

Performance Evaluation and Operational Availability of a Textile Manufacturing 4.0 Using Stochastic Petri Nets

Avaliação de Desempenho e Disponibilidade Operacional de uma Manufatura Têxtil 4.0 Usando Redes de Petri Estocásticas

Edson Moura Silva^{1*}, Danilo Ricardo Barbosa de Araújo¹, Ermeson Carneiro de Andrade¹

Resumo: The Brazilian clothing industry is the 7th largest globally, generating an annual revenue of USD 10 billion. However, Brazil is only 54th in industrial innovation investments. The constraint on industrial innovation investments represents a challenge for the implementation of Industry 4.0, especially in local garment manufacturing hubs. It is crucial to assess the impact of Industry 4.0 in these hubs in order to highlight its benefits. The study proposes the development of an approach based on Stochastic Petri Nets to model production processes in the textile industry, applied to a company in the garment manufacturing hub of the Agreste region of Pernambuco. The results demonstrate that this approach has the potential to assist garment administrators in optimizing production processes and making more informed decisions. Additionally, the approach allows administrators to maintain resources balanced, efficient, and available in accordance with the production goals of the modern market.

Keywords: Textile Manufacturing 4.0 — Performance Evaluation — Availability Assessment — Stochastic Petri Nets

Resumo: A indústria de vestuário brasileira é a 7ª maior globalmente, gerando uma receita de USD 10 bilhões por ano. No entanto, o Brasil está apenas em 54º lugar em investimentos de inovação industrial. A restrição de investimentos em inovação industrial representa um desafio para a implementação da Indústria 4.0, especialmente nos polos de confecção locais. É crucial avaliar o impacto da Indústria 4.0 nesses polos a fim de destacar seus benefícios. O estudo propõe o desenvolvimento de uma abordagem baseada em Redes de Petri Estocásticas para modelar processos de produção na indústria têxtil, aplicada em uma empresa do polo de confecção do Agreste de Pernambuco. Os resultados demonstram que essa abordagem tem o potencial de auxiliar os administradores de confecção a otimizar os processos produtivos e tomar decisões mais informadas. Adicionalmente, a abordagem permite que os administradores mantenham os recursos equilibrados, eficientes e disponíveis de acordo com as metas de produção do mercado moderno.

Palavras-Chave: Manufatura Têxtil 4.0 — Avaliação de Desempenho — Avaliação de Disponibilidade — Redes de Petri Stocásticas

¹ Departamento de Computação, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife, Pernambuco, Brasil

*Corresponding author: edson.msilva2@ufrpe.br

DOI: <https://doi.org/10.22456/2175-2745.135781> • Received: 26/09/2023 • Accepted: 30/06/2024

CC BY-NC-ND 4.0 - This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License.

1. Introdução

O polo de confecções do Agreste de Pernambuco 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 [1]. 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 7ª maior

indústria de vestuário do mundo, com receita anual de USD 10 bilhões, demonstrando o grande potencial econômico desse setor [2]. No entanto, ao observar o cenário global de investimentos em inovação industrial, o país se depara com um dilema significativo, o Brasil ocupa a 54ª posição no ranking mundial de investimentos em inovação industrial [3].

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. Logo, uma

grande problemática enfrentada por essas empresas é a dificuldade para avaliar com precisão o desempenho e disponibilidade operacional dos processos produtivos. Segundo [4], 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 [5]. 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 [6]. 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) [7]. 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 [8]. Portanto, o processo de transição da indústria convencional para a indústria 4.0, juntamente com as várias métricas associadas, como avaliação de desempenho e disponibilidade, pode ser planejado, validado e simulado utilizando a formalidade de Redes de Petri, conforme proposto por [9].

O estado da arte na área de avaliação de desempenho e disponibilidade operacional de manufaturas, com foco na indústria têxtil, revela uma série de estudos relevantes e abordagens inovadoras, com a aplicação de Redes de Petri. Os estudos destacam a importância dessas abordagens para aprimorar a eficiência, economizar recursos e apoiar a tomada de decisões baseadas em dados precisos. No entanto, apesar dos avanços significativos nesses trabalhos, nenhum deles abordou especificamente a avaliação de desempenho e disponibilidade operacional de uma manufatura têxtil 4.0. Essa lacuna motiva esse estudo a ofertar uma abordagem abrangente e alinhada aos desafios da indústria têxtil moderna, baseada na avaliação de métricas bem definidas e apresentação dos possíveis arranjos. Essa abordagem tem o potencial de melhorar o desempenho e a disponibilidade operacional, aumentar a produtividade e, consequentemente, proporcionar vantagens competitivas para as manufaturas têxteis 4.0 do polo de confecções do Agreste de Pernambuco.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma abordagem baseada em Redes de Petri Estocásticas (SPNs) para analisar o processo produtivo de uma manufatura têxtil 4.0, aplicada em uma empresa do polo de confecção do Agreste de Pernambuco. O foco principal é identificar possíveis arranjos que sejam mais eficientes e estejam disponíveis para aprimorar a produção. 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 (1500 peças), em comparação com as demais possibilidades de arranjo. Já o arranjo composto por redundância de recursos como 2 máquinas de corte de tecido, 5 costureiras e

redundância de conexão com a Internet (WI-FI e 4G), ofertou aumento de disponibilidade operacional de 43,73% ao ano. Este trabalho tem o potencial de trazer impactos significativos para as empresas do polo de confecção do Agreste de Pernambuco, ofertando uma abordagem capaz de analisar o processo produtivo completo. Através dessa análise, é possível identificar e apresentar os arranjos mais promissores, o que pode resultar em uma redução significativa no tempo de produção e na indisponibilidade dos recursos. Essa otimização do processo produtivo tem o potencial de melhorar a eficiência e disponibilidade operacional, proporcionando maior competitividade para as empresas do polo de confecções do Agreste de Pernambuco.

O trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a fundamentação teórica. A Seção 3 apresenta os trabalhos relacionados. A Seção 4 apresenta a metodologia e a infraestrutura adotada. A Seção 5 apresenta os modelos propostos. A Seção 6 apresenta os resultados. Por fim, a Seção 7 apresenta a conclusão e sugere os trabalhos futuros.

2. Fundamentação

Nesta Seção, serão apresentados os conceitos básicos para fundamentação deste trabalho.

2.1 Manufatura têxtil 4.0

As tecnologias de automação são essenciais para modernizar a indústria têxtil. A chamada Manufatura Têxtil 4.0 envolve uma cadeia de produção independente e utiliza tecnologias como RFID (*Radio-Frequency Identification*), sensores e IIoTs (Internet das Coisas) para coletar, armazenar e compartilhar informações sobre o status de equipamentos e manutenções. Essa tecnologia permite uma autoconfiguração e otimização rápida e flexível para atender a pedidos personalizados. As informações são retroalimentadas para os sistemas MES (*Manufacturing Execution System*) e ERP (*Enterprise Resource Planning*) para fundamentar decisões de gerenciamento futuros [10].

A modernização do polo de confecções do Agreste de Pernambuco tem sido impulsionada pela revolução da Indústria 4.0. Esse cenário de transformação digital está redefinindo a maneira como as empresas têxteis operam, incorporando tecnologias avançadas como a Internet das Coisas, automação e análise de dados. À medida que a região abraça os princípios da Indústria 4.0 observa-se um discreto movimento em direção aos processos mais eficientes e produção personalizada [11].

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) [12]. O MInA é uma solução MES integrada que utiliza sensores, IIoTs, 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 [13]. 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.

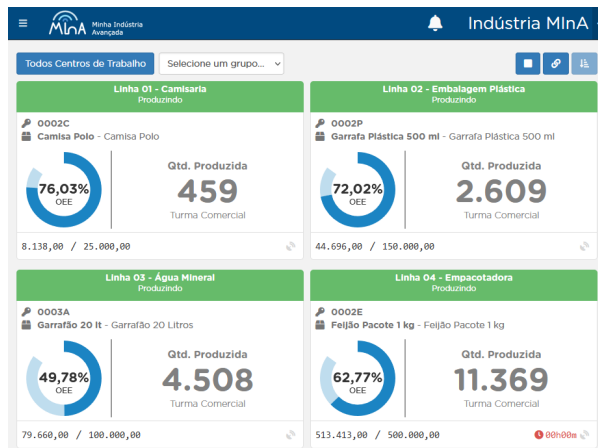


Figura 1. Área de trabalho plataforma MInA.

Na Tabela 1 são apresentadas as informações dos meses trabalhados, produtos produzidos e o tempo de processamento dos lotes, entre janeiro 2023 a junho 2024. Os meses de setembro 2023 e fevereiro 2024 foram removidos devido à ausência de registro de produção. Essas informações foram extraídas da plataforma MES usada para monitorar a produção da manufatura têxtil abordada nesse trabalho.

Tabela 1. Dados extraídos da plataforma MES da empresa.

Mês	Produção	Tempo de processamento do lote (h)
2023-01	11276	108,74
2023-02	7869	77,82
2023-03	14799	132,23
2023-04	11964	115,52
2023-05	15185	150,29
2023-06	11611	119,51
2023-07	10230	61,22
2023-08	14965	149,11
2023-10	10563	99,17
2023-11	7169	72,24
2023-12	8915	86,89
2024-01	6273	62,72
2024-03	10787	88,80
2024-04	15292	111,30
2024-05	14766	78,20
2024-06	9516	42,27

Embora o uso de plataformas de monitoramento 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 passagem de produto, a plataforma MES irá contabilizar e extrair métricas de desempenho, disponibilidade e qualidade de máquina.

Neste trabalho, são avaliadas métricas de desempenho e disponibilidade operacional dos recursos na infraestrutura da manufatura têxtil. Por esse motivo, apesar das semelhanças com as plataformas MES, as métricas utilizadas possuem aplicações distintas. Enquanto as plataformas MES avaliam o desempenho atual das máquinas com base no OEE (*Overall Equipment Efficiency* – Eficiência Global de Equipamento) [14], a abordagem proposta neste trabalho avalia o desempenho e a disponibilidade dos recursos na infraestrutura por meio de uma modelagem baseada em modelos. Isso significa que podemos utilizar modelos para avaliar o desempenho e a disponibilidade de recursos humanos, máquinas ou até mesmo a conexão com a Internet mediante a modelagem do processo produtivo.

2.2 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 $C = (T, P, A, M)$ [15, 16].

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 [17], onde os tempos (por exemplo, *delays*) associados as atividades (representadas como transições) são considerados variáveis aleatórias com distribuições exponenciais. Adicionalmente, Marsan et al. [18] 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 2 (a) ilustra os elementos de uma rede SPN, enquanto a Figura 2 (b) apresenta um exemplo de modelo SPN que representa um sistema de falha e reparo.

Os lugares habilitados são representados por círculos va-

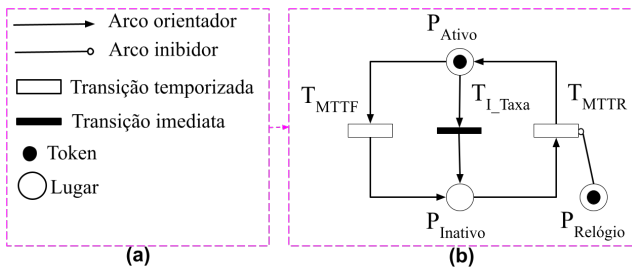


Figura 2. (a) Elementos SPN. (b) Exemplo de modelo SPN.

zios, 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 [19].

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 [20]. Para mais informações sobre as SPNs, os leitores podem consultar os trabalhos [21], [22] e [23].

3. Trabalhos relacionados

Nesta Seção serão abordados os trabalhos relacionados ao tema central deste estudo: a avaliação de desempenho e disponibilidade operacional de manufaturas. Em [24], os autores usaram as Redes de Petri Temporalizadas (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.

Em [25], 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 [26], é apresentada a análise de desempenho de sistemas de manufatura celular a partir de Redes de Petri coloridas (CPN). Na abordagem foram utilizadas 3 células de trabalho e realizados diversos arranjos variando a taxa de produção das células e quantidade de operadores. Dessa forma, após o processo de simulação, foi constatado que o cenário 3 foi o mais adequado. Segundo os autores, embora o uso médio da força de trabalho tenha permanecido semelhante em termos percentuais, o cenário 3 apresentou um melhor desempenho geral em relação aos cenários anteriores.

O trabalho em [27] descreve a modelagem e simulação de uma cadeia de suprimentos têxtil usando CPNs. 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.

Já em [28], os autores apresentam abordagem inovadora para otimizar o desempenho do *Automated Manufacturing Systems* (AMS) usando as redes de Petri com Lugares Temporizados (TPPN). O trabalho apresenta um modelo que compreende um controlador supervisor de qualidade, necessário para monitorar o status do trabalho, rotear peças e selecionar máquinas em um AMS para garantir o desempenho desejado. O modelo proposto é capaz de projetar parâmetros de controle adequados para atender aos requisitos de desempenho do sistema, sem fazer mudanças radicais em sua estrutura.

Em [29], é abordada a otimização de processos de sistemas de produção de vestuário usando redes de Petri com Lugares Temporizados (TPPN). 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 [30], é apresentada uma abordagem de avaliação de desempenho relacionada a reengenharia de processos baseada em CPNs, submetida a um estudo de caso em uma empresa têxtil italiana. Segundo os autores, o estudo permitiu desenvolver um modelo capaz de simular as ações de reengenharia usando o conceito de *Digital Twins* (Gêmeos Digitais) para validar sua eficácia e conduzir as análises de desempenho quantitativas. Os resultados apontaram a redução de 33% nos dias de trabalho no arranjo de subprocesso (1-2), sendo este o cenário mais adequado frente aos demais arranjos analisados no estudo.

Em [31], é proposta uma abordagem em GSPNs para otimizar a produção em sistemas de manufatura enxuta através do desenvolvimento de um modelo em que representa processos de manufatura enxuta sujeitos a variações do ritmo de produção necessário para atender a demanda. Através das simulações, foi possível apresentar cenários de reconfiguração do processo que sincronizou e otimizou as atividades de produção. Isso proporcionou a redução do tempo médio de fila de 34,27% e 30,39%, indicando uma possível melhoria no fluxo do processo produtivo.

Embora compartilhe semelhanças com os estudos anteriores, é importante ressaltar que nenhum dos trabalhos correlatos apresentou uma abordagem baseada em modelos que permita avaliar o desempenho e a disponibilidade operacional de uma manufatura têxtil 4.0. Essa lacuna é significativa, uma vez que a compreensão detalhada dos processos produtivos da indústria 4.0 pode auxiliar as empresas do polo de confecção do Agreste de Pernambuco a identificar as melhores opções e otimizar seus fluxos de trabalho. Contudo, o modelo proposto neste estudo objetiva preencher essa lacuna, ofertando uma abordagem que permite avaliar diversas métricas de uma infraestrutura têxtil 4.0. Ao considerar a variação dos recursos como o tempo de corte nas células de costura, redundância de maquinário e conexão com a Internet nas diferentes etapas do processo produtivo, a abordagem possibilita uma análise mais precisa e detalhada do desempenho e da disponibilidade da infraestrutura. Essa abordagem adaptável e flexível confere aos gestores das manufaturas têxteis a capacidade de tomar decisões baseadas na escolha dos arranjos mais adequados para as suas empresas.

4. Metodologia e Infraestrutura Adotada

Nesta Seção, será apresentada a metodologia e a infraestrutura têxtil 4.0 adotada.

4.1 Metodologia adotada

Esta subseção descreve a metodologia empregada na análise e modelagem de uma infraestrutura têxtil, conforme representado na Figura 3. A metodologia compreende três macro atividades divididas em 6 etapas. Antes de iniciar a execução, foi necessário selecionar uma empresa de estudo de caso. Os critérios de seleção incluíram localização no polo de confecções do Agreste de Pernambuco, adoção de tecnologias 4.0 (IoT e processos digitalizados), enfrentamento de

desafios operacionais de produção, abertura para melhorias de desempenho e disponibilidade, e acesso ao chão de fábrica.

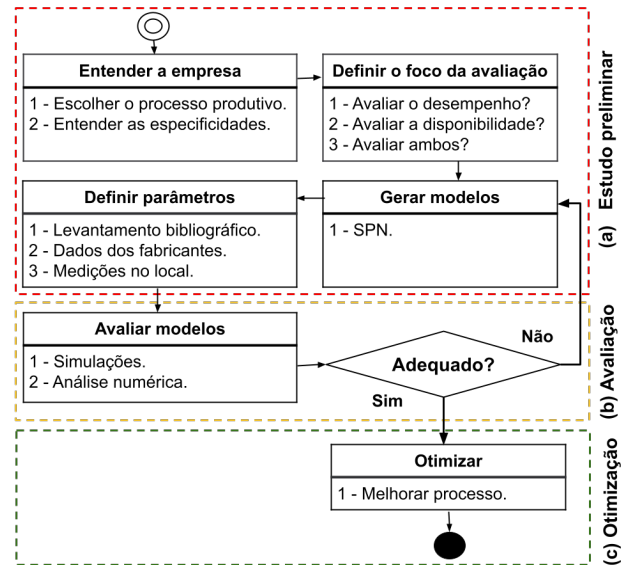


Figura 3. Metodologia.

Após a seleção da empresa, a metodologia inicia com a compreensão das especificidades da empresa, escolhendo o processo produtivo (ex.: confecção de camisa Polo Piquet). Após isso, o foco da avaliação é definido alinhado às expectativas da empresa e ao escopo do estudo (ex.: desempenho, disponibilidade ou ambos). Os modelos subsequentes dependem dessa escolha. Por exemplo, ao optar por ambos. No desempenho, são analisados os tempos de produção de lotes e a taxa de produção. Na disponibilidade, considera-se o tempo de indisponibilidade e a disponibilidade. Após definição do foco, são gerados os modelos SPN do processo adotado. O passo seguinte é a definição dos parâmetros de entrada, estabelecidos por estudos bibliográficos, dados dos fabricantes e medições *in loco*.

Esses parâmetros são importantes para as avaliações, variando conforme o foco escolhido para garantir precisão. Os modelos são então avaliados via simulações e análises numéricas. Os resultados são avaliados e, se não atenderem às expectativas, o modelo retorna à fase “Gerar modelo” para aprimoramento. Caso contrário, segue-se para a fase “Otimizar”, sugerindo melhorias no processo produtivo real com base nos resultados apresentados. Vale ressaltar que não são esperados resultados positivos ou negativos, o propósito do estudo é apresentar os possíveis arranjos mais eficientes e sugerir possíveis ajustes nos processos produtivos, cabe a empresa a escolha de usar ou não os resultados para fundamentar a melhoria dos seus processos.

O processo de validação do modelo foi conduzido através da identificação do intervalo de confiança do tempo de processamento dos lotes, obtido da plataforma MES da empresa ao longo de um período de 16 meses. Para validar o modelo, verificou-se se a média calculada das análises estava dentro deste intervalo de confiança, estabelecido como critério de

aceitação. Adicionalmente, esses resultados foram validados com o gerente do chão de fábrica para assegurar a precisão e relevância das informações.

A metodologia apresentada neste estudo, que se concentra na análise e modelagem de infraestruturas têxteis, possui um grande potencial para ser generalizada e aplicada em diferentes contextos industriais. Sua estrutura modular e flexível permite adaptações a diversos tipos de processos produtivos, empresas e setores. Ao iniciar com a seleção criteriosa de uma empresa de estudo de caso, baseada em critérios como adoção de tecnologias 4.0 e disponibilidade para melhorias operacionais, a metodologia pode ser facilmente ajustada para atender às necessidades específicas de outras indústrias. A compreensão detalhada dos processos produtivos, seguida pela modelagem utilizando SPNs e definição de parâmetros críticos, possibilita uma abordagem personalizada e eficaz. A validação dos modelos com dados reais, juntamente com a colaboração com *stakeholders* como gerentes de chão de fábrica, fortalece a confiança e a aplicabilidade dos resultados obtidos, oferecendo uma base sólida para melhorias contínuas e decisões estratégicas fundamentadas.

4.2 Infraestrutura têxtil adotada

A Figura 4 representa o ciclo produtivo da confecção têxtil 4.0 utilizada como referência neste trabalho.

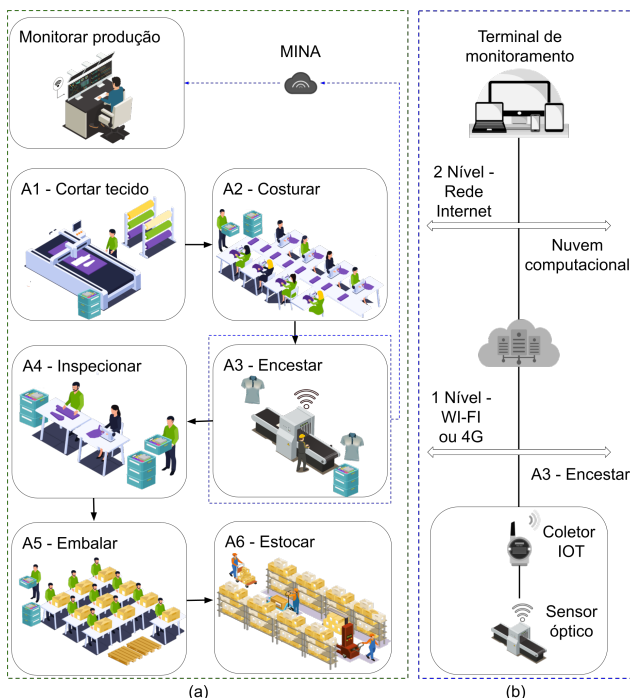


Figura 4. (a) Processo produtivo; (b) Encestamento, nuvem computacional e terminal de monitoramento.

A Figura 4 (a) apresenta as 6 fases do processo produtivo: cortar lote de tecido (A1), costurar lote de tecido (A2), encestar lote (A3), inspeccionar lote (A4), embalar lote (A5) e estocar lote (A6). Já a Figura 4 (b) ilustra o ambiente tecnológico adotado, que consiste em 3 camadas: terminal de

monitoramento, nuvem computacional e encestamento com uso de sensores e IoT. A fase de encestamento utiliza um sensor instalado na esteira para contabilizar a passagem dos produtos. O sensor é conectado 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 informações no terminal de monitoramento on-line.

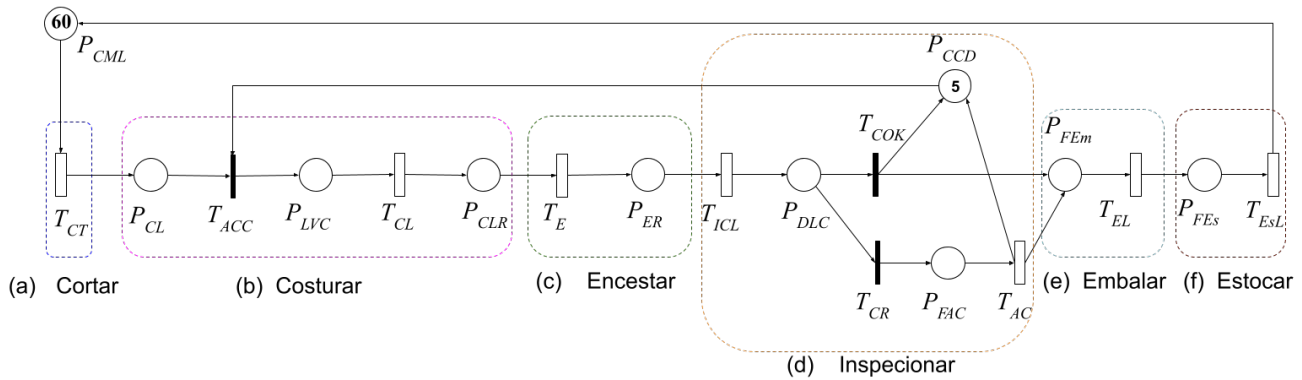
A fase cortar o lote de tecido, consiste no corte das folhas de tecido que originam a frente e o verso das peças. Nessa fase é utilizada uma máquina de corte de alta precisão. A fase de costura do lote de tecido, consiste na união (costura manual) da frente com o verso do tecido cortado. É nessa fase que os cortes do tecido são transformados em peças. A atividade de encestar lote consiste na contabilidade automática das peças produzidas. A fase inspecionar lote consiste na avaliação de qualidade das peças. A fase embalar lote consiste em dobrar, separar e ensacar as peças 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. Na fase estocar lote os produtos são encaixotados e estocados para iniciação dos trâmites de logística e distribuição.

A escolha por considerar a produção de camisas Polos Piquet ocorreu devido aos seguintes motivos. Primeiro, a empresa selecionada para o estudo de caso é especializada apenas na fabricação de camisas polo. Segundo, esse produto possuía tempos de produção disponíveis para análise. Além disso, a análise foi direcionada para a avaliação de desempenho e disponibilidade, pois foi um interesse da confecção identificar gargalos e indisponibilidades para proporcionar possíveis melhorias. 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 na Seção a seguir.

5. Modelos propostos

A Figura 5 apresenta o modelo de desempenho proposto baseado no processo produtivo definido na Figura 4 (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 conectada 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 II e III.

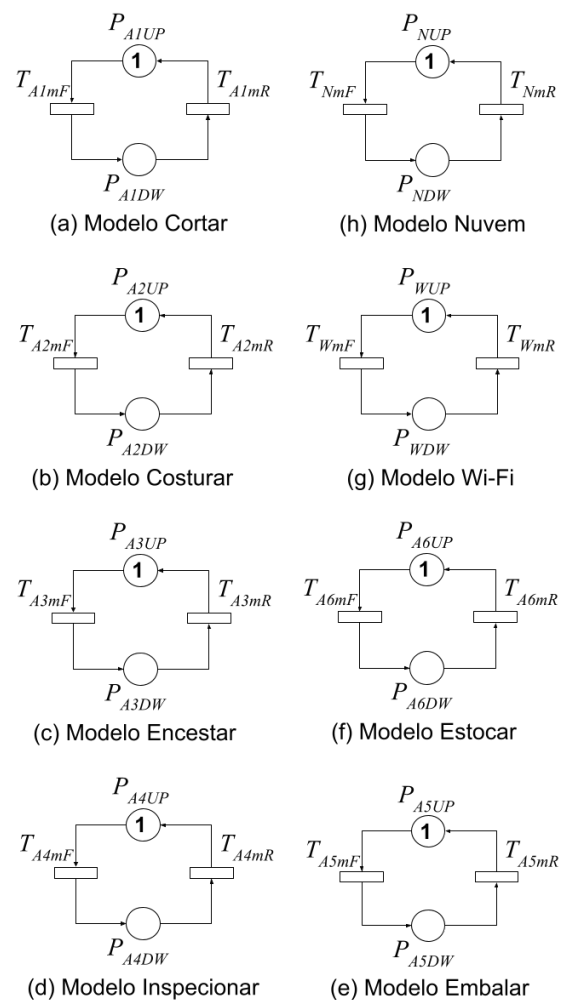
Figura 5. Modelo SPN de desempenho da produção.

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.

A Figura 6 apresenta os modelos de disponibilidade sem a redundância de recursos. 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).

A Figura 6 (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 demais modelos que representam a falha e o reparo de outras fases do processo produtivo ou componentes tecnológicos possuem um comportamento semelhante ao ilustrado na Figura 6 (a).



** Ver descrição das siglas na Tabela II e III.

Figura 6. Modelo SPN de disponibilidade do processo produtivo sem redundância.

A Figura 7 apresenta uma versão do modelo da Figura 6,

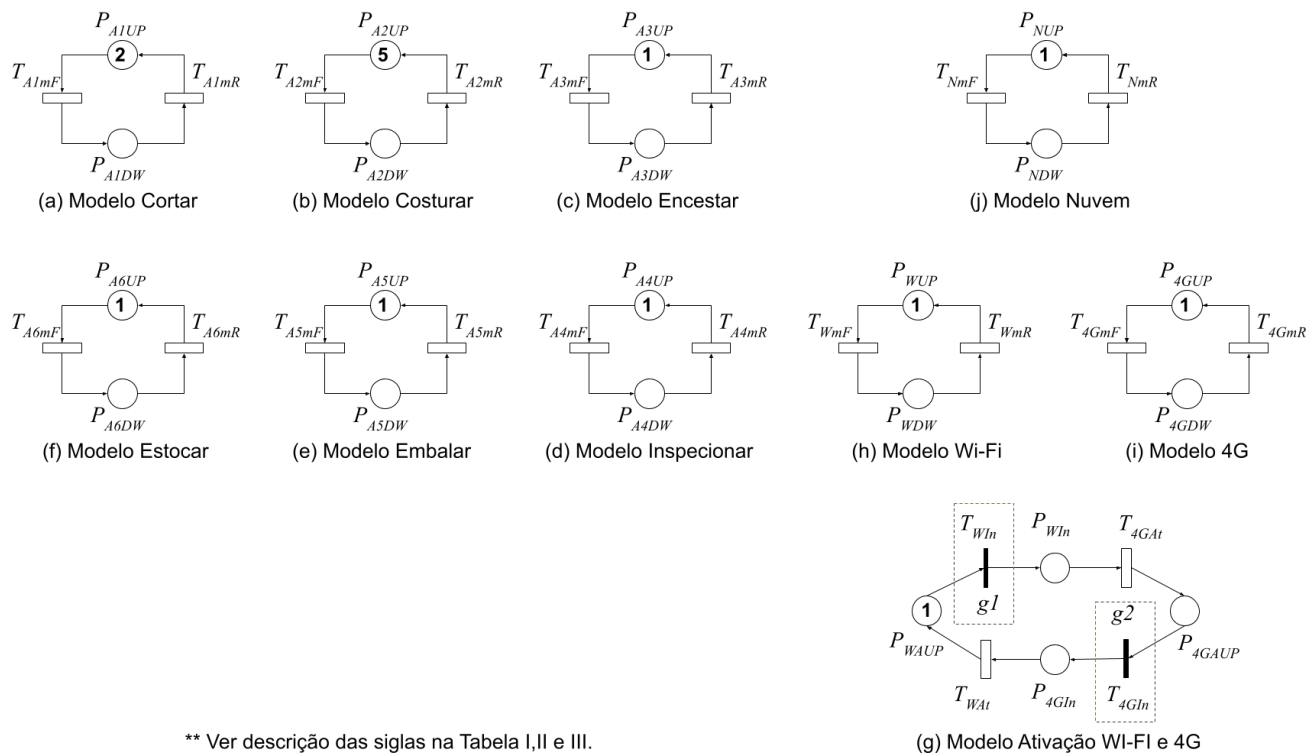


Figura 7. Modelo SPN de disponibilidade do processo produtivo com redundância.

porém com redundância nas máquinas de corte de tecido, nas costureiras e na conexão de rede. Na Figura 7 (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.

Na Figura 7 (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. As Figuras 7 (h) e (i) descrevem a falha e o reparo do ponto de acesso WI-FI e da estação base 4G. Na Figura 7 (g), a ativação da conectividade Wi-Fi ou 4G é modelada. 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 o desempenho. O comportamento do modelo de ativação é regido pelas funções de guarda [g1] e [g2] nas transições imediatas T_{WIn} e T_{4GIn} , detalhadas na Tabela 2.

Na Tabela 3 são detalhadas as atividades da infraestrutura representadas por transições, incluindo os tempos, probabilidades, prioridades, lugares, descrições e a marcação inicial

Tabela 2. Expressões de guarda.

Guarda	Expressões
g1	if (mark("PWUP") == 1) return(1); else return(0);
g2	if ((mark("PWDW") == 1) && (mark("P4GUP")==1)) return(1); else return(0);

dos modelos apresentados nas Figuras 5, 6 e 7. 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. É importante ressaltar que os tempos de falha e reparo dos componentes de Wi-Fi e 4G foram obtidos conforme [32]. A Tabela 4 apresenta as métricas adotadas. As funções foram baseadas na sintaxe da ferramenta de modelagem SPNP (*Stochastic Petri Net Package*) Application [33], que é a ferramenta adotada para as análises numéricas. Neste trabalho, a análise estocástica do modelo representa o estudo de caso do processo produtivo de uma manufatura têxtil 4.0.

As métricas adotadas para as análises são apresentadas na Tabela 4. 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 [34], 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 representa o tempo

Tabela 3. Transições e Lugares

Transições	Descrição	Valores	Prioridade	Lugares	Descrição	Tokens
T_{CT}	Cortar tecido	0,5 (h)	-	P_{CL}	Chegada do lote de tecido	0
T_{CL}	Costurar lote	3,0 (h)	-	P_{LVC}	Lote vinculado a célula	0
T_{EL}	Encestar lote	0,083333(h)	-	P_{CLR}	Costura do lote realizada	0
T_{ICL}	Inspecionar costura	0,6(h)	-	P_{ER}	Encestamento realizado	0
T_{AC}	Ajustar costura	0,3 (h)	-	P_{DLC}	Decisão do lote costurado	0
T_{EL}	Embalar lote	0,5 (h)	-	P_{FAC}	Fila de ajuste da costura	0
T_{EsL}	Estocar lote	0,16667 (h)	-	P_{FEm}	Fila de embalagem	0
T_{ACC}	Acionar célula	1 (prob.)	3	P_{FES}	Fila de estoque	0
T_{COK}	Costura ok	0,99 (prob.)	2	P_{CCD}	Células de costura disponíveis	1-5
T_{CR}	Costura ruim	0,01 (prob.)	1	P_{CML}	Capacidade máxima de lotes	60
T_{A1mF}	MTTF máquina de corte	2918 (h)	-	P_{A1UP}	Máquinas funcionando	1-2
T_{A1mR}	MTTR máquina de corte	4 (h)	-	P_{A1DW}	Máquinas paradas	0
T_{A2mF}	Tempo médio de faltas	2191 (h)	-	P_{A2UP}	Costureira presente	1-5
T_{A2mR}	Tempo médio de reposição	2 (h)	-	P_{A2DW}	Costureira ausente	0
T_{A3mF}	MTTF sensor Encestamento	5844,48 (h)	-	P_{A3UP}	Sensor funcionando	1
T_{A3mR}	MTTR sensor Encestamento	1 (h)	-	P_{A3DW}	Sensor parado	0
T_{A4mF}	Tempo médio de falta	2191 (h)	-	P_{A4UP}	Inspetor presente	1
T_{A4mR}	Tempo médio de reposição	2 (h)	-	P_{A4DW}	Inspetor ausente	0
T_{A5mF}	Tempo médio de faltas	2191 (h)	-	P_{A5UP}	Embalador presente	1
T_{A5mR}	Tempo médio de reposição	2 (h)	-	P_{A5DW}	Embalador ausente	0
T_{A6mF}	Tempo médio de faltas	2191 (h)	-	P_{A6UP}	Estoquista presente	1
T_{A6mR}	Tempo médio de reposição	2 (h)	-	P_{A6DW}	Estoquista ausente	0
T_{WAr}	Ativação WI-FI	0,0013889(h)	10	P_{WAUP}	WI-FI ativado	1
T_{WIn}	Ativação WI-FI	1 (prob.)	5	P_{WIn}	WI-FI desativado	0
T_{4GAi}	Ativação 4G	0,0013889(h)	-	P_{4GAUP}	4G ativado	0
T_{4GIIn}	Ativação 4G	1 (prob.)	-	P_{4GIIn}	4G Desativado	0
T_{WmF}	MTTF do WI-FI	10000 (h)	-	P_{WUP}	WI-FI funcionando	1
T_{WmR}	MTTR do WI-FI	1,6666 (h)	-	P_{WDW}	WI-FI parado	0
T_{4GmF}	MTTF do 4G	83220 (h)	-	P_{4GUP}	4G funcionando	1
T_{4GmR}	MTTR do 4G	12 (h)	-	P_{4GDW}	4G parado	0
T_{NmF}	MTTF da Nuvem	8766 (h)	-	P_{4GUP}	Nuvem funcionando	1
T_{NmR}	MTTR da Nuvem	2 (h)	-	P_{4GDW}	Nuvem parada	0

Tabela 4. Métricas.

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)	$\text{return}(\text{rate}("T_{EsL}"));$
Expectativa de lotes na infraestrutura (ELI)	$\text{return}((\text{mark}("P_{CL}"))+(\text{mark}("P_{LVC}"))+(\text{mark}("P_{CLR}"))+(\text{mark}("P_{ER}"))+(\text{mark}("P_{DLC}"))+(\text{probmenor}*(\text{mark}("P_{FAC}"))+(\text{mark}("P_{FEm}"))+(\text{mark}("P_{FES}")));$
Tempo de produção do lote (TPL)	Expectativa de lotes na infraestrutura / Vazão;
Disponibilidade sem redundância (DSR)	$\text{if}(((\text{mark}("P_{A1UP}") \geq 1)) \&\& ((\text{mark}("P_{A2UP}") \geq 1)) \&\& ((\text{mark}("P_{A3UP}") \geq 1)) \&\& ((\text{mark}("P_{A4UP}") \geq 1)) \&\& ((\text{mark}("P_{A5UP}") \geq 1)) \&\& ((\text{mark}("P_{A6UP}") \geq 1)) \&\& ((\text{mark}("P_{NUF}") \geq 1)) \&\& ((\text{mark}("P_{WUP}") \geq 1))) \text{return}(1); \text{else return}(0);$
Disponibilidade com redundância (DCR)	$\text{if}(((\text{mark}("P_{A1UP}") \geq 1)) \&\& ((\text{mark}("P_{A2UP}") \geq 1)) \&\& ((\text{mark}("P_{A3UP}") \geq 1)) \&\& ((\text{mark}("P_{A4UP}") \geq 1)) \&\& ((\text{mark}("P_{A5UP}") \geq 1)) \&\& ((\text{mark}("P_{A6UP}") \geq 1)) \&\& ((\text{mark}("P_{NUF}") \geq 1)) \&\& ((\text{mark}("P_{4GUP}") \geq 1)) \&\& ((\text{mark}("P_{4GUP}") \geq 1)) \&\& ((\text{mark}("P_{WUP}") \geq 1)) \&\& ((\text{mark}("P_{WAUP}") \geq 1)))) \text{return}(1); \text{else return}(0);$
Tempo de inatividade sem redundância (TISR)	$((1-\text{DSR}) * 525600);$
Tempo de inatividade com redundância (TICR)	$((1-\text{DCR}) * 525600);$

do desempenho do processo. As métricas de disponibilidade sem redundância (*DSR*) e disponibilidade com redundância (*DCR*) são usadas para calcular a disponibilidade em estado estacionário, dada pela probabilidade de haver *tokens* nos lugares que representam a operacionalidade dos componentes.

DSR calcula a disponibilidade em estado estacionário do processo produtivo, considerando os elementos sem a redundância de recursos, conforme mostrado na Figura 6. Já *DCR* considera a redundância de recursos nas fases de corte, costura e conexão de rede, conforme apresentado na Figura 7. O tempo de inatividade (em minutos por ano) é calculado pela seguinte expressão: $\text{TISR} = (1 - \text{DSR}) \times T$, 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 na expressão: $\text{TISC} = (1 - \text{DCR}) \times T$, onde *DCR* é a disponibilidade do sistema com redundância dos recursos.

Vale ressaltar que cada modelo pode apresentar modos operacionais com valores de saídas específicas. Por esse motivo, cada modo operacional, apresenta necessariamente uma métrica específica. Portanto, empresas ou indivíduos precisam especificar esses modos operacionais. A abordagem desse trabalho utilizou os dados dos modos operacionais coletados com a empresa. Esses valores foram especificados e atribuídos aos parâmetros dos modelos de disponibilidade apresentados nas fases de corte, costura, encastamento, inspeção, embalagem e estocagem.

necessário para produzir um lote completo, desde o corte do tecido até a embalagem, permitindo uma análise abrangente

6. Resultados

O desempenho e a disponibilidade operacional 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 e indisponibilidade operacional. Por esse motivo, o modelo apresentado na Figura 5 foi utilizado para avaliar o desempenho, enquanto os modelos apresentados nas Figuras 6 e 7 foram utilizados para avaliar a disponibilidade. Todos os modelos avaliam o ciclo produtivo apresentado na Figura 4.

A Figura 8 apresenta a distribuição normal dos tempos de produção reais extraídos da plataforma MES e apresentados na Tabela 1. No gráfico, é exibida uma linha de densidade que representa a distribuição dos tempos de produção do lote em horas. Esse gráfico sugere que a maioria dos lotes possui tempos de produção próximos à média de 100 horas. Já o gráfico de barras representa a frequência dos tempos de produção em intervalos específicos. A maior frequência está no intervalo entre 0 e 50 horas, indicando que muitos lotes têm tempos de produção mais curtos. À medida que os tempos aumentam, a frequência diminui gradualmente. O maior tempo de produção observado é 150,29 horas, enquanto o menor tempo observado é 42,82 horas. A média dos tempos de produção é 97,51 horas, e a mediana é 93,985 horas. O desvio padrão é de 93,98 horas. A amostra abrange 16 meses, e o intervalo de confiança para os tempos de produção está entre 81 e 112 horas.

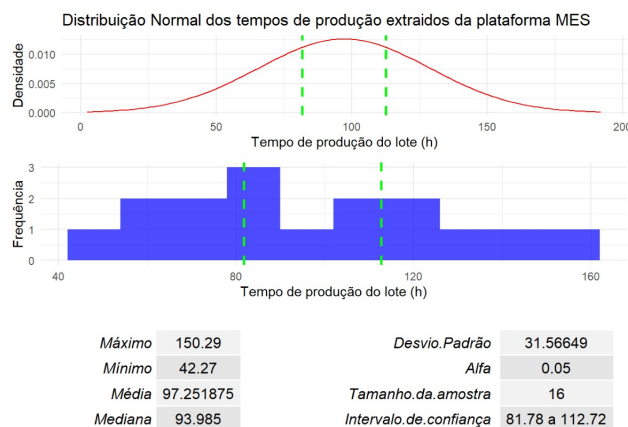


Figura 8. Distribuição Normal dos tempos de produção reais.

O objetivo principal das inferências realizadas na Figura 8 é observar o intervalo de confiança e verificar se as estatísticas obtidas pelos modelos estão dentro desse intervalo. Isso permite avaliar a precisão das estimativas e a confiabilidade dos resultados.

Nas Figuras 9 e 10 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.

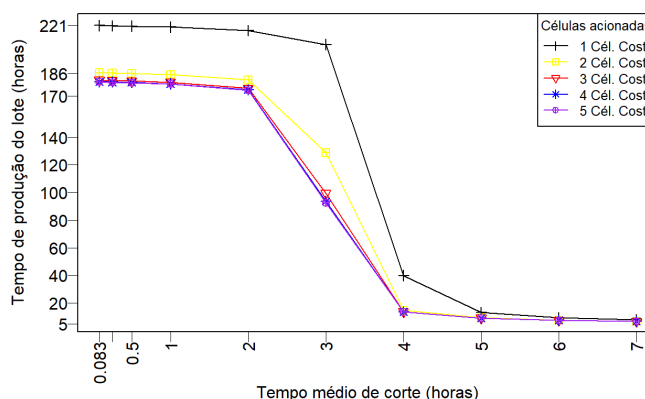


Figura 9. Tempo de produção do lote.

A Figura 9 apresenta o tempo médio de produção do lote de camisa polo na infraestrutura. O objetivo é avaliar o comportamento dos arranjos variando a quantidade de costureiras acionadas por tempo de corte do tecido e encontrar os arranjos mais promissores. 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. Essa diferença ocorre devido à quantidade de costureiras disponíveis no “arranjo 2” ser 5 vezes maior se comparado ao “arranjo 1”, muito embora ambas executem a mesma carga de trabalho e com o mesmo tempo de corte do tecido. Fica claro que o “arranjo 1” terá dificuldades para cumprir a meta produtiva e provavelmente acumulará lotes na fila anterior ao processo de costura. Além disso, os tempos desses dois arranjos não se enquadram no tempo médio observado na Tabela da Figura 8.

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. Nesse cenário, o tempo de produção do lote ficou dentro do intervalo de confiança estabelecido na tabela da Figura 8. Isso significa que as variações observadas nos tempos de produção são consistentes com os resultados em ambientes reais, onde pequenas mudanças na configuração de trabalho podem resultar em melhorias significativas na eficiência da produção.

O comportamento dos resultados e a identificação do arranjo com tempo de produção mais promissor sugere que é mais viável cortar o tecido a cada 3 horas e manter as 5 costureiras em operação. Dessa forma, as filas de espera do processamento do lote podem diminuir e mais lotes serão

processados em um menor intervalo de tempo. Porém, 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 10 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.

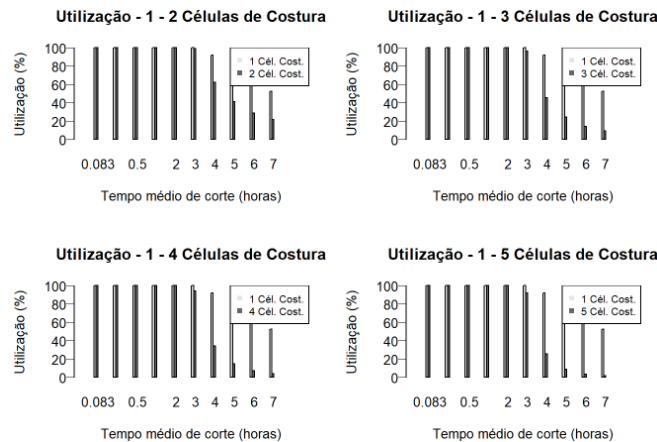


Figura 10. Utilização dos recursos na infraestrutura

É possível observar que entre 0,083 h e 2 h de tempo de corte, todos os arranjos apresentam gargalos de 100% de utilização das costureiras, o que pode impactar a saúde das profissionais visto que a fase de costura é manual. No entanto, a partir das 4 h do tempo de corte inicia a queda de utilização das costureiras que pode variar de 70% a 25%, esse comportamento de ociosidade é nocivo para a empresa, pois significa que menos lotes serão produzidos. Logo com base no comportamento do gráfico de utilização, o arranjo que pode apresentar o equilíbrio entre gargalo e ócio com 92% de utilização é o arranjo composto por 5 costureiras com tempo de corte a partir de 3 h.

A seguir serão apresentados os resultados relacionados a disponibilidade da infraestrutura adotada. Os modelos SPN e as expressões apresentadas nas Figuras 6,7 e Tabelas 2,3 e 4, 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 compreende a 2 máquinas de corte de tecido,

5 costureiras, 1 encestamento, 1 inspecionador, 1 embalador, 1 estoquista, conexão de rede redundante (WI-FI e 4G) e 1 nuvem.

Os resultados para as configurações adotadas estão detalhados na Tabela 5. A Configuração I apresenta o pior nível de disponibilidade (0,9944302093) em comparação com a configuração II. Ou seja, a configuração do modelo sem redundância pode apresentar um tempo de inatividade de até 48,82 h/ano. Enquanto o modelo com redundância, representado pela configuração II, pode apresentar um tempo de inatividade de até 27,47 h/ano. Isso significa que a configuração II, pode aumentar em até 43,73% a disponibilidade operacional do processo produtivo. Em suma, a análise revelou que a introdução de redundância, como evidenciado pela Configuração II, tem o potencial de melhorar significativamente a disponibilidade operacional do processo produtivo em comparação com a Configuração I, que carece dessa redundância. Essa melhoria pode reduzir consideravelmente o tempo de inatividade anual, contribuindo para uma operação mais confiável e eficiente.

A avaliação de desempenho e disponibilidade da manufatura têxtil 4.0 apresentada nesta Seção, resalta a importância de tomar decisões estratégicas sólidas na configuração das células de costura e na implementação de medidas de redundância na infraestrutura. Os resultados demonstram claramente como essas escolhas podem ter um impacto significativo na eficiência operacional, reduzindo o tempo de produção e minimizando o tempo de inatividade. Em um ambiente de fabricação cada vez mais digital e interconectado, o uso de modelos baseados em Redes de Petri Estocásticas oferecem uma abordagem robusta para otimizar o desempenho e a disponibilidade, permitindo que as empresas alcancem maior eficiência e competitividade na indústria têxtil 4.0.

Tabela 5. Resultados de disponibilidade e inatividade.

Configurações	Descrição	PD	TI (h)
I	Modelo sem redundância	0,9944302093	48,82
II	Modelo com redundância	0,9968663004	27,47

6.1 Ameaças à Validade do Trabalho

Este estudo está sujeito a ameaças à validade que devem ser consideradas cuidadosamente. As principais ameaças incluem:

- **Generalização dos Resultados:** Os resultados obtidos são específicos para a infraestrutura têxtil analisada no polo de confecção do Agreste de Pernambuco. Outros contextos industriais podem apresentar variações significativas, o que limita a generalização das conclusões para outras manufaturas ou regiões.
- **Dados Alterados por Sigilo Empresarial:** Devido à confidencialidade dos dados empresariais, algumas informações foram alteradas. Embora tenham sido validadas com o gerente do chão de fábrica, essas modificações podem impactar a representação exata da realidade operacional da empresa.

- **Limitações da Modelagem e Simulação:** A abordagem baseada em Redes de Petri Estocásticas (SPNs) utilizada neste estudo pode não capturar todas as complexidades do ambiente produtivo real. Variações não consideradas nos modelos podem influenciar os resultados finais.
- **Adoção de Transições Exponenciais:** Modelar todas as transições como exponenciais simplifica a análise do processo produtivo. No entanto, isso pode não considerar todas as possíveis variações reais, como tempos de reparo ou falha que não seguem padrões exponenciais.

7. Conclusão

Ao considerar o cenário atual da indústria de vestuário no Brasil, destaca-se a sua posição global significativa em receita, contrastando com os desafios de investimento em inovação industrial. A abordagem proposta, fundamentada em métricas e modelos, demonstrou ser eficaz como um método viável para avaliar tanto o desempenho quanto a disponibilidade do processo produtivo em uma manufatura têxtil 4.0 no polo de confecções do Agreste de Pernambuco. Isso permitiu identificar o arranjo mais apropriado para otimizar tanto o desempenho quanto a disponibilidade, com resultados correspondentes. Consequentemente, os modelos desenvolvidos podem servir como um guia para os tomadores de decisão anteciparem suas previsões e planejarem suas expectativas produtivas de maneira mais adequada.

Como trabalho futuro, pretende-se explorar métricas adicionais, como tempo de inatividade e consumo de energia, para uma avaliação mais abrangente. Além disso, planeja-se avaliar os impactos da alocação dos recursos frente aos custos operacionais, visando otimizar ainda mais o desempenho e a eficiência. Também é objetivo desenvolver uma ferramenta prática que facilite o uso do modelo proposto, permitindo aos administradores tomar decisões informadas de forma autônoma, resultando em melhorias operacionais e maior competitividade para as empresas têxteis.

Contribuições dos autores

Os autores Edson Silva e Ermeson Andrade foram os responsáveis pela escrita e organização do artigo, incluindo a coordenação da pesquisa. O autor Danilo Araújo contribuiu na revisão do trabalho e na discussão dos resultados.

Referências

- [1] M'ELO, L. B. d. *Managerial competencies and organizational performance: a study involving industrial laundries in the Textile Polo of Agreste Pernambucano*. Dissertação (Mestrado) — Federal University of Pernambuco, 2022.
- [2] JUNIOR, B. d. O. M. Industry: Clothing industry. Banco do Nordeste do Brasil, 2023.
- [3] DUTTA, S. et al. *Global Innovation Index 2022: What is the Future of Innovation-driven Growth?* [S.l.]: WIPO, 2022.
- [4] JACINTHO, C. P.; OLIVEIRA, H. A. de. Performance evaluation in a textile manufacturing industry. *Undergraduate Thesis in Production Engineering at Capivari College*, 2018.
- [5] BASHIR, N. et al. 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.
- [6] RATH, M. et al. 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.
- [7] 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.
- [8] SOUSA, F. J. D. M. Supervision systems models in industry 4.0. *Interdisciplinary Journal of Engineering Research*, v. 9, n. 1, p. 27–48, 2023.
- [9] CACHADA, A. et al. 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.
- [10] 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.
- [11] FERREIRA, D. V. et al. *Industry 4.0 maturity model for assessment of textile processes*. Dissertação (Mestrado) — Federal University of Pernambuco, 2021.
- [12] ALVES, D. L. N. de A.; SANTOS, V. M. L. dos. Computerized monitoring and analysis systems of gypsum quality: Prospecting and development of new technologies to strengthen the gypsum hub of araripe. *Cadernos de Prospecção*, v. 15, n. 3, p. 823–838, 2022.
- [13] Mina. *Portal Mina*. 2023. Acesso em: 30 de agosto de 2023. Disponível em: <https://portal.mina.com.br>.
- [14] SOUZA, J. V. M. de; STELA, V.; FERREIRA, D. M. Medição de Eficiência de Produção na Indústria 4.0. Engenharia Elétrica, Universidade São Francisco – Campus Itatiba, 2020.
- [15] AGERWALA, T. Special feature: Putting petri nets to work. *Computer, IEEE Computer Society, IEEE Computer Society*, v. 12, n. 12, p. 85–94, 1979.
- [16] PETERSON, J. L. *Petri net theory and the modeling of systems*. [S.l.]: The British Computer Society, 1982.

- [17] MOLLOY, M. K. Performance analysis using stochastic petri nets. *IEEE Transactions on computers*, IEEE Computer Society, v. 31, n. 09, p. 913–917, 1982.
- [18] 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.
- [19] BALBO, G. et al. 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.
- [20] MURATA, T. Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 77, n. 4, p. 541–580, 1989.
- [21] 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.
- [22] HAAS, P. J. *Stochastic petri nets: Modelling, stability, simulation*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2006.
- [23] 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.
- [24] BARAD, M.; CHERKASSKY, A. Timed petri nets perspective on weaving processes. *IFAC Proceedings Volumes*, Elsevier, v. 43, n. 12, p. 438–443, 2010.
- [25] CARVALHO, H. J. R. de; PORTO, A. J. V. Use of petri nets in formal analysis of multifunctional work in production lines. *Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas*, n. 2, p. 109–109, 2007.
- [26] CARVALHO, H. J. R. d.; PORTO, A. J. V. Performance analysis of cellular manufacturing systems using colored petri nets. In: *Proceedings*. [S.l.: s.n.], 2007.
- [27] SANTANA-ROBLES, F. et al. Modeling and simulation of textile supply chain through colored petri nets. *Intelligent Information Management*, Scientific Research Publishing, v. 4, n. 5A, p. 261, 2012.
- [28] HU, H.; LIU, Y. Supervisor synthesis and performance improvement for automated manufacturing systems by using petri nets. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 11, n. 2, p. 450–458, 2015.
- [29] XIAOHUA, W. 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.
- [30] CAVONE, G.; EPICOCO, N.; DOTOLI, M. Process re-engineering based on colored petri nets: The case of an italian textile company. In: IEEE. *2020 28th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. [S.l.], 2020. p. 856–861.
- [31] CESARO, E. C. d. *Timed Petri Net Approach for Production Synchronization in Lean Manufacturing Systems*. Dissertação (B.S. thesis) — Federal University of Technology of Paraná, 2021.
- [32] ANDRADE, E. et al. Performance and availability trade-offs in fog–cloud iot environments. *Journal of Network and Systems Management*, Springer, v. 29, p. 1–27, 2021.
- [33] TRIVEDI, K. S. et al. Spnp user’s manual version 6.0. *Center for Advanced Computing and Communication (CACC) Department of electrical and Computer Engineering, Duke University*, 1999.
- [34] LITTLE, J. D. A proof for the queueing formula: $L = \lambda w$. *Operations research*, INFORMS, v. 9, n. 3, p. 383–387, 1961.