Avaliação de Disponibilidade e Confiabilidade de uma Manufatura Têxtil 4.0 Utilizando Modelos Estocásticos

Edson Silva [*,**] **Danilo Araújo** [**] **Ermeson Andrade** [**]

[*] *Instituto SENAI de Inovação para Tecnologias da Informação e Comunicação (ISI-TICs), Recife, PE, (e-mail: edson.silva2@sistemafiepe.org.br).*
[**] *Programa de Pós-graduação em Informática Aplicada (PPGIA), Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife, PE, (e-mail: {edson.msilva2, danilo.araujo, ermeson.andrade}@ufrpe.br).*

Abstract: The Brazilian apparel industry ranks 7th globally, generating a revenue of USD 10 billion per year. Despite the increasing adoption of Internet of Things (IoT) devices in so-called "Industry 4.0" manufacturing, accurately estimating crucial indicators such as availability and operational reliability of resources in local garment manufacturing hubs still poses a major challenge. This assessment can help companies identify areas for improvement and make more informed decisions, resulting in greater competitiveness in the global market. This study proposes an approach based on stochastic Petri nets to model and analyze the failure and repair process of the production process in a 4.0 textile industry from a company in the garment manufacturing hub of Agreste de Pernambuco. The results indicate that the arrangement with redundancies can reduce the failure rate by more than 60%, can increase the reliability index by more than 50%, and can increase operational availability by 45.36 hours per year compared to the arrangement without resource redundancy. For this reason, the proposed approach has the potential to assist managers of manufacturing operations in improving the availability and reliability of resources in balance with productive capacity.

Resumo: A indústria de vestuário brasileira é a 7ª maior globalmente, gerando uma receita de USD 10 bilhões por ano. Apesar da crescente adesão aos dispositivos Internet das Coisas (IoT) nas chamadas "manufaturas 4.0", estimar de maneira precisa indicadores cruciais como disponibilidade e confiabilidade operacional dos recursos nos polos de confecção locais ainda representa um grande desafio a ser superado. Essa avaliação pode ajudar as empresas a identificar áreas de melhoria e tomar decisões mais assertivas, resultando em maior competitividade no mercado global. Este trabalho propõe uma abordagem baseada em redes de Petri estocásticas para modelar e analisar o processo de falha e reparo do processo produtivo de uma indústria têxtil 4.0 de uma empresa do polo de confecção do Agreste de Pernambuco. Os resultados indicam que 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. Por esse motivo, a abordagem proposta tem o potencial de auxiliar os gestores das confecções a melhorar a disponibilidade e confiabilidade dos recursos em equilíbrio com a capacidade produtiva.

Keywords: Textile Manufacturing 4.0; Availability; Reliability; Modeling; Stochastic Petri Nets.

Palavras-chaves: Manufatura Têxtil 4.0; Disponibilidade; Confiabilidade; Modelagem; Redes de Petri Estocásticas.

1. INTRODUÇÃO

No contexto da indústria têxtil brasileira, amplamente reconhecida internacionalmente, destaca-se o polo de confecções do Agreste de Pernambuco, abrangendo os municípios de Caruaru, Toritama, Santa Cruz do Capibaribe e Surubim. Essa região acomoda aproximadamente 18 mil empresas têxteis, emprega 250 mil profissionais e produz cerca de 800 milhões de peças de vestuário por ano (Mélo, 2022). Logo, a indústria de confecção do Agreste de Pernambuco é um setor relevante para o desenvolvimento econômico local e nacional posicionando o país como a 7ª maior indústria de vestuário do mundo, com receita anual de USD 10 bilhões (Mendes Junior, 2023).

A modernização do polo tem sido impulsionada pela adoção da Indústria 4.0. Esse cenário de transformação digital está redefinindo a maneira como as empresas têxteis operam, incorporando tecnologias avançadas como a IoT, automação e análise de dados. Dessa forma, nessa região, observa-se um discreto movimento em direção aos processos mais eficientes e produção personalizada (Fer-

reira et al., 2021). No entanto, a precisão na previsão da disponibilidade e confiabilidade operacionais diante das sazonalidades do mercado têxtil representa uma grande problemática enfrentada pelos polos de confecções locais, inclusive para o polo de confecção do Agreste Pernambucano.

De acordo com Bashir et al. (2020), ao reduzir a probabilidade de ocorrência de eventos de falha e reparo, a disponibilidade e a confiabilidade operacional tendem a aumentar. Adicionalmente, de acordo com Rath et al. (2021), esses eventos podem ser registrados por dispositivos como os IIoT's (*Industrial Internet of Things* - Internet Industrial das Coisas). Dispositivos os quais são responsáveis por digitalizar os dados da produção e enviá-los para tecnologias como a computação em Nuvem, responsável por processar grandes volumes de dados (Ciortea, 2023). Para Sousa (2023), a computação em Nuvem é essencial para os sistemas supervisores apresentarem o status corrente do processo produtivo. Para Maia (2022), ao modularizar os componentes, o processo de modelagem poderá ser facilitado, os modelos podem ser escaláveis e a análise das simulações pode ser mais rápida em termos de tempo de processamento computacional. Logo, de acordo com Cachada et al. (2018), a transição para a indústria 4.0 e a coleta de métricas correspondentes, como avaliação de disponibilidade, pode ser planejada e analisada usando modelos analíticos como as redes de Petri.

Os estudos disponíveis na área de manufaturas têxteis revelam uma série de pesquisas com a aplicação das redes de Petri para aprimorar o processo produtivo e facilitar a tomada de decisões. No entanto, há uma lacuna substancial, pois nenhum dos trabalhos aborda a avaliação da disponibilidade e confiabilidade da manufatura têxtil 4.0. Por esse motivo, este estudo propõe uma abordagem abrangente para preencher essa lacuna, visando analisar a disponibilidade e confiabilidade operacional para proporcionar maior produtividade nas manufaturas têxteis 4.0 no Agreste de Pernambuco. Portanto, o objetivo deste trabalho é apresentar uma abordagem baseada em SPNs (Stochastic Petri Nets - Redes de Petri Estocásticas) para analisar o processo de falha e reparo do processo produtivo de uma manufatura têxtil 4.0. Esta abordagem é aplicada em uma empresa do polo de confecção do Agreste de Pernambuco, com o foco principal de identificar possíveis arranjos que apresentem maior índice de disponibilidade e confiabilidade para aprimorar a produção. Os resultados revelaram, por exemplo, que o arranjo com redundâncias pode aumentar a disponibilidade operacional em 45,36 h/ano, pode reduzir em mais de 60% o índice de falha e pode aumentar em mais de 50% o índice de confiabilidade ao ano se comparado ao modelo sem redundância de recursos. Através dessa análise, é possível identificar e apresentar os possíveis arranjos mais promissores, o que pode resultar em uma diminuição significativa da indisponibilidade de recursos nas empresas do polo de confecções do Agreste de Pernambuco.

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

2. TRABALHOS RELACIONADOS

Ao longo dos anos vários trabalhos foram propostos para analisar manufaturas. Em de Carvalho and Porto (2007), os autores aplicaram o formalismo de TPNs (*Timed Petri Nets* - Redes de Petri Temporizadas) 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 Barad and 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 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 demostrou ser eficiente em pequenos lotes e no processamento de vários tipos de vestuário.

Em Lisboa et al. (2019) as STPN (*Stochastic Timed Petri Nets* - Redes de Petri Temporizadas Estocásticas) são utilizadas para modelar e simular processos de mineração a céu aberto. A abordagem envolve a decomposição do modelo em módulos básicos que podem ser escaláveis conforme necessário. Os resultados incluem uma estrutura válida de simulação para o processo de mineração, permitindo a avaliação comportamental da eficiência da estrutura diante de variações na função de distribuição de probabilidade.

Embora compartilhe semelhanças, nenhum dos estudos anteriores abordou a avaliação da disponibilidade e confiabilidade em 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 a melhorar os fluxos de trabalho. O modelo proposto neste estudo visa preencher essa lacuna, ofertando uma abordagem abrangente que permite avaliar várias métricas em uma infraestrutura têxtil 4.0. Além disso, este estudo propõe uma metodologia que pode ser adaptada para diferentes indústrias, e o estudo de caso foi conduzido com base em uma infraestrutura têxtil real no polo de confecção do Agreste.

3. METODOLOGIA E INFRAESTRUTURA ADOTADA

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

3.1 Metodologia adotada

Esta subseção descreve a metodologia empregada na análise e modelagem de uma infraestrutura têxtil 4.0, conforme representado na Figura 1. A metodologia compreende três macro atividades divididas em 6 etapas. Antes de iniciar a execução, é importante selecionar uma empresa de estudo de caso. Para este trabalho, 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, abertura para melhorias, e acesso ao chão de fábrica.

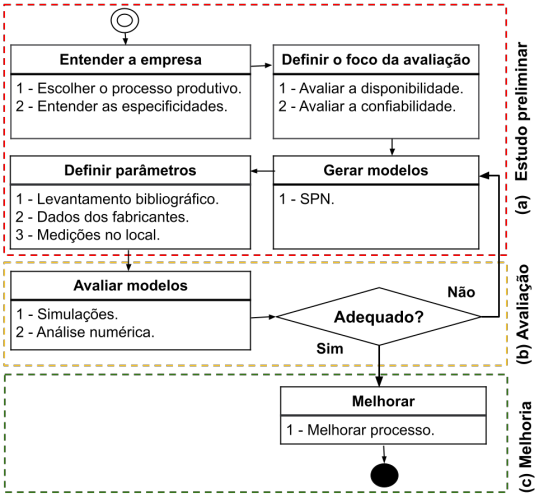

Figura 1. Metodologia.

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 ao escopo do estudo (ex.: disponibilidade, confiabilidade ou ambos). Os modelos subsequentes dependem dessa escolha. Por exemplo, ao optar por ambos. Na disponibilidade, considera-se a indisponibilidade e a disponibilidade. Enquanto na confiabilidade são analisados os índices de falha e a confiabilidade dos recursos. 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 cruciais 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 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.

3.2 Infraestrutura têxtil 4.0 adotada

A Figura 2 representa o ciclo produtivo da confecção têxtil 4.0 utilizada como referência neste trabalho, onde a Figura 2 (a) apresenta as 6 fases do processo produtivo: cortar lote de tecido (A1), costurar lote de tecido (A2), encestar lote (A3), inspecionar lote (A4), embalar lote (A5) e estocar lote (A6). Já a Figura 2 (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 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.

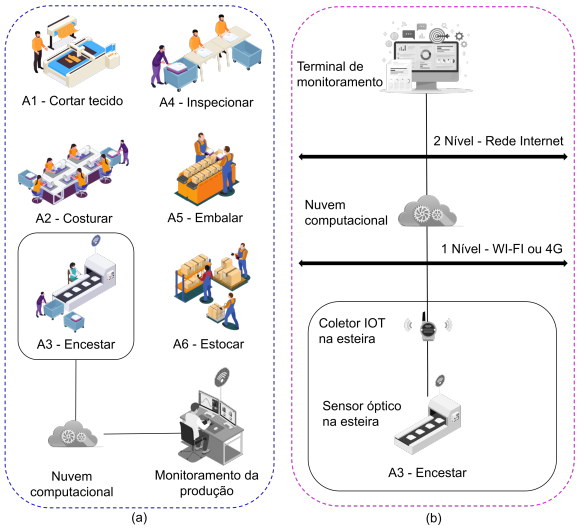

Figura 2. (a) Processo produtivo; (b) Encestamento, nuvem computacional e terminal de monitoramento.

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 contabilizadas automaticamente e, 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 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 na seção a seguir.

4. MODELOS PROPOSTOS

4.1 Modelos de disponibilidade

A Figura 3 apresenta os modelos de disponibilidade com base na infraestrutura apresentada na Figura 2. 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 3 (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. Note que um componente redundante é traduzido no número de tokens no componente. Por exemplo, o número "3" no lugar P_{A1UP}, representa que três máquinas estão ativas. Os modelos das Figuras 3 (b), (c), (d), (e), (f) e (j) 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).

Os modelos representados na Figura 3 (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 3 (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 1.

Tabela 1. Expressões de guarda dos modelos de disponibilidade.

Guarda	Expressões
$g1_{MDCRA}$	if (mark("PWUP") == 1) return(1); else return(0);
$g2_{MDCRA}$	if ((mark("PWDW") == 1) && (mark("P4GUP")==1)) return(1); else return(0);

Na Tabela 2, são detalhadas as transições e lugares dos modelos apresentados na Figura 3. É importante observar que, devido à limitação de espaço, os detalhes das transições estão localizados na parte esquerda da tabela, enquanto os detalhes dos lugares estão dispostos à direita. Além disso, ressaltamos que esses valores foram obtidos de uma infraestrutura têxtil real, localizada na cidade de Caruaru, polo de confecção do Agreste de Pernambuco. No entanto, esses dados foram alterados para preservar o sigilo da empresa.

A Tabela 3 apresenta as métricas adotadas para os modelos de disponibilidade. As funções foram baseadas na sintaxe da ferramenta de modelagem SPNP (*Stochastic Petri Net Package*) (Trivedi et al., 1999), que é a ferramenta adotada para as análises numéricas. O SPNP é amplamente utilizado para modelar sistemas que envolvem incertezas e processos aleatórios, permitindo representar sistemas complexos com múltiplos tipos de eventos estocásticos e realizar simulações e análises quantitativas, abrangendo métricas como disponibilidade e confiabilidade.

Para as análises, foram considerados três cenários. DSR calcula a disponibilidade em estado estacionário do processo produtivo, considerando os elementos sem a redundância de recursos. DCRM considera a redundância moderada de recursos nas fases de corte, costura e conexão de rede WI-FI. Já DCRA considera a redundância avançada de recursos nas fases de corte, costura, encestamento, inspeção, embalagem, estoque e na conexão com a Internet, que é exatamente o cenário apresentado na Figura 3. O tempo de inatividade (em minutos por ano) é calculado pela seguinte expressão: TISR = ((1 - DSR) × 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. 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.

4.2 Modelos de confiabilidade

Os modelos de confiabilidade apresentados na Figura 4 são derivados dos modelos de disponibilidade apresentados na seção 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 4 apresenta os modelos de confiabilidade. Esses modelos são semelhantes aos modelos de disponibilidade, 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, que foram omitidas devido à falta de espaço.

A Tabela 4 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 4. 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.

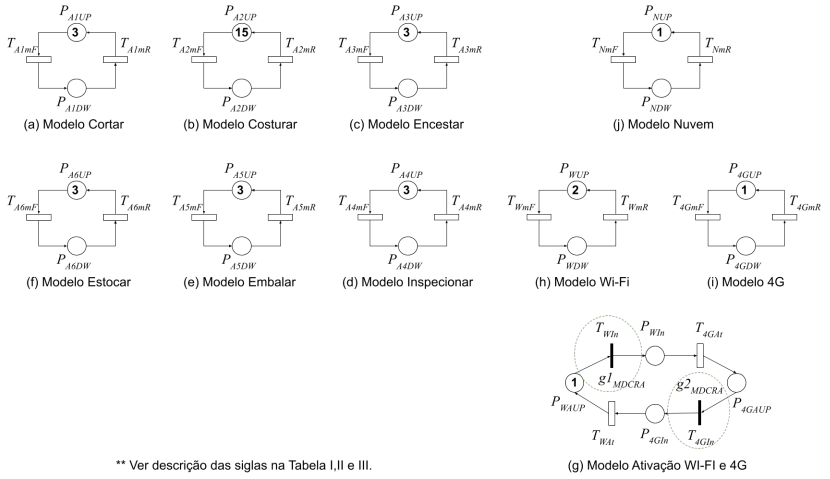

Figura 3. Modelos SPNs de disponibilidade do processo produtivo.

Tabela 2. Transições e Lugares

Transições	Descrição	Valores	Prioridade	Lugares	Descrição	*Tokens*
T_{A1mF}	MTTF máquina de corte	2918 (h)	-	P_{A1UP}	Máquinas funcionando	1-3
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	1-15
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	1-3
T_{A3mR}	MTTR sensor Encestamento	1 (h)	-	P_{A3DW}	Sensor parado	0
T_{A4mF}	Tempo médio de falta	2191 (h)	-	P_{A4UP}	Inspetor presente	1-3
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	1-3
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	1-3
T_{A6mR}	Tempo médio de reposição	2 (h)	-	P_{A6DW}	Estoquista ausente	0
T_{WAt}	Ativação WI-FI	0,0013889(h)	10	P_{WAUP}	WI-FI ativado	1-2
T_{WIn}	Ativação WI-FI	1 (prob.)	5	P_{WIn}	WI-FI desativado	0
T_{4GAt}	Ativaçao 4G	0,0013889(h)	-	P_{4GAUP}	4G ativado	1
T_{4GIn}	Ativaçao 4G	1 (prob.)	-	P_{4GIn}	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 3. Métricas de disponibilidade.

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

5. RESULTADOS

A disponibilidade e a confiabilidade operacional da produção em uma manufatura têxtil 4.0 podem ser comprometidas pela ocorrência de falhas de equipamentos, ausências não justificadas de colaboradores e falta de disponibilidade na conexão com a Internet. Como resultado, a possibilidade de desequilíbrio desses recursos pode levar à

Tabela 4. Métricas de confiabilidade.

Métricas	**Funções**
Índice de falha da infraestrutura sem redundância (IFISR)	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);
Índice de falha da infraestrutura com redundância moderada (IFICRM)	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);
Índice de falha da infraestrutura com redundância avançada (IFICRA)	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);
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);

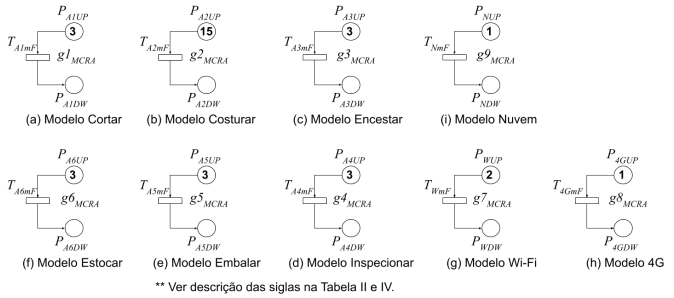

Figura 4. Modelos SPNs de confiabilidade do processo produtivo.

diminuição da disponibilidade e confiabilidade operacional. Portanto, é fundamental realizar as análises dessas métricas e adotar medidas para mitigar tais riscos, assegurando a continuidade eficiente das operações.

Primeiramente, serão analisados os resultados relacionados à disponibilidade da infraestrutura adotada. Os modelos SPN apresentados na Figura 3, juntamente com as expressões e funções detalhadas nas Tabelas 1, 2 e 3, respectivamente, foram utilizados para calcular as métricas. Para fins de análise, foram considerados diferentes arranjos: o modelo sem redundância consiste em 1 máquina de corte de tecido, 1 costureira, 1 encestamento, 1 inspecionador, 1 embalador, 1 estoquista, uma conexão WI-FI e 1 nuvem computacional. No modelo com redundância moderada, há redundância apenas nas fases de corte de tecido, com 2 máquinas, na costura, com 5 costureiras, e na conexão com a Internet, com 2 conexões WI-FI. Já no modelo com redundância avançada, temos 3 máquinas de corte de tecido, 15 costureiras, 3 encestamentos, 3 inspecionadores, 3 embaladores, 3 estoquistas, 2 conexões WI-FI, 1 conexão 4G e 1 nuvem.

Os resultados para os arranjos adotados estão detalhados na Tabela 5. 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 um DT (*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 5. Resultados de disponibilidade e inatividade.

Configuração	**Descrição**	**Disponibilidade(h)**	**DT (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

A seguir, serão apresentados os resultados relacionados aos índices de falha e confiabilidade da infraestrutura adotada. Os modelos SPNs apresentados na Figura 4, juntamente com os parâmetros e expressões detalhadas nas Tabelas 2 e 3, 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 5, 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 de 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.

Ao analisar a confiabilidade 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

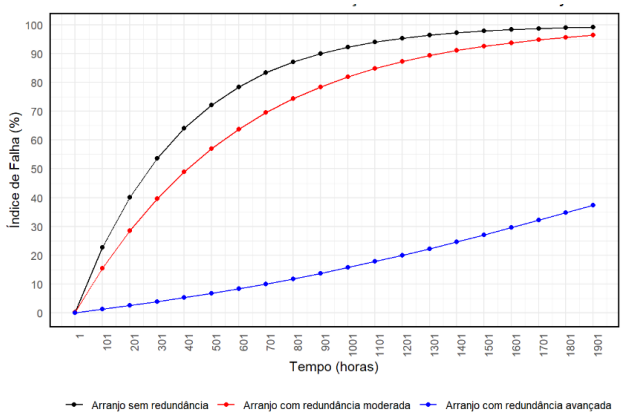

Figura 5. Curva de falha dos arranjos.

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 6, 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.

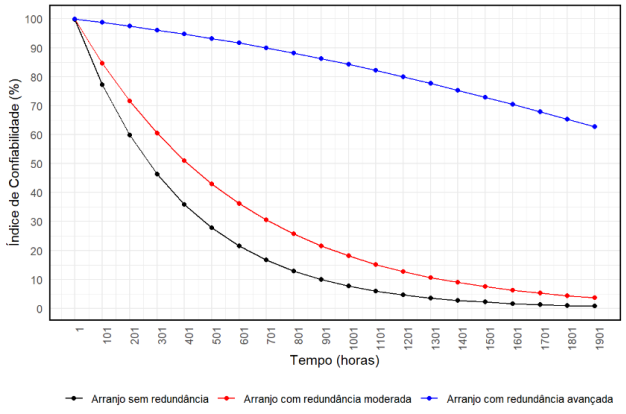

Figura 6. Curva de confiabilidade dos arranjos.

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.

As Figuras 7, 8 e 9 apresentam a intersecção entre as linhas dos índices de falha e de confiabilidade dos arranjos sem redundância, com redundância moderada e com redundância avançada. Na Figura 7, 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 da infraestrutura ao longo do tempo, destacando a importância da definição de estratégias de manutenção proativas para garantir a confiabilidade e a continuidade da operação.

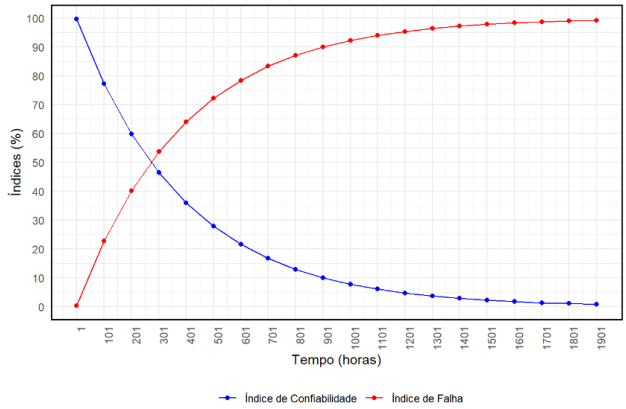

Figura 7. Índices de falha Vs confiabilidade sem a redundância de recursos.

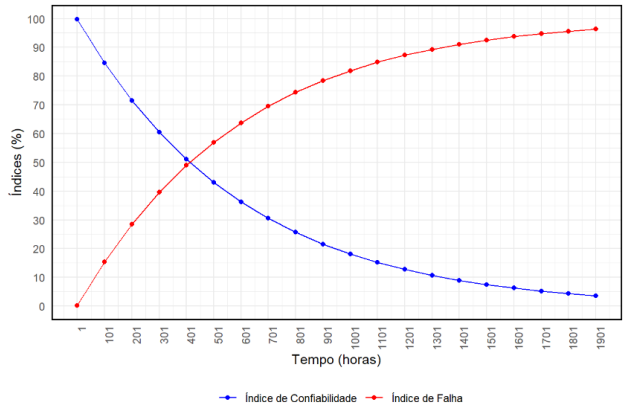

Figura 8. Índices de falha Vs confiabilidade com redundância moderada de recursos.

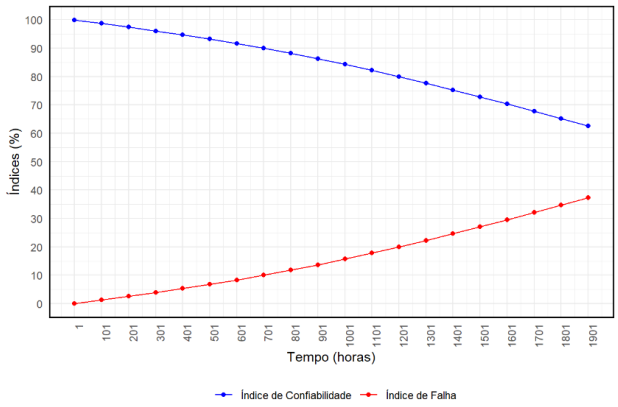

Figura 9. Índices de falha Vs confiabilidade com redundância avançada de recursos.

Já a Figura 8 indica que, nas 400 horas iniciais, o comportamento dos índices são semelhantes aos apresentados no cenário sem redundância, porém com uma diferença a maior de 100 horas para a ocorrência da intercessão entre as linhas. Isso significa que mesmo com o uso de redundância moderada haverá uma probabilidade de mais de 50% de ocorrência de falha, enquanto a confiabilidade diminuirá proporcionalmente. No entanto, a Figura 9 apresenta um comportamento distinto dos cenários anteriores. Nas 1900 horas, o índice de falha é de 40%, enquanto o índice de confiabilidade aproxima-se de 60% sem que haja intersecção entre os índices. Essa observação reflete os efeitos da redundância dos componentes na mitigação das falhas ao longo da operação da infraestrutura. Esses resultados destacam a eficácia da redundância avançada na melhoria da confiabilidade operacional e na redução dos riscos de falha durante a produção.

Essas foram apenas algumas das análises realizadas, e é importante reconhecer que mais análises podem ser conduzidas conforme as necessidades individuais de cada operador de manufatura têxtil. Cada processo de manufatura tem suas particularidades, e os modelos apresentados podem ser facilmente adaptados para incluir mais etapas e considerar outros elementos. Isso proporciona flexibilidade e capacidade de ajuste para atender a uma ampla gama de cenários e requisitos específicos da indústria têxtil. Além disso, a avaliação da disponibilidade e confiabilidade operacional da manufatura têxtil 4.0, apresentada nesta seção, destaca a importância de tomar decisões fundamentadas na configuração adequada dos recursos e na implementação de redundância na infraestrutura. Os resultados demonstram claramente como essas escolhas podem influenciar a disponibilidade e confiabilidade operacional.

6. CONCLUSÃO

A abordagem proposta, fundamentada em métricas e modelos, demonstrou ser eficaz como um método viável para avaliar a disponibilidade e a confiabilidade do processo produtivo em uma manufatura têxtil 4.0 do polo de confecções do Agreste de Pernambuco. Isso permitiu identificar os possíveis arranjos mais adequados para melhorar a disponibilidade e a confiabilidade operacionais. Logo, a abordagem apresentada pode ajudar os tomadores de decisão a anteciparem suas previsões e planejarem suas expectativas produtivas de forma mais adequada.

Como trabalhos futuros é pretendido explorar métricas adicionais, como o consumo de energia e os custos, além de criar uma ferramenta prática para facilitar a aplicação do modelo proposto. Esses aprimoramentos capacitarão os administradores a fazer escolhas informadas, resultando em melhorias operacionais e ampliando a competitividade das indústrias têxteis.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho, foi realizado com apoio do Instituto SENAI de Inovação para Tecnologias da Informação e Comunicação em parceria com o Programa de Pós-graduação em Informática Aplicada da Universidade Federal Rural de Pernambuco.

REFERÊNCIAS

Barad, M. and Cherkassky, A. (2010). Timed petri nets perspective on weaving processes. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(12), 438–443.

Bashir, N., Bashir, R., Joorel, J.S., and Jan, T. (2020). Reliability and profit evaluation of textile industry with exponential failure time distribution and different repair strategies. In *2020 8th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions)(ICRITO)*, 119–124. IEEE.

Cachada, A., Pires, F., Barbosa, J., Leitão, P., and Calà, A. (2018). Petri nets methodology for the design and control of migration processes towards industry 4.0. In *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, 540–545. IEEE.

Ciortea, E.M. (2023). The advantage of smart manufacturing systems using cloud and rami 4.0. In *2023 24th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, 114–117. IEEE.

de Carvalho, H.J.R. and Porto, A.J.V. (2007). Use of petri nets in formal analysis of multifunctional work in production lines. *Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas*, (2), 109–109.

Ferreira, D.V. et al. (2021). *Industry 4.0 maturity model for assessment of textile processes.* Master's thesis, Federal University of Pernambuco.

Lisboa, A.C., De Souza, F.H., Ribeiro, C.M., Maia, C.A., Saldanha, R.R., Castro, F.L., and Vieira, D.A. (2019). On modelling and simulating open pit mine through stochastic timed petri nets. *IEEE Access*, 7, 112821–112835.

Maia, C.A. (2022). Stochastic timed discrete-event systems: Modular modeling and performance evaluation through markovian jumps. *IEEE Access*, 10, 108332–108341.

Mendes Junior, B.d.O. (2023). Industry: Clothing Industry. *Bank of the Northeast of Brazil, ETENE Sector Notebook; n.276.*

Mélo, L.B.d. (2022). *Managerial competencies and organizational performance: a study involving industrial laundries in the Textile Polo of Agreste Pernambucano.* Master's thesis, Federal University of Pernambuco.

Rath, M., Gannouni, A., Luetticke, D., and Gries, T. (2021). Digitizing a distributed textile production process using the industrial internet of things: a use case. In *2021 4th IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, 315–320. IEEE.

Santana-Robles, F., Medina-Marín, J., Montaño-Arango, O., and Seck-Tuoh-Mora, J.C. (2012). Modeling and simulation of textile supply chain through colored petri nets. *Intelligent Information Management*, 4(5A), 261.

Sousa, F.J.D.M. (2023). Supervision systems models in industry 4.0. *Interdisciplinary Journal of Engineering Research*, 9(1), 27–48.

Trivedi, K.S. et al. (1999). Spnp user's manual version 6.0. *Center for Advanced Computing and Communication (CACC) Department of electrical and Computer Engineering, Duke University.*

Xiaohua, W., Ruiqing, W., Zhang, L., et al. (2017). Timed petri net based optimal scheduling for garment flexible productions. *J Textile Eng Fashion Technol*, 2(2), 343–349.