

## Avaliação do Desempenho Operacional de uma Manufatura Têxtil Tradicional Utilizando Modelos Estocásticos

Edson Silva<sup>1,3</sup>, Ermeson Andrade<sup>2</sup>, Roberta Fagundes<sup>1</sup>, Gustavo Callou<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Pernambuco (UPE) - Recife – PE – Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) - Recife – PE – Brasil

<sup>3</sup>Instituto Senai de Inovação (ISI TICs) - Recife – PE – Brazil

{edsonmoura.silva, roberta.fagundes, gustavo.callou}@upe.br

{ermeson.andrade, gustavo.callou}@ufrpe.br,

edson.silva2@sistemafiepe.org.br

**Abstract.** *The Brazilian textile industry ranks fifth globally, with an average annual revenue of approximately USD 14 billion. Despite this economic relevance, traditional textile manufacturing in the country still exhibits lower productivity than international competitors, such as Chinese industries, due to regional, structural, and technological limitations. Furthermore, existing studies are often restricted to specific stages of the production process, rely on synthetic data, or present limited reproducibility. In this context, this work proposes the use of Stochastic Petri Nets (SPNs) for the integrated modeling and analysis of the complete production process. The approach is validated through a case study conducted in a Brazilian textile manufacturing facility, in which the most promising operational configurations are identified. The results indicate a reduction of up to 44.7% in the average production time, highlighting the potential of the proposed approach as an accessible, accurate, and balanced solution for the efficient planning of production systems.*

**Resumo.** *A indústria têxtil brasileira ocupa a quinta posição no cenário global, com receita média anual de aproximadamente USD 14 bilhões. Apesar dessa relevância econômica, manufaturas têxteis tradicionais no país ainda apresentam desempenho produtivo inferior quando comparadas a concorrentes internacionais, como as indústrias chinesas, em decorrência de limitações regionais, estruturais e tecnológicas. Além disso, estudos existentes frequentemente se restringem a etapas específicas do processo produtivo, utilizam dados sintéticos ou apresentam baixa reprodutibilidade. Neste contexto, este trabalho propõe o uso de Redes de Petri Estocásticas (Stochastic Petri Nets – SPN) para a modelagem e análise integrada do processo produtivo completo. A abordagem é validada por meio de um estudo de caso em uma manufatura têxtil brasileira, no qual são identificados os arranjos operacionais mais promissores. Os resultados indicam uma redução de até 44,7% no tempo médio de produção, destacando o potencial da proposta como uma solução acessível, precisa e equilibrada para o planejamento eficiente de sistemas produtivos.*

## 1. Introdução

O Polo de Confeccões do Agreste de Pernambuco reúne cerca de 18 mil empresas, produz 800 milhões de peças/ano e emprega 250 mil profissionais, destacando sua relevância regional [Mélo 2022]. Em 2022, o Brasil faturou USD 14 bilhões, com participação de USD 1,8 bilhões do Nordeste e USD 240 milhões de Pernambuco [Júnior 2025]. Apesar disso, o setor já apresentou uma forte recessão, agravada por fatores regionais como o racionamento de água, altos custos de frete e insumos, além da baixa adoção de tecnologias para avaliação e monitoramento do desempenho operacional [Alexandre et al. 2018].

A concorrência com produtos chineses tem intensificado a pressão por preços, reduzindo a competitividade da indústria local [Lima 2010]. Adicionalmente, a baixa maturidade gerencial tem impactado negativamente o desempenho operacional, retratando a necessidade de melhorias contínuas nos processos produtivos da região [Nascimento et al. 2020]. Nesse cenário, modelos analíticos, como as Redes de Petri, têm sido amplamente aplicados na análise de sistemas produtivos [Silva et al. 1996].

Embora estudos como [Cruz et al. 2018] utilizem Redes de Petri Estocásticas (SPN), tais abordagens geralmente se concentram em etapas específicas do processo produtivo e apresentam uma capacidade limitada de generalização. Dessa forma, constata-se a necessidade de abordagens mais abrangentes e adaptáveis para a análise e avaliação do desempenho operacional de sistemas produtivos têxteis. Diante disso, este trabalho tem como objetivos centrais: (i) propor uma abordagem baseada em SPN para modelar e avaliar o desempenho operacional de manufaturas têxteis tradicionais reais; e (ii) demonstrar, a partir dos modelos propostos, que configurações distintas podem resultar em ganhos significativos de desempenho.

O trabalho está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. A Seção 3 detalha a metodologia utilizada para avaliar o desempenho de sistemas de manufaturas têxteis. A Seção 4 mostra a infraestrutura do sistema a ser analisado. A Seção 5 apresenta o modelo SPN proposto. Em seguida, a Seção 6 apresenta os resultados. E, por fim, a Seção 7 apresenta a conclusão e sugere os trabalhos futuros.

## 2. Trabalhos relacionados

Esta seção apresenta os trabalhos relacionados ao tema central deste estudo, destacando a ampla aplicação das Redes de Petri na modelagem e avaliação de sistemas manufatureiros. Em [Wang et al. 2022], foram utilizadas Redes de Petri Coloridas (CPN) para analisar métricas como tempo de ciclo e vazão, resultando em ganhos de produtividade de 14,3%. De forma semelhante, [Abreu 2022] utilizam CPNs para reduzir a dependência de trabalho manual em processos de manufatura têxtil.

Por sua vez, [Ala et al. 2024] aplicam Redes de Petri clássicas (PN) em sistemas de manufatura flexível, com foco na avaliação de propriedades estruturais, como vivacidade e limitabilidade dos recursos. Em outra vertente, [Silva et al. 2024] utilizam SPN para avaliar confiabilidade e disponibilidade, obtendo melhorias superiores a 50% na confiabilidade e redução de 60% nos índices de falha. Adicionalmente, [Deng et al. 2025] aplicam CPNs na otimização de métricas operacionais, como tempo de ciclo e utilização de recursos. Apesar dessas contribuições relevantes, observa-se que nenhum desses trabalhos contempla, de forma integrada, a complexidade inerente à manufatura têxtil tradicional, conforme sintetizado na Tabela 1.

**Tabela 1. Comparação dos trabalhos relacionados**

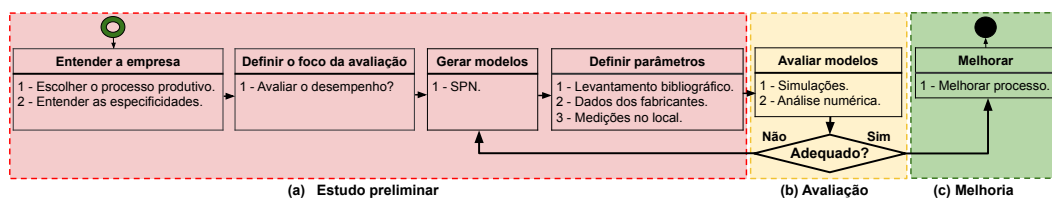
Trabalhos	Manufatura	Modelo	Tempo de Produção	Vazão	Utilização	Estatísticas	Dados R.	Processo C.
[Wang et al. 2022]	Flexível	CPN	X	X	-	X	-	X
[Abreu 2022]	Têxtil	CPN	-	-	-	-	X	-
[Silva et al. 2024]	Têxtil	SPN	-	-	-	-	X	X
[Ala et al. 2024]	Flexível	PN	-	-	-	-	-	-
[Deng et al. 2025]	Flexível	CPN	X	-	X	-	-	-
<b>Este trabalho</b>	<b>Têxtil</b>	<b>SPN</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>

Abreviações: Dados R. = Dados Reais; Processo C. = Processo Completo;

Nesse contexto, o presente trabalho busca suprir essa lacuna ao propor uma abordagem ampla, que envolve todas as etapas básicas do processo de confecção têxtil tradicional, capaz de avaliar múltiplas métricas de desempenho sob variabilidades reais, permitindo a identificação de arranjos mais adequados para o planejamento eficiente de sistemas produtivos.

### 3. Metodologia Adotada

Esta seção apresenta a metodologia utilizada para a modelagem e análise de uma infraestrutura têxtil tradicional. A Figura 1 ilustra a metodologia adotada, composta por três macro atividades (estudo preliminar, avaliação e melhoria) divididas em seis etapas (entender a empresa, definir o foco da avaliação, gerar modelos, definir parâmetros, avaliar modelos e propor melhorias)



**Figura 1. Metodologia adotada.**

A metodologia adotada inicia-se com a seleção da empresa e a compreensão detalhada do processo produtivo, incluindo suas especificidades, bem como a definição do produto a ser analisado. Nesse estudo, foi selecionado o macacão infantil, conforme interesse dos gestores da organização. Em seguida, estabelece-se o foco da avaliação, sendo adotada, neste caso, a análise de desempenho, também alinhada às demandas gerenciais.

A escolha da modelagem por meio de SPN foi motivada por sua ampla aplicabilidade e pela capacidade de representar explicitamente métricas relevantes, como tempos de execução e taxas de produção [de Lima et al. 2021] [Valentim et al. 2024]. A partir dessa definição, é construído um modelo SPN representativo do processo produtivo em estudo. Os parâmetros do modelo foram coletados junto aos gestores no ambiente real de operação, constituindo insumos fundamentais para a modelagem. Ressalta-se que tais parâmetros podem variar de acordo com os objetivos específicos da manufatura.

A avaliação do modelo é conduzida por meio de simulação, aliada a análises numéricas e estatísticas. As principais métricas consideradas incluem: (i) taxa de utilização, que representa a fração do tempo em que os recursos permanecem ocupados; (ii) vazão, definida como a quantidade média de requisições (lotes) processadas por unidade de tempo; (iii) número médio de lotes no sistema, que indica a quantidade esperada

de lotes ao longo do tempo; e (iv) tempo de resposta, correspondente ao tempo médio total de permanência de uma requisição no sistema, englobando tanto o tempo de espera em fila quanto o tempo efetivo de processamento. Esta última métrica é particularmente relevante, pois permite avaliar diretamente o tempo de produção dos lotes.

Após a obtenção dos resultados, procede-se à sua análise à luz dos objetivos estabelecidos. Caso os resultados não atendam às expectativas dos gestores, o modelo é revisado, retornando à etapa de geração do modelo para os devidos ajustes. Caso contrário, avança-se para a etapa de melhoria, na qual são propostas intervenções no processo produtivo real com base nos achados obtidos.

#### 4. Infraestrutura Têxtil Adotada

Esta seção apresenta a infraestrutura têxtil adotada, baseada em confecção têxtil tradicional, especializada na produção de macacões infantis, cuja expectativa produtiva são 20 lotes (6000 peças) mensais. A Figura 2 ilustra o ciclo produtivo, composto por sete fases: cortar lote de tecido, costurar lote tecido, beneficiar lote, costurar lote pós-beneficiado, pré-embalar lote, embalar lote e estocar lote.



Figura 2. Ciclo produtivo.

O processo inicia no corte do tecido, seguido pela costura que transforma os cortes em peças. Em seguida, ocorre o beneficiamento (etiqueta e estamparia) e a costura pós-beneficiamento para acabamento. Por fim, realizam-se as etapas de pré-embalagem, embalagem (consolidação do produto) e estocagem para logística e distribuição. Especificidades do processo, como decisão de qualidade, são detalhadas na seção a seguir.

#### 5. Modelo proposto

A Figura 3 apresenta o modelo que representa o processo de confecção de lotes de macacões infantis. Ele é dividido em sete fases: cortar tecido (a), costurar lote de tecido (b), beneficiar lote (c), costurar lote pós-beneficiado (d), pré-embalar lote (e), embalar lote (f) e estocar lote (g). O processo inicia na fase Figura 3 (a), com a atividade  $T_{CT}$  (cortar tecido), cujo tempo médio ajuda a definir a capacidade máxima de lotes suportada pela infraestrutura. Devido às limitações operacionais, a produção é controlada por metas mensais de 20 lotes, representados por 20 *tokens* no lugar  $P_{CML}$ , e se conecta a  $T_{CT}$  para regular a entrada de tecido evitando gargalos. Adicionalmente, um arco inibidor de  $P_{CL}$  para  $T_{CT}$  impede o acúmulo de tecido cortado em  $P_{CL}$ , garantindo que ao menos uma célula possa processá-lo assim que disponível. Na fase (b), o lote segue para o lugar  $P_{CL}$  (chegada do lote), onde a atividade  $T_{ACC}$  (acionar célula de costura) verifica  $P_{CCD}$  (células de costura disponíveis). Havendo disponibilidade, o lote segue para  $P_{LVCC}$  (lote vinculado a célula de costura), habilitando  $T_{CL}$  (costurar lote), que o transfere para  $P_{CLR}$  (costura de lote realizada) e habilita  $T_{ACL}$  (avaliar costura do lote). Após avaliado, o lote segue para  $P_{DLC}$  (decisão de lote costurado): se conforme,  $T_{COK}$  (costura ok) o direciona

para  $P_{FB}$  (fila de beneficiamento), na fase (c); se não conforme,  $T_{CR}$  (costura ruim) o envia para  $P_{FAC}$  (fila de ajuste de costura), habilitando  $T_{AC}$  (ajustar costura). Após ajuste, o lote seguirá para  $P_{FB}$  (fila de beneficiamento).

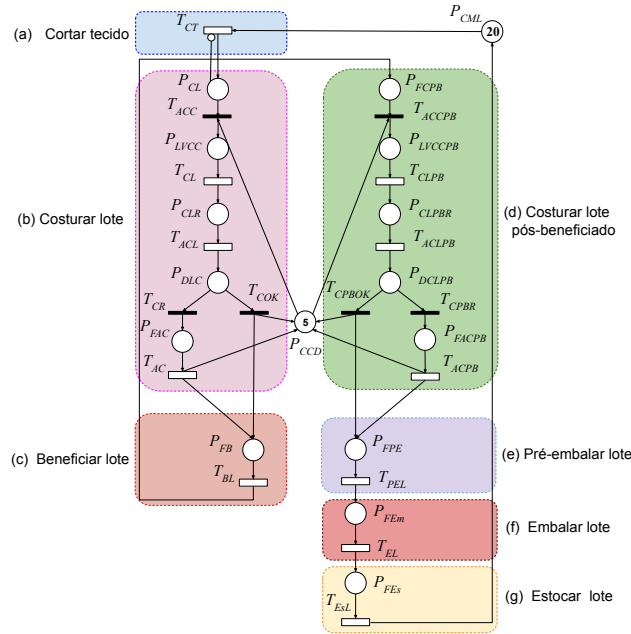


Figura 3. Modelo SPN do processo produtivo do macacão.

Na fase (c), o lote é processado por  $T_{BL}$  (beneficiar lote). Em seguida, na fase (d), é transferido para o lugar  $P_{FCPB}$  (costura pós-beneficiamento), onde a transição imediata  $T_{ACCPB}$  (acionar célula de costura pós-beneficiamento) verifica  $P_{CCD}$  (células de costura disponíveis). Havendo ao menos uma célula disponível, o lote segue para  $P_{LVCCPB}$  (lote vinculado a célula de costura pós-beneficiamento), habilitando a atividade  $T_{CLPB}$  (costurar o lote pós-beneficiado), que o transfere para  $P_{CLPBR}$  (costura do lote pós-beneficiado realizada) e habilita  $T_{ACLPB}$  (avaliar costura do lote pós-beneficiado) para avaliação. Após isso, o lote segue para  $P_{DCLPB}$  (decisão de lote pós-beneficiado): se conforme,  $T_{CPBOK}$  (costura pós-beneficiamento ok) o encaminha para  $P_{FPE}$  (fila de pré-embalagem) na fase (e); se não conforme,  $T_{CPBR}$  (costura pós-beneficiamento ruim) o envia para  $P_{FACPB}$  (fila de ajuste de costura pós-beneficiamento), habilitando  $T_{ACPB}$  (ajustar costura pós-beneficiamento). Após o ajuste, o lote é transferido para  $P_{FPE}$  (fila de pré-embalagem). Na fase (e), o lote é processado por  $T_{PEL}$  (pré-embalar lote). Em seguida, na fase (f), é transferido para  $P_{FEm}$  (fila de embalagem), habilitando  $T_{EL}$  (embalar lote). Por fim, na fase (g), o lote segue para  $P_{FEs}$  (fila de estoque), habilitando a atividade  $T_{EsL}$  (estocar lote), onde o ciclo de vida da confecção do lote de macacão infantil é concluído.

A Tabela 2 apresenta as atividades da infraestrutura modeladas por transições temporizadas, com *delays* em horas. Destaca-se a transição  $T_{CT}$ , cujo o tempo médio de corte do tecido varia entre 1 e 13 horas, caracterizando uma variabilidade paramétrica temporal entre diferentes cenários operacionais. Essa variação foi adotada para representar distintas taxas médias de chegada da matéria-prima, representada por  $T_{CT}$ , e analisar seus impactos no desempenho global do sistema. Adicionalmente, são apresentadas as transições

imediatas associadas a prioridades e probabilidades correspondentes. Já na Tabela 3, são apresentadas as descrições dos lugares e a marcação inicial do modelo.

**Tabela 2. Transições do modelo SPN (Temporizadas e Imediatas).**

Transições	Descrição	Tempo (hrs.)	Prioridade	Probabilidade (%)
$T_{CT}$	Cortar tecido	1-13	-	-
$T_{CL}$	Costurar lote	2,0	-	-
$T_{ACL}$	Avaliar costura do lote	0,4	-	-
$T_{A-C}$	Ajustar costura	0,2	-	-
$T_{B-L}$	Beneficiar lote	1,0	-	-
$T_{CLPB}$	Costurar lote pós-beneficiado	1,5	-	-
$T_{ACLPB}$	Avaliar costura do lote pós-beneficiado	0,3	-	-
$T_{ACPB}$	Ajustar costura do lote pós-beneficiado	0,15	-	-
$T_{PEL}$	Pré-embalar lote	0,75	-	-
$T_{EL}$	Embalar lote	0,583	-	-
$T_{EsL}$	Estocar lote	0,417	-	-
$T_{ACC}$	Acionar célula de costura	-	6	1%
$T_{COK}$	Costura OK	-	5	99%
$T_{CR}$	Costura Ruim	-	4	1%
$T_{ACCPB}$	Acionar célula pós-beneficiamento	-	3	1%
$T_{CPBOK}$	Costura pós-beneficiamento OK	-	2	99%
$T_{CPBR}$	Costura pós-beneficiamento Ruim	-	1	1%

**Tabela 3. Distribuição inicial de tokens nos lugares da SPN.**

Lugar	Descrição	Tokens	Lugar	Descrição	Tokens
$P_{CL}$	Chegada do lote de tecido	0	$P_{LVCC}$	Lote vinculado a célula de costura	0
$P_{CLR}$	Costura do lote realizada	0	$P_{DLCL}$	Decisão de qualidade do lote costurado	0
$P_{FAC}$	Fila de ajuste da costura	0	$P_{FB}$	Fila de beneficiamento do lote	0
$P_{FCPB}$	Fila costura pós-beneficiada	0	$P_{LVCCPB}$	Lote vinculado a célula pós-benefi.	0
$P_{CLPBR}$	Costura lote pós-beneficiamento realizada	0	$P_{DCLPB}$	Decisão qualidade do lote pós-benefi.	0
$P_{FACPB}$	Fila ajuste costura pós-beneficiamento	0	$P_{FPE}$	Fila de pré-embalagem	0
$P_{FEm}$	Fila de embalagem	0	$P_{FEs}$	Fila de estoque	0
$P_{CCD}$	Células de costura disponíveis	1-5	$P_{CML}$	Capacidade máxima de lotes no mês	20

A Tabela 4 apresenta as métricas adotadas para as análises numéricas realizadas neste trabalho. Contudo, é importante esclarecer que as métricas 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. Informações adicionais sobre essa ferramenta <sup>1 2</sup>. As funções *return*, *mark* e *rate*: a função *return* especifica o valor que deve ser retornado por uma função. Esse valor pode ser baseado no estado atual do modelo. A função *mark* retorna o número de *tokens* em um lugar específico do modelo, sendo essencial para avaliar o estado atual do modelo. Já a função *rate* determina a taxa de disparo de transições no modelo, variando de acordo com o estado do modelo e com o número de *tokens* em lugares específicos. As variáveis *probmenor* e *probmaior* utilizadas na função indicam as probabilidades associadas apenas as transições imediatas ( $T_{CR}$ ,  $T_{COK}$ ,  $T_{CPBR}$  e  $T_{CPBOK}$ ), que representam decisões de qualidade dos produtos processados nas fases (b, c) do modelo, conforme apresentado na Tabela 2.

Na Tabela 4, a métrica de utilização calcula a razão entre o número de células de costura ocupadas pelo total de células disponíveis e relacionadas ao processo de costura na infraestrutura. O tempo de produção do lote ( $T_{PL}$ ) é calculado com base na lei de *Little* [Little 1961], que relaciona a vazão média ( $V$ ) e o número médio de itens no sistema ( $L$ ), sendo definido como  $T_{PL} = ELI/V$ , onde  $ELI$  representa o número médio de lotes.

<sup>1</sup>Orientação, instalação e configuração ferramenta SPNP, [https://youtu.be/UtGi2G5W\\_U0\\$](https://youtu.be/UtGi2G5W_U0$)

<sup>2</sup>Orientação, modelagem e análises na ferramenta SPNP, <https://youtu.be/W-xguYOs6GM>

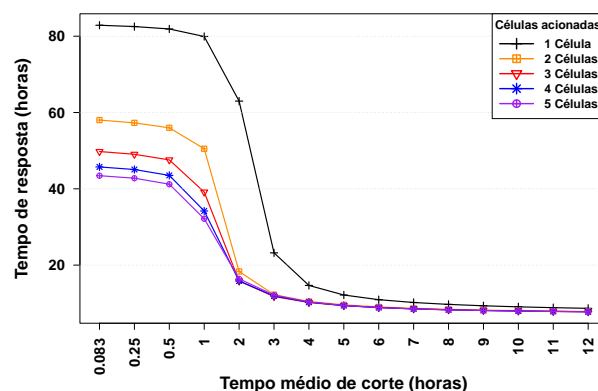
Essa métrica quantifica o tempo necessário para produzir um lote completo, do corte à estocagem, permitindo avaliar o desempenho operacional do processo.

**Tabela 4. Métricas para avaliação de desempenho operacional da SPN.**

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

## 6. Resultados

O desempenho da manufatura têxtil pode ser reduzido pela intensidade das atividades ao longo do tempo, exigindo o equilíbrio entre o tempo de corte do tecido, o número de células (C) operantes e as demais etapas; caso contrário, haverá perda de desempenho. Por exemplo, a Figura 4 apresenta o impacto das variações do tempo de corte (0,083-12h) eixo X, e acionamento das células de costura (1-5C) no tempo médio de produção do lote, eixo Y. O comportamento observado na Figura 4 mostra que o pior arranjo, composto por 1C de costura com tempo de corte de 0,083h (“arranjo 1”), resulta no maior tempo de produção do lote (83h). No entanto, identificar o arranjo mais performático é um desafio que exigiu uma análise robusta e aprofundada, conforme as estatísticas descritivas dos tempos de produção do lote apresentadas na Tabela 5.



**Figura 4. Tempo de produção do lote.**

A Tabela 5 apresenta as estatísticas descritivas, comparando os arranjos de 1-5C, mostrando a redução dos tempos médios e o comportamento da variabilidade com o aumento de células, indicando maior estabilidade. O arranjo 1C apresenta o pior desempenho (média 33,80h, D.P. 32,89h, CV 97,3%), enquanto 2C e 3C são intermediários, com redução de média e dispersão, porém ainda elevados. Os arranjos 4C e 5C têm os

melhores resultados, com menores médias (18,22h e 17,69h), desvios (15,27h e 14,25h) e coeficientes de variação, além de intervalos de confiança mais estreitos. Todos rejeitam a normalidade ( $p < 0,001$ ). Assim, 4C e 5C são mais estáveis e eficientes, com leve vantagem para 5C.

**Tabela 5. Estatísticas descritivas dos tempos de produção por número de células**

Ar.	N.	Mín.	Máx.	Méd.	Medi.	Var.	D.P.	C.V.%	Ampl.	p-valor	Nor.	I.C. 95%
1 C.	15	8,67	82,87	33,80	12,17	1081,90	32,89	97,3%	74,20	< 0,001	Não	[15,22 ; 52,38]
2 C.	15	7,85	58,02	22,05	9,59	444,05	21,07	95,6%	50,17	< 0,001	Não	[11,21 ; 32,89]
3 C.	15	7,78	49,77	19,35	9,39	294,26	17,15	88,7%	42,00	< 0,001	Não	[10,15 ; 28,55]
4 C.	15	7,77	45,74	18,22	9,39	233,08	15,27	83,8%	37,96	< 0,001	Não	[9,47 ; 26,97]
5 C.	15	7,77	43,44	17,69	9,42	202,93	14,25	80,5%	35,66	< 0,001	Não	[9,25 ; 26,13]

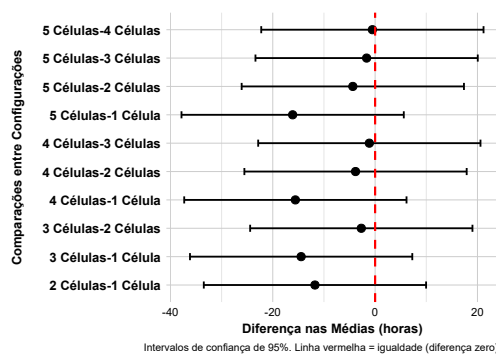
*Abreviações:* Ar. = Arranjos; N. = número de amostras; Mín. = valor mínimo; Máx. = valor máximo; Méd. = média; Medi. = mediana; Var. = variância; D.P. = desvio padrão; C.V. = coeficiente de variabilidade; Ampl. = amplitude; p-valor = valor do teste de hipótese; Nor. = normalidade; I.C. 95% = intervalo de confiança de 95%.

A Tabela 6 apresenta a matriz de correlação entre os tempos médios de produção do lote, indicando alta similaridade entre os arranjos, com correlações entre 0,992 e 1,000. O arranjo 1C apresenta maior sensibilidade e variabilidade operacional, enquanto 3C, 4C e 5C exibem padrões quase idênticos e maior estabilidade. A correlação perfeita entre 4C e 5C indica que adicionar uma quinta célula não altera significativamente o desempenho, sendo 4C o melhor equilíbrio entre desempenho e alocação de recursos.

**Tabela 6. Matriz de correlação entre tempos de produção**

	1C	2C	3C	4C	5C
1C	1,000	0,997	0,994	0,993	0,992
2C	0,997	1,000	0,999	0,998	0,998
3C	0,994	0,999	1,000	0,999	0,999
4C	0,993	0,998	0,999	1,000	1,000
5C	0,992	0,998	0,999	1,000	1,000

A Figura 5 apresenta o teste de Tukey HSD dos tempos de produção, comparando em detalhes as diferenças nas médias de cada arranjo: o eixo Y apresenta os pares comparados (5-4, 5-3, ..., 2-1C); enquanto o eixo X apresenta a diferença de médias com escala -40 a 20h; a referência é representada pela linha vermelha em zero (igualdade).



**Figura 5. Teste de Tukey HSD do tempo de produção do lote.**

O comportamento observado na Figura 5 indica que todos os intervalos de confiança cruzam a linha de igualdade, confirmando estatisticamente a não-significância

das diferenças. Entretanto, 8 de 10 comparações apresentam diferenças médias negativas, indicando tendência direcional consistente favorável às configurações com mais células.

Adicionalmente, a Figura 6 apresenta o boxplot do tempo médio de produção do lote, com eixo Y variando de 0-40h e eixo X representando o acionamento de 1-5C. Os resultados demonstram uma redução progressiva e monotônica no tempo médio de resposta conforme aumenta o número de células na configuração: 1C:  $\approx 38$ h (valor base de referência); 2C:  $\approx 26$ h (redução de 12h = 31,6% em relação à base); 3C:  $\approx 23$ h (redução acumulada de 15h = 39,5%); 4C:  $\approx 22$ h (redução acumulada de 16h = 42,1%); 5C:  $\approx 21$ h (redução acumulada de 17h = 44,7%). A configuração com 5C emerge como o arranjo mais eficiente, registrando o menor tempo médio de resposta ( $\approx 21$ h) e a maior redução absoluta (17h) em comparação com a configuração basal de 1C. O padrão de redução segue uma curva de retornos marginais decrescentes; a análise quantitativa recomenda alocação de 5C para implementação operacional. Contudo, a configuração com 4C representa uma alternativa viável, atingindo 94% da eficiência máxima com potencial economia de recursos.

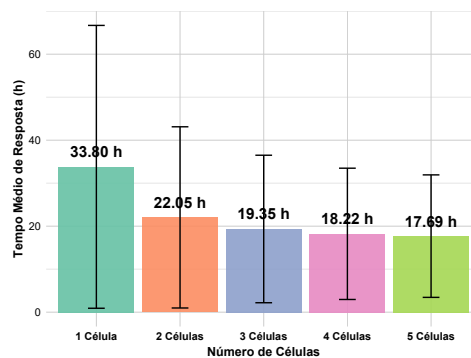


Figura 6. Boxplot do tempo médio de produção do lote.

A Figura 7 apresenta o histograma de distribuição do tempo de processamento do lote, baseado em 75 observações. O eixo X representa o tempo de produção em horas (0-80h), enquanto o eixo Y exibe a frequência absoluta (0-40) à esquerda e densidade probabilística (0-0,015) à direita. A linha vermelha representa a curva teórica da distribuição normal calculada a partir da média e do desvio padrão da amostra, neste caso apresentando forte assimetria positiva, com concentração de dados entre 0-20h (moda  $\approx 10$ h), enquanto a cauda alongada sugere a presença de valores extremos (máximo = 82,87h). A linha verde tracejada representa a média da amostra, enquanto a linha azul tracejada representa a mediana da amostra. A discrepância entre média (22,22h) e mediana (10,20h) confirma esta assimetria, com desvio padrão elevado (21,52h) indicando alta variabilidade do processo. Observa-se ainda que a maior concentração de frequência (volume de lotes processados) ocorre nos menores intervalos de tempo.

A Figura 8 apresenta o impacto do tempo de corte na vazão da produção de macacões infantis, onde o eixo X mostra o tempo médio de corte do tecido, variando de 0,0833-12h, enquanto o eixo Y representa a vazão de lotes processados. Ao acionar 5C e tempo de corte de 0,833h, obtém-se a vazão máxima de 0,44 lotes (132 macacões/h), enquanto com 1C e 12h a vazão máxima é 0,07 lotes (21 macacões/h). Entre esses extremos, existem 15 configurações com vazões próximas, exigindo uma análise robusta para

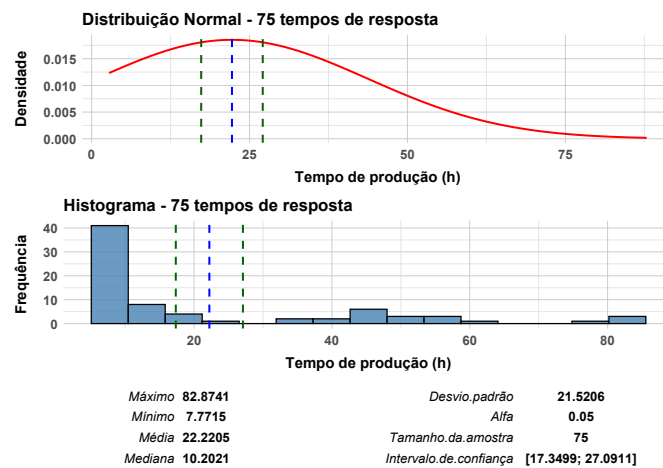


Figura 7. Histograma de distribuição do tempo de processamento do lote.

identificar o arranjo com maior constância. Por esse motivo, analisar a janela de ganho operacional por acionamento das células indica que o pico de vazão ocorre em 1h. Por exemplo, ao considerar que o limite referencial seja 50% da vazão, esse patamar é atingido entre 2h e 3h, a depender do arranjo. Dessa forma, as janelas de ganho marginal situam-se predominantemente entre 1–2h, com exceção da transição 3→2, cuja janela se estende até 3h. Esses resultados reforçam que a faixa entre 1–3 h constitui a janela de ganho mais adequada para a estabilidade operacional da vazão, pois, após 3h incrementar recursos oferta baixa compensação em termos de desempenho.

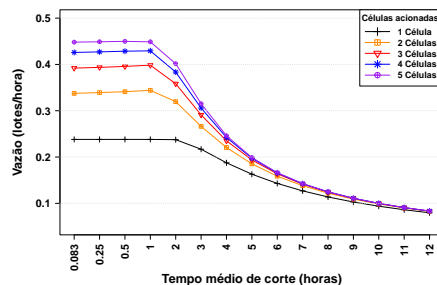


Figura 8. Vazão.

A Figura 9 apresenta a taxa de utilização dos arranjos de células de costura, comparando o cenário mais pessimista (1C) ao mais otimista (5C). Quando a utilização se aproxima de 100%, formam-se filas potencialmente infinitas, reduzindo a produção de lotes. Em processos manufaturados, é improvável manter níveis contínuos próximos de 95%, devido à queda de ritmo ao longo do tempo. Por outro lado, níveis inferiores a 60% são considerados inaceitáveis. Definir limites de utilização dos recursos permite avaliar a sustentabilidade e a capacidade contínua da produção, identificando uma janela aceitável que evite gargalos ou ociosidade. Observa-se que a configuração com 2C e tempo médio de corte entre 1-2h, que segundo as expectativas dos gestores, representa a janela ótima, mantendo a utilização acima de 60% e próxima de 95%, evitando sobrecarga ( $\geq 100\%$ ) e subutilização ( $< 60\%$ ). Além disso, essa janela deve ser analisada em conjunto com o tempo de processamento e a vazão dos lotes, a fim de garantir uma capacidade produtiva equilibrada, alinhada ao planejamento e sustentada por critérios estatísticos.

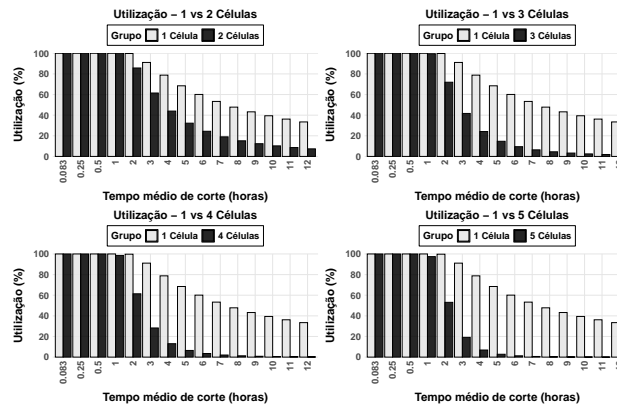


Figura 9. Utilização das células de costura.

A modelagem SPN mostrou-se eficaz para representar os processos têxteis das manufaturas tradicionais, identificando gargalos e comportamentos emergentes. O tempo de corte revelou-se determinante para a estabilidade do sistema, atuando como um regulador importante do fluxo produtivo. Arranjos com 3–4 células e tempo de corte entre 2–3 horas demonstraram o melhor equilíbrio entre desempenho e recursos. A adição de mais de 4 células apresentou retornos decrescentes, indicando limites práticos para expansão da capacidade. A combinação entre análise estatística e simulação estocástica gerou conclusões mais confiáveis sobre os ganhos reais.

## 7. Conclusão

A abordagem proposta, baseada em modelagem estocástica, avaliação de desempenho, análises numéricas e estatísticas, mostrou-se adequada como um método educativo, viável e eficiente para avaliar o processo produtivo de uma manufatura têxtil tradicional. Permitindo identificar os arranjos mais adequados para melhorar o desempenho operacional e nutrir a possibilidade de melhorias, como um remanejamento adequado de recursos frente a novas demandas de cargas de trabalho, considerando variabilidades e especificidades do processo. Logo, essa abordagem pode servir como uma referência para auxiliar os tomadores de decisão a anteciparem suas previsões e realizarem um planejamento mais alinhado às expectativas produtivas. Como trabalhos futuros, é pretendido avaliar eficiência energética, custos operacionais e métricas adicionais, como disponibilidade e confiabilidade, além de desenvolver uma ferramenta para facilitar o uso do modelo proposto em regiões periféricas onde pode haver restrições tecnológicas e orçamentárias.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro para a realização desta pesquisa.

## Referências

- Abreu, V. A. (2022). Automation project in the textile industry based on Petri net. Master's thesis, Federal University of Ouro Preto.
- Ala, B., Yahyaoui, A., and Lakhoua, M. N. (2024). Petri nets modeling of a flexible manufacturing system. *Journal of Innovation and Applied Technology*, 10(1):5–10.

- Alexandre, M. P. et al. (2018). Interface between strategic positioning and costing systems in industries of the textile sector in the mesoregion of the Sertão of Paraíba.
- Cruz, A. G. d. et al. (2018). Modeling and simulation of the production system in a clothing manufacturing industry using Petri nets. B.S. thesis, Pontifical Catholic University of Goiás.
- de Lima, J. W. S., Callou, G., and Andrade, E. (2021). Teoria de filas e rede de petri estocástica: Um tutorial. *Research, Society and Development*, 10(3):e2810312826–e2810312826.
- Deng, W., Zhang, Q., Wu, L., and Yang, W. (2025). A petri net-based digital modeling and optimization method for flexible manufacturing systems with integrated optical perception. In *Third International Conference on Advanced Materials and Equipment Manufacturing (AMEM 2024)*, volume 13691, pages 1044–1052. SPIE.
- Júnior, B. d. O. M. (2025). Indústria do vestuário: v. 10, n. 392, julho, 2025. *Caderno Setorial ETENE*, 10.
- Lima, M. C. P. d. (2010). The metamorphosis of the handsome: an analysis of the clothing sector in region Agreste of Pernambuco. Master's thesis, Federal University of Pernambuco.
- Little, J. D. (1961). A Proof for the Queuing Formula:  $L = \lambda W$ . *Operations research*, 9(3):383–387.
- 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.
- Nascimento, A., Tavares, E., Alves Jr, G., Sousa, E., and Nogueira, B. (2020). Performability evaluation of transport modes for cloud-based inbound logistics: a study based on coffee industry. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 34(2):126–147.
- Silva, E. M., Macieira, R. M., de Araújo, D. R. B., and Andrade, E. C. d. (2024). Assessment of availability and reliability of a textile manufacturing 4.0 using stochastic models. In *Proceedings of the 13th Latin-American Symposium on Dependable and Secure Computing*, pages 146–152.
- Silva, M., Teruel, E., Valette, R., and Pingaud, H. (1996). Petri Nets and Production Systems. In *Advanced Course on Petri Nets*, pages 85–124. Springer.
- 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*.
- Valentim, T., Callou, G., França, C., and Tavares, E. (2024). Availability and performance assessment of iomt systems: a stochastic modeling approach. *Journal of Network and Systems Management*, 32(4):95.
- Wang, G., Li, D., Wang, S., Cheng, M., Luo, Z., and Liu, R. (2022). A formal performance evaluation method for customised plug-and-play manufacturing systems using coloured petri nets. *Sensors*, 22(20):7845.