



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA APLICADA

EDSON MOURA SILVA

MODELAGEM E ANÁLISE DE MANUFATURAS TÊXTEIS

RECIFE – PE

2024

EDSON MOURA SILVA

MODELAGEM E ANÁLISE DE MANUFATURAS TÊXTEIS

Dissertação submetida à Coordenação do
Programa de Pós-Graduação em Informática
Aplicada da Universidade Federal Rural
de Pernambuco, como parte dos requisitos
necessários para obtenção do grau de Mestre.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ermeson Carneiro de Andrade

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Danilo Ricardo Barbosa de Araújo

RECIFE – PE

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586m Silva, Edson Moura Silva
Modelagem e Análise de Manufaturas Têxteis / Edson Moura Silva Silva. - 2024.
85 f. : il.

Orientador: Ermeson Carneiro de Andrade.
Coorientador: Danilo Ricardo Barbosa de Araujo.
Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, , Recife, 2024.

1. Manufatura Têxtil 4.0. 2. Avaliação de Desempenho. 3. Avaliação de Disponibilidade. 4. Avaliação de Confiabilidade. 5. Redes de Petri Estocásticas. I. Andrade, Ermeson Carneiro de, orient. II. Araujo, Danilo Ricardo Barbosa de, coorient. III. Título

CDD

EDSON MOURA SILVA

MODELAGEM E ANÁLISE DE MANUFATURAS TÊXTEIS

Dissertação submetida à Coordenação do
Programa de Pós-Graduação em Informática
Aplicada da Universidade Federal Rural
de Pernambuco, como parte dos requisitos
necessários para obtenção do grau de Mestre.

Aprovada em: 21 de 05 de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ermeson Carneiro de Andrade (Orientador)
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Departamento de Computação

Prof. Dr. Carlos Julian Menezes Araújo
Universidade Federal do Cariri
Centro de Ciências e Tecnologia

Rafael Melo Macieira
Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Informática

Dedicatória: Dedico este mestrado aos meus pais, José e Ivone, pela educação, persistência, resiliência. Aos notáveis professores Emerson e Danilo, cujo conhecimento e orientação foram fundamentais para meu desenvolvimento acadêmico.

Agradecimentos

Em memória da minha mãe, uma mulher aguerrida, que mesmo sem o privilégio da educação formal, conseguiu me alfabetizar e ser o maior exemplo de educação, amor e perseverança da minha vida.

Ao meu pai, que também enfrentou a falta de educação formal, mas me ensinou valores inestimáveis como a honestidade, seriedade e compromisso com o trabalho. Seu legado carrego com orgulho.

A construção do saber é uma jornada de aprendizados e ensinamentos constantes, espero que minha modesta contribuição honre todo esforço empenhado por meus pais, minha família, meus professores e meus colegas que compartilharam cada nível dessa evolução. Esse trabalho é minha maneira de honrar o que vocês me proporcionaram. Obrigado por me permitir chegar até aqui.

É fundamental diminuir a distância entre o que se diz e o que se faz, de tal maneira que num dado momento a tua fala seja a tua prática.

(Paulo Freire)

Resumo

A indústria têxtil brasileira ocupa a 5^a posição global com uma receita média anual de USD 32,28 bilhões e aproximadamente 31% dessa receita (USD 10 bilhões) é gerada a partir da produção de vestuário, posicionando o país na 7^a posição global. No entanto, devido ao aumento dos preços dos insumos, dificuldades históricas e restrição de investimentos em inovação industrial como a implementação da Indústria 4.0, essa indústria ainda apresenta baixa precisão nos processos de produção e baixo desempenho em comparação com outras indústrias, como as da China. Por tanto, este estudo propõe o desenvolvimento de uma abordagem baseada em redes de Petri estocásticas para modelar e analisar os processos de produção na indústria têxtil tradicional e 4.0, com o objetivo de identificar os possíveis arranjos mais eficientes que estejam disponíveis para aprimorar o desempenho operacional da produção. Para alcançar esse objetivo, métricas de avaliação de desempenho, disponibilidade e confiabilidade foram aplicadas, tais como tempo de produção por lote, vazão, índices de utilização, falha, disponibilidade e confiabilidade dos recursos, foram coletadas e analisada. Para analisar a aplicabilidade dos modelos propostos, foram realizados estudos de caso em uma empresa têxtil do polo de confecção do Agreste Pernambucano. Os resultados, extraídos mediante análises numéricas, demonstram que essa abordagem tem o potencial de auxiliar os administradores de confecção a otimizar os processos produtivos e tomar decisões mais precisas. Adicionalmente, a abordagem permite que os administradores realizem o planejamento de capacidade e determinem os arranjos de produção mais apropriados, mantendo os recursos equilibrados, eficientes e disponíveis conforme as metas de produção do mercado moderno.

Palavras-chave: Indústria Têxtil. Manufatura Têxtil 4.0. Avaliação de Desempenho. Avaliação de Disponibilidade. Avaliação de Confiabilidade. Redes de Petri Estocásticas.

Abstract

The Brazilian textile industry ranks 5th globally with an average annual revenue of USD 32.28 billion, and approximately 31% of this revenue (USD 10 billion) is generated from garment production, positioning the country in the 7th global position. However, due to the rise in input prices, historical challenges, and limited investment in industrial innovation such as the implementation of Industry 4.0, this industry still exhibits low precision in production processes and underperforms compared to other industries, such as those in China. Therefore, this study proposes the development of an approach based on stochastic Petri nets to model and analyze production processes in traditional and Industry 4.0 textile manufacturing, aiming to identify the most efficient possible arrangements available to enhance operational production performance. To achieve this goal, performance evaluation metrics, availability, and reliability, such as production time per batch, throughput, utilization rates, failure, availability, and resource reliability, were collected and analyzed. To analyze the applicability of the proposed models, case studies were conducted in a textile company in the Agreste Pernambucano manufacturing hub. The results, extracted through numerical analyses, demonstrate that this approach has the potential to help garment managers optimize production processes and make more precise decisions. Additionally, the approach allows managers to perform capacity planning and determine the most appropriate production arrangements, keeping resources balanced, efficient, and available according to modern market production goals.

Keywords: Textile Industry. Textile Manufacturing 4.0. Performance Evaluation. Availability Assessment. Reliability Assessment. Stochastic Petri Nets.

Lista de Figuras

Figura 1 – Área de trabalho plataforma MES MInA (Minha Indústria Avançada).	28
Figura 2 – Elementos das redes de Petri.	29
Figura 3 – Exemplo básico de Modelo SPN.	30
Figura 4 – Metodologia adotada.	33
Figura 5 – Ciclo produtivo manufatura têxtil tradicional.	35
Figura 6 – (a) Processo produtivo; (b) Encestamento, nuvem computacional e terminal de monitoramento.	37
Figura 7 – Modelo SPN de desempenho do processo produtivo do macacão na manufatura tradicional.	41
Figura 8 – Modelo SPN de desempenho da produção da manufatura têxtil 4.0. . .	47
Figura 9 – Modelos SPNs de disponibilidade do processo produtivo da manufatura têxtil 4.0 sem redundância.	50
Figura 10 – Modelos SPNs de disponibilidade do processo produtivo da manufatura têxtil 4.0 com redundância moderada.	51
Figura 11 – Modelos SPNs de disponibilidade do processo produtivo da manufatura têxtil 4.0 com redundância avançada.	52
Figura 12 – Modelos SPNs de confiabilidade sem redundância na infraestrutura da manufatura têxtil 4.0.	57
Figura 13 – Modelos SPNs de confiabilidade com redundância moderada na infraestrutura da manufatura têxtil 4.0.	59
Figura 14 – Modelos SPNs de confiabilidade com redundância avançada na infraestrutura da manufatura têxtil 4.0.	61
Figura 15 – Tempo de produção do lote - Manufatura tradicional.	66
Figura 16 – Vazão - Manufatura tradicional.	67
Figura 17 – Utilização das células de costura - Manufatura tradicional.	68
Figura 18 – Tempo de produção do lote - Manufatura 4.0.	69
Figura 19 – Utilização das células de costura - Manufatura 4.0.	70
Figura 20 – Curva de falha dos arranjos na infraestrutura da manufatura têxtil 4.0.	72
Figura 21 – Curva de confiabilidade dos arranjos na infraestrutura da manufatura têxtil 4.0.	73

Figura 22 – Intersecção dos índices de falha e confiabilidade da infraestrutura da manufatura 4.0 sem a redundância de recursos.	74
Figura 23 – Intersecção dos índices de falha e confiabilidade da infraestrutura da manufatura 4.0 com redundância moderada de recursos.	75
Figura 24 – Intersecção dos índices de falha e confiabilidade da infraestrutura da manufatura 4.0 com redundância avançada de recursos.	76

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparação de características entre os trabalhos relacionados.	24
Tabela 2 – Transições do modelo de desempenho da manufatura tradicional. . . .	43
Tabela 3 – Distribuição inicial de <i>tokens</i> nos lugares do modelo de desempenho da manufatura tradicional.	44
Tabela 4 – Métricas para avaliação de desempenho operacional do modelo SPN de manufatura têxtil tradicional.	46
Tabela 5 – Transições do modelo de desempenho da manufatura 4.0.	48
Tabela 6 – Distribuição inicial de <i>tokens</i> nos lugares do modelo de desempenho da manufatura 4.0.	48
Tabela 7 – Métricas para avaliação de desempenho operacional do modelo SPN de manufatura têxtil 4.0.	49
Tabela 8 – Expressões de guarda dos modelos de disponibilidade manufatura têxtil 4.0 com redundância avançada.	52
Tabela 9 – Transições do modelo de disponibilidade da manufatura 4.0.	53
Tabela 10 – Distribuição inicial de <i>tokens</i> nos lugares do modelo de disponibilidade da manufatura 4.0.	54
Tabela 11 – Métricas de disponibilidade do modelo SPN da manufatura têxtil 4.0. .	55
Tabela 12 – Expressões de guarda modelos de confiabilidade sem redundância. . . .	58
Tabela 13 – Expressões de guarda modelos de confiabilidade com redundância moderada.	59
Tabela 14 – Expressões de guarda modelos de confiabilidade com redundância avançada.	61
Tabela 15 – Métricas de confiabilidade da infraestrutura da manufatura têxtil 4.0. .	63
Tabela 16 – Resultados de disponibilidade e inatividade da infraestrutura da manufatura têxtil 4.0.	71

Lista de Siglas

IIoT	<i>Industrial Internet of Things (Internet Industrial das Coisas)</i>
IoTs	<i>Internet of Things (Internet das Coisas)</i>
RAMI 4.0	<i>Reference Architectural Model Industrie 4.0 (Modelos de Arquitetura de Referência para a Indústria 4.0)</i>
SPNs	<i>Stochastic Petri Nets (Redes de Petri Estocásticas)</i>
GSPNs	<i>Generalized Stochastic Petri Nets (Redes de Petri Estocásticas Generalizadas)</i>
TPN	<i>Timed Petri Nets (Redes de Petri Temporizadas)</i>
CPNs	<i>Coloured Petri Nets (Redes de Petri Coloridas)</i>
TPPNs	<i>Petri Nets with Timed Places (Redes de Petri com Lugares Temporizados)</i>
RFID	<i>Radio-Frequency Identification (Identificação por Radiofrequência)</i>
MES	<i>Manufacturing Execution System (Sistema de Execução de Manufatura)</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning (Planejamento de Recursos Empresariais)</i>
SENAI-PE	<i>Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial de Pernambuco</i>
SEBRAE-PE	<i>Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas de Pernambuco</i>
MInA	<i>Minha Indústria Avançada</i>
COVID-19	<i>Coronavirus Disease 2019 (Doença por Coronavírus 2019)</i>
SPNP	<i>Stochastic Petri Net Package (Pacote de redes de petri estocástica)</i>
SMF	<i>Flexible Manufacturing System (Sistema de Manufatura Flexível)</i>
Ladder	<i>Ferramenta gráfica usada para desenvolver programas ou softwares para CLPs (Controladores Lógico Programáveis)</i>
MTTR	<i>Mean Time To Repair (Tempo Médio para Reparo)</i>
MTTF	<i>Mean Time To Failure (Tempo Médio Para Falha)</i>
RAMI 4.0	<i>Reference Architecture Model Industrie 4.0 (Modelo de Referência Arquitetural proposto para a Indústria 4.0)</i>

TPL	<i>Tempo de Processamento do Lote</i>
U	<i>Utilização</i>
V	<i>Vazão</i>
ELI	<i>Expectativa de Lotes na Infraestrutura</i>
DSR	<i>Disponibilidade Sem Redundância</i>
DCRM	<i>Disponibilidade Com Redundância Moderada</i>
DCRA	<i>Disponibilidade Com Redundância Avançada</i>
TISR	<i>Tempo de Inatividade Sem Redundância</i>
TICRM	<i>Tempo de Inatividade Com Redundância Moderada</i>
TICRA	<i>Tempo de Inatividade Com Redundância Avançada</i>
IFISR	<i>Índice de Falha da Infraestrutura Sem Redundância</i>
IFICRM	<i>Índice de Falha da Infraestrutura Com Redundância Moderada</i>
IFICRA	<i>Índice de Falha da Infraestrutura Com Redundância Avançada</i>
ICISR	<i>Índice de Confiabilidade da Infraestrutura Sem Redundância</i>
ICICRM	<i>Índice de Confiabilidade da Infraestrutura Com Redundância Moderada</i>
ICICRA	<i>Índice de Confiabilidade da Infraestrutura Com Redundância Avançada</i>

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Motivação e justificativa	18
1.2	Objetivos	19
1.3	Organização da Dissertação	20
2	Trabalhos Relacionados	21
2.1	Considerações Finais	25
3	Fundamentação	26
3.1	Indústria Têxtil	26
3.2	Redes de Petri	29
3.3	Considerações Finais	31
4	Metodologia e infraestruturas adotadas	32
4.1	Metodologia	32
4.2	Infraestruturas	34
4.2.1	Infraestrutura têxtil tradicional	34
4.2.2	Infraestrutura têxtil 4.0	37
4.3	Considerações Finais	39
5	Modelos propostos	40
5.1	Modelo SPN de desempenho da manufatura têxtil tradicional	40
5.2	Manufatura têxtil 4.0	47
5.2.1	Modelo SPN de desempenho da manufatura têxtil 4.0	47
5.2.2	Modelos SPN de disponibilidade da manufatura têxtil 4.0	50
5.2.3	Modelos SPN de confiabilidade da manufatura têxtil 4.0	57
5.3	Considerações Finais	64
6	Estudos de casos	65
6.1	Estudo de Caso 01 (Avaliação de desempenho da infraestrutura da manufatura têxtil tradicional)	65
6.2	Estudo de Caso 02 (Avaliação de desempenho da infraestrutura da manufatura têxtil 4.0)	68
6.3	Estudo de Caso 02 (Avaliação de disponibilidade da infraestrutura da manufatura têxtil 4.0)	71

6.4	Estudo de Caso 02 (Avaliação da confiabilidade da infraestrutura da manufatura têxtil 4.0)	72
6.5	Considerações Finais	76
7	Conclusão e Trabalhos Futuros	77
7.1	Contribuições	78
7.2	Trabalhos Futuros	79
	Referências	80

1 Introdução

A representatividade do polo de confecções do Agreste Pernambucano frente ao mercado têxtil, alcançou notoriedade internacional no início dos anos 1990 com a instalação e estruturação das grandes manufaturas da região. Como consequência, houve o aumento da demanda da mão de obra local e o inerente êxodo urbano, que somados, resultaram na consolidação das manufaturas familiares ([ARAÚJO, 2006](#)). O polo abrange os municípios de Caruaru, Toritama, Santa Cruz do Capibaribe e Surubim. Essa região abriga cerca de 18 mil empresas têxteis, emprega aproximadamente 250 mil profissionais e produz cerca de 800 milhões de peças de vestuário por ano ([MÉLO, 2022](#)). Por esses motivos, a indústria de confecção do Agreste de Pernambuco é um setor de importância estratégica para o desenvolvimento econômico regional e nacional, pois contribui diretamente no posicionamento do país, como a 7^a maior indústria de vestuário do mundo, com receita anual de aproximadamente USD 10 bilhões, sendo que o Nordeste contribuiu com USD 1,5 bilhões e Pernambuco com USD 170 milhões, demonstrando o grande potencial econômico desse setor ([JUNIOR, 2023](#)). Isso significa que a indústria têxtil agrega aproximadamente 2% do PIB (Produto Interno Bruto) industrial do estado de Pernambuco, 1,5% do PIB industrial da região Nordeste e 2,3% do PIB industrial do Brasil ([PRADO, 2023](#)).

No entanto, ao observar o cenário global de investimentos em inovação industrial, o país se depara com um dilema significativo. O Brasil ocupa a 54^a posição no ranking mundial de investimentos em inovação industrial ([DUTTA et al., 2022](#)). A restrição de investimentos em inovação industrial representa um desafio para a implementação da Indústria 4.0 no país, especialmente nos polos de confecções locais, como o polo de confecção do Agreste Pernambucano.

Embora Caruaru seja o município mais desenvolvido do polo, uma grande problemática enfrentada por algumas empresas é a dificuldade para avaliar com precisão o desempenho e disponibilidade operacional dos processos produtivos. Essa dificuldade é ainda mais acentuada pela entrada de produtos chineses de baixo custo no polo ([LIMA, 2010](#)), exacerbando a competição. Para se manterem competitivas nesse mercado, é essencial que as indústrias locais se adaptem constantemente e implementem melhorias em seus processos de produção ([JR et al., 2011](#); [NASCIMENTO et al., 2020](#)).

Segundo [Jacintho e Oliveira \(2018\)](#), a avaliação de desempenho é fundamental para

a medição da eficiência do processo produtivo e para a redução de inconformidades na produção. Adicionalmente, ao identificar e minimizar a recorrência de eventos de falhas e reparos, a confiabilidade e a disponibilidade operacional tendem a aumentar, conforme observado por [Bashir et al. \(2020\)](#). A captura e o registro desses eventos podem ser aprimorados com a implementação de dispositivos IIoTs (Internet Industrial das Coisas), que facilitam a digitalização e integração de dados no chão de fábrica ([RATH et al., 2021](#)). Esses dados podem ser processados por uma variedade de tecnologias, incluindo a computação em Nuvem e Modelos de Arquitetura de Referência para a Indústria 4.0 (RAMI 4.0) ([CIORTEA, 2023](#)). Vale ressaltar que a computação em nuvem serve como base para os sistemas supervisores, permitindo o monitoramento online da produção e a integração com sistemas paralelos, como mencionado por [SOUSA \(2023\)](#). Essa abordagem, conhecida como Indústria 4.0, é caracterizada pela integração de sistemas ciberfísicos, internet das coisas e computação em nuvem, desempenhando um papel crucial na transformação digital das operações industriais, permitindo a automação inteligente e a otimização dos processos de produção.

Dada a importância da Indústria têxtil, seja na sua forma tradicional ou na sua versão 4.0, no mercado atual, é importante destacar a necessidade de avaliações precisas de desempenho, disponibilidade e confiabilidade. Qualquer tempo de inatividade ou desempenho abaixo do esperado pode resultar em enormes perdas financeiras, ou, até mesmo, comprometer a segurança dos trabalhadores e consumidores. Para desenvolver e avaliar esses ambientes de forma eficaz, advogamos pelo uso da modelagem. É importante ressaltar que os ambientes da Indústria 4.0 abrangem uma ampla gama de tecnologias, incluindo IIoTs, servidores de nuvem e aplicações intensivas em dados. Dessa forma, realizar testes em sistemas reais com medições seria não só extremamente custoso, mas também demorado. A modelagem surge, então, como uma alternativa viável e eficiente para simular e otimizar o funcionamento desses ambientes complexos ([CACHADA et al., 2018](#)).

Modelos analíticos têm sido amplamente empregados na modelagem e análise de sistemas complexos, incluindo processos produtivos ([QIN et al., 2023](#)). Entre esses modelos, as cadeias de Markov ([DEBOM; CHIWIACOWSKY, 2023](#)) e as redes de Petri ([SOUSA et al., 2023](#)) se destacam por sua sólida fundamentação matemática e eficácia comprovada. Eles oferecem a capacidade de conduzir análises quantitativas e qualitativas, bem como

realizar verificações de propriedades essenciais dos sistemas em estudo. Além disso, esses modelos facilitam comparações entre diferentes alternativas de soluções e permitem ajustes nos sistemas de forma ágil, com custos financeiros e computacionais reduzidos, mantendo um alto nível de confiabilidade. No contexto deste trabalho, foi utilizada uma extensão das redes de Petri conhecida como redes de Petri estocásticas, visto que ela permite a modelagem de sistemas com comportamento probabilístico, essencial para a análise de processos produtivos sujeitos a variabilidades e incertezas.

Para apresentar a aplicabilidade deste trabalho foram realizados dois estudos de caso, um aplicado à manufatura têxtil tradicional e o segundo à manufatura 4.0. Para o estudo da manufatura têxtil tradicional, os resultados revelaram que o arranjo composto por 3 células de costura, com a frequência inicial de 2 horas para o corte do tecido, ofertou ganhos de desempenho de 74,60% no tempo de produção de 20 lotes de peças, em comparação com as demais possibilidades de arranjo. Já no estudo da manufatura têxtil 4.0, os resultados revelaram, por exemplo, que o arranjo composto por 5 costureiras, com a frequência inicial de 3 horas para o corte do tecido, ofertou ganhos de desempenho de 55% no tempo de produção de 60 lotes de peças, em comparação com as demais possibilidades de arranjo. No entanto, o arranjo com redundâncias pode reduzir em mais de 60% o índice de falha, pode aumentar em mais de 50% o índice de confiabilidade e pode aumentar a disponibilidade operacional em 45,36 horas ao ano se comparado ao arranjo sem redundância de recursos.

1.1 Motivação e justificativa

O processo de modelagem e análise de métricas como o desempenho, disponibilidade e confiabilidade na indústria têxtil é fundamental para a garantia da eficiência operacional e competitividade desse seguimento. Inicialmente a avaliação de desempenho permite identificar inconformidades como ineficiências (por exemplo: produção abaixo do programado) ou gargalos (por exemplo: demanda de produção maior do que a capacidade de entrega), melhorando a utilização dos recursos e reduzindo os desperdícios com os arranjos potencialmente mais adequados. Por exemplo, ao analisar o tempo de ciclo de produção de determinado produto têxtil, é possível identificar gargalos e implementar medidas para aumentar a produtividade. Portanto, a avaliação de métricas de desempenho

é fundamental para o alinhamento das expectativas de produção frente à crescente demanda por produtos de alta qualidade e prontidão de entrega, garantindo a satisfação do cliente e a competitividade nesse mercado ([COMAN; IONESCU, 2014](#)).

No entanto, não menos importante, a avaliação da disponibilidade e confiabilidade dos recursos como equipamentos, sistemas, insumos, conectividade e pessoas na indústria têxtil podem complementar a avaliação de desempenho, contribuindo para continuidade das operações em função do tempo de produção. Por exemplo, a avaliação da disponibilidade tem o propósito de estimar a probabilidade de que o sistema esteja operacional e disponível ao longo do tempo, considerando tanto os estados operacionais quanto os estados de falha e reparo dos componentes do sistema. A disponibilidade do sistema é calculada como a soma das probabilidades de todos os estados em que o sistema está operacional em um determinado momento ([KUMAR et al., 2012](#)). Já a análise da confiabilidade de máquinas permite identificar com antecedência a probabilidade de estarem propensas a falhas, resultando na possibilidade de agendamento de manutenções preventivas que podem reduzir o tempo de inatividade e aumentar a eficiência global da produção ([FRIEDERICH; LAZAROVA-MOLNAR, 2024](#)).

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é apresentar uma abordagem baseada em Redes de Petri Estocásticas (SPNs) para analisar o processo produtivo de uma manufatura têxtil tradicional e de uma manufatura têxtil 4.0, ambas localizadas no polo de confecção do Agreste de Pernambuco. Dessa forma, este trabalho tem o potencial de ofertar impactos significativos para as empresas do polo de confecção do Agreste de Pernambuco, apresentando uma abordagem capaz de analisar o processo produtivo completo. Através dessas análises, é possível identificar e apresentar os arranjos mais promissores, o que pode resultar em uma redução significativa no tempo de produção e na indisponibilidade operacional dos recursos proporcionando maior competitividade para as empresas do polo de confecções do Agreste de Pernambuco.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Propor uma abordagem abrangente para modelar, analisar e avaliar métricas de desempenho, disponibilidade e confiabilidade operacional das manufaturas têxteis.

- Propor uma abordagem flexível e adaptável que considere as especificidades do processo produtivo como, por exemplo, a capacidade de produção, os processos de decisão, as variações dos tempos das atividades, e a redundância de recursos na infraestrutura.
- Prover informações confiáveis aos tomadores de decisão da manufatura têxtil para viabilizar a escolha do arranjo mais adequado para aperfeiçoar o processo produtivo.

1.3 Organização da Dissertação

O trabalho está organizado da seguinte forma: O Capítulo 2 apresenta os trabalhos relacionados. O Capítulo 3 apresenta a fundamentação teórica. O Capítulo 4 apresenta a metodologia e a infraestrutura adotada. O Capítulo 5 apresenta os modelos propostos. O Capítulo 6 apresenta os estudos de casos adotados. Por fim, o Capítulo 7 apresenta a conclusão e sugere os trabalhos futuros.

2 Trabalhos Relacionados

A avaliação de manufaturas tradicionais não é algo recente, tendo sido objeto de estudo ao longo dos anos. Contudo, com a chegada da manufatura 4.0 e a introdução de novos elementos, como a IIoT, a computação em nuvem, a análise de big data e a integração de sistemas ciberfísicos, surge a necessidade de desenvolver metodologias adaptadas para avaliar esses novos ambientes, os quais exigem um nível de operacionalidade significativamente mais elevado.

Em (ZIMMERMANN, 2007) foi apresentado um exemplo da utilização das GSPNs (Generalized Stochastic Petri Nets - Redes de Petri Estocásticas Generalizadas) para a modelagem e melhoria de um sistema de manufatura flexível. O objetivo, segundo o autor, foi minimizar o custo do sistema e maximizar sua eficiência.

Em (SEIFU, 2007) foi proposta uma TPN (Timed Petri Nets – Redes de Petri Temporizadas) para modelar e analisar o processo produtivo de uma manufatura. O estudo avaliou parâmetros de desempenho, tais como a taxa de utilização de máquinas, detecção de gargalos, tempo de ciclo e o *throughput* (vazão). Na primeira rodada de avaliações destacou-se a máquina M4 como gargalo de utilização de 36,36%. A segunda rodada de avaliações focou nas máquinas M1 e M2, identificando a M2 como gargalo de utilização de 60% e um tempo de ciclo de 3,5 horas. Segundo os autores, esses resultados revelaram um desempenho insatisfatório da fábrica, esses resultados representam oportunidades de melhoria na redistribuição dos recursos.

Em (CARVALHO; PORTO, 2007), os autores aplicaram o formalismo de TPNs na análise de linhas de produção com trabalho multifuncional. Nesse trabalho, foi desenvolvida uma equação para o estoque intermediário mínimo, a qual tem efeito fundamental no melhor aproveitamento dos recursos disponíveis, como a mão de obra multifuncional, para se atingir maiores níveis de produtividade. Segundo os autores, a modelagem pode levar a uma melhor alocação dos recursos disponíveis, como a mão de obra multifuncional, para se atingir maiores níveis de produtividade.

Em (KAHRAMAN; TÜYSÜZ, 2010) foi apresentada uma metodologia que consiste na combinação de SPNs (Stochastic Petri Nets - Redes de Petri Estocásticas) com a teoria dos conjuntos Fuzzy para melhorar a representação das incertezas em sistemas de manufatura. Dessa forma, foram abordados a variabilidade estocástica e a imprecisão. Os

resultados incluem a análise qualitativa e quantitativa de sistemas, destacando propriedades como a alcançabilidade, limitação e vivacidade, demonstrando a eficácia dessa abordagem em analisar e modelar sistemas complexos como as manufaturas flexíveis.

Em (BARAD; CHERKASSKY, 2010), os autores usaram as TPNs para avaliar um processo produtivo de uma tecelagem. Eles destacam que as redes de filas são úteis na fase inicial de planejamento, em que os modelos conceituais são necessários para estimar o uso previsto de recursos no estado estacionário. No estudo, os autores descrevem um arranjo que resultou em uma economia de 65% na utilização dos teares. No entanto, para que os resultados sejam confiáveis é necessário haver uma validação prévia dos modelos.

O trabalho em (SANTANA-ROBLES et al., 2012) descreve a modelagem e simulação de uma cadeia de suprimentos têxtil usando CPNs (Coloured Petri Nets – Redes de Petri Coloridas). O modelo inclui etapas como *design*, corte, costura, montagem, acabamento, embalagem e logística da cadeia de suprimentos. Os autores destacam que a capacidade de modelar todo o processo de produção e logística têxtil extrapolam as abordagens tradicionais, permitindo considerar atrasos que antes não eram considerados.

Em (BARAD, 2016) foi apresentada uma abordagem concentrada na aplicação das TPNs no planejamento de lotes para processos de tingimento do tecido, adaptando-as às condições específicas da manufatura têxtil. O estudo apresenta um exemplo prático baseado em uma manufatura real, destacando o uso de oito tipos de lotes com diferentes características. A metodologia utiliza a decomposição de TPNs em redes menores e independentes, aplicando regras específicas para estimar a utilização de estações de trabalho na rede. A análise demonstra que, ao atribuir um tipo de lote a cada máquina, é possível reduzir o número necessário de máquinas operacionais.

Em (XIAOHUA et al., 2017), é abordada a otimização de processos de sistemas de produção de vestuário usando as TPPNs (Petri Nets with Timed Places - Redes de Petri com Lugares Temporizados). Os principais desafios relatados foram a competição por equipamentos, balanceamento de linha e configuração de estações de trabalho. Segundo os autores, as redes de Petri podem ser aplicadas para estabelecer um modelo de sistema de suspensão de roupa e um algoritmo de agendamento otimizado que leva em conta os recursos limitados e a competição por esses recursos. Dessa forma, o modelo de produção multitarefa demonstrou ser eficiente em pequenos lotes e no processamento de vários tipos de vestuário.

Em (CRUZ et al., 2018) foi proposta a aplicação das SPNs para modelar o processo produtivo de camisas do tipo “polo” visando identificar gargalos e propor melhorias de eficiência na produção. A metodologia inclui a modelagem qualitativa e quantitativa. Os resultados destacam a aplicabilidade da rede de Petri na simulação de cenários, identificando gargalos e ineficiências.

Em (BLAGA et al., 2021) foi proposto a aplicação das TPNs e CPNs para modelar e simular sistemas de manufatura têxtil com o propósito de melhorar o processo produtivo. A metodologia abordada envolveu a simulação de operações de linha de montagem e gestão de estoque. Os resultados mostram uma análise detalhada do fluxo de trabalho, identificação de gargalos operacionais e utilização adequada dos recursos.

Em (ABREU, 2022) foi proposta a automação de uma manufatura têxtil baseada na seleção de retalhos têxteis classificados por cor. Para fundamentar a viabilidade da automação dessa fase do processo produtivo, os autores propuseram o uso das CPNs para modelar e simular o sistema da indústria têxtil. A metodologia inclui a integração de diferentes softwares, simulação do sistema supervisor (exemplo: sistemas de monitoramento de produção on-line) e programação em *Ladder* para os controladores lógicos programáveis.

Embora compartilhe semelhanças, nenhum dos estudos anteriores abordou a avaliação de desempenho, disponibilidade e confiabilidade operacional em uma manufatura têxtil tradicional ou 4.0 (ver Tabela 1). Essa lacuna é significativa, uma vez que a compreensão detalhada dos processos produtivos dessa indústria pode auxiliar as empresas do polo de confecção a melhorar os fluxos de trabalho. Os modelos propostos neste estudo visam preencher essa lacuna, ofertando uma abordagem abrangente que permite avaliar várias métricas em uma infraestrutura têxtil tradicional ou 4.0. Em geral, os trabalhos relacionados a avaliação de desempenho de manufaturas têxteis, apresentam modelos limitados às fases do processo produtivo, ao maquinário utilizado, ao uso de sistemas específicos ou a cenários baseados em dados fictícios como os sistemas de manufatura flexível que, em sua maioria, utilizam dados genéricos em ambientes controlados para a realização de experimentos e estudos conceituais, conforme apresentado na Tabela 1.

Trabalhos	Manufaturas	Modelos	Métricas				Ambiente de Validação		Ferramentas	
			Desempenho	Vazão	Utilização	Disponibilidade	Confiabilidade	Real	Controlado	
ZIMMERMANN, 2007	SMF*	GSPN	X	X	X				X	TimeNET
SEIFU, 2007	Metalúrgica	TPN	X	X	X	X		X		Não informado
CARVALHO; PORTO, 2007	SMF*	TPN	X		X				X	Não informado
KAHRAMAN; TÜYSÜZ, 2010	SMF*	SPN	X	X					X	MATLAB
BARAD; CHERKASSKY, 2010	Têxtil	TPN			X			X		Não informado
SANTANA-ROBLES et al., 2012	Têxtil	CPN	X	X	X				X	CPN Tools
BARAD, 2016	Têxtil	TPN	X	X	X			X		Siman V, Framework Arena
XIAOHUA et al., 2017	Têxtil	TPPN	X		X	X		X		MATLAB
CRUZ et al., 2018	Têxtil	SPN	X	X				X		Snoopy
BLAGA et al., 2021	Têxtil	TPN, CPN	X	X	X			X		Visual Object Net, CPN Tools
ABREU, 2022	Têxtil	CPN	X			X		X		PIPE
Este trabalho	Têxtil	SPN	X	X	X	X	X	X		SPNP

TABELA 1 – Comparação de características entre os trabalhos relacionados.

Nota: *SMF (Flexible Manufacturing System - Sistema de Manufatura Flexível.)

Essa é uma crítica limitação, uma vez que a compreensão precisa e abrangente dos processos e fluxos de trabalho é essencial para identificar gargalos, sobrecargas e oportunidades de melhoria. Além disso, este estudo propõe uma metodologia que pode ser adaptada para diferentes indústrias, sendo os estudos de caso fundamentados em infraestruturas têxteis reais. Essa abordagem adaptável e flexível oferece aos gestores da indústria têxtil a capacidade de tomar decisões precisas ao escolher os arranjos mais adequados para suas empresas.

2.1 Considerações Finais

Este Capítulo proporcionou uma visão abrangente dos principais estudos correlatos ao tema proposto. Embora haja uma quantidade significativa de trabalhos na literatura que se concentram no desempenho das manufaturas têxteis, poucos trabalhos nos últimos anos dedicaram-se a ofertar abordagens de impacto significativo para a avaliação de desempenho da indústria têxtil. Esse comportamento retrata a carência de estudos mais robustos direcionados a análise dos processos produtivos desse seguimento. É importante destacar que até o momento nenhum desses estudos se dedicou especificamente à análise do desempenho, vazão, utilização, disponibilidade e confiabilidade em uma mesma abordagem. Essa lacuna destaca a necessidade de investigar esses aspectos fundamentais para melhorar a eficiência das operações de manufatura têxtil.

3 Fundamentação

A indústria têxtil no Brasil está fortemente ligada à história, economia e política do país. As confecções familiares nas periferias das grandes capitais aprimoraram seus processos para atender à demanda local. Apesar da concorrência, sazonalidades de mercado e dificuldades de avaliação, o setor adota inovações tecnológicas e métricas de desempenho para melhorar seus processos. Este capítulo destaca a indústria têxtil, especialmente o polo de confecção do Agreste, e apresenta uma visão geral das redes de Petri e suas características principais.

3.1 Indústria Têxtil

O desenvolvimento das fábricas têxteis no Brasil, entre 1830 e 1884, destaca-se pela inauguração das primeiras unidades na Bahia até 1860, impulsionadas pela exploração de mão de obra escrava e abundância de fontes hidráulicas. A partir de 1866, houve uma concentração dessas indústrias no centro-sul, notadamente no Rio de Janeiro, evidenciando a ascensão econômica e política da região. A construção da estrada de ferro que ligava Rio de Janeiro, São Paulo e Minas Gerais contribuiu para esse deslocamento. Em 1881, a Companhia de Fiação e Tecidos Porto Alegrense foi fundada em Porto Alegre, marcando a expansão para o sul. No ano seguinte, em 1882, a Tecelagem Roeder, Karsten & Hadlich foi estabelecida por Johann Karsten, um imigrante alemão. Nesse período, estimava-se que o Brasil contava com cerca de 48 fábricas, produzindo anualmente 20 milhões de metros de tecido. Esses números aumentariam nos anos subsequentes, com 134 estabelecimentos em 17 estados do país até o final do século XIX ([FUJITA; JORENTE, 2015](#)).

Em 1900 foi iniciado o processo de industrialização gradual das confecções brasileiras, marcado pela transformação de tecidos em peças de vestuário, artigos domésticos ou decorativos e pela influência da moda. A indústria de confecção, especialmente de vestuário, teve seu início em Pernambuco entre as décadas de 50 e 60, inicialmente em Santa Cruz do Capibaribe. Retalhos provenientes de fábricas têxteis de Recife foram utilizados como matéria-prima, dando origem a produtos populares comercializados em feiras livres por confecções familiares. A primeira feira tradicional do Agreste do estado foi instituída em Caruaru, conhecida como “Feira da Sulanca”. Entre as décadas de 1950 e 1980, a feira se

desenvolveu, sendo posteriormente formalizada e reestruturada como o “Pólo de Confeções do Agreste de Pernambuco” a partir do ano 2000 (SILVA, 2020). A cadeia produtiva têxtil envolve atividades inter-relacionadas desde a origem dos insumos até a comercialização do produto acabado, passando por processos como fiação, malharia/tecelagem, beneficiamento, estamparia, tingimento e confecção (RUSSI et al., 2022).

As tecnologias de automação desempenham um papel crucial na modernização da indústria têxtil, especialmente com o advento da Manufatura Têxtil 4.0. Essa abordagem envolve uma cadeia de produção independente e utiliza tecnologias como RFID (*Radio-Frequency Identification*), sensores e IoTs (*Internet of Things*) para coletar, armazenar e compartilhar informações sobre o status de equipamentos e manutenções. Com essa tecnologia, é possível uma autoconfiguração e otimização rápidas e flexíveis. Além disso, as informações geradas são retroalimentadas para os sistemas MES (*Manufacturing Execution System*) e ERP (*Enterprise Resource Planning*), fundamentando decisões de gerenciamento futuras (CHEN; XING, 2015).

Segundo Zironi e Okada (2021), a manufatura 4.0 segue os pilares da indústria 4.0, incluindo Big Data, IoT, Segurança da Informação, Computação em Nuvem, Realidade Aumentada e Manufatura Aditiva. Big Data refere-se à coleta e análise de grandes volumes de dados para apoiar a tomada de decisão. IoT integra recursos físicos e virtuais em redes conectadas à internet, permitindo a coleta e troca de dados em tempo real. Segurança da Informação assegura a integridade, disponibilidade e confidencialidade dos dados. Computação em Nuvem permite o armazenamento e processamento de dados na internet. Realidade Aumentada cria ambientes virtuais tridimensionais para diversas aplicações. Manufatura Aditiva usa essas tecnologias no contexto industrial para digitalizar e monitorar processos produtivos, reduzindo inconformidades.

Essa modernização é visível no polo de confeções do Agreste de Pernambuco, impulsionado pela revolução da Indústria 4.0. Nesse novo cenário, as empresas têxteis estão redefinindo suas operações, integrando tecnologias avançadas como a Internet das Coisas, automação e análise de dados. À medida que a região abraça os princípios da Indústria 4.0, percebe-se um discreto movimento em direção a processos mais eficientes e produção personalizada (FERREIRA et al., 2021).

Para promover a transformação digital de micro, pequenas e médias empresas, o SENAI-PE (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial de Pernambuco), em conjunto

com SEBRAE-PE (Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas de Pernambuco), lançaram oficialmente em 2021, a plataforma MInA (Minha Indústria Avançada)(ALVES; SANTOS, 2022). O MInA é uma solução MES integrada que utiliza sensores, IoTs, Internet, nuvem computacional e plataforma supervisória para coletar, processar e monitorar dados da produção dos mais variados seguimentos de mercado, como o têxtil, em tempo de execução. Ao digitalizar o processo produtivo desejado, o usuário poderá utilizar desktops, tablets, smartphones e demais dispositivos móveis para monitorar remotamente a produção (MINA, 2023). Na Figura 1, é apresentada a área de trabalho da plataforma, onde os operadores podem monitorar os registros automáticos da produção, assim como os eventos de paradas planejadas, agendadas e não planejadas.

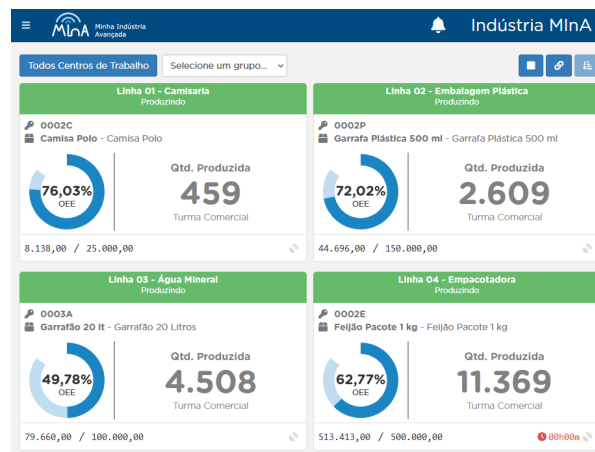


Figura 1 – Área de trabalho plataforma MES MInA (Minha Indústria Avançada).

Embora o uso de plataformas de monitoramento da produção sejam perfeitamente aplicáveis ao contexto têxtil, é preciso compreender que estes sistemas apresentam informações baseadas no histórico parcial de produção. Isso significa que um produto ao passar por um sensor ele é imediatamente contabilizado, encaminhado para um dispositivo IoT e em seguida encaminhado para a plataforma MES no formato digital, como uma contagem de produto bom. A repetição desse comportamento origina o ciclo produtivo do produto. Quando o ciclo é estabelecido, significa que há uma frequência de passagem dos produtos que tende a ser contínua. Enquanto houver fluxo de produtos, a plataforma MES contabiliza e extrai métricas de desempenho e qualidade da máquina.

3.2 Redes de Petri

As redes de Petri são uma ferramenta de modelagem matemática e gráfica representada por um grafo bipartido direcionado, denotado por $N = (T, P, A)$, onde $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ é um conjunto de transições, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ é um conjunto de lugares ($T \cup P$ formam os nós de N), e $A \subseteq \{T \times P\} \cup \{P \times T\}$ é um conjunto de arcos direcionados. A marcação M é uma função que atribui *tokens* aos lugares. O estado da rede é definido quando um lugar está marcado com um *token*. Uma rede de Petri $N = (T, P, A)$ com marcação M é uma Rede de Petri Marcada $C = (T, P, A, M)$ (AGERWALA, 1979; PETERSON, 1982). A Figura 2 detalha os elementos utilizados para modelar uma rede de Petri.

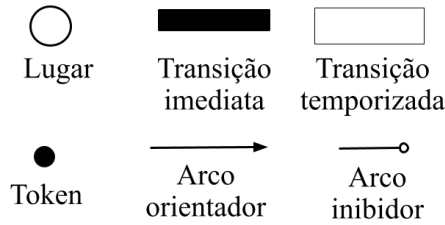


Figura 2 – Elementos das redes de Petri.

Os lugares habilitados são representados por círculos vazios, enquanto os lugares desabilitados são representados por círculos preenchidos com pequenos pontos pretos (*tokens*). As transições imediatas são representadas por finos retângulos preenchidos, já as transições temporizadas são representadas por retângulos maiores e vazios. Os arcos orientadores (arestas dirigidas) ligam os lugares às transições e vice-versa. Os *tokens* (pontos pretos ou apenas um número) podem residir em lugares. O número atual de *tokens* em cada lugar denota o estado global de uma rede de Petri (ou seja, a marcação). Um arco inibidor é um tipo especial de arco que representa um pequeno círculo branco numa extremidade, utilizado para desativar as transições se houver *tokens* presentes no seu lugar de origem (BALBO et al., 1987).

As redes de Petri clássica, também conhecida como redes de Petri pura, não utiliza a propriedade de tempo. Para lidar com essa questão, muitas extensões foram propostas. Um caso especial é a SPN (MOLLOY, 1982), onde os tempos (por exemplo, *delays*) associados as atividades (representadas como transições) são considerados variáveis aleatórias com distribuições exponenciais. Adicionalmente, Marsan et al. (MARSAN et

al., 1984) propuseram as GSPNs, que são uma extensão das SPNs que considera dois tipos de transições: temporizadas e imediatas. Tempos de disparo exponencialmente distribuídos estão associados com as transições temporizadas, enquanto as transições imediatas disparam em tempo zero, ambas as transições para serem disparadas, precisam ter a condição de habilitação da transição ativa (presença de um token no lugar P). Por uma questão de concisão, o acrônimo SPN aqui é usado para expressar toda a família de modelos derivados das SPNs. A Figura 3 apresenta um exemplo de modelo SPN que representa um sistema de falha e reparo.

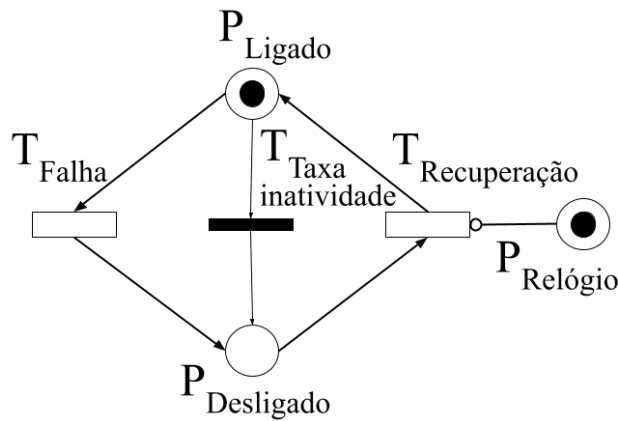


Figura 3 – Exemplo básico de Modelo SPN.

O lugar P_{Ligado} , quando ocupado por um *token*, indica que o sistema está operante, enquanto o lugar $P_{\text{Desligado}}$, quando ocupado por um *token*, indica que o sistema está inoperante. A atividade temporizada T_{Falha} move o *token* do lugar P_{Ligado} para o lugar $P_{\text{Desligado}}$. A atividade $T_{\text{Recuperação}}$ move o *token* do lugar $P_{\text{Desligado}}$ para o lugar P_{Ligado} . O lugar $P_{\text{Relógio}}$, quando ocupado por um *token*, indica que o sistema está em funcionamento pleno. O arco inibidor do lugar $P_{\text{Relógio}}$ para a atividade temporizada $T_{\text{Recuperação}}$ indica que há uma condição de reparo baseado no tempo. A atividade imediata T_{Taxa} conecta o lugar P_{Ligado} ao lugar $P_{\text{Desligado}}$. Esta atividade imediata permite calcular a taxa de inatividade do sistema baseada na ocorrência de eventos de falha e reparo.

O comportamento das redes de Petri, em geral, é definido em termos de um fluxo de *tokens*, onde os *tokens* são criados e consumidos conforme as regras de disparo das transições. As transições imediatas representam atividades instantâneas e têm maior prioridade de disparo do que as transições temporizadas. Adicionalmente, as transições imediatas podem conter funções de guarda, prioridades e probabilidades. As regras de disparo das transições em redes de Petri são fundamentadas na noção de habilitação. Uma

transição está habilitada para disparar quando todas as suas transições de entrada possuem ao menos um *token* em cada lugar associado. Em outras palavras, uma transição pode disparar somente se todos os seus pré-requisitos (lugares de entrada) estiverem marcados com ao menos um *token*. Quando uma transição é disparada, consome os *tokens* dos lugares de entrada e produz *tokens* nos lugares de saída, conforme definido pela modelagem da rede de Petri. Essa dinâmica de habilitação e disparo é fundamental para o entendimento e a modelagem do comportamento de sistemas utilizando redes de Petri, proporcionando uma representação formal e visual das interações entre as diferentes atividades do sistema (MURATA, 1989). Para mais informações sobre as SPNs, os leitores podem consultar os trabalhos (MACIEL et al., 1996), (HAAS, 2006) e (LIMA et al., 2021).

3.3 Considerações Finais

Neste Capítulo, foram discutidas as mudanças tecnológicas na indústria têxtil e a necessidade de adaptação para se manter competitivas. Foram apresentadas as redes de Petri como uma ferramenta eficaz para modelar e otimizar esses processos, considerando, fatores como o tempo das atividades e os recursos. Esses temas combinados são essenciais para apoiar a modelagem e análise dos processos produtivos da Indústria 4.0 na manufatura têxtil, visando melhorias e sustentabilidade operacional.

4 Metodologia e infraestruturas adotadas

A metodologia adotada neste estudo foi desenvolvida pelos autores com base em trabalhos amplamente reconhecidos pela academia. Destaca-se a parceria entre a UFRPE e o Instituto SENAI de Inovação para Tecnologias da Informação e Comunicação (ISI – TICs), que facilitou o acesso às empresas. Este capítulo detalha a metodologia utilizada para a modelagem e análise de manufaturas têxteis e discute as infraestruturas adotadas, considerando tanto a manufatura tradicional quanto a 4.0.

4.1 Metodologia

Esta Seção descreve a metodologia empregada na análise e modelagem de infraestruturas têxteis. No entanto, para realizar a escolha das empresas candidatas a participar do estudo de caso foram estabelecidos os seguintes critérios:

- As empresas devem possuir processos manufaturados tradicionais e/ou 4.0.
- As empresas devem possuir dificuldades em estimar o desempenho operacional.
- As empresas devem estar abertas para a realização de estudos de caso.
- As empresas devem viabilizar, quando necessário, o acesso ao chão de fábrica.
- As empresas devem viabilizar, quando necessário, os dados da produção.

Uma vez selecionada a empresa, é iniciada a metodologia adotada conforme ilustrado na Figura 4. A metodologia é composta por três macro atividades: estudo preliminar (a), avaliação (b) e melhoria (c). Divididas em 6 etapas: entender da empresa, definir do foco da avaliação, gerar modelo, definir parâmetros, avaliar modelos e melhorar o processo produtivo.

A metodologia adotada inicia com o entendimento da manufatura através da escolha do processo produtivo e da compreensão de suas especificidades (ex.: confecção de roupas infantis, confecção de camisas polo, etc.). Em seguida, com base nas expectativas da empresa e no escopo do estudo, é definido o foco da avaliação, no caso desse estudo foi definida, tendo como critérios: a avaliação de desempenho, disponibilidade e confiabilidade.

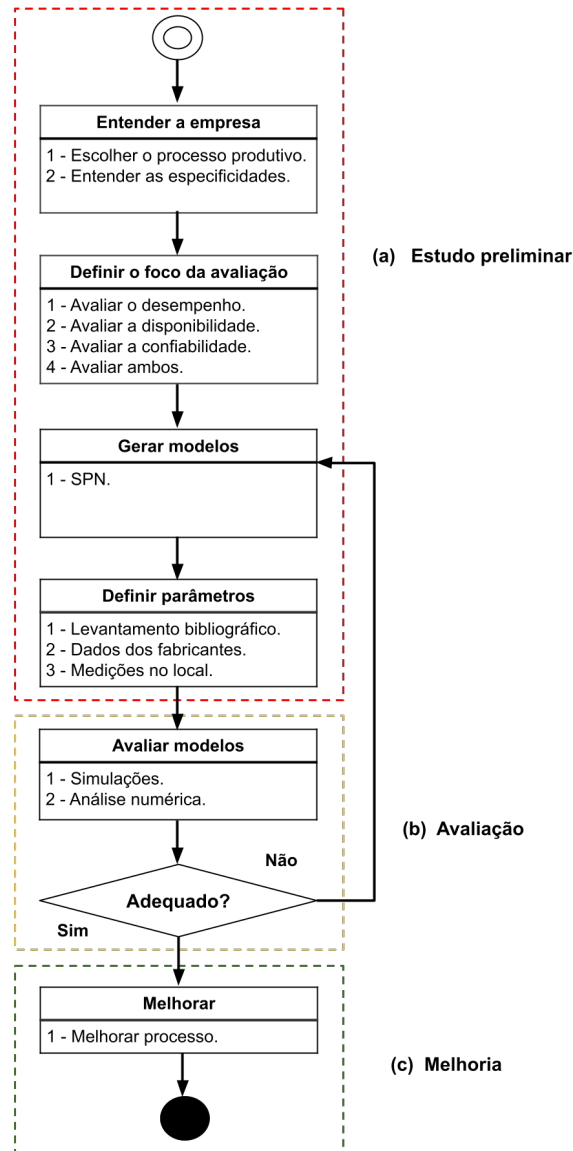


Figura 4 – Metodologia adotada.

Essa escolha é primordial, visto que os modelos e parâmetros das etapas subsequentes dependem dessa definição. Por exemplo, ao optar por um modelo de desempenho, serão analisadas informações relacionadas aos processos produtivos, como os tempos de execução das atividades, taxa de produção e índice de utilização dos recursos. No caso da disponibilidade, consideram-se métricas como disponibilidade da infraestrutura e tempo de downtime. Para a confiabilidade, são analisados os índices de falha e a confiabilidade dos recursos.

Uma vez definido o foco, são gerados os modelos SPNs dos processos produtivos adotados. O fluxo prossegue com a definição dos parâmetros, os quais são estabelecidos por meio de estudos bibliográficos, levantamento de dados fornecidos por fabricantes dos

equipamentos e obtidos no local. Esses parâmetros desempenham um papel crucial como entradas para o modelo, permitindo a realização das avaliações. Vale destacar que a análise numérica foi adotada para obter os resultados deste trabalho. A depender do foco da avaliação escolhido, diferentes conjuntos de parâmetros serão necessários, garantindo uma análise precisa e adequada aos objetivos do estudo.

Os modelos, em seguida, são avaliados por simulações e análises numéricas. Os resultados são avaliados e, se não atenderem as expectativas, o modelo retorna à fase “Gerar modelo” para aprimoramento. Caso contrário, segue-se para a fase “Melhorar”, propondo melhoria nos arranjos do processo produtivo real com base nos resultados apresentados. É importante destacar que o estudo não busca resultados positivos ou negativos específicos. Seu objetivo é identificar os arranjos mais eficientes e sugerir possíveis ajustes nos processos produtivos. A decisão de utilizar ou não os resultados para fundamentar melhorias nos processos cabe à empresa.

4.2 Infraestruturas

Compreender as especificidades do processo produtivo é essencial para entender como os recursos interagem na infraestrutura da empresa. Identificar as atividades mais estratégicas para a produção de um produto específico pode ser desafiador, exigindo controle rigoroso, mão de obra qualificada, equilíbrio entre demanda e capacidade, e registro detalhado da produção, rejeições e condições. Este capítulo apresentará as infraestruturas utilizadas nas análises, começando pela manufatura tradicional e, em seguida, abordando a manufatura 4.0.

4.2.1 Infraestrutura têxtil tradicional

A infraestrutura concebida foi baseada numa empresa de confecção têxtil tradicional, especializada na produção de lotes de peças (macacões) infantis. Essa empresa está localizada na cidade de Caruaru, a qual faz parte do polo de confecção do Agreste de Pernambuco. A Figura 5 representa as 7 fases do processo produtivo da confecção têxtil dessa empresa: cortar o lote de tecido (A1), costurar lote de tecido (A2), beneficiar lote (A3), costurar lote pós-beneficiado (A4), pré-embalar lote (A5), embalar lote (A6) e estocar

lote (A7).

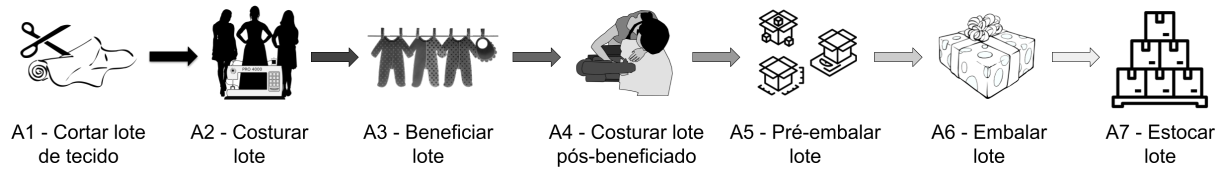


Figura 5 – Ciclo produtivo manufatura têxtil tradicional.

Na fase de cortar o lote de tecido (A1) é realizado o corte das folhas de tecido que originam a frente e o verso das peças. Nessa fase, é utilizada uma máquina de corte de alta precisão operada por um operador. O tecido chega em uma grande bobina, é acoplado na máquina de corte e a máquina recebe o comando via software para cortar o tecido em vários pedaços retangulares de mesmo tamanho. O tecido é cortado e sobrepostos pela própria máquina formando um fardo de tecido cortado. Em seguida, o operador inspeciona a posição o laser da máquina na direção do fardo para que este seja cortado conforme as medidas predefinidas no software que controla a máquina de corte. O fardo é então cortado sob medida com o máximo de utilização do tecido e com possibilidade quase nula de erro no corte do tecido. Após o fardo ser cortado nas posições de frente e verso da peça, esse fardo recebe o nome de lote e segue para a próxima fase do processo, costura.

A fase de costura do lote de tecido (A2) consiste na união (costura manual) da frente com o verso do tecido cortado. É nessa fase que os cortes do tecido são transformados em peças. As costureiras disponíveis nas células de costura (local onde uma ou mais costureiras estão reunidas para confeccionar as peças) recebem o tecido cortado e iniciam o processo de costura. Após finalizar a costura da peça ela é inspecionada por uma costureira que assume o papel de inspeção, caso a peça esteja costurada adequadamente (OK) ela seguirá para a próxima fase do processo, beneficiar lote. Caso a costura esteja inadequada (RUIM) ela seguirá para a fase de ajuste.

A atividade de beneficiar lote (A3) consiste na inserção de etiqueta e estamparia das peças. Nessa fase o lote é encaminhado para uma empresa terceira especializada no beneficiamento automatizado de peças têxteis. Eventualmente, para a empresa contratante, pode ocorrer um maior tempo de espera mediante o deslocamento do lote para a empresa contratada somado ao tempo de processamento do lote que concorre com outros lotes vindos de outras empresas têxteis. O lote é inspecionado por amostra, caso aproximadamente 20% do lote esteja conforme os critérios de qualidade definidos pela empresa é assumido

que o restante das peças está adequado. Assim que as peças retornam para a empresa, elas seguem para a próxima fase do processo, costura pós-beneficiamento. Por esse motivo o tempo médio da atividade de beneficiamento nessa empresa é maior se comparado a empresas que possuem o processo beneficiamento interno.

A fase costurar lote pós-beneficiado (A4) consiste na costura dos bordados, inserção de botões e outros adereços para acabamento dos lotes. Nessa fase as costureiras tendem a consumir menos tempo na costura das peças. Por outro lado, as costureiras ficam mais sobrecarregadas, pois também recebem novos lotes de tecidos cortados para realizar a primeira costura. Para essa concorrência de demandas existem um critério de prioridades, caso existir um lote de tecido cortado e um lote de peças beneficiadas na fila para costura, a prioridade será costurar o lote de peças beneficiadas. Essa prioridade é definida para que as peças beneficiadas sigam para as próximas fases do processo produtivo e sejam finalizadas. Caso não existisse esse critério poderia haver excesso de trabalho e poucos lotes adequados para seguir para as próximas fases do processo, resultando em um gargalo do processo.

A fase de pré-embalagem (A5) consiste em dobrar, ensacar e separar as peças por tipo, tamanho e cor. Já na fase embalar lote (A6) consiste na inserção da peça ensacada numa embalagem específica contendo informações da empresa e do produto como a cor, o gênero e o tamanho. Nessa fase, a peça é consolidada como produto pronto, é contabilizada e organizada para seguir para a próxima fase, estoque. Na fase estocar lote (A7) os produtos são encaixotados e estocados para iniciação dos trâmites de logística e distribuição. Nessa fase o produto está apto para ser comercializado junto aos distribuidores e lojistas da região.

Dentre os diversos produtos fabricados por esta confecção têxtil, a escolha por modelar a produção de macacões infantis foi definida por duas razões. Primeiro, esse produto possuía tempos de produção disponíveis para análise. Segundo, trata-se de uma peça de destaque na linha de produção da empresa. Além disso, o interesse da confecção em identificar gargalos para possíveis melhorias motivou a análise voltada a avaliação de desempenho. Por fim, os tempos de produção das etapas dessas peças foram fornecidos pelo gerente do chão de fábrica, sendo esses dados utilizados como entrada para o modelo que será descrito no Capítulo 5.

4.2.2 Infraestrutura têxtil 4.0

A infraestrutura concebida foi baseada numa empresa de confecção têxtil 4.0, especializada na produção de lotes de peças (Camisas polo) adultos. Essa empresa está localizada na cidade de Caruaru, a qual faz parte do polo de confecção do Agreste de Pernambuco. Essa manufatura foi classificada como manufatura 4.0 por utilizar no processo produtivo recursos tecnológicos de digitalização e monitoramento da produção, conforme os pilares destacados na Seção 3.1. Entre esses recursos estão os sensores ópticos de barreira, o coletor IoT, as conexões de acesso à internet WIFI e 4G, a plataforma MES (Nuvem Computacional) e o computador usado para visualizar os dados na plataforma (Terminal de Monitoramento). A Figura 6 (a) representa as 6 fases do processo produtivo da confecção têxtil dessa empresa: cortar lote de tecido (A1), costurar lote de tecido (A2), encestar lote (A3), inspecionar lote (A4), embalar lote (A5) e estocar lote (A6).

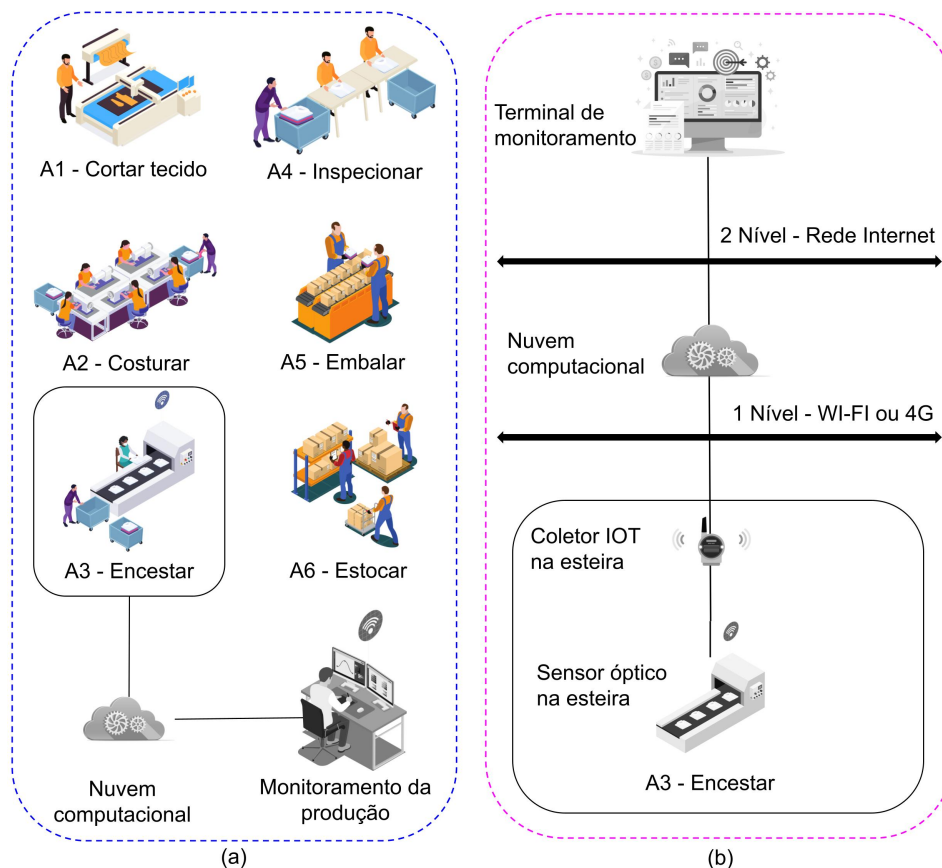


Figura 6 – (a) Processo produtivo; (b) Encestamento, nuvem computacional e terminal de monitoramento.

Já a Figura 6 (b) ilustra o ambiente tecnológico adotado, que consiste em 3 camadas: encestamento (com uso de sensores e IoT), nuvem computacional e terminal

de monitoramento. A fase de encestamento utiliza um sensor instalado na esteira para contabilizar a passagem dos produtos. O sensor é conectado fisicamente por cabo ao dispositivo IoT que, por sua vez, envia as contagens para a nuvem computacional. A nuvem computacional processa os dados enviados pelo IoT, enquanto o terminal de monitoramento permite que os operadores acompanhem, no formato digital, a evolução da produção. No ambiente adotado, o coletor IoT recebe as contagens da fase de encestamento e utiliza a conexão WI-FI ou 4G para enviar os dados para a nuvem computacional processar e disponibilizar as informações no terminal de monitoramento on-line.

Antes de detalhar o comportamento das fases na infraestrutura, é importante observar que existem fases semelhantes às apresentadas na Subseção 4.2.1, uma vez que as empresas dos estudos de caso pertencem ao mesmo segmento de manufatura têxtil. Portanto, atividades semelhantes, como corte (A1), costura (A2), inspeção (A4), embalagem (A5) e estoque (A6), não serão detalhadas em profundidade. A atividade de encestamento (A3), no entanto, será abordada de maneira mais detalhada no início desta Seção, devido à sua complexidade e importância para a digitalização do processo produtivo.

Na fase de corte (A1), o tecido é cortado para formar a frente e o verso das peças. Em seguida, na fase de costura, as partes são costuradas manualmente (A2). Na fase de encestamento (A3), as peças são contadas automaticamente. As costureiras passam as peças diante de um sensor óptico, que registra instantaneamente a contagem de peças aprovadas. Esse processo é quase imediato, podendo durar apenas centésimos de segundos, desde que não haja lentidão na conexão de internet local. Posteriormente, na fase de inspeção (A4) as peças são avaliadas para garantir qualidade. Em seguida, as peças são embaladas (A5) com informações relevantes. Por fim, as peças são encaixotadas e estocadas (A6) para distribuição. Vale destacar que o processo produtivo dessa manufatura concentra-se na fabricação de camisas Polo Piquet e foi motivado por dois fatores: primeiro, a especialização da empresa na produção desse produto; segundo, a disponibilização dos tempos de produção pela empresa para análise, sendo esses dados utilizados como entrada para o modelo descrito no Capítulo 5.

4.3 Considerações Finais

Neste Capítulo, foi detalhada a metodologia adotada e o fluxo operacional específico para cada tipo de manufatura, mostrando como os processos produtivos são organizados. Foi apresentada a infraestrutura da manufatura têxtil tradicional, com seu ciclo produtivo clássico, e também a infraestrutura da manufatura têxtil 4.0, que incorpora avanços tecnológicos como IoT e computação em nuvem. A integração desses temas é essencial para demonstrar como a modernização por meio da Indústria 4.0 pode melhorar a eficiência, reduzir custos e aumentar a competitividade no setor têxtil, combinando práticas tradicionais com inovações tecnológicas.

5 Modelos propostos

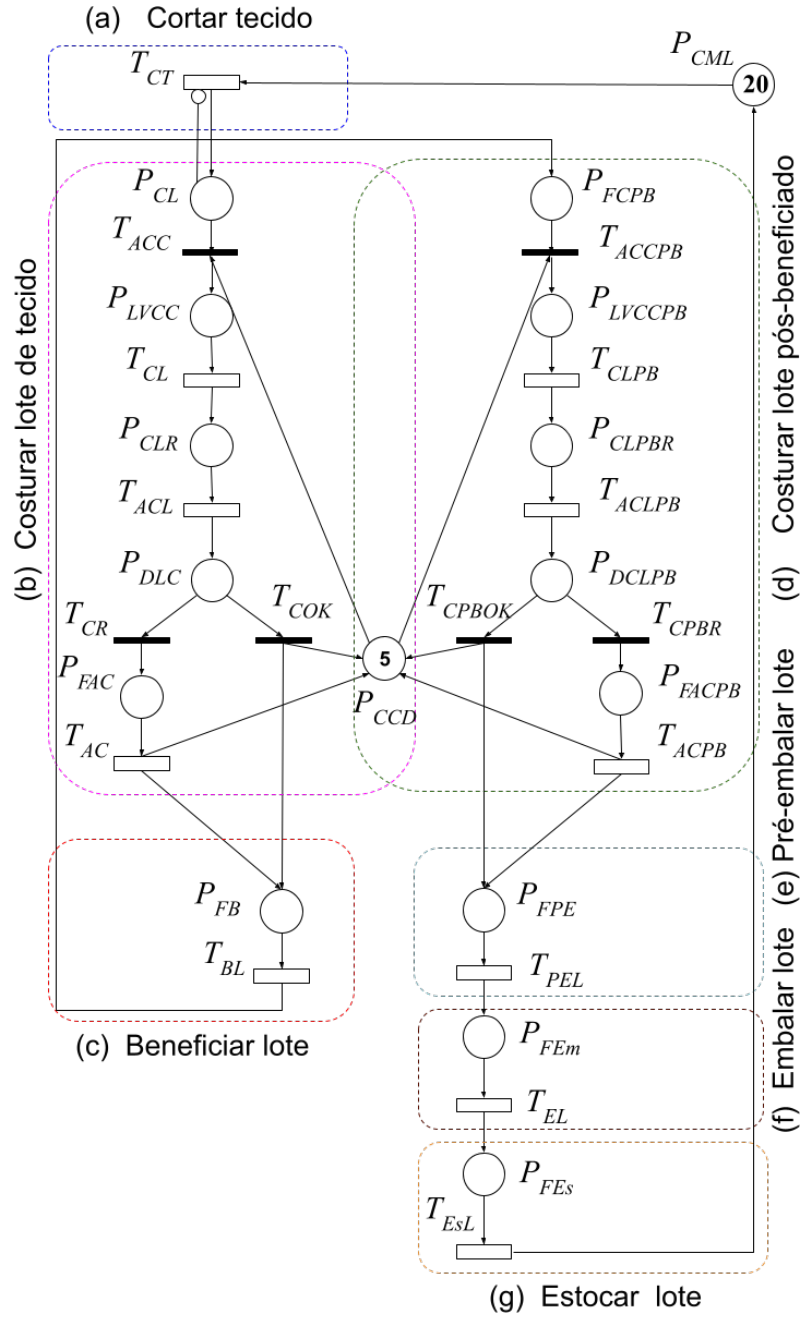
O processo de modelagem descreve o comportamento do processo produtivo real e sintetiza parâmetros como tempos das atividades, decisões de qualidade baseadas na probabilidade de ocorrência, prioridades das atividades no fluxo produtivo, capacidade produtiva, recursos compartilhados, filas, avaliação de métricas e análises numéricas dos dados extraídos. Neste capítulo, serão apresentados os modelos analíticos relacionados à manufatura têxtil tradicional, seguidos pelos modelos da manufatura 4.0. Além disso, serão discutidas as prioridades, funções de controle e tempos de transição em ambos os contextos.

5.1 Modelo SPN de desempenho da manufatura têxtil tradicional

A Figura 7 ilustra o modelo que representa o processo de confecção de lotes de macacões infantis, conforme detalhado na Figura 5. O modelo desenvolvido possui sete fases: cortar tecido (a), costurar lote de tecido (b), beneficiar lote (c), costurar lote pós-beneficiado (d), pré-embalar lote (e), embalar lote (f) e estocar lote (g). Antes de iniciar o detalhamento do modelo, é preciso ressaltar que os nomes das transições por padrão é iniciado com a letra T seguida da sigla que representa o nome da atividade, enquanto o nome dos lugares é iniciado com a letra P seguida da sigla que representa as filas, decisões ou estados.

O processo de confecção do lote de macacão infantil é iniciado na fase (a), quando a atividade T_{CT} (cortar tecido) é executada por uma máquina de corte industrial operada por um funcionário. O ritmo do corte do tecido ajuda a determinar a capacidade de lotes que a infraestrutura pode suportar. Quanto menor o tempo médio de corte, maior será o trabalho das fases posteriores. Logo, devido a restrições de capacidade operacional da manufatura têxtil, a produção é finita, baseada em metas diárias, semanais e mensais, tendo o lote de produtos como a unidade de medida usada para mensurar a meta produtiva, onde cada lote equivale a 300 produtos e a meta produtiva mensal equivale a 6000 produtos. Logo, 20 lotes é o limite mensal da manufatura abordada, produzir mais que isso no mês pode extrapolar a capacidade de produção das 5 células de costura, sendo necessário limitar. Por esse motivo, o lugar P_{CML} possui a função de configurar a quantidade de lotes que a

infraestrutura pode processar. Logo, P_{CML} está conectado a T_{CT} para controlar a chegada de tecido e evitar gargalos na infraestrutura.



** Ver descrição das siglas nas Tabelas 2 e 3.

Figura 7 – Modelo SPN de desempenho do processo produtivo do macacão na manufatura tradicional.

Outro detalhe importante é a existência do arco inibidor do lugar P_{CL} para T_{CT} . A adoção desse arco inibidor no início do modelo evita a possibilidade de acúmulo de tecido cortado em P_{CL} a espera de uma célula de costura disponível para processá-lo, visto que a

demanda de tecido cortado precisa acompanhar a capacidade de confecção manufaturada das células de costura. Na fase (b), o lote é acomodado no lugar P_{CL} (chegada do lote), onde a transição T_{ACC} (acionar célula de costura) verifica o lugar P_{CCD} (células de costura disponíveis). Vale destacar que o lugar P_{CCD} configura a quantidade de células de costura disponíveis na infraestrutura. Este lugar acomoda 5 tokens, cada um representando uma célula de costura responsável pelo processamento dos lotes de produtos. A ausência de qualquer uma dessas células pode impactar negativamente o desempenho da produção. Assumindo que haja células disponíveis, o lote é imediatamente transferido para o lugar P_{LVCC} (lote vinculado a célula de costura). O fluxo habilita a transição T_{CL} (costurar lote), que transfere o lote para o lugar P_{CLR} (costura de lote realizada), habilitando a transição T_{ACL} (avaliar costura do lote). Após avaliação, o lote é transferido para o lugar P_{DLC} (decisão de lote costurado). Caso a qualidade do lote esteja conforme, a transição T_{COK} (costura ok) é habilitada e o lote transferido para o lugar P_{FB} (fila de beneficiamento) na fase (c). Caso a qualidade esteja não conforme, a transição T_{CR} (costura ruim) será habilitada e o lote será transferido para P_{FAC} (fila de ajuste de costura), habilitando a atividade T_{AC} (ajustar costura). Ajustada a costura, o lote é transferido para P_{FB} (fila de beneficiamento).

Na fase (c), o lote é beneficiado através da atividade T_{BL} (beneficiar lote). Em seguida, na fase (d), o lote beneficiado é transferido para o lugar P_{FCPB} que representa a fila de costura pós-beneficiamento. A transição imediata T_{ACCPB} , verifica as possibilidades de células de costura disponíveis (P_{CCD}). Assumindo que haja minimamente uma célula de costura disponível no lugar P_{CCD} , o lote beneficiado é transferido imediatamente para o lugar P_{LVCCPB} (lote vinculado a célula de costura pós-beneficiamento). O fluxo habilita a atividade T_{CLPB} (costurar o lote de tecido pós-beneficiado), onde o lote beneficiado é costurado e transferido para o lugar P_{CLPBR} (costura do lote pós-beneficiado realizada). Esse fluxo continua e habilita a atividade T_{ACLPB} que avalia a costura do lote pós-beneficiado. Após avaliação, o lote é transferido para o lugar P_{DCLPB} (decisão de lote pós-beneficiado). Caso a costura do lote esteja conforme, a transição T_{CPBOK} (costura pós-beneficiamento ok) será habilitada e o lote será transferido para o lugar P_{FPE} (fila de pré-embalagem) na fase (e). Caso a qualidade da costura pós-beneficiamento do lote esteja não conforme, a transição T_{CPBR} (costura pós-beneficiamento ruim) será habilitada e o lote seguirá para P_{FACPB} (fila de ajuste de costura pós-beneficiamento), que habilitará a

atividade T_{ACPB} (ajustar costura pós-beneficiamento). Em seguida, o lote é transferido para P_{FPE} (fila de pré-embalagem).

Uma vez na fila de pré-embalagem (fase (e)), o lote é pré-embalado através da transição T_{PEL} . Em seguida, na fase (f), o lote pré-embalado é transferido para P_{EM} (fila embalar lote) que habilita a atividade T_{EL} (embalar lote). Por fim, na fase (g), o lote embalado é transferido para P_{FES} (fila do estoque), que habilita a atividade T_{ESL} (estocar lote), concluindo o ciclo de vida da confecção do lote de macacão infantil.

Na Tabela 2 são apresentadas as atividades da infraestrutura representadas por transições temporizadas com *delays* (tempos) adotados na escala de horas. A atividade T_{CT} , em especial, apresenta a variação no tempo médio de corte do tecido de 0,0833 a 13 horas. Essa variação é padrão e foi adotada para representar o tempo médio de chegada da matéria-prima (tecido) para ser processada no modelo. As atividades e os tempos correspondentes foram coletados durante visita à manufatura no período de pandemia do COVID-19. Além das restrições provocadas pela pandemia, a empresa não possuía sistemas ou registros confiáveis dos tempos médios das atividades do processo produtivo. Havia apenas o conhecimento empírico das costureiras sobre os tempos médios das atividades de confecção dos principais produtos, como, por exemplo, o macacão infantil. Esses tempos foram confirmados de maneira verbal com o gestor de operações da manufatura. Porém, esses dados foram alterados, devido à sigilo da empresa.

TABELA 2 – Transições do modelo de desempenho da manufatura tradicional.

Transições	Descrição	Valores	Prioridade
T_{CT}	Cortar tecido	0,0833-13 (h)	-
T_{CL}	Costurar lote	2,0 (h)	-
T_{ACL}	Avaliar costura do lote	0,4 (h)	-
T_{AC}	Ajustar costura	0,2 (h)	-
T_{BL}	Beneficiar lote	1,0 (h)	-
T_{CLPB}	Costurar lote pós-beneficiado	1,5 (h)	-
T_{ACLPB}	Avaliar costura do lote Pós-beneficiado	0,3 (h)	-
T_{ACPB}	Ajustar Costura do lote Pós-beneficiado	0,15 (h)	-

Continua na próxima página

TABELA 2 – Transições do modelo de desempenho da manufatura tradicional
(continuação).

Transições	Descrição	Valores	Prioridade
T_{PEL}	pré-embalar lote	0,75 (h)	-
T_{EL}	Embalar lote	0,583 (h)	-
T_{EsL}	Estocar lote	0,417 (h)	-
T_{ACC}	Acionar célula costura	1 (prob.)	6
T_{COK}	Costura OK	0,99 (prob.)	5
T_{CR}	Costura Ruim	0,01 (prob.)	4
T_{ACCPB}	Acionar célula costura pós-beneficiamento	1 (prob.)	3
T_{CPBOK}	Costura pós-beneficiamento OK	0,99 (prob.)	2
T_{CPBR}	Costura pós-beneficiamento Ruim	0,01 (prob.)	1

Na Tabela 2 são apresentadas as probabilidades e prioridades adotadas. A prioridade determina a ordem de disparo das transições imediatas. Transições com maior prioridade (valores inteiros mais altos) são disparadas antes das com menor prioridade, esse comportamento é essencial para manter a fluidez dos *tokens* quando várias transições são habilitadas simultaneamente. Já a probabilidade indica a chance de disparo de uma transição imediata. Valores entre 0 e 1 determinam essa chance, com 1 significando a certeza de disparo. Em situações com múltiplas transições habilitadas, as probabilidades relativas influenciam qual transição poderá ocorrer com maior ou menor frequência. Na Tabela 3 são apresentadas as descrições dos lugares e a marcação inicial do modelo de desempenho da manufatura têxtil tradicional.

TABELA 3 – Distribuição inicial de *tokens* nos lugares do modelo de desempenho da manufatura tradicional.

Lugares	Descrição	<i>Tokens</i>
P_{CL}	Chegada do lote de tecido	0
P_{LVCC}	Lote vinculado a célula de costura	0

Continua na próxima página

TABELA 3 – Distribuição inicial de *tokens* nos lugares do modelo de desempenho da manufatura tradicional (continuação).

Lugares	Descrição	<i>Tokens</i>
P_{CLR}	Costura do lote realizada	0
P_{DLC}	Decisão de qualidade do lote costurado	0
P_{FAC}	Fila de ajuste da costura	0
P_{FB}	Fila de beneficiamento do lote	0
P_{FCPB}	Fila costura pós-beneficiada	0
P_{LVCCPB}	Lote vinculado a célula pós-beneficiamento	0
P_{CLPBR}	Costura do lote pós-beneficiamento realizada	0
P_{DCLPB}	Decisão de qualidade do lote pós-beneficiado	0
P_{FACPB}	Fila de ajuste da costura pós-beneficiamento	0
P_{FPE}	Fila de pré-embalagem	0
P_{FEm}	Fila de embalagem	0
P_{FEs}	Fila de estoque	0
P_{CCD}	Células de costura disponíveis	1-5
P_{CML}	Capacidade de lotes processados no mês	20

Já a Tabela 4 apresenta as métricas adotadas. A métrica de utilização calcula a razão entre o número total de células de costura ocupadas pelo número total de células de costura disponíveis para toda a infraestrutura. A métrica de tempo de produção do lote (*TPL*) é calculada com base na lei de *Little* (LITTLE, 1961), que relaciona a vazão média do sistema (V) e o número médio de itens no sistema (L). No processo de manufatura têxtil modelado, é utilizada a fórmula $TPL = ELI/V$, onde (ELI) representa o número médio de lotes e (V) a vazão média. Essa métrica fornece uma medida precisa e quantitativa do tempo necessário para produzir um lote completo, desde o corte do tecido até a embalagem, permitindo uma análise abrangente do desempenho do processo.

TABELA 4 – Métricas para avaliação de desempenho operacional do modelo SPN de manufatura têxtil tradicional.

Métricas	Funções
Utilização (U)	$\begin{aligned} & \text{return}(((\text{mark}("P_{LVCC}"))+(\text{mark}("P_{CLR}"))+(\text{mark}("P_{DLC}")) \\ & +(\text{mark}("P_{FAC}"))+(\text{mark}("P_{LVCCPB}"))+(\text{mark}("P_{CLPBR}")) \\ & +(\text{mark}("P_{DCLPB}"))+(\text{mark}("P_{FACPB}")))/((\text{mark}("P_{LVCC}")) \\ & +(\text{mark}("P_{CLR}"))+(\text{mark}("P_{DLC}"))+(\text{mark}("P_{FAC}"))+(\text{mark}("P_{LVCCPB}")) \\ & +(\text{mark}("P_{CLPBR}"))+(\text{mark}("P_{DCLPB}"))+(\text{mark}("P_{FACPB}")) \\ & +(\text{mark}("P_{CCD}")))); \end{aligned}$
Vazão (V)	$\begin{aligned} & \text{return}(\text{rate}("T_{EsL}")); \\ & \text{return}((\text{mark}("P_{CL}"))+(\text{mark}("P_{LVCC}"))+(\text{mark}("P_{CLR}"))+(\text{mark}("P_{DLC}")) \\ & +(\text{probmenor}*(\text{mark}("P_{FAC}")))+(\text{mark}("P_{FB}"))+(\text{mark}("P_{FCPB}")) \\ & +(\text{mark}("P_{LVCCPB}"))+\text{mark}("P_{CLPBR}"))+(\text{mark}("P_{DCLPB}")) \\ & +(\text{probmenor}*(\text{mark}("P_{FACPB}")))+(\text{mark}("P_{FPE}"))+(\text{mark}("P_{FEm}")) \\ & +(\text{mark}("P_{FEs}")))); \end{aligned}$
Expectativa de lotes na infraestrutura (ELI)	
Tempo de produção do lote (TPL):	ELI / V;

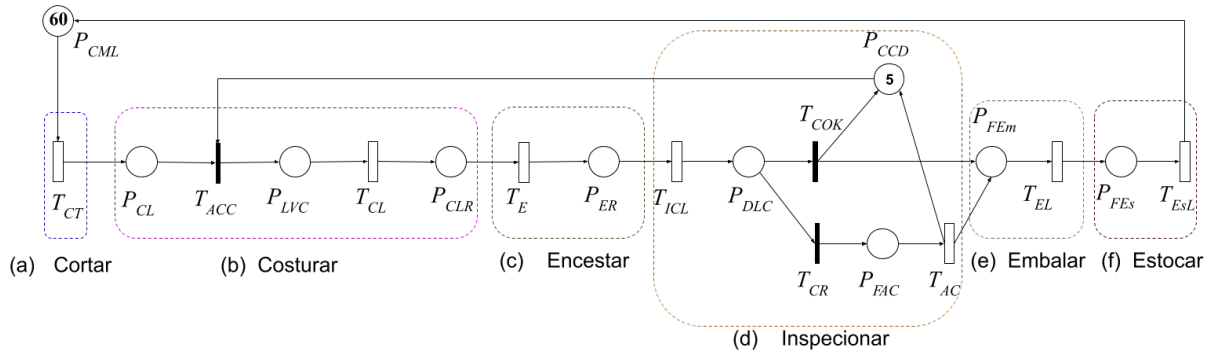
As métricas apresentadas na Tabela 4 foram baseadas na sintaxe da ferramenta de modelagem SPNP, que é a ferramenta adotada para as análises numéricas. Neste caso é importante esclarecer a importância das funções *return*, *mark* e *rate*: A função *return* é utilizada para especificar o valor que deve ser retornado por uma função. O valor retornado pode ser baseado no estado atual do modelo. A função *mark* retorna o número de *tokens* em um lugar específico do modelo, sendo essencial para avaliar o estado atual do modelo. Já a função *rate* determina a taxa de disparo das transições no modelo, variando conforme o estado do modelo e com o número de *tokens* em lugares específicos. A variável *probmenor* utilizada na função tem o objetivo de indicar as probabilidades associadas com as transições imediatas T_{CR} e T_{CPBR} no modelo, conforme apresentado na Tabela 3.

5.2 Manufatura têxtil 4.0

Nas subseções a seguir, serão apresentados os modelos de desempenho, disponibilidade e confiabilidade da manufatura têxtil 4.0.

5.2.1 Modelo SPN de desempenho da manufatura têxtil 4.0

A Figura 8 apresenta o modelo de desempenho proposto baseado no processo produtivo definido na Figura 6 (a). O disparo do processo de confecção do lote da camisa polo é iniciado na fase (a), quando a atividade T_{CT} (cortar tecido) é executada. O ritmo do corte do tecido ajuda a determinar a capacidade de lotes que a infraestrutura pode suportar. Por esse motivo, o lugar P_{CML} acomoda 60 *tokens*, os quais representam a capacidade máxima de lotes na infraestrutura. Logo, P_{CML} está conectado a T_{CT} para controlar a chegada de tecido e evitar gargalos na infraestrutura. Na fase (b), o lote é acomodado no lugar P_{CL} (chegada do lote), onde a transição T_{ACC} (acionar célula de costura) verifica o lugar P_{CCD} (costureiras disponíveis).



** Ver descrição das siglas na Tabela 5 e 6.

Figura 8 – Modelo SPN de desempenho da produção da manufatura têxtil 4.0.

Assumindo que haja disponibilidade, o lote é imediatamente transferido para o lugar P_{LVC} (lote vinculado a célula de costura). O fluxo habilita a transição T_{CL} (costurar lote), que transfere o lote para o lugar P_{CLR} (costura de lote realizada), habilitando a transição T_E (encestar lote) na fase (c). Após o encestamento, o lote é transferido para o lugar P_{ER} (encestamento realizado). Logo é iniciada a fase (d) com a transição T_{ICL} (inspecionar costura do lote) habilitada, transferindo o lote para o lugar P_{DLC} (decisão de lote costurado).

Caso a qualidade do lote esteja conforme esperado, a transição T_{COK} (costura ok) é habilitada e o lote transferido para o lugar P_{FEm} (fila de embalagem) na fase (e). Caso a qualidade esteja não conforme, a transição T_{CR} (costura ruim) será habilitada e o lote será transferido para P_{FAC} (fila de ajuste de costura), habilitando a atividade T_{AC} (ajustar costura). Ajustada a costura, o lote é transferido para P_{FEm} (fila de embalagem) na fase (e). Por fim, na fase (f), o lote embalado é transferido para P_{FEs} (fila do estoque), que habilita a atividade T_{EsL} (estocar lote), concluindo o ciclo de vida da confecção do lote da camisa Polo Piquet. Na Tabela 5 são apresentadas transições, valores e prioridades do modelo de desempenho da manufatura têxtil 4.0. Já na Tabela 6, são apresentados os lugares, descrições e a marcação inicial dos componentes do modelo.

TABELA 5 – Transições do modelo de desempenho da manufatura 4.0.

Transições	Descrição	Valores	Prioridade
T_{CT}	Cortar tecido	0,5 (h)	-
T_{CL}	Costurar lote	3,0 (h)	-
T_{EL}	Encestar lote	0,083333 (h)	-
T_{ICL}	Inspecionar	0,6 (h)	-
T_{AC}	Ajustar costura	0,3 (h)	-
T_{EL}	Embalar lote	0,5 (h)	-
T_{EsL}	Estocar lote	0,16667 (h)	-
T_{ACC}	Acionar célula	1 (prob.)	3
T_{COK}	Costura ok	0,99 (prob.)	2
T_{CR}	Costura ruim	0,01 (prob.)	1

TABELA 6 – Distribuição inicial de *tokens* nos lugares do modelo de desempenho da manufatura 4.0.

Lugares	Descrição	<i>Tokens</i>
P_{CL}	Chegada do lote de tecido	0

Continua na próxima página

TABELA 6 – Distribuição inicial de *tokens* nos lugares do modelo de desempenho da manufatura 4.0. (continuação)

Lugares	Descrição	<i>Tokens</i>
P_{LVC}	Lote vinculado a célula	0
P_{CLR}	Costura do lote realizada	0
P_{ER}	Encestamento realizado	0
P_{DLC}	Decisão do lote costurado	0
P_{FAC}	Fila de ajuste da costura	0
P_{FEm}	Fila de embalagem	0
P_{FEs}	Fila de estoque	0
P_{CCD}	Células de costura	1 - 5
P_{CML}	Capacidade de lotes	60

A Tabela 7 apresenta uma versão das métricas apresentadas na Tabela 4, onde a métrica de utilização calcula a razão entre o número total de células de costura ocupadas pelo número total de células de costura disponíveis para toda a infraestrutura. A métrica de tempo de produção do lote (TPL) relaciona a vazão média do sistema (V) e o número médio de itens no sistema (L). sendo sua fórmula $TPL = ELI / V$. Essa métrica calcula o tempo necessário para produzir um lote completo, desde o corte do tecido até a embalagem, possibilitando uma análise abrangente do desempenho do processo.

TABELA 7 – Métricas para avaliação de desempenho operacional do modelo SPN de manufatura têxtil 4.0.

Métricas	Funções
Utilização (U)	$\text{return}(((\text{mark}("P_{LVC}"))+(\text{mark}("P_{CLR}"))+(\text{mark}("P_{ER}"))+(\text{mark}("P_{DLC}"))$ $+(\text{mark}("P_{FAC}")))/((\text{mark}("P_{LVC}"))+(\text{mark}("P_{CLR}"))+(\text{mark}("P_{ER}"))$ $+(\text{mark}("P_{DLC}"))+(\text{mark}("P_{FAC}"))+(\text{mark}("P_{CCD}"))));$
Vazão (V)	$\text{return}(\text{rate}("T_{EsL}"));$

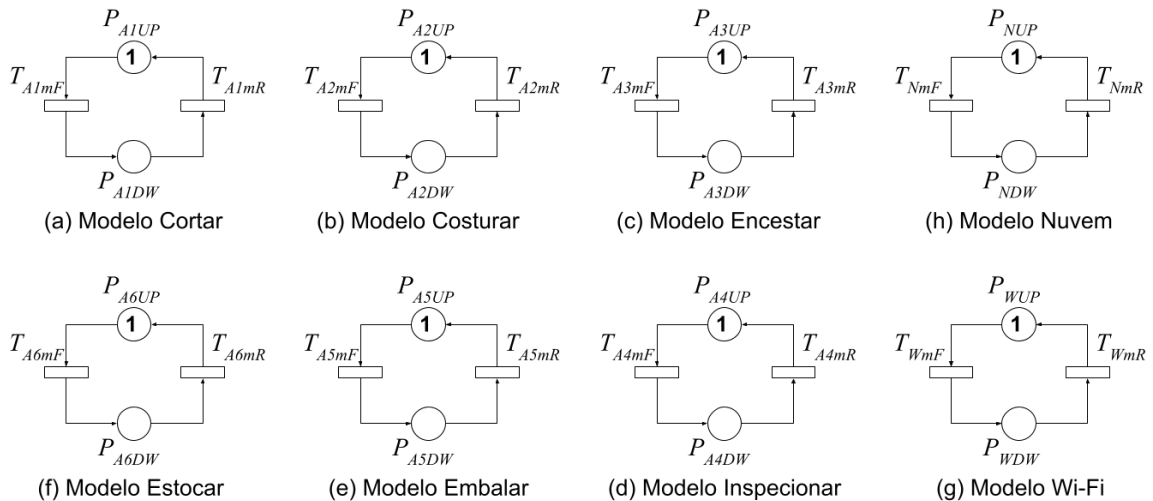
Continua na próxima página

TABELA 7 – Métricas para avaliação de desempenho operacional do modelo SPN de manufatura têxtil 4.0. (continuação)

Métricas	Funções
Expectativa de lotes na infraestrutura (ELI)	$\text{return}((\text{mark}("P_{CL}"))+(\text{mark}("P_{LVC}"))+(\text{mark}("P_{CLR}"))+(\text{mark}("P_{ER}"))$ $+(\text{mark}("P_{DLC}"))+(\text{probmenor}*(\text{mark}("P_{FAC}")))+(\text{mark}("P_{FE_m}"))$ $+(\text{mark}("P_{FE_s}")));$
Tempo de produção do lote (TPL)	ELI / V;

5.2.2 Modelos SPN de disponibilidade da manufatura têxtil 4.0

A Figura 9 apresenta os modelos de disponibilidade sem redundância de recursos com base na infraestrutura apresentada na Figura 6. Cada modelo representa a falha e reparo de uma das fases do processo produtivo ou de um componente tecnológico, incluindo o: modelo de corte (a), modelo de costura (b), modelo de encestamento (c), modelo de inspeção (d), modelo de embalagem (e) modelo de estoque (f), modelo WI-FI (g) e modelo de nuvem computacional (h).

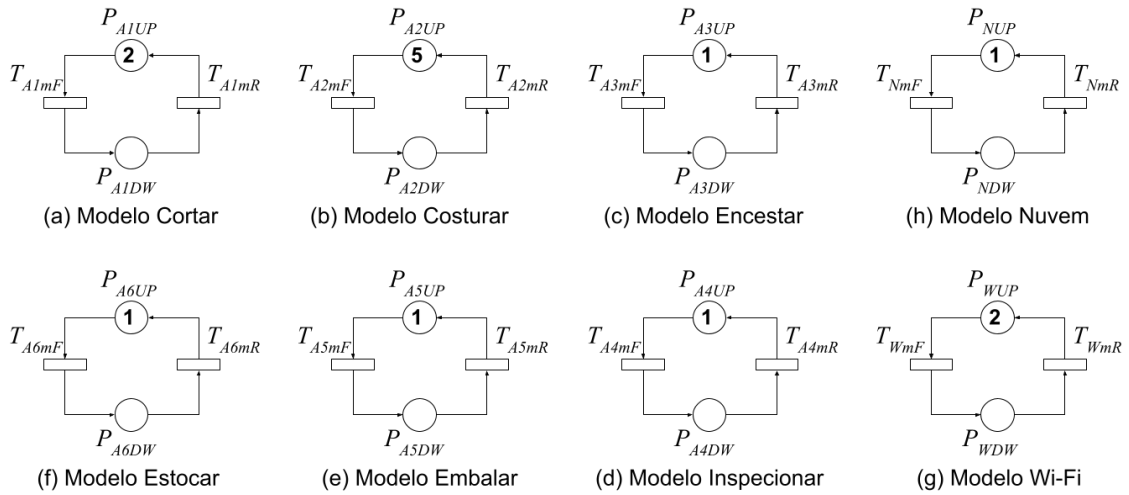


** Ver descrição das siglas na Tabela 9 e 10.

Figura 9 – Modelos SPNs de disponibilidade do processo produtivo da manufatura têxtil 4.0 sem redundância.

A Figura 9 (a) representa o comportamento de falha e reparo da máquina de corte de tecido, onde o token indica o status do funcionamento da máquina. As transições T_{A1mF} , e T_{A1mR} simbolizam a falha e o reparo, respectivamente. Quando ocorre uma falha, representada pelo disparo da transição T_{A1mF} , um token é movido de P_{A1UP} para P_{A1DW} , indicando a falha na máquina. O reparo, simbolizado pela transição T_{A1mR} , retorna o token para P_{A1UP} , indicando a restauração da operação normal da máquina. Os modelos das Figuras 9 (b), (c), (d), (e), (f) e (g) que representam a falha e o reparo de outras fases do processo produtivo ou componentes tecnológicos possuem um comportamento semelhante ao representado no modelo (a).

A Figura 10 apresenta uma versão do modelo da Figura 9, porém com redundância nas máquinas de corte de tecido, nas costureiras e na conexão de rede. Na Figura 10 (a), os *tokens* em P_{A1UP} indicam a quantidade de máquinas de corte. Dois *tokens* em P_{A1UP} significam duas máquinas em operação. O comportamento de falha e reparo é semelhante ao explicado anteriormente, em que T_{A1mF} representa a falha da máquina e T_{A1mR} representa o reparo dela. No entanto, vale destacar que a redundância na máquina de corte reduz a probabilidade de parada total na fase de corte de tecido.



** Ver descrição das siglas na Tabela 9 e 10.

Figura 10 – Modelos SPNs de disponibilidade do processo produtivo da manufatura têxtil 4.0 com redundância moderada.

Na Figura 10 (b), os *tokens* em P_{A2UP} representam as costureiras. Cinco *tokens* em P_{A2UP} denotam que 5 costureiras estão trabalhando. Se uma costureira falta, T_{A2mF} move um *token* de P_{A2UP} para P_{A2DW} . Ao ocorrer reposição, T_{A2mR} move um *token* de P_{A2DW} para P_{A2UP} . Observe que, devido à redundância de costureiras, a probabilidade de

interrupção total na fase de costura tende a ser menor.

A Figura 11 apresenta uma versão dos modelos da Figura 10, porém com redundância avançada em todos os componentes, exceto na nuvem computacional. Os modelos representados na Figura 11 (h) e (i) descrevem a falha e o reparo do ponto de acesso WI-FI e da estação base 4G. Já a ativação da conectividade WI-FI ou 4G é representada no modelo (g). Um *token* em P_{WAUP} significa WI-FI ativo. Com uma falha no WI-FI, um *token* é movido para P_{WDW} , ativando o 4G. Quando o WI-FI retorna, o 4G é desativado, reduzindo consumo e melhorando a disponibilidade. O comportamento do modelo de ativação na Figura 11 (g) é regulado pelas funções de guarda $g1_{MDCRA}$ e $g2_{MDCRA}$ atribuídas às transições imediatas T_{WIn} e T_{4GIn} , conforme detalhado na Tabela 8.

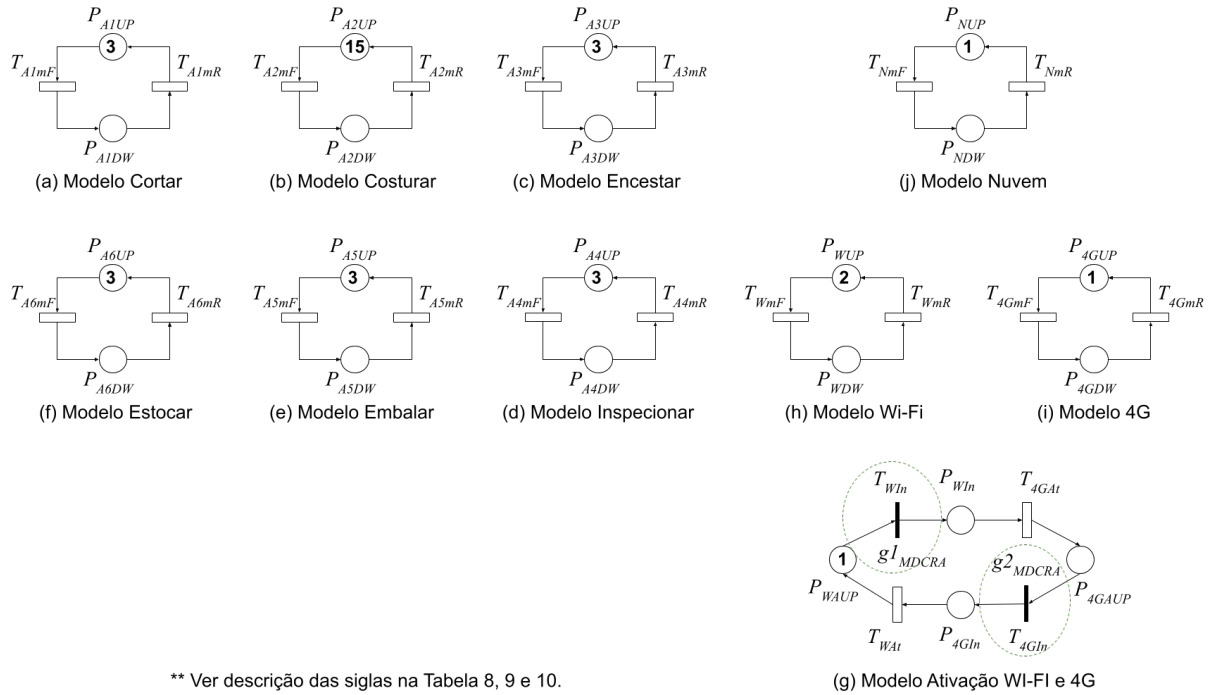


Figura 11 – Modelos SPNs de disponibilidade do processo produtivo da manufatura têxtil 4.0 com redundância avançada.

TABELA 8 – Expressões de guarda dos modelos de disponibilidade manufatura têxtil 4.0 com redundância avançada.

Guarda	Expressões
$g1_{MDCRA}$	if (mark("PWUP") == 1) return(1); else return(0);
$g2_{MDCRA}$	if ((mark("PWDW") == 1) && (mark("P 4GUP") == 1)) return(1); else return(0);

Na Tabela 9 são detalhadas as atividades da infraestrutura representadas por transições, incluindo os tempos, probabilidades, prioridades e descrições dos modelos apresentados nas Figuras 9, 10 e 11. É importante ressaltar que esses valores foram obtidos de uma infraestrutura têxtil real, localizada na cidade de Caruaru, polo de confecção do Agreste de Pernambuco. Porém, esses dados foram alterados em respeito ao sigilo da empresa.

TABELA 9 – Transições do modelo de disponibilidade da manufatura 4.0.

Transições	Descrição	Valores	Prioridade
T_{A1mF}	MTTF máquina de corte	2918 (h)	-
T_{A1mR}	MTTR máquina de corte	4 (h)	-
T_{A2mF}	Tempo médio de faltas	2191 (h)	-
T_{A2mR}	Tempo médio de reposição	2 (h)	-
T_{A3mF}	MTTF sensor Encestamento	5844,48 (h)	-
T_{A3mR}	MTTR sensor Encestamento	1 (h)	-
T_{A4mF}	Tempo médio de falta	2191 (h)	-
T_{A4mR}	Tempo médio de reposição	2 (h)	-
T_{A5mF}	Tempo médio de faltas	2191 (h)	-
T_{A5mR}	Tempo médio de reposição	2 (h)	-
T_{A6mF}	Tempo médio de faltas	2191 (h)	-
T_{A6mR}	Tempo médio de reposição	2 (h)	-
T_{WAt}	Ativação WI-FI	0,0013889 (h)	10
T_{WIn}	Ativação WI-FI	1 (prob.)	5
T_{4GAt}	Ativação 4G	0,0013889 (h)	-
T_{4GIn}	Ativação 4G	1 (prob.)	-
T_{WmF}	MTTF do WI-FI	10000 (h)	-
T_{WmR}	MTTR do WI-FI	1,6666 (h)	-
T_{4GmF}	MTTF do 4G	83220 (h)	-

Continua na próxima página

TABELA 9 – Transições do modelo de disponibilidade da manufatura 4.0. (continuação)

Transições	Descrição	Valores	Prioridade
T_{4GmR}	MTTR do 4G	12 (h)	-
T_{NmF}	MTTF da Nuvem	8766 (h)	-
T_{NmR}	MTTR da Nuvem	2 (h)	-

Já na Tabela 10 são detalhados os lugares, descrições e a marcação inicial dos modelos apresentados nas Figuras 9, 10 e 10.

TABELA 10 – Distribuição inicial de *tokens* nos lugares do modelo de disponibilidade da manufatura 4.0.

Lugares	Descrição	<i>Tokens</i>
P_{A1UP}	Máquinas funcionando	1 - 3
P_{A1DW}	Máquinas paradas	0
P_{A2UP}	Costureira presente	1 - 15
P_{A2DW}	Costureira ausente	0
P_{A3UP}	Sensor funcionando	1 - 3
P_{A3DW}	Sensor parado	0
P_{A4UP}	Inspetor presente	1 - 3
P_{A4DW}	Inspetor ausente	0
P_{A5UP}	Embalador presente	1 - 3
P_{A5DW}	Embalador ausente	0
P_{A6UP}	Estoquista presente	1 - 3
P_{A6DW}	Estoquista ausente	0
P_{WAUP}	WI-FI ativado	1 - 2
P_{WIn}	WI-FI desativado	0
P_{4GAUP}	4G ativado	1
P_{4GIn}	4G Desativado	0

Continua na próxima página

TABELA 10 – Distribuição inicial de *tokens* nos lugares do modelo de disponibilidade da manufatura 4.0. (continuação)

Lugares	Descrição	<i>Tokens</i>
P_{WUP}	WI-FI funcionando	1
P_{WDW}	WI-FI parado	0
P_{4GUP}	4G funcionando	1
P_{4gDW}	4G parado	0
P_{4GUP}	Nuvem funcionando	1
P_{4GDW}	Nuvem parada	0

A Tabela 11 apresenta as métricas de disponibilidade. Para as análises, foram considerados três cenários (DSR, DCRM e DRCA), DSR calcula a disponibilidade em estado estacionário do processo produtivo, levando em conta os elementos sem redundância de recursos (ver Figura 9). DCRM considera uma redundância moderada de recursos nas fases de corte, costura e conexão de rede WI-FI (ver Figura 10). Por sua vez, DCRA aborda a redundância avançada de recursos nas fases de corte, costura, encestamento, inspeção, embalagem, estoque e na conexão com a Internet, conforme ilustrado na Figura 11. O tempo de inatividade (em minutos por ano) é calculado pela seguinte expressão: $TISR = ((1 - DSR) \times T)$, onde DSR é a disponibilidade do sistema sem redundância de recursos, e T é o intervalo de tempo considerado (525.600 minutos). A mesma lógica é aplicada nas demais expressões.

TABELA 11 – Métricas de disponibilidade do modelo SPN da manufatura têxtil 4.0.

Métricas	Funções
Disponibilidade sem redundância (DSR)	if(((mark("P _{A1UP} ") == 1)) && ((mark("P _{A2UP} ") == 1))
	&& ((mark("P _{A3UP} ") == 1)) && ((mark("P _{A4UP} ") == 1))
	&& ((mark("P _{A5UP} ") == 1)) && ((mark("P _{A6UP} ") == 1))
	&& ((mark("P _{WUP} ") == 1))) && ((mark("P _{NUUP} ") == 1))
	return(1); else return(0);

Continua na próxima página

TABELA 11 – Métricas de disponibilidade do modelo SPN da manufatura têxtil 4.0.
(continuação)

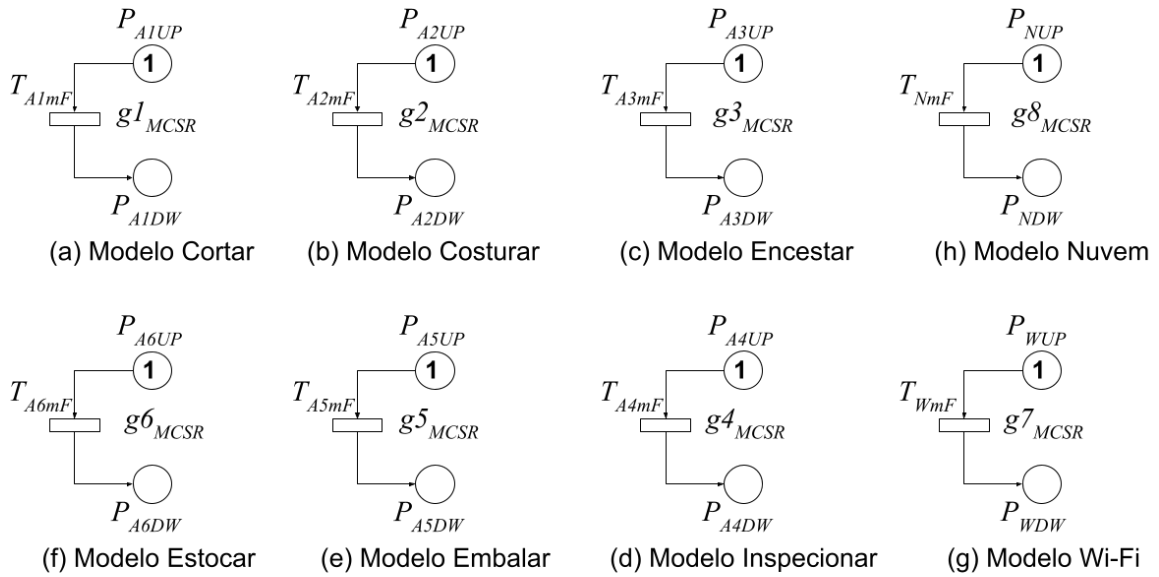
Métricas	Funções
Disponibilidade com redundância moderada (DCRM)	$\text{if}(((\text{mark}("P_{A1UP"}) \geq 1)) \ \&\& \ ((\text{mark}("P_{A2UP"}) \geq 1))$ $\&\& \ ((\text{mark}("P_{A3UP"}) == 1)) \ \&\& \ ((\text{mark}("P_{A4UP"}) == 1))$ $\&\& \ ((\text{mark}("P_{A5UP"}) == 1)) \ \&\& \ ((\text{mark}("P_{A6UP"}) == 1))$ $\&\& \ ((\text{mark}("P_{WUP"}) \geq 1) \ \&\& \ ((\text{mark}("P_{NUP"}) == 1))$ $\text{return}(1); \text{ else return}(0);$
Disponibilidade com redundância avançada (DCRA)	$\text{if}(((\text{mark}("P_{A1UP"}) \geq 1)) \ \&\& \ ((\text{mark}("P_{A2UP"}) \geq 1))$ $\&\& \ ((\text{mark}("P_{A3UP"}) \geq 1)) \ \&\& \ ((\text{mark}("P_{A4UP"}) \geq 1))$ $\&\& \ ((\text{mark}("P_{A5UP"}) \geq 1)) \ \&\& \ ((\text{mark}("P_{A6UP"}) \geq 1))$ $\&\& \ ((\text{mark}("P_{NUP"}) == 1)) \ \&\& \ (((\text{mark}("P_{4GUP"}) == 1)$ $\&\& \ (\text{mark}("P_{4GAUP"}) == 1)) \ \ ((\text{mark}("P_{WUP"}) \geq 1)$ $\&\& \ (\text{mark}("P_{WAUP"}) == 1)))) \ \text{return}(1); \text{ else return}(0);$
Tempo de inatividade sem redundância (TISR)	$((1\text{-DSR}) * 525600);$
Tempo de inatividade com redundância moderada (TICRM)	$((1\text{-DCRM}) * 525600);$
Tempo de inatividade com redundância avançada (TICRA)	$((1\text{-DCRA}) * 525600);$

Vale ressaltar que cada cenário pode apresentar modos operacionais específicos. Por esse motivo, cada cenário necessariamente possui uma métrica específica. Portanto, empresas ou indivíduos precisam especificar esses modos operacionais. A abordagem deste trabalho utilizou os dados dos modos operacionais coletados junto à empresa.

5.2.3 Modelos SPN de confiabilidade da manufatura têxtil 4.0

Os modelos de confiabilidade são derivados dos modelos de disponibilidade apresentados no Capítulo anterior. Porém, enquanto as métricas do modelo de disponibilidade são baseadas na ocorrência de disponibilidade dos recursos, as métricas dos modelos de confiabilidade são baseadas na probabilidade de ocorrência de indisponibilidade dos recursos.

A Figura 12 apresenta os modelos de confiabilidade sem a redundância dos recursos na infraestrutura. Esses modelos são semelhantes aos modelos de disponibilidade apresentados nas Figuras 9, com a diferença de que o reparo não é considerado. Além disso, a falha de uma fase do processo produtivo ou de um componente tecnológico resulta na falha do sistema como um todo. Esse comportamento é determinado por funções de guarda atribuídas às transições do modelo conforme apresentado na Tabela 12.



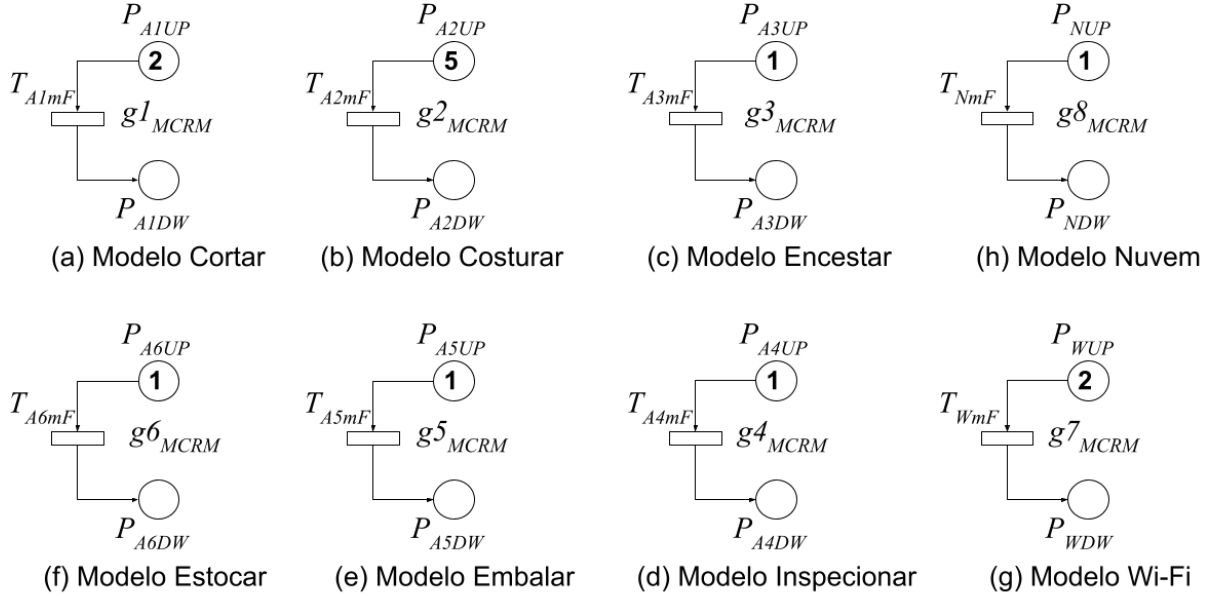
** Ver descrição das siglas na Tabela 9, 10 e 12.

Figura 12 – Modelos SPNs de confiabilidade sem redundância na infraestrutura da manufatura têxtil 4.0.

TABELA 12 – Expressões de guarda modelos de confiabilidade sem redundância.

Guarda	Expressões
	if ((mark("P _{A4DW} ")==0) && (mark("P _{A2DW} ")==0) && (mark("P _{A3DW} ")==0)
<i>g1_{MCSR}</i>	&& (mark("P _{A5DW} ")==0) && (mark("P _{A6DW} ")==0) && (mark("P _{NDW} ")==0) && (mark("P _{WDW} ")==0)) return(1); else return(0);
	if ((mark("P _{A1DW} ")==0) && (mark("P _{A3DW} ")==0) && (mark("P _{A4DW} ")==0)
<i>g2_{MCSR}</i>	&& (mark("P _{A5DW} ")==0) && (mark("P _{A6DW} ")==0) && (mark("P _{NDW} ")==0) && (mark("P _{WDW} ")==0)) return(1); else return(0);
	if ((mark("P _{A1DW} ")==0) && (mark("P _{A2DW} ")==0) && (mark("P _{A4DW} ")==0)
<i>g3_{MCSR}</i>	&& (mark("P _{A5DW} ")==0) && (mark("P _{A6DW} ")==0) && (mark("P _{NDW} ")==0) && (mark("P _{WDW} ")==0)) return(1); else return(0);
	if ((mark("P _{A1DW} ")==0) && (mark("P _{A2DW} ")==0) && (mark("P _{A3DW} ")==0)
<i>g4_{MCSR}</i>	&& (mark("P _{A5DW} ")==0) && (mark("P _{A6DW} ")==0) && (mark("P _{NDW} ")==0) && (mark("P _{WDW} ")==0)) return(1); else return(0);
	if ((mark("P _{A1DW} ")==0) && (mark("P _{A2DW} ")==0) && (mark("P _{A4DW} ")==0)
<i>g5_{MCSR}</i>	&& (mark("P _{A3DW} ")==0) && (mark("P _{A6DW} ")==0) && (mark("P _{NDW} ")==0) && (mark("P _{WDW} ")==0)) return(1); else return(0);
	if ((mark("P _{A1DW} ")==0) && (mark("P _{A2DW} ")==0) && (mark("P _{A4DW} ")==0)
<i>g6_{MCSR}</i>	&& (mark("P _{A3DW} ")==0) && (mark("P _{A5DW} ")==0) && (mark("P _{NDW} ")==0) && (mark("P _{WDW} ")==0)) return(1); else return(0);
	if ((mark("P _{A1DW} ")==0) && (mark("P _{A2DW} ")==0) && (mark("P _{A4DW} ")==0)
<i>g7_{MCSR}</i>	&& (mark("P _{A3DW} ")==0) && (mark("P _{A5DW} ")==0) && (mark("P _{NDW} ")==0) && (mark("P _{A6DW} ")==0)) return(1); else return(0);
	if ((mark("P _{A1DW} ")==0) && (mark("P _{A2DW} ")==0) && (mark("P _{A4DW} ")==0)
<i>g8_{MCSR}</i>	&& (mark("P _{A3DW} ")==0) && (mark("P _{A5DW} ")==0) && (mark("P _{A6DW} ")==0) && (mark("P _{WDW} ")==0)) return(1); else return(0);

A Figura 13 apresenta os modelos de confiabilidade correspondentes aos modelos de disponibilidade mostrados na Figura 10, porém com o acréscimo de redundância moderada nos componentes de corte do tecido, costureiras e conexão WI-FI. As funções de guarda atribuídas a esse arranjo estão definidas na Tabela 13.



** Ver descrição das siglas na Tabela 9, 10 e 13.

Figura 13 – Modelos SPNs de confiabilidade com redundância moderada na infraestrutura da manufatura têxtil 4.0.

TABELA 13 – Expressões de guarda modelos de confiabilidade com redundância moderada.

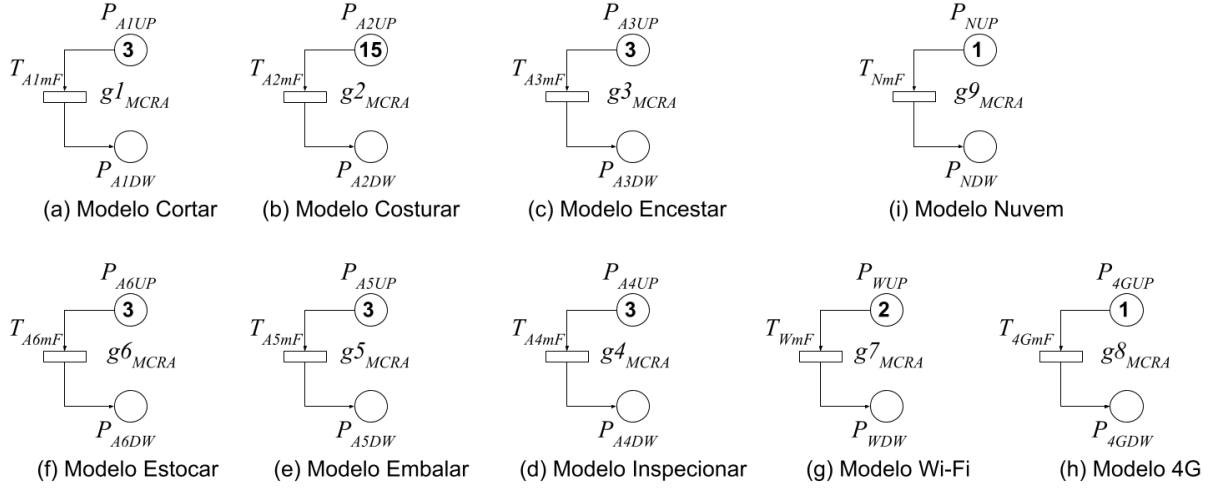
Guarda	Expressões
$g1_{MCCRM}$	$\text{if } ((\text{mark}("P_{A4DW}")==0) \ \&\& \ (\text{mark}("P_{A2DW}")<5) \ \&\& \ (\text{mark}("P_{A3DW}")==0) \\ \&\& \ (\text{mark}("P_{A5DW}")==0) \ \&\& \ (\text{mark}("P_{A6DW}")==0) \ \&\& \ (\text{mark}("P_{NDW}")==0) \\ \&\& \ (\text{mark}("P_{WDW}")<2)) \ \text{return}(1); \ \text{else} \ \text{return}(0);$
$g2_{MCCRM}$	$\text{if } ((\text{mark}("P_{A1DW}")<2) \ \&\& \ (\text{mark}("P_{A2DW}")<5) \ \&\& \ (\text{mark}("P_{A3DW}")==0) \\ \&\& \ (\text{mark}("P_{A5DW}")==0) \ \&\& \ (\text{mark}("P_{A6DW}")==0) \ \&\& \ (\text{mark}("P_{NDW}")==0) \\ \&\& \ (\text{mark}("P_{WDW}")<2)) \ \text{return}(1); \ \text{else} \ \text{return}(0);$

Continua na próxima página

TABELA 13 – Expressões de guarda modelos de confiabilidade com redundância moderada (continuação)

Guarda	Expressões
	if ((mark("P _{A1DW} ")<2) && (mark("P _{A2DW} ")<5) && (mark("P _{A4DW} ")==0)
<i>g3_{MCCRM}</i>	&& (mark("P _{A5DW} ")==0) && (mark("P _{A6DW} ")==0) && (mark("P _{NDW} ")==0) && (mark("P _{WDW} ")<2)) return(1); else return(0);
	if ((mark("P _{A1DW} ")<2) && (mark("P _{A2DW} ")<5) && (mark("P _{A3DW} ")==0)
<i>g4_{MCCRM}</i>	&& (mark("P _{A5DW} ")==0) && (mark("P _{A6DW} ")==0) && (mark("P _{NDW} ")==0) && (mark("P _{WDW} ")<2)) return(1); else return(0);
	if ((mark("P _{A1DW} ")<2) && (mark("P _{A2DW} ")<5) && (mark("P _{A4DW} ")==0)
<i>g5_{MCCRM}</i>	&& (mark("P _{A3DW} ")==0) && (mark("P _{A6DW} ")==0) && (mark("P _{NDW} ")==0) && (mark("P _{WDW} ")<2)) return(1); else return(0);
	if ((mark("P _{A1DW} ")<2) && (mark("P _{A2DW} ")<5) && (mark("P _{A4DW} ")==0)
<i>g6_{MCCRM}</i>	&& (mark("P _{A3DW} ")==0) && (mark("P _{A5DW} ")==0) && (mark("P _{NDW} ")==0) && (mark("P _{WDW} ")<2)) return(1); else return(0);
	if ((mark("P _{A1DW} ")<2) && (mark("P _{A2DW} ")<5) && (mark("P _{A4DW} ")==0)
<i>g7_{MCCRM}</i>	&& (mark("P _{A3DW} ")==0) && (mark("P _{A5DW} ")==0) && (mark("P _{NDW} ")==0) && (mark("P _{A6DW} ")==0)) return(1); else return(0);
	if ((mark("P _{A1DW} ")<2) && (mark("P _{A2DW} ")<5) && (mark("P _{A4DW} ")==0)
<i>g8_{MCCRM}</i>	&& (mark("P _{A3DW} ")==0) && (mark("P _{A5DW} ")==0) && (mark("P _{A6DW} ")==0) && (mark("P _{WDW} ")<2)) return(1); else return(0);

Já a Figura 14 apresenta os modelos de confiabilidade correspondentes aos modelos de disponibilidade mostrados na Figura 11, porém com o acréscimo de redundância avançada em todos os componentes, exceto na nuvem computacional. As funções de guarda atribuídas a esse arranjo estão definidas na Tabela 14.



** Ver descrição das siglas na Tabela 9, 10 e 14.

Figura 14 – Modelos SPNs de confiabilidade com redundância avançada na infraestrutura da manufatura têxtil 4.0.

TABELA 14 – Expressões de guarda modelos de confiabilidade com redundância avançada.

Guarda	Expressões
	if ((mark("P _{A4DW} ")<3) && (mark("P _{A2DW} ")<15) && (mark("P _{A3DW} ")<3)
$g1_{MCCRA}$	&& (mark("P _{A5DW} ")<3) && (mark("P _{A6DW} ")<3) && (mark("P _{NDW} ")==0)
	&& (mark("P _{4GDW} ")==0) && (mark("P _{WDW} ")<2)) return(1); else return(0);
	if ((mark("P _{A1DW} ")<3) && (mark("P _{A4DW} ")<3) && (mark("P _{A3DW} ")<3)
$g2_{MCCRA}$	&& (mark("P _{A5DW} ")<3) && (mark("P _{A6DW} ")<3) && (mark("P _{NDW} ")==0)
	&& (mark("P _{4GDW} ")==0) && (mark("P _{WDW} ")<2)) return(1); else return(0);
	if ((mark("P _{A1DW} ")<3) && (mark("P _{A2DW} ")<15) && (mark("P _{A4DW} ")<3)
$g3_{MCCRA}$	&& (mark("P _{A5DW} ")<3) && (mark("P _{A6DW} ")<3) && (mark("P _{NDW} ")==0)
	&& (mark("P _{4GDW} ")==0) && (mark("P _{WDW} ")<2)) return(1); else return(0);

Continua na próxima página

TABELA 14 – Expressões de guarda modelos de confiabilidade com redundância avançada (continuação)

Guarda	Expressões
	if ((mark("P _{A1DW} ")<3) && (mark("P _{A2DW} ")<15) && (mark("P _{A3DW} ")<3)
<i>g4_{MCCRA}</i>	&& (mark("P _{A5DW} ")<3) && (mark("P _{A6DW} ")<3) && (mark("P _{NDW} ")==0)
	&& (mark("P _{4GDW} ")==0) && (mark("P _{WDW} ")<2)) return(1); else return(0);
	if ((mark("P _{A1DW} ")<3) && (mark("P _{A2DW} ")<15) && (mark("P _{A4DW} ")<3)
<i>g5_{MCCRA}</i>	&& (mark("P _{A3DW} ")<3) && (mark("P _{A6DW} ")<3) && (mark("P _{NDW} ")==0)
	&& (mark("P _{4GDW} ")==0) && (mark("P _{WDW} ")<2)) return(1); else return(0);
	if ((mark("P _{A1DW} ")<3) && (mark("P _{A2DW} ")<15) && (mark("P _{A4DW} ")<3)
<i>g6_{MCCRA}</i>	&& (mark("P _{A3DW} ")<3) && (mark("P _{A5DW} ")<3) && (mark("P _{NDW} ")==0)
	&& (mark("P _{4GDW} ")==0) && (mark("P _{WDW} ")<2)) return(1); else return(0);
	if ((mark("P _{A1DW} ")<3) && (mark("P _{A2DW} ")<15) && (mark("P _{A4DW} ")<3)
<i>g7_{MCCRA}</i>	&& (mark("P _{A3DW} ")<3) && (mark("P _{A5DW} ")<3) && (mark("P _{NDW} ")==0)
	&& (mark("P _{A6DW} ")<3) && (mark("P _{4GDW} ")==0)) return(1); else return(0);
	if ((mark("P _{A1DW} ")<3) && (mark("P _{A2DW} ")<15) && (mark("P _{A4DW} ")<3)
<i>g8_{MCCRA}</i>	&& (mark("P _{A3DW} ")<3) && (mark("P _{A5DW} ")<3) && (mark("P _{A6DW} ")<3)
	&& (mark("P _{NDW} ")==0) && (mark("P _{WDW} ")<2)) return(1); else return(0);
	if ((mark("P _{A1DW} ")<3) && (mark("P _{A2DW} ")<15) && (mark("P _{A4DW} ")<3)
<i>g9_{MCCRA}</i>	&& (mark("P _{A3DW} ")<3) && (mark("P _{A5DW} ")<3) && (mark("P _{A6DW} ")<3)
	&& (mark("P _{4GDW} ")==0) && (mark("P _{WDW} ")<2)) return(1); else return(0);

A Tabela 15 apresenta as métricas adotadas para os modelos de confiabilidade. IFISR calcula o índice de falha da infraestrutura, considerando os elementos sem a redundância de recursos. IFICRM considera a redundância moderada de recursos nas fases de corte, costura e conexão de rede WI-FI. Já IFICRA considera a redundância avançada de recursos nas fases de corte, costura, encestamento, inspeção, embalagem, estoque e na conexão com a internet (WI-FI e 4G), conforme apresentado na Figura 14. O índice de confiabilidade da infraestrutura sem redundância é calculado pela seguinte expressão:

$ICISR = (1 - IFISR)$. A mesma lógica é aplicada para os demais índices.

TABELA 15 – Métricas de confiabilidade da infraestrutura da manufatura têxtil 4.0.

Métricas	Funções
Índice de falha da infraestrutura sem redundância (IFISR)	<pre> if(((mark("P_{A1DW}") == 1)) ((mark("P_{A2DW}") == 1)) ((mark("P_{A3DW}") == 1)) ((mark("P_{A4DW}") == 1)) ((mark("P_{A5DW}") == 1)) ((mark("P_{A6DW}") == 1)) ((mark("P_{WDW}") == 1)) ((mark("P_{NDW}") == 1))) return(1); else return(0); </pre>
Índice de falha da infraestrutura com redundância moderada (IFICRM)	<pre> if(((mark("P_{A1DW}") == 2)) ((mark("P_{A2DW}") == 5)) ((mark("P_{A3DW}") == 1)) ((mark("P_{A4DW}") == 1)) ((mark("P_{A5DW}") == 1)) ((mark("P_{A6DW}") == 1)) ((mark("P_{WDW}") == 2)) ((mark("P_{NDW}") == 1))) return(1); else return(0); </pre>
Índice de falha da infraestrutura com redundância avançada (IFICRA)	<pre> if(((mark("P_{A1DW}") == 3)) ((mark("P_{A2DW}") == 15)) ((mark("P_{A3DW}") == 3)) ((mark("P_{A4DW}") == 3)) ((mark("P_{A5DW}") == 3)) ((mark("P_{A6DW}") == 3)) ((mark("P_{WDW}") == 2)) ((mark("P_{4GDW}") == 1)) ((mark("P_{NDW}") == 1))) return(1); else return(0); </pre>
Índice de confiabilidade da infraestrutura sem redundância (ICISR)	$(1 - IFISR)$;
Índice de confiabilidade da infraestrutura com redundância moderada (ICICRM)	$(1 - IFICRM)$;
Índice de confiabilidade da infraestrutura com redundância avançada (ICICRA)	$(1 - IFICRA)$;

5.3 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os modelos de desempenho, disponibilidade e confiabilidade utilizados tanto na manufatura têxtil tradicional quanto na 4.0. Esses modelos, desenvolvidos através do formalismo das Redes de Petri Estocásticas, representam os processos produtivos em ambas as infraestruturas, proporcionando uma base sólida para avaliar a eficiência operacional e identificar oportunidades de aprimoramento. Por meio desses modelos, é possível compreender melhor o funcionamento dos sistemas de produção e tomar decisões embasadas para melhorar o desempenho e a confiabilidade das operações.

6 Estudos de casos

Neste capítulo serão apresentados os estudos de caso realizados para a avaliação da abordagem proposta neste trabalho. Antes, é preciso lembrar que as empresas fazem parte do polo de confecção do Agreste de Pernambuco. O primeiro estudo de caso consiste na avaliação do desempenho, vazão e taxa de utilização do processo produtivo de uma manufatura têxtil tradicional. No segundo caso, foi realizada a avaliação do desempenho, vazão, taxa de utilização, disponibilidade e confiabilidade do processo produtivo de uma manufatura têxtil 4.0. Por tanto, o uso dos estudos de caso contribuiu para o entendimento do comportamento dos recursos em tempo de execução, facilitando a composição do processo de modelagem e viabilizando a realização de análises numéricas precisas.

6.1 Estudo de Caso 01 (Avaliação de desempenho da infraestrutura da manufatura têxtil tradicional)

A seguir serão apresentados os resultados relacionados a avaliação de desempenho da infraestrutura têxtil tradicional. O desempenho de uma manufatura têxtil pode diminuir mediante a intensidade das atividades manuais executadas pelas células de costura em função do tempo. Por exemplo, o tempo de corte do tecido deve ser equilibrado com o número de células de costura e os tempos das demais atividades do processo produtivo para evitar perdas de desempenho. Um modelo SPN foi utilizado para analisar o ciclo produtivo, mostrando os impactos das variações no tempo de corte e no acionamento das células de costura.

Se o tempo de corte do tecido for muito curto, os lotes cortados podem se acumular enquanto aguardam que uma célula de costura esteja disponível, resultando em um uso intensivo das células de costura e aumento do tempo de processamento (gargalo). Por outro lado, se o tempo de corte for muito longo, os lotes cortados seguirão para a costura com pouco tempo de espera, mas algumas células de costura poderão ficar ociosas devido à falta de tecido, levando a uma queda na taxa de produção. Esses cenários ilustram possíveis desequilíbrios de desempenho que podem ocorrer no processo produtivo se não houver um planejamento adequado.

Desta forma, o modelo apresentado na Figura 7 será usado para avaliar o ciclo

produtivo apresentado na Figura 5. Nas Figuras 15, 16 e 17, são apresentados os impactos das variações do tempo de corte do tecido e do acionamento das células de costura no desempenho da produção, considerando o tempo de produção do lote, a vazão e a utilização das células de costura. No eixo *X* foi variado o tempo médio de corte do tecido, começando de 0,0833 até 13 horas. Já no eixo *Y*, foram apresentados os resultados do tempo médio de produção, da vazão e da utilização em função da variação de 1-5 células de costura. A Figura 15 apresenta o tempo médio de produção do lote de macacão infantil na infraestrutura. O objetivo é avaliar o comportamento dos arranjos variando a quantidade de células de costura acionadas por tempo de corte do tecido e encontrar o arranjo mais adequado.

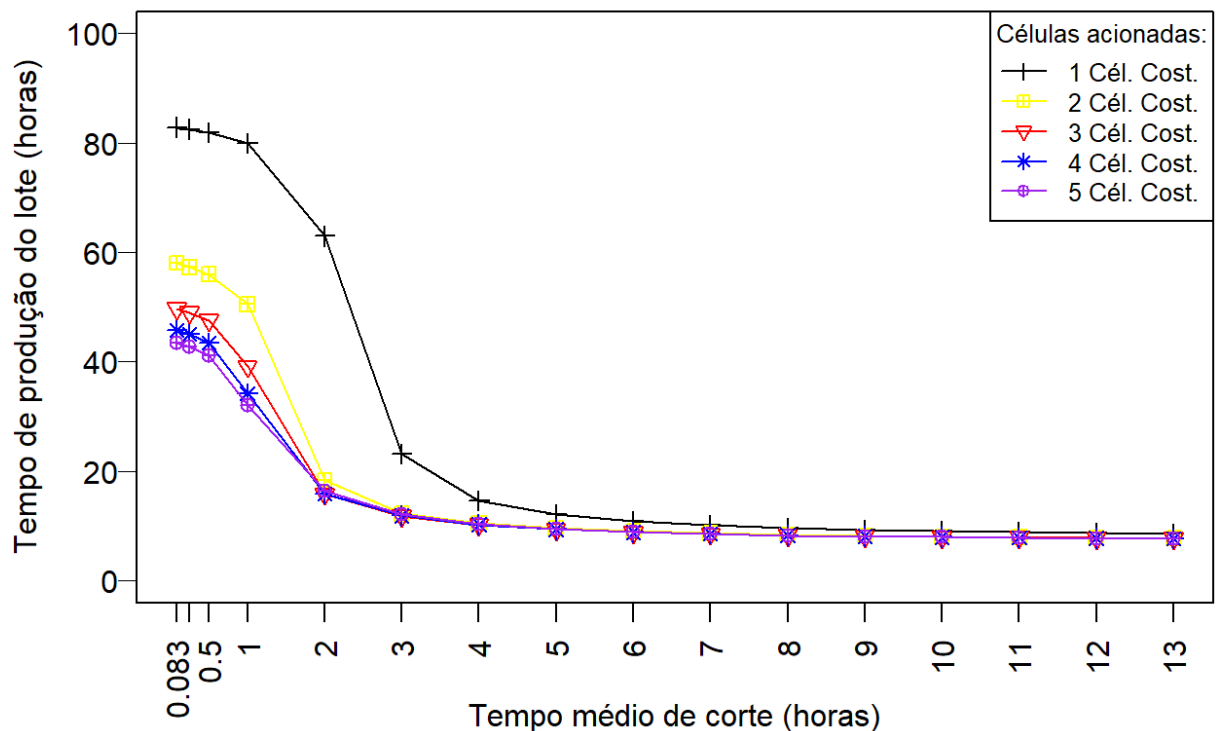


Figura 15 – Tempo de produção do lote - Manufatura tradicional.

A análise mostra que o pior arranjo, composto por 1 célula de costura com tempo de corte de 0,083 horas (“arranjo 1”), resulta no maior tempo de produção do lote (83 horas). Já o arranjo mais promissor, composto por 3 células de costura ao tempo médio de corte de 2 horas, o tempo de produção cai para 16 horas (“arranjo 2”), resultando numa diferença de 67 horas entre os arranjos. Caso o “arranjo 2” seja escolhido, haverá um ganho de eficiência de 74,60%. Isso significa que o administrador da manufatura poderá produzir o lote de produtos com um menor range de tempo acionando apenas 3 células de costura.

As demais células podem ser realocadas nos turnos posteriores ou em operações de apoio as células principais. Essas são apenas algumas das possibilidades de ajustes sugeridas mediante os resultados analisados.

É importante ressaltar que, quando o tempo médio de corte é menor que 2 horas, o número de células de costura afeta diretamente no tempo de resposta. Porém, a partir de 2 horas essa diferença diminui, com exceção para o caso de haver apenas uma célula disponível. Nesse caso, apenas a partir do tempo médio de corte de 8 horas que os tempos de resposta serão semelhantes para todas as configurações de células de costura.

A Figura 16 apresenta o impacto do tempo de corte na vazão da produção de macacões infantis. O acionamento de 5 células com tempo de corte de 0,833 horas, apresenta o melhor resultado em relação à vazão. Embora a capacidade da infraestrutura seja limitada em respeito a natureza manufaturada, esse arranjo representa o volume máximo de lotes que podem ser produzidos por hora. Porém, caso apenas 1 célula esteja disponível, o comprimento da fila tende a ser maior e menos lotes são fabricados, evidenciando a influência direta do número de células e do tempo de corte na eficiência do processo produtivo.

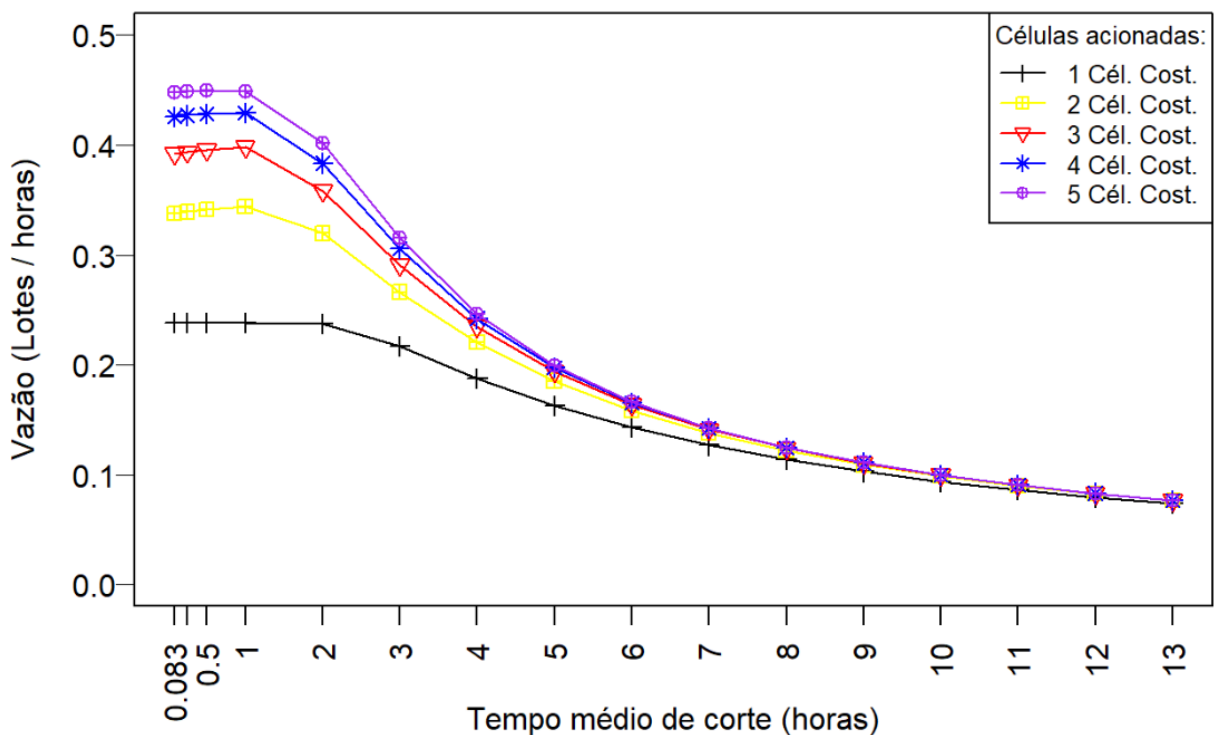


Figura 16 – Vazão - Manufatura tradicional.

A Figura 17 detalha a utilização de cada arranjo de célula de costura acionada comparando o caso mais pessimista (1 célula) ao mais otimista (5 células). Dessa forma, quando as células estão trabalhando na capacidade máxima (próximo a 100%), as filas tendem a ser infinitas e menos lotes são fabricados. Por outro lado, a vazão tende a ser semelhante para as configurações as quais o tempo médio de corte for superior a 8 horas.

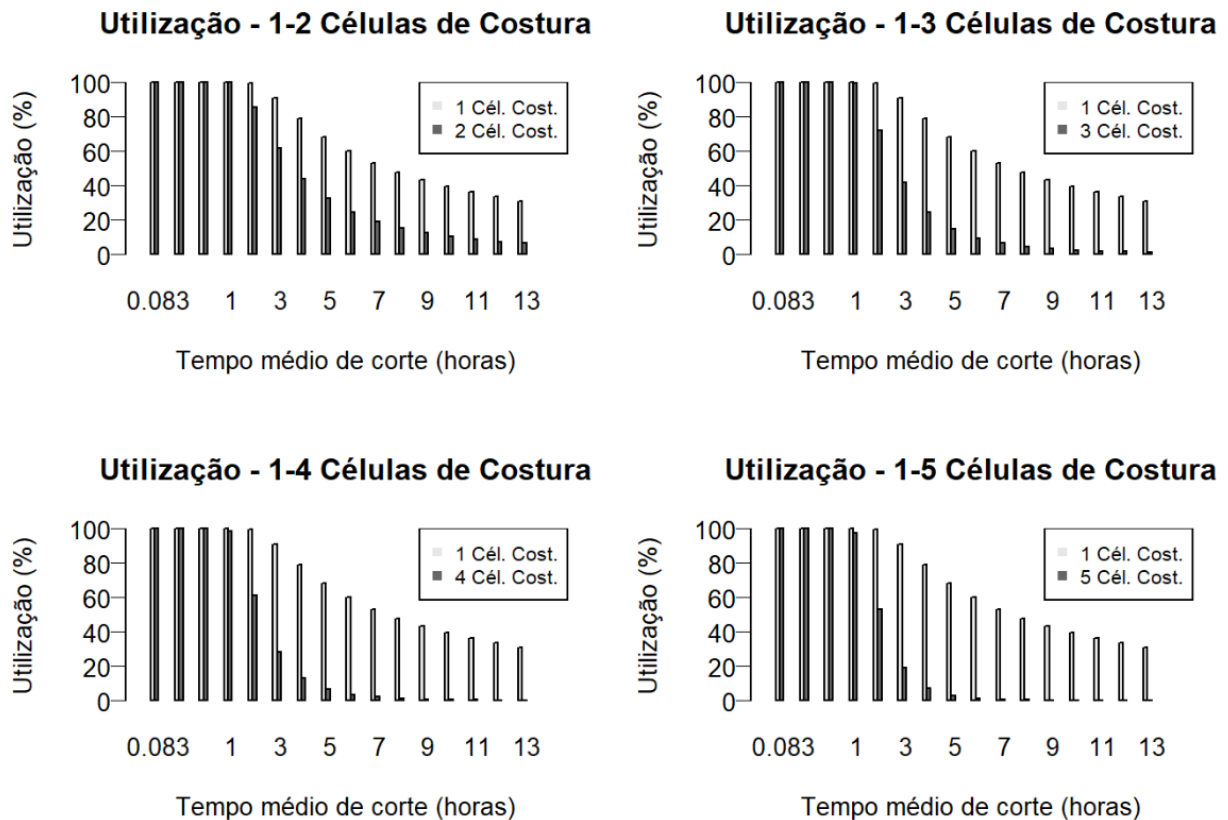


Figura 17 – Utilização das células de costura - Manufatura tradicional.

6.2 Estudo de Caso 02 (Avaliação de desempenho da infraestrutura da manufatura têxtil 4.0)

A seguir serão apresentados os resultados relacionados a avaliação de desempenho da infraestrutura têxtil 4.0. O desempenho da produção de uma manufatura têxtil 4.0 pode diminuir mediante a possibilidade de ocorrência de atividades manuais, falhas de equipamentos, falta não justificada de colaboradores e indisponibilidade de conexão com a Internet. Logo, a possibilidade de desequilíbrio desses atributos pode originar a queda no desempenho operacional. Por esse motivo, o modelo apresentado na Figura 8 foi utilizado para avaliar o desempenho. Na Figura 18, são apresentados os impactos das variações

do tempo de corte do tecido e do acionamento das células de costura no desempenho da produção, considerando o tempo de produção do lote e a utilização das costureiras. No eixo X foi variado o tempo médio de corte do tecido, começando de 0,0833 até 7 horas. Já no eixo Y , foram apresentados os resultados do tempo médio de produção e da utilização em função da variação de 1-5 costureiras.

A Figura 18 apresenta o tempo médio de produção do lote de camisa polo na infraestrutura. Conforme já mencionado na avaliação de desempenho do estudo de caso 1, o objetivo é avaliar o comportamento dos arranjos variando a quantidade de células de costura acionadas por tempo de corte do tecido e encontrar o arranjo mais adequado. A análise mostra que o pior arranjo, composto por 1 costureira com tempo de corte de 0,083 horas (“arranjo 1”), resulta no maior tempo de produção do lote (221 horas). Já o “arranjo 2” composto por 5 costureiras resulta no menor tempo de produção do lote (180 horas). A diferença entre esses dois arranjos é de 41 horas.

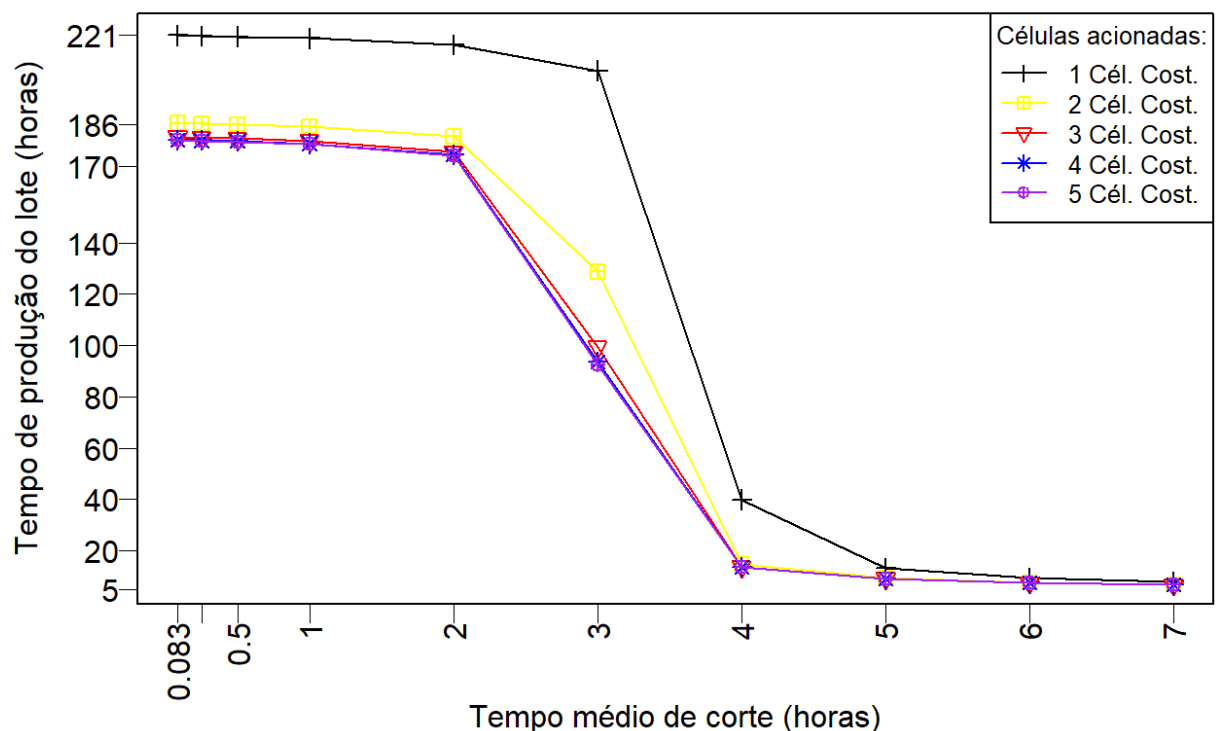


Figura 18 – Tempo de produção do lote - Manufatura 4.0.

Ao realizar uma comparação semelhante, onde o “arranjo 3” apresenta frequência do tempo de corte de 3 horas e o acionamento de 1 costureira, o tempo de produção do lote é 207 horas, caso as 5 costureiras sejam acionadas “arranjo 4”, o tempo de produção do lote cairá para 92 horas resultando na diferença de 115 horas entre os arranjos. Caso o

arranjo 4 seja escolhido, haverá um ganho de eficiência de 55%. Entre as possibilidades de arranjos existentes, a comparação entre o arranjo 3 e 4 apresentou a maior diferença de tempo de produção do lote. É importante ressaltar que quando o intervalo de corte é menor que 3 horas, o número de costureiras afeta diretamente no tempo de resposta. Porém, a partir de 3 horas essa diferença diminui, com exceção para o caso de haver apenas uma costureira. Nesse caso, apenas a partir do intervalo de 5 horas que os tempos de resposta serão semelhantes para todas as possibilidades de arranjos.

A Figura 19 apresenta a utilização de cada arranjo de costureiras acionadas, desde o caso mais pessimista (1 costureira) ao mais otimista (5 costureiras). Logo, quando as costureiras estão operando em capacidade máxima (próximo a 100%), as filas tendem a ser infinitas e menos lotes são fabricados. Dessa forma, as maiores quedas nos acionamentos das costureiras ocorreram entre 2 e 4 horas. Por outro lado, a vazão tende a ser semelhante para as configurações as quais o tempo de corte for maior ou igual a 5 horas.

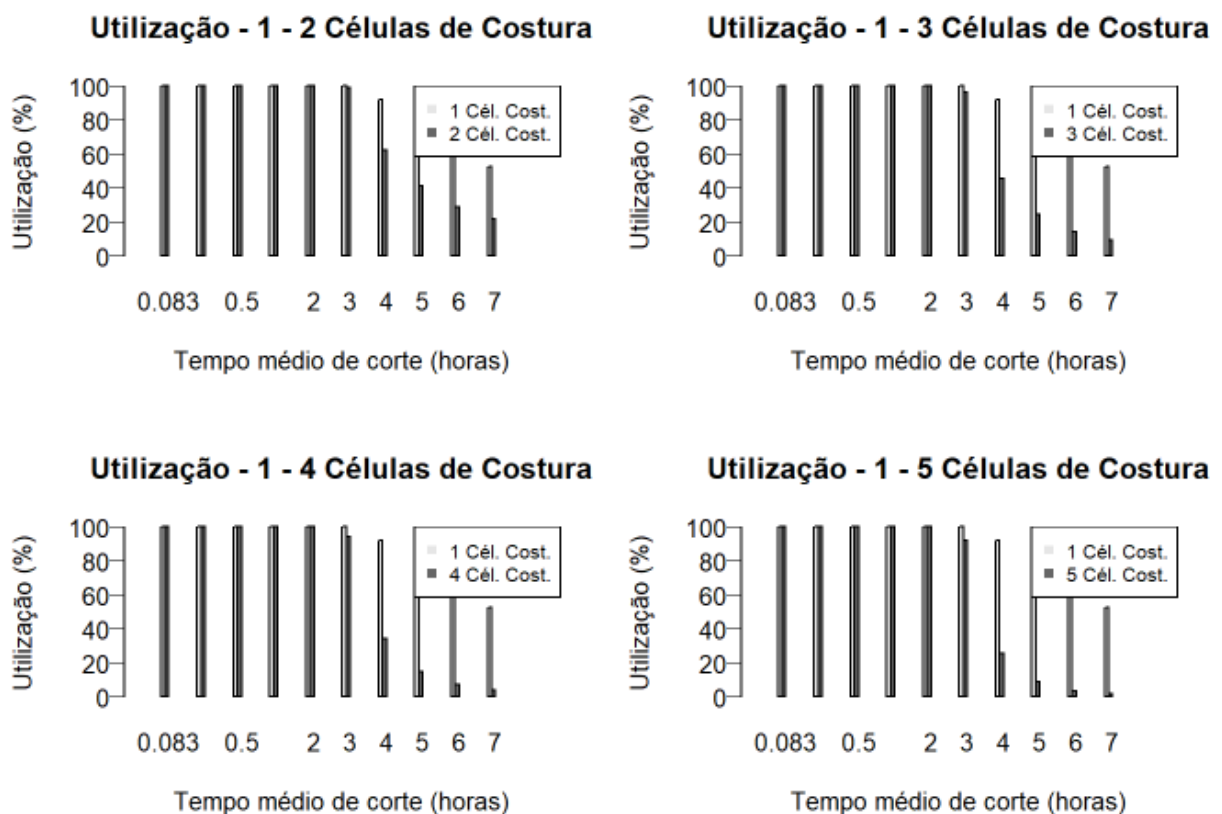


Figura 19 – Utilização das células de costura - Manufatura 4.0.

6.3 Estudo de Caso 02 (Avaliação de disponibilidade da infraestrutura da manufatura têxtil 4.0)

A seguir serão apresentados os resultados relacionados a avaliação de disponibilidade da infraestrutura têxtil 4.0. Os modelos SPN e as expressões apresentadas nas Figuras 9, 10 11 e Tabelas 8, 9, 10 e 11, respectivamente, foram utilizados para calcular as métricas. As seguintes configurações foram consideradas: modelo sem redundância formado por 1 máquina de corte de tecido, 1 costureira, 1 encestamento, 1 inspecionador, 1 embalador, 1 estoquista, uma conexão WI-FI e uma nuvem. Já o modelo com redundância moderada compreende a 2 máquinas de corte de tecido, 5 costureiras, 1 encestamento, 1 inspecionador, 1 embalador, 1 estoquista, 2 conexões de rede WI-FI e 1 nuvem. No entanto, o modelo com redundância avançada compreende 3 máquinas de corte de tecido, 15 costureiras, 3 encestamento, 3 inspecionadores, 3 embaladores, 3 estoquistas, 2 conexões de rede WI-FI, 1 conexão de rede 4G e 1 nuvem.

Os resultados para os arranjos adotados estão detalhados na Tabela 16. O arranjo I apresenta o pior nível de disponibilidade (0,9944302093) em comparação com os arranjos II e III. Ou seja, a configuração do arranjo sem redundância pode apresentar *Down Time* (Tempo de Inatividade) de até 48,82 h/ano. Enquanto o arranjo com redundância moderada, representado no arranjo II, pode apresentar um tempo de inatividade de até 27,46 h/ano. Já o arranjo com redundância avançada, representado pelo arranjo III, apresenta o menor nível de indisponibilidade 3,46 h/ano. Isso significa que o arranjo III, pode aumentar a disponibilidade operacional do processo produtivo em 45,36 h/ano. Em resumo, a análise revelou que ao introduzir a redundância avançada, conforme apresentado no arranjo III, há o potencial de melhorar significativamente a disponibilidade operacional do processo produtivo em comparação com o arranjo I, que carece dessa redundância.

TABELA 16 – Resultados de disponibilidade e inatividade da infraestrutura da manufatura têxtil 4.0.

Configuração	Descrição	Disponibilidade(h)	Down Time (h)
Arranjo I	Sem redundância	0,9944302093	48,82
Arranjo II	Redundância moderada	0,9968665735	27,46
Arranjo III	Redundância avançada	0,9996051006	3,46

6.4 Estudo de Caso 02 (Avaliação da confiabilidade da infraestrutura da manufatura têxtil 4.0)

A seguir, serão apresentados os resultados relacionados aos índices de falha e confiabilidade da infraestrutura da manufatura têxtil 4.0. Os modelos SPNs apresentados nas Figuras 12, 13 e 14 juntamente com os parâmetros e expressões detalhadas nas Tabelas 9, 10, 12, 13, 14 e 15, respectivamente, foram utilizados para calcular as métricas. As configurações consideradas foram derivadas dos modelos de disponibilidade e, portanto, são semelhantes às apresentadas anteriormente.

Na Figura 20, são apresentados os impactos dos índices de falha frente ao acionamento de redundância nos arranjos em função do tempo operacional. Para isso, foram considerados os três arranjos apresentados anteriormente: o arranjo sem redundância, arranjo com redundância moderada e o arranjo com redundância avançada. No eixo X foi variado o tempo médio operação da infraestrutura, começando de 1 até 1901 horas. Já no eixo Y , foram apresentados os índices (%) de falha dos recursos sem e com redundâncias na infraestrutura.

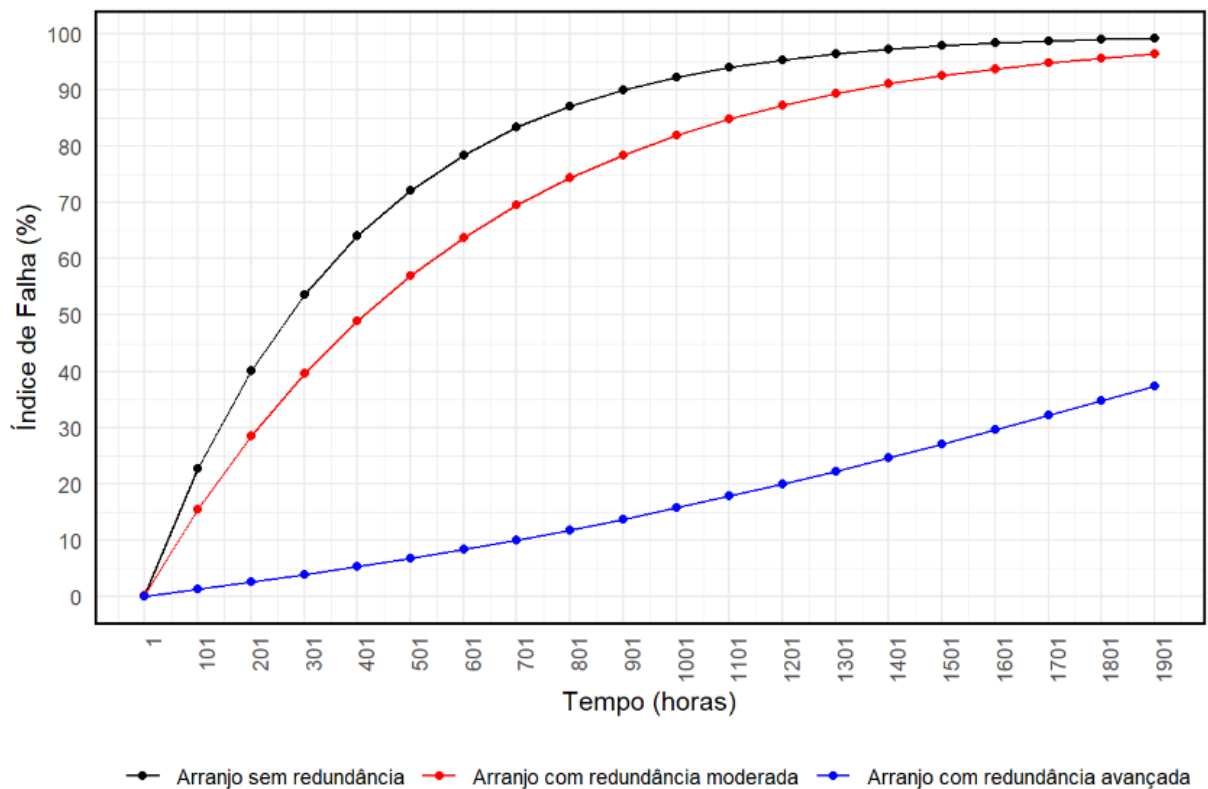


Figura 20 – Curva de falha dos arranjos na infraestrutura da manufatura têxtil 4.0.

Ao analisar o índice de falha do modelo sem redundância, observa-se que ele ultrapassa os 90% de índice de falha após 1000 horas de operação anual da infraestrutura. Enquanto isso, o modelo com redundância avançada aproxima-se dos 40% de índice de falha em torno das 2000 horas por ano. Essa comparação destaca que o modelo com redundância avançada tem potencial para reduzir o índice de falha da infraestrutura em mais de 60% ao ano em comparação com o modelo sem redundância. Esses dados são cruciais para embasar decisões estratégicas e investimentos em tecnologias que visem aumentar a confiabilidade e eficiência operacional da infraestrutura têxtil.

Na Figura 21, são destacados os efeitos dos índices de confiabilidade diante da ativação da redundância nos arranjos em relação ao tempo de operação. No eixo X, o tempo médio de operação da infraestrutura varia de 1 a 1901 horas. Enquanto isso, no eixo Y, são exibidos os índices de confiabilidade (em porcentagem) dos recursos com e sem redundâncias na infraestrutura. É importante ressaltar que esses resultados complementam os índices de falha, fornecendo uma visão abrangente dos aspectos de confiabilidade e robustez do sistema, o que é essencial para orientar decisões estratégicas e aprimorar a eficiência operacional.

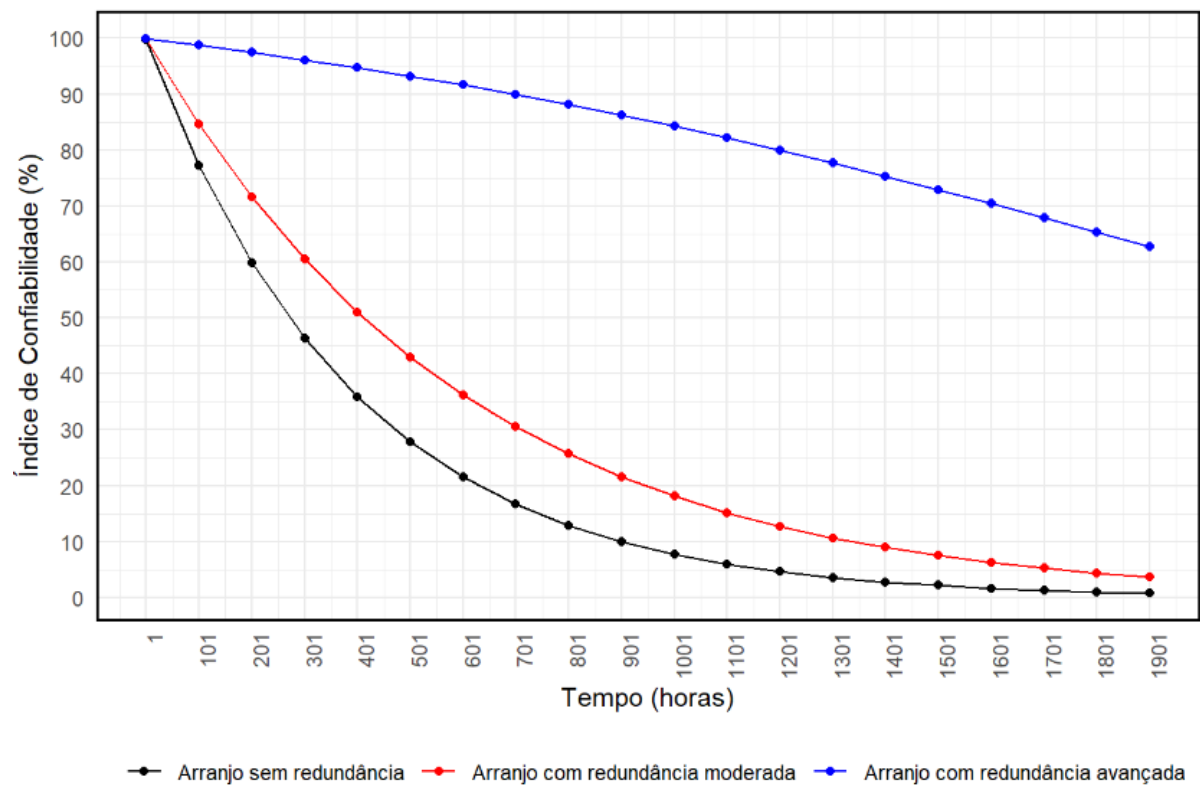


Figura 21 – Curva de confiabilidade dos arranjos na infraestrutura da manufatura têxtil 4.0.

Os resultados revelaram que quanto maior o nível de redundância maior será o índice de confiabilidade. Ao observar o comportamento do modelo sem redundância, ele cai para menos de 10% o índice de confiabilidade a partir das 1000 h/ano de operação da infraestrutura, enquanto o modelo com redundância avançada aproxima-se dos 60% de índice de confiabilidade a aproximadamente 2000 h/ano. Isso significa que o modelo com redundância avançada pode aumentar em mais de 50% o índice de confiabilidade da infraestrutura ao ano se comparado ao modelo sem redundância.

A Figura 22 apresenta a intersecção entre as linhas dos índices de falha e de confiabilidade dos arranjos sem redundância. Esse tipo de resultado é importante para compreender a dinâmica da manufatura em termos de sua estabilidade e capacidade de manutenção ao longo do tempo. É possível observar que, nas 300 horas iniciais, o índice de falha aumenta em mais de 50%, enquanto o índice de confiabilidade diminui proporcionalmente. Isso indica uma deterioração no desempenho do sistema ao longo do tempo, destacando a importância de estratégias de manutenção proativas para garantir a operação confiável e contínua.

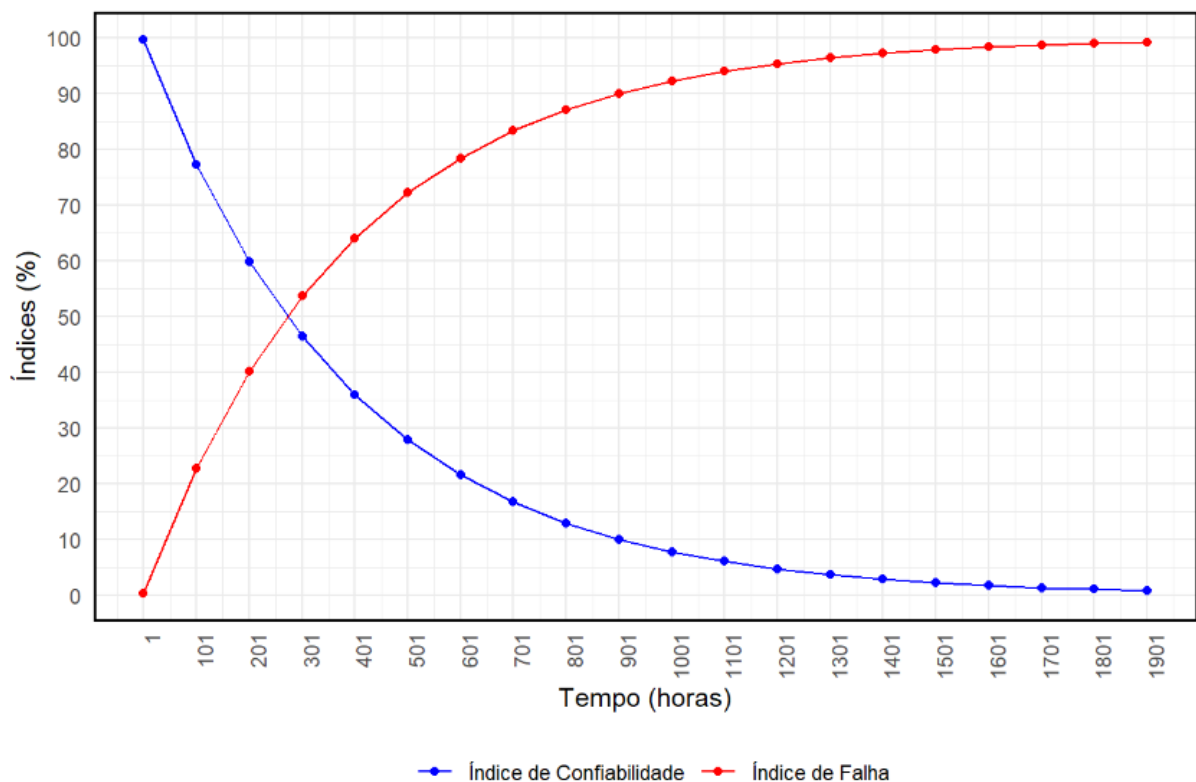


Figura 22 – Intersecção dos índices de falha e confiabilidade da infraestrutura da manufatura 4.0 sem a redundância de recursos.

Já a Figura 23 apresenta uma intersecção entre as linhas dos índices de falha e índice de confiabilidade dos arranjos com redundância moderada. É possível observar que, nas 400 horas iniciais, o comportamento dos índices de falha e confiabilidade são semelhantes aos apresentados anteriormente no arranjo sem redundância, porém com uma diferença a maior de 100 horas para a ocorrência da intersecção das linhas.

Isso significa que mesmo com o uso de redundância moderada haverá uma probabilidade de mais de 50% no índice de falha, enquanto o índice de confiabilidade diminuirá proporcionalmente. Logo, embora haja sobrevida de 100 horas da infraestrutura, ainda haverá uma alta probabilidade de ocorrência de falhas, o que fortalece a necessidade de manter a redundância dos recursos e refinamento das ações de manutenção na infraestrutura têxtil.

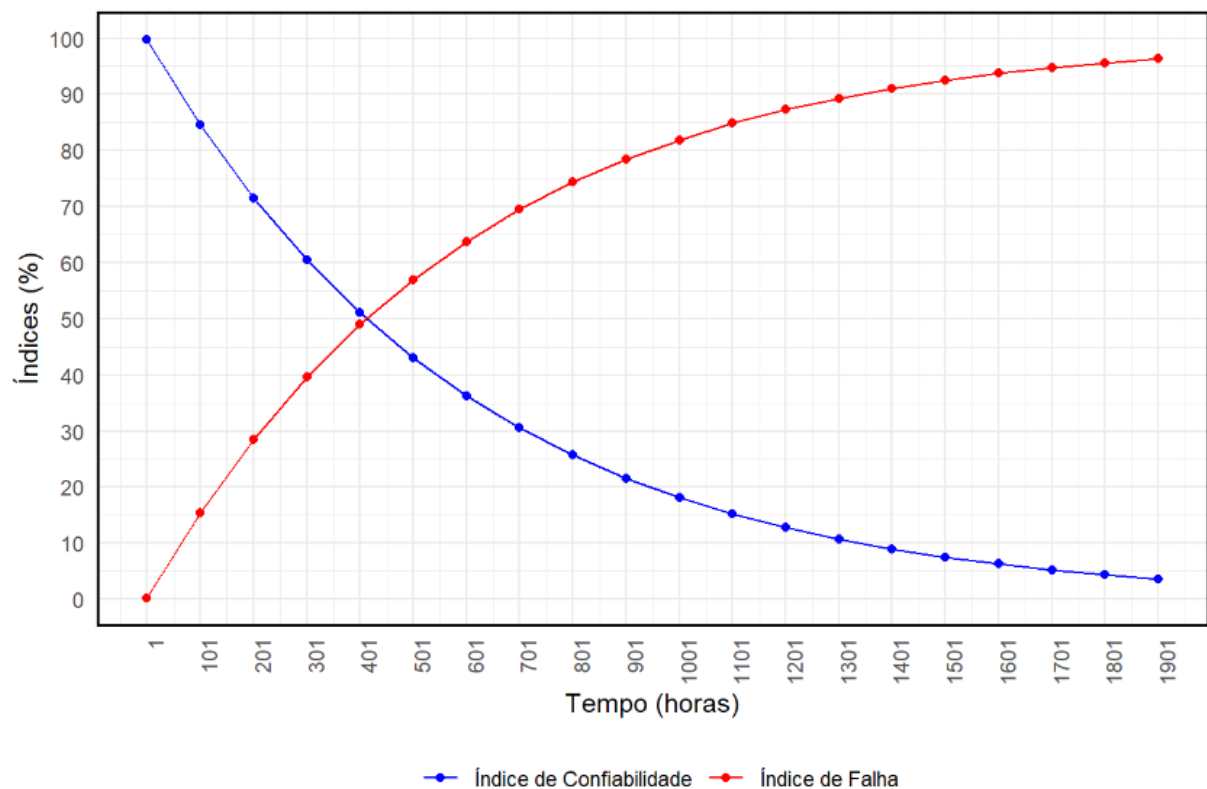


Figura 23 – Intersecção dos índices de falha e confiabilidade da infraestrutura da manufatura 4.0 com redundância moderada de recursos.

No entanto, a Figura 24 apresenta uma intersecção entre as linhas dos índices de falha e índice de confiabilidade dos arranjos com redundância avançada. É possível observar que aproximadamente nas 1900 horas iniciais, o índice de falha aproxima-se de 40% enquanto o índice de confiabilidade aproxima-se de 60%. Essa observação é importante para entender os efeitos da redundância dos componentes na mitigação das falhas ao longo da operação do sistema. Esses resultados destacam a eficácia da redundância avançada na melhoria da confiabilidade operacional e na redução dos riscos de falha durante a produção.

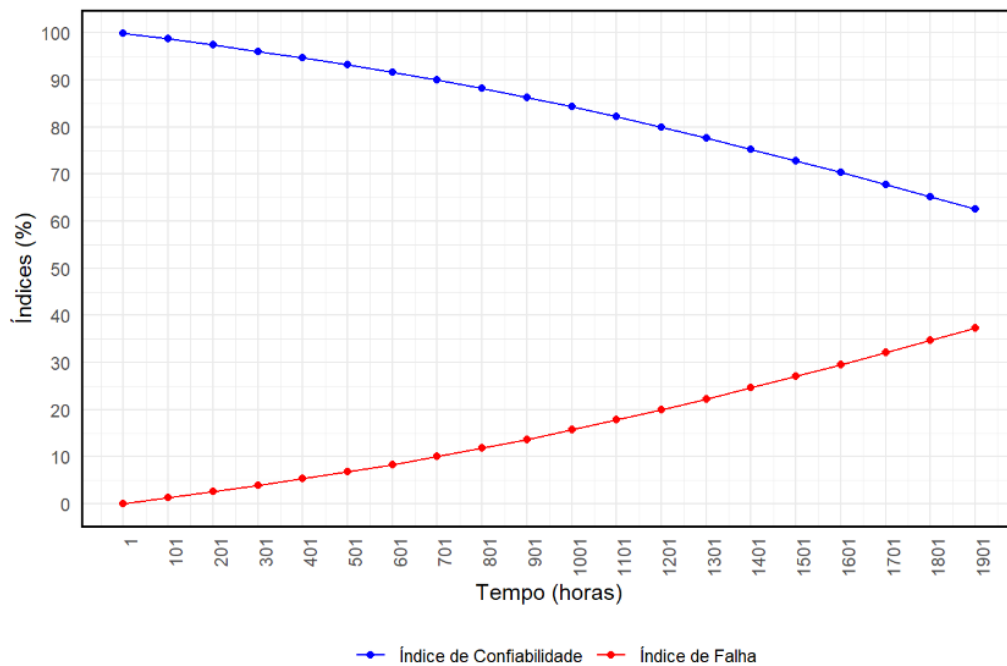


Figura 24 – Intersecção dos índices de falha e confiabilidade da infraestrutura da manufatura 4.0 com redundância avançada de recursos.

6.5 Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentados quatro estudos de caso detalhados, cada um enfocando diferentes aspectos da manufatura têxtil tradicional e 4.0. Esses estudos abarcaram a avaliação de desempenho da infraestrutura tradicional, a avaliação de desempenho da infraestrutura 4.0, a análise de disponibilidade e a avaliação da confiabilidade da manufatura têxtil 4.0. Cada estudo de caso foi conduzido com base nos modelos de Redes de Petri Estocásticas propostos anteriormente, proporcionando uma análise prática e direta da aplicabilidade e eficácia desses modelos em um contexto real.

7 Conclusão e Trabalhos Futuros

As indústrias têxteis em Pernambuco enfrentaram desafios significativos, incluindo a obsolescência do parque industrial, a competição com produtos importados de melhor qualidade e mais baratos. Estes problemas foram agravados pela crise econômica dos anos 1990, levando a falências e redução de investimentos na região. No entanto, as perspectivas de tendência para a melhoria da indústria têxtil Pernambucana, integrando conceitos da Indústria 4.0, incluem a adoção de tecnologias como a digitalização avançada. A implementação dessas tecnologias visa reduzir o desperdício e melhorar a eficiência no uso de recursos. Os impactos esperados incluem melhorias na gestão de resíduos, otimização de processos, redução de desperdícios, melhoria da eficiência no uso de recursos e o fortalecimento no posicionamento de mercado para as empresas pernambucanas no cenário global da moda.

Nesse sentido, este trabalho apresentou uma abordagem que utiliza modelos estocásticos para realizar avaliação de métricas de desempenho, disponibilidade e confiabilidade operacional do processo produtivo de manufaturas têxteis tradicionais e 4.0. A abordagem permite auxiliar gestores industriais a analisar e programar seus processos produtivos a partir da modelagem da produção considerando parâmetros como os tempos médios de execução das atividades, processos de qualidade, capacidade da infraestrutura, compartilhamento de recursos, disponibilidade de recursos, conectividade, índice de falha e reparo dos recursos e entre outros parâmetros abordados.

As análises foram realizadas com base nos dados fornecidos pela empresa, seguindo a metodologia adotada. Primeiramente, foram escolhidas as empresas do polo de confecção do Agreste de Pernambuco, posteriormente foram escolhidos os produtos e métricas baseados no escopo do trabalho e nas expectativas da empresa, em seguida foram concebidos os modelos com o intuito de representar graficamente o processo produtivo, posteriormente foram atribuídos os parâmetros aos modelos, em seguida foram realizadas as simulações e as análises que permitiram avaliar a produção e por fim foram apresentados os resultados com as variações e potenciais arranjos mais eficientes em relação ao desempenho, disponibilidade e confiabilidade operacionais do processo produtivo. Para demonstrar a aplicabilidade da abordagem apresentada, foram realizados estudos de casos. No primeiro, foram utilizados os dados de uma manufatura têxtil tradicional, enquanto no segundo estudo de caso foram

utilizados os dados de uma manufatura têxtil 4.0. Em ambos os casos, os dados dos parâmetros foram obtidos tanto com o gestor industrial quanto por meio da ferramenta de monitoramento da produção da empresa.

Os resultados dos estudos de caso apresentaram diferentes valores para as métricas abordadas. O que significa que embora haja diferenças de capacidade produtiva entre as indústrias tradicionais e as indústrias 4.0, ambas possuem o potencial de melhorar o desempenho, disponibilidade e confiabilidade dos seus processos produtivos, pois ambas possuem gargalos e ineficiências que frequentemente são negligenciados pela ausência de ferramentas e processos voltados a análise das métricas abordadas neste estudo.

Embora o objetivo deste trabalho não seja comparar os resultados dos dois estudos de caso, a análise do tempo de processamento revela diferenças significativas. O estudo de caso da manufatura tradicional mostrou um potencial de ganho de desempenho de 76%, enquanto o arranjo da manufatura 4.0 alcançou 55%. Isso sugere que o tempo de processamento na manufatura tradicional pode ser 21% mais defasado em comparação com a manufatura têxtil 4.0. Em relação à disponibilidade e confiabilidade, não foi possível realizar comparações devido à falta de informações confiáveis na manufatura têxtil tradicional, o que impediu a análise desses aspectos. Esses exemplos destacam a importância de ter informações precisas para um planejamento eficaz do processo produtivo, considerando métricas como desempenho, disponibilidade e confiabilidade operacional dos recursos na infraestrutura têxtil.

7.1 Contribuições

A seguir são listadas as principais contribuições deste trabalho:

- A abordagem desenvolvida centraliza as métricas de avaliação de desempenho, disponibilidade e confiabilidade, podendo ser aplicada tanto ao contexto da manufatura têxtil tradicional quanto para o contexto da manufatura têxtil 4.0.
- A abordagem desenvolvida é flexível e abrangente, pode ser adaptada para indústrias de diferentes seguimentos de mercado.
- A abordagem apresentada pode auxiliar os gestores industriais a identificar gargalos e ineficiências, evitando potenciais prejuízos e possibilitando uma programação de

produção mais assertiva e com baixa probabilidade de riscos operacionais.

- Submissão de artigos em uma revista e dois eventos:
 - RITA (Revista de Informática Teórica e Aplicada) com o trabalho; *Avaliação de Desempenho e Disponibilidade Operacional de uma Manufatura Têxtil 4.0 usando Redes de Petri Estocásticas*. (Artigo aceito).
 - CBA XXV (Congresso Brasileiro de Automática) com o trabalho; *Avaliação de Disponibilidade e Confiabilidade de uma Manufatura Têxtil 4.0 Utilizando Modelos Estocásticos*. (Artigo aceito).
 - LADC XIII (Latin-American Symposium on Dependable and Secure Computing) com o trabalho; *Stochastic Evaluation of Performance, Availability, and Reliability of an Industry 4.0 Textile Manufacturing*. (Artigo submetido).

7.2 Trabalhos Futuros

A seguir são listadas as sugestões de trabalhos futuros:

- Como trabalhos futuros, é pretendido explorar métricas adicionais, como tempo de inatividade e consumo de energia.
- É pretendido avaliar os impactos da alocação dos recursos frente aos custos operacionais.
- É pretendido o desenvolvimento de uma ferramenta prática que possa facilitar o uso do modelo proposto e viabilizar aos administradores a possibilidade e autonomia de tomar decisões informadas, resultando em melhorias operacionais e maior competitividade para as empresas têxteis.

Referências

- ABREU, V. A. **Projeto de automação na indústria têxtil baseado em rede de Petri**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, 2022. <<https://monografias.ufop.br/handle/35400000/4337>> (Accessed on 2024-04-23).
- AGERWALA, T. Special feature: Putting petri nets to work. **Computer, IEEE Computer Society**, IEEE Computer Society, v. 12, n. 12, p. 85–94, 1979. <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1658580>> (Accessed on 2024-01-04).
- ALVES, D. L. N. de A.; SANTOS, V. M. L. dos. Sistemas Informatizados de Monitoramento e Análise da Qualidade do Gesso: prospecção e desenvolvimento de novas tecnologias para fortalecimento do Polo Gesseiro do Araripe. **Cadernos de Prospecção**, v. 15, n. 3, p. 823–838, 2022. <<https://doi.org/10.9771/cp.v15i3.46747>> (Accessed on 2024-04-16).
- ARAUJO, C. A. C. d. L. **Análise da cadeia têxtil e de confecções do estado de Pernambuco e os impactos nela decorrentes do fim do acordo sobre têxteis e vestuário-ATV**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2006. <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/4515>> (Accessed on 2024-03-01).
- BALBO, G.; CHIOLA, G.; FRANCESCHINIS, G.; ROET, G. Generalized stochastic Petri nets for the performance evaluation of FMS. In: IEEE. **Proceedings. 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [S.l.], 1987. v. 4, p. 1013–1018. <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1087864>> (Accessed on 2024-02-05).
- BARAD, M. Petri Nets—A Versatile Modeling Structure. **Applied Mathematics**, Scientific Research Publishing, v. 7, n. 9, p. 829–839, 2016. <<https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=66770>> (Accessed on 2024-03-10).
- BARAD, M.; CHERKASSKY, A. Timed Petri Nets Perspective on Weaving Processes. **IFAC Proceedings Volumes**, Elsevier, v. 43, n. 12, p. 438–443, 2010. <<https://doi.org/10.3182/20100830-3-DE-4013.00072>> (Accessed on 2024-03-09).
- BASHIR, N.; BASHIR, R.; JOOREL, J. S.; JAN, T. Reliability and Profit Evaluation of Textile Industry with Exponential Failure Time Distribution and Different Repair Strategies. In: IEEE. **2020 8th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions)(ICRITO)**. [S.l.], 2020. p. 119–124. <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9197781>> (Accessed on 2024-04-19).
- BLAGA, F.; POP, A.; HULE, V.; INDRE, C. The efficiency of modeling and simulation of manufacturing systems using Petri nets. In: IOP PUBLISHING. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. [S.l.], 2021. v. 1169, n. 1, p. 012005. <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1169/1/012005/meta>> (Accessed on 2024-04-03).
- CACHADA, A.; PIRES, F.; BARBOSA, J.; LEITÃO, P.; CALÀ, A. Petri nets methodology for the design and control of migration processes towards industry 4.0. In: IEEE. **2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)**. [S.l.], 2018. p. 540–545. <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8390763>> (Accessed on 2024-03-16).

CARVALHO, H. J. R. de; PORTO, A. J. V. Utilização de redes de Petri na análise formal do trabalho multifuncional em linhas de produção. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, n. 2, p. 109–109, 2007. <<https://doi.org/10.15675/gepros.v0i2.158>> (Accessed on 2024-02-06).

CHEN, Z.; XING, M. Upgrading of textile manufacturing based on industry 4.0. In: ATLANTIS PRESS. **5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering**. [S.l.], 2015. p. 2143–2146. <<https://www.atlantis-press.com/proceedings/icadme-15/25840478>> (Accessed on 2024-03-02).

CIORTEA, E. M. The advantage of smart manufacturing systems using cloud and RAMI 4.0. In: IEEE. **2023 24th International Carpathian Control Conference (ICCC)**. [S.l.], 2023. p. 114–117. <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10178891>> (Accessed on 2024-04-26).

COMAN, D.; IONESCU, A. Simulation and Performance Analysis of a FMS/CIM Using Stochastic Timed Petri Nets. **Advanced Materials Research**, Trans Tech Publ, v. 837, p. 322–327, 2014. <<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.837.322>> (Accessed on 2024-02-12).

CRUZ, A. G. d. et al. Modelagem e simulação de sistema de produção em uma indústria de confecção de roupas usando redes de PETRI. Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2018. <<https://tede2.pucgoias.edu.br/handle/tede/4097>> (Accessed on 2024-03-22).

DEBOM, H.; CHIWIACOWSKY, L. D. APLICAÇÃO DA CADEIA DE MARKOV NO ESTUDO DA TRANSIÇÃO DE PRODUTOS EXTRUDADOS EM UMA EMPRESA DO RAMO PLÁSTICO. p. 1–17, 2023. <<https://tinyurl.com/zhm6pap>> (Accessed on 2024-04-01).

DUTTA, S.; LANVIN, B.; WUNSCH-VINCENT, S.; LEÓN, L. R. et al. **Global Innovation Index 2022: What is the Future of Innovation-driven Growth?** [S.l.]: WIPO, 2022. <<https://repository.ufrpe.br/handle/123456789/4906>> (Accessed on 2024-04-10).

FERREIRA, D. V. et al. **Modelo de maturidade da indústria 4.0 para avaliação de processos têxteis**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2021. <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/43947>> (Accessed on 2024-02-05).

FRIEDERICH, J.; LAZAROVA-MOLNAR, S. Reliability assessment of manufacturing systems: A comprehensive overview, challenges and opportunities. **Journal of Manufacturing Systems**, Elsevier, v. 72, p. 38–58, 2024. <<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.11.001>> (Accessed on 2024-04-20).

FUJITA, R. M. L.; JORENTE, M. J. A Indústria Têxtil no Brasil: uma perspectiva histórica e cultural. **ModaPalavra e-periódico**, Universidade do Estado de Santa Catarina, n. 15, p. 153–174, 2015. <<https://www.redalyc.org/pdf/5140/514051496008.pdf>> (Accessed on 2024-03-18).

HAAS, P. J. **Stochastic petri nets: Modelling, stability, simulation**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2006. <<https://tinyurl.com/mpvj86>> (Accessed on 2024-03-21).

JACINTHO, C. P.; OLIVEIRA, H. A. de. Avaliação de desempenho em uma indústria de confecção têxtil. **Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Produção da Faculdade de Capivari**, 2018. <https://www.fucap.edu.br/dashboard/biblioteca_repositorio/29c81981aa43e75902eb1f66f53df6d8.pdf> (Accessed on 2024-03-19).

JR, G. A.; MACIEL, P.; LIM, R.; MAGNANI, F.; JR, A. A. Towards the Evaluation of Environment and Business Trade-offs in Supply Chains. **Electronic Notes in Theoretical Computer Science**, Elsevier, v. 275, p. 5–21, 2011. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1571066111000934>> (Accessed on 2024-02-27).

JUNIOR, B. d. O. M. Indústria: Indústria do Vestuário. Banco do Nordeste do Brasil, 2023. <<https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/handle/123456789/1741>> (Accessed on 2024-02-05).

KAHRAMAN, C.; TÜYSÜZ, F. Manufacturing System Modeling Using Petri Nets. In: **Production Engineering and Management under Fuzziness**. [S.l.]: Springer, 2010. p. 95–124. <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-12052-7_6> (Accessed on 2024-03-09).

KUMAR, G.; JAIN, V.; GANDHI, O. Reliability and availability analysis of mechanical systems using stochastic petri net modeling based on decomposition approach. **International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering**, World Scientific, v. 19, n. 01, p. 1250005, 2012. <<https://doi.org/10.1142/S0218539312500052>> (Accessed on 2024-03-14).

LIMA, J. W. S. de; CALLOU, G.; ANDRADE, E. Queueing Theory and Stochastic Petri Net: A tutorial. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, 2021. <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/12826>> (Accessed on 2024-03-28).

LIMA, M. C. P. d. **A metamorfose do belo: uma análise do setor de confecção no agreste Pernambuco**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2010. <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5608>> (Accessed on 2024-04-13).

LITTLE, J. D. A Proof for the Queuing Formula: $L = \lambda W$. **Operations research, INFORMS**, v. 9, n. 3, p. 383–387, 1961. <<https://pubsonline.informs.org/doi/epdf/10.1287/opre.9.3.383>> (Accessed on 2024-01-02).

MACIEL, P. R.; LINS, R. D.; CUNHA, P. R. **Introdução às redes de Petri e aplicações**. [S.l.]: UNICAMP-Instituto de Computacao Sao Paulo, Brazil, 1996. <<https://tinyurl.com/2s3vvpaw>> (Accessed on 2024-03-10).

MARSAN, M. A.; CONTE, G.; BALBO, G. A Class of Generalized Stochastic Petri Nets for the Performance Evaluation of Multiprocessor Systems. **ACM Transactions on Computer Systems (TOCS)**, ACM New York, NY, USA, v. 2, n. 2, p. 93–122, 1984. <<https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/190.191>> (Accessed on 2024-01-03).

MÉLO, L. B. d. **Competências gerenciais e desempenho organizacional: um estudo envolvendo as lavanderias industriais do Polo Têxtil do Agreste Pernambucano**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2022. <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/46555>> (Accessed on 2024-03-11).

MINA. **Portal Mina**. [S.l.]: Instituto SENAI de Inovação para Tecnologias da Informação e Comunicação (ISI-TICs), 2023. <<https://portal.mina.com.br>> (Accessed on 2024-04-28).

- MOLLOY, M. K. Performance Analysis Using Stochastic Petri Nets. **IEEE Transactions on computers**, IEEE Computer Society, v. 31, n. 09, p. 913–917, 1982. <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1676110>> (Accessed on 2024-02-02).
- MURATA, T. Petri nets: Properties, analysis and applications. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 77, n. 4, p. 541–580, 1989. <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/24143>> (Accessed on 2024-01-30).
- NASCIMENTO, A.; TAVARES, E.; JR, G. A.; SOUSA, E.; NOGUEIRA, B. Performability evaluation of transport modes for cloud-based inbound logistics: a study based on coffee industry. **International Journal of Manufacturing Technology and Management**, Inderscience Publishers (IEL), v. 34, n. 2, p. 126–147, 2020. <<https://www.inderscienceonline.com/doi/pdf/10.1504/IJMTM.2020.106209>> (Accessed on 2024-03-17).
- PETERSON, J. L. **Petri net theory and the modeling of systems**. [S.l.]: The British Computer Society, 1982. <<https://dl.icdst.org/pdfs/files3/2bf95f7fde49a09814231bbcbce592526.pdf>> (Accessed on 2024-01-25).
- PRADO, M. V. Relatório Setorial da Indústria Têxtil Brasileira. **IEMI**, IEMI, ABIT, 2023. <<https://iemi.com.br/produto/brasil-textil/>> (Accessed on 2024-05-13).
- QIN, T.; DONG, Y.; YIN, L.; LI, Z. Liveness enforcement for production systems modeled by time Petri nets. **Information Sciences**, Elsevier, v. 648, p. 119564, 2023. <<https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.119564>> (Accessed on 2024-04-18).
- RATH, M.; GANNOUNI, A.; LUETTICKE, D.; GRIES, T. Digitizing a distributed textile production process using the industrial internet of things: a use case. In: **IEEE. 2021 4th IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)**. [S.l.], 2021. p. 315–320. <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9468203>> (Accessed on 2024-04-08).
- RUSSI, A. K. et al. **Etapas de desenvolvimento de produto têxtil de vestuário tendo como base a economia circular**. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2022. <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/238978/TCC%20ALINE%20KARON%20RUSSI%202022.1.pdf?sequence=1>> (Accessed on 2024-03-20).
- SANTANA-ROBLES, F.; MEDINA-MARÍN, J.; MONTAÑO-ARANGO, O.; SECK-TUOH-MORA, J. C. Modeling and Simulation of Textile Supply Chain through Colored Petri Nets. **Intelligent Information Management**, Scientific Research Publishing, v. 4, n. 5A, p. 261, 2012. <<http://dx.doi.org/10.4236/iim.2012.425037>> (Accessed on 2024-01-11).
- SEIFU, A. **Simulation and Performance Analysis of Manufacturing Systems Using Deterministic and Stochastic Petri Nets**. Dissertação (B.S. thesis) — Addis Ababa University, 2007. <<http://etd.aau.edu.et/handle/123456789/5246>> (Accessed on 2024-02-05).
- SILVA, M. C. C. d. **Re-tecendo: tecelagem artesanal e refugos têxteis**. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Federal de Pernambuco, 2020. <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/43113>> (Accessed on 2024-02-05).

SOUSA, A. L. d. et al. Controle da produção utilizando estratégias de consenso multiagente. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2023. <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/32959>> (Accessed on 2024-04-15).

SOUSA, F. J. D. M. Modelos de sistemas de supervisão na indústria 4.0. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia**, v. 9, n. 1, p. 27–48, 2023. <<https://periodicos.unb.br/index.php/ripe/article/view/41878>> (Accessed on 2024-04-10).

XIAOHUA, W.; RUIQING, W.; ZHANG, L. et al. Timed Petri Net Based Optimal Scheduling for Garment Flexible Productions. **J Textile Eng Fashion Technol**, v. 2, n. 2, p. 343–349, 2017. <<https://medcraveonline.com/JTEFT/JTEFT-02-00055.pdf>> (Accessed on 2024-04-10).

ZIMMERMANN, A. **Stochastic Discrete Event Systems**. [S.l.]: Springer, 2007. <<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-74173-2>> (Accessed on 2024-03-07).

ZIRONDI, J. M.; OKADA, R. H. Manufatura avançada: a indústria 4.0 e seus desafios e oportunidades. **Revista Interface Tecnológica**, v. 18, n. 1, p. 593–605, 2021. <<https://doi.org/10.31510/inf.v18i1.1149>> (Accessed on 2024-06-10).