.P., He, Y.H., Radwin, R.G., 2017. Visualizing stressful aspects of repetitive motion tasks and opportunities for ergonomic improvements using computer vision. *Appl. Ergon.* 65, 461–472. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.02.020>.
- Gots, G., Weyer, J., Staettin, N.A., 2014. Beyond human centred automation-concepts for human-machine interaction in multi-layered networks. *Ergonomics* 57 (3), 289–294. <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.890748>.
- Guastallo, S.J., 2017. Nonlinear dynamical systems for theory and research in ergonomics. *Ergonomics* 60 (2), 167–193. <https://doi.org/10.1080/00140139.2016.1162881>.
- Gulrin, F., Laville, A., Dancikova, F., Dumfries, J., Kerguelen, A., 2007. Understanding and Transforming Work. The Practice of Ergonomics. ANACT, Lyon.
- Hales, T.R., Bernard, B.P., 1996. Epidemiology of work-related musculoskeletal disorders. *Orthop. Clin. N. Am.* 27 (4), 679–700.
- Heylighen, F., Cilliers, P., Gershenson, C., 2007. Complexity and Philosophy. Complexity, Science and Society. Radcliffe, Oxford, UK.
- Kank, B., Waterloo, P., Hilden, R.J., 2014. Creating levels in systems ergonomics: a framework to support 'mesoergonomic' inquiry. *Appl. Ergon.* 45 (1), 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.04.021>.
- Koukoulidi, T., 2014. The impact of lean production on musculoskeletal and psychosocial risks: an examination of sociotechnical trends over 20 years. *Appl. Ergon.* 45 (2), 198–212. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.07.018>.
- Kumar, S., 2001. Theories of musculoskeletal injury causation. *Ergonomics* 44 (1), 17–47. <https://doi.org/10.1080/00140130120716>.
- Landsbergis, P.A., Cahill, J., Schell, P., 1996. New systems of work organization impacts on job characteristics and health. *Job Stress Netw.* 1 (1), 1–10.
- Lau, W.A., Armstrong, T.J., Fostabius, A., Ulin, S.S., Wemer, R.A., Alben, J.W., 1999. Cross-sectional study of the relationship between repetitive work and the prevalence of upper limb musculoskeletal disorders. *Am. J. Ind. Med.* 36 (2), 248–259. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0274\(199908\)36:2<248::AID-AJIM4>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0274(199908)36:2<248::AID-AJIM4>3.0.CO;2-Q).
- Leclerc, A., Chastang, J.F., Nedhammer, L., Landin, M.F., Roquarie, V., 2004. Incidence of shoulder pain in repetitive work. *Occup. Environ. Med.* 61 (1), 30–44.
- Lin, L., Detry, C., Kim, S.W., 2001. Ergonomics and quality in paced assembly lines. *Hum. Factors Ergon. Manuf. Serv. Ind.* 11 (4), 377–382. <https://doi.org/10.1002/hfm.1020>.
- Malchaire, J.B., Cock, N.A., Robert, A.R., 1996. Prevalence of musculoskeletal disorders at the wrist as a function of angles, forces, repetitiveness and movement velocities. *Scand. J. Work Environ. Health* 22 (3), 176–181.
- Moore, J.S., Gerg, A., 1995. The strain index: a proposed method to analyze jobs for risk of distal upper extremity disorders. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 56 (5), 443–458. <https://doi.org/10.1080/15428119591016883>.
- Moray, N., 1994. "De Maxima in Coni. Lat." or how cost-cut reduces science to art in the practice of human factors. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 38th Annual Meeting, Santa Monica, Human Factors and Ergonomics Society, CA, pp. 526–530.
- Neumann, W.P., Kuba, A., Wells, R.W., 2016. Human factors in production system design and quality performance – a systematic Review. *IFAC-PapersOnline* 49 (12), 1721–1724. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.830>.
- Neumann, W.P., Winkel, J., Melbo, L., Magnusberg, R., Mathiassen, S.E., 2006. Production system design elements influencing productivity and ergonomics: a case study of parallel and serial flow strategies. *Int. J. Oper. Prod. Manag.* 26 (8), 904–923. <https://doi.org/10.1108/01443700610678666>.
- Nordander, C., Ohlsson, K., Balogh, I., Hansson, G.A., Axmon, A., Parniani, R., Skerfving, S., 2008. Gender differences in workers with identical repetitive industrial tasks: exposure and musculoskeletal disorders. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 81 (8), 930–947. <https://doi.org/10.1007/s00420-007-0286-9>.
- Parker, S.K., 2003. Longitudinal effects of lean production on employee outcomes and the mediating role of work characteristics. *J. Appl. Psychol.* 88 (4), 620–634. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.88.4.620>.
- Parsons, K.C., 2000. Environmental ergonomics: a review of principles, methods and models. *Appl. Ergon.* 31 (8), 581–594. [https://doi.org/10.1016/S0001-6870\(00\)00444-2](https://doi.org/10.1016/S0001-6870(00)00444-2).
- Perrow, C., 1984. *Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies*. Princeton University Press, Princeton.
- Puts-Anderson, V., 1988. *Cumulative Trauma Disorders: a Manual for Musculoskeletal Diseases of the Upper Limbs*. Taylor & Francis, London.

- Rashedi, E., Nussbaum, M.A., 2016. Cycle time influences the development of muscle fatigue at low to moderate levels of intermittent muscle contraction. *J. Electromyogr. Kinesiol.* 26, 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2016.03.001>.
- Salmon, P.M., Walker, G.H., Reed, M., G.J. Gooch, N., Stanton, N.A., 2017. Fitting methods to paradigms: an ergonomics methods fit for systems thinking? *Ergonomics* 60 (2), 194–205. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1103385>.
- Sandlund, J., Sotgiu, D., Heider, M., Mathiassen, S.E., 2017. Differences in motor variability among individuals performing a standardized short-cycle manual task. *Hum. Mov. Sci.* 51, 17–26. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2016.10.009>.
- Sarin, T.A., Bursica, C.F., 2009. The impacts of lean production on working conditions: a case study of a hairwater assembly line in Brazil. *Int. J. Ind. Ergon.* 39 (2), 403–412. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2008.08.003>.
- Silventoinen, R.A., Fiea, L.J., Armstrong, T.J., 1986. Hand wrist cumulative trauma disorders in industry. *Occup. Environ. Med.* 43 (11), 779–784. <https://doi.org/10.1136/ocm.43.11.779>.
- Sood, D., Nussbaum, M.A., Hager, K., Nogueira, H.C., 2017. Predicted endurance times during overhead work: influence of duty cycle and tool mass estimated using perceived discomfort. *Ergonomics* 60 (10), 1405–1414. <https://doi.org/10.1080/00140139.2017.1293830>.
- Stanton, J.D., 2000. *Business Dynamics Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill.
- Stark, S.R., 1991. Workplace ergonomic factors and the development of musculoskeletal disorders of the neck and upper limbs: a meta-analysis. *Am. J. Ind. Med.* 19 (1), 87–107. <https://doi.org/10.1002/ajim.4700190111>.
- Taguchi, G., Hoepf, E.A., Hsiang, T., 1990. *Quality Engineering in Production Systems*. McGraw-Hill, New York.
- Villego, J., Salas, F.A., Neumann, W.P., 2017. Using action research to develop human factors approaches to improve assembly quality during early design and ramp-up of an assembly line. *Int. J. Ind. Ergon.* 61, 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2017.05.006>.
- von Bontaroff, L., 1968. *General Systems Theory: Foundations, Development, Applications*. George Braziller, New York.
- Walker, G.H., Salmon, P.M., Bellinger, M., Stanton, N.A., 2017. Quantum ergonomics: shifting the paradigm of the systems agenda. *Ergonomics* 60 (2), 157–166. <https://doi.org/10.1080/00140139.2016.1123040>.
- Wilson, J.R., 2012. Fundamentals of systems ergonomics. *Work* 41 (Suppl. 1), 3861–3868. <https://doi.org/10.5253/WOR-2012-0093-3861>.
- Wilson, J.R., 2014. Fundamentals of systems ergonomics/human factors. *Appl. Ergon.* 45 (1), 5–13. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.03.021>.
- Woods, D., Hilling, E., 2005. *Joint and Cognitive Systems an Introduction to Cognitive Systems Engineering*. CRC Press Taylor & Francis Group, New York.
- Woods, D., DeMarco, S., 2000. Anticipating the effects of technological change: a new era of dynamics for human factors. *Theor. Issues Ergon.* 1 (3), 272–282. <https://doi.org/10.1080/14639220110037452>.