

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE INFORMÁTICA
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

EMANUEL CRISTIAN DE CESARO

**UMA ABORDAGEM EM REDES DE PETRI TEMPORIZADAS
PARA SINCRONIZAÇÃO DE PRODUÇÃO EM SISTEMAS DE
MANUFATURA ENXUTA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO
2021

EMANUEL CRISTIAN DE CESARO

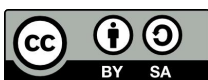
**UMA ABORDAGEM EM REDES DE PETRI TEMPORIZADAS
PARA SINCRONIZAÇÃO DE PRODUÇÃO EM SISTEMAS DE
MANUFATURA ENXUTA**

**A Timed Petri Net approach for production synchronization in lean manufacturing
systems**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Computação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Marcelo Teixeira, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PATO BRANCO
2021



4.0 Internacional

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

EMANUEL CRISTIAN DE CESARO

**UMA ABORDAGEM EM REDES DE PETRI TEMPORIZADAS
PARA SINCRONIZAÇÃO DE PRODUÇÃO EM SISTEMAS DE
MANUFATURA ENXUTA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Computação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação.

Data de aprovação: 02 de Novembro de 2021

Marcelo Teixeira
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Jeferson José de Lima
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Érick Oliveira Rodrigues
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PATO BRANCO
2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por toda iluminação e capacidade que me foi dada enquanto escrevia esse documento.

Agradeço a minha família pelo apoio incondicional que tive nesse período.

Agradeço ao meu sócio Darlan Guth por entender meus momentos de ausência na empresa enquanto escrevia esse documento.

Por fim, faço um agradecimento muito especial ao meu orientador Marcelo Teixeira, por toda sua disponibilidade, atenção e por não deixar de acreditar em mim.

Obrigado!

RESUMO

Ferramentas de planejamento e capacidade de produção são fundamentais para a sincronização dos sistemas de produção modernos, em especial os sistemas de manufatura. Sem essas ferramentas, o estudo de implantação de técnicas enxutas de otimização de produção são custosos financeiramente, consomem tempo, recursos, além de serem inflexíveis para cenários de reconfiguração física. Esse trabalho apresenta um modelo genérico em GSPNs, com fácil adaptabilidade, para modelagem de sistemas de produção, capaz de capturar inúmeros perfis de variabilidade sem a necessidade de alteração no meio físico. Com essa abordagem, múltiplos cenários podem ser reconfigurados, simulados e analisados em um curto espaço de tempo, o que faz das GSPNs uma valiosa ferramenta para planejamento e controle PCP.

Palavras-chave: Redes de Petri. Manufatura enxuta. PCP. Sistemas de Produção.

ABSTRACT

Planning tools and production capacity are essential for synchronizing modern production systems, especially manufacturing systems. Without these tools, the study of implementation of lean production optimization techniques is financially costly, consumes time, resources, in addition to being inflexible for physical reconfiguration scenarios. This labor presents a generic model in GSPNs, with easy adaptability for modeling production systems, capable of capturing numerous variability profiles without the need to change the physical environment. With this approach, multiple scenarios can be reconfigured, simulated and analyzed in a short period of time, which makes GSPNs a valuable tool for production planning and control.

Keywords: Petri Nets. Lean manufacturing. PCP. Production systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pirâmide da automação.	3
Figura 2 – Exemplo de Rede de Petri	9
Figura 3 – Exemplo de sistema de produção sequencial com múltiplos operadores.	10
Figura 4 – Fluxograma de execução	13
Figura 5 – GSPN genérica P para um componente temporizado de produção.	13
Figura 6 – Comportamento do sistema sob variação de λ_{TS}	15
Figura 7 – Modelo composto P^C para o sistema de produção com 4 estações sequenciais.	16
Figura 8 – Gráfico da ocupação do sistema em cada estação de trabalho de P^C	17
Figura 9 – Gráfico da ocupação do sistema em cada estação de trabalho com 2 recursos em RS3	18
Figura 10 – Gráfico do tempo médio de fila em cada modelo no sistema de produção	19
Figura 11 – Modelo Juncão P^{12}	19
Figura 12 – Gráfico da ocupação dos sistema de manufatura em cada estação de trabalho, com a junção de Et^1 e Et^2 em Et^{12}	20

SUMÁRIO

1 – Introdução	1
1.1 Objetivo Geral	2
1.2 Objetivos Específicos	2
2 – Referencial teórico	3
2.1 Planejamento de produção	4
2.2 Métodos de planejamento de produção	4
2.2.1 Manufatura enxuta	5
2.2.2 Just in time	5
2.2.3 Automação	5
2.2.4 Manufatura Flexível	6
2.3 Modelagem	7
2.3.1 Redes de Petri	7
3 – GSPN para a sincronização do fluxo de manufatura	10
3.1 Cenário motivador	10
3.2 METODOLOGIA	12
3.2.1 Etapa 1: Modelo genérico da estação de trabalho	12
3.3 Experimentos	14
3.3.1 Ferramenta Time NET	14
3.3.2 Experimentos iniciais	14
3.3.3 Parametrização do modelo	16
3.3.4 Simulação e Validação	16
3.3.5 Modelo Alternativo	19
4 – Conclusão	22
Referências	23

1 Introdução

Historicamente, os sistemas de produção se pautam na relação entre seres humanos e máquinas. Groover (2014) define um sistema de produção como um conjunto de elementos que visa transformar matéria prima em produtos, por meio da integração entre pessoas, equipamentos e tecnologia. A indústria, que antes era composta por postos de trabalho essencialmente manuais, passou a receber sistemas autônomos e inteligentes com elevados níveis de tecnologia agregada.

Um dos exemplos clássicos de sistemas de produção, que acompanham essa evolução, são os sistemas de manufatura. Os sistemas de manufatura organizam a produção baseado no fluxo e na divisão de trabalho, resultando em uma produção mais rápida e eficiente. Ou seja, eles padronizam os processos produtivos, fazendo com que o sistema produza mais em menos tempo, comparado aos sistemas artesanais.

A evolução tecnológica como um todo vem exigindo atualmente a agregação de tecnologia além da linha de produção em sistemas de manufatura, abrangendo também departamentos de gerenciamento do negócio (ANTUNES, 2008). Uma parcela dos sistemas de manufatura modernos compreende uma ampla variedade de modelos, conceitos e métodos aplicados a gestão de produção. Dentre esses sistemas, destaca-se o conceito de manufatura enxuta.

A implantação do conceito de manufatura enxuta implica na fábrica operando com o mínimo de recursos possíveis e, ainda assim, maximizando o volume de trabalho realizado com esses recursos, os quais incluem trabalhadores, equipamentos, tempo, espaço e materiais. Além disso, a manufatura enxuta tende a agregar qualidade ao produto, de modo que o consumidor demonstre alto grau de satisfação. Em resumo, a produção enxuta significa fazer mais com menos, e fazer melhor (GROOVER, 2014).

A aplicação prática de uma política enxuta em uma empresa não é simples, tendo em vista que se propõem a reestruturar processos, políticas e práticas organizacionais. As decisões enxutas estão relacionadas ao planejamento de produção, baseando-se no contexto de gerenciamento do negócio. Todas as decisões a nível de gestão refletem diretamente no chão de fábrica, ocasionando uma gama de problemas caso a planta produtiva não esteja preparada para enfrentar mudanças.

Como alicerce a aplicação da manufatura enxuta, surge o conceito de produção *just in time*. O *just in time* é um método racional de fabricação por meio da completa eliminação de elementos desnecessários na produção. A ideia básica, nesse sistema, é produzir os itens necessários, no tempo necessário e na quantidade necessária (COSTA, 2007). Esse método define indicadores de eficiência para um sistema de manufatura, o que levam o fabricante a ter somente os recursos necessários a cada tarefa. Isso faz do sistema *just in time* um pilar de operacionalização da manufatura enxuta, permitindo assim eliminar as principais fontes de desperdícios.

Um dos indicadores fundamentais de um sistema *just in time* é o tempo *takt*. Em resumo, esse indicador refere-se ao tempo que um sistema de produção leva para produzir uma unidade de um determinado item. Hierarquicamente, esse indicador é definido no departamento de gestão e espera-se que reflita no chão de fábrica. Entretanto, precisa-se reconfigurar a planta produtiva, e todos os equipamentos associados ao sistema de produção, para em seguida coletar através de medidas se o tempo *takt* atingiu o objetivo esperado.

Essa abordagem consome tempo e recursos da empresa, além de não garantir sucesso na aplicação, considerando que após a reconfiguração o *takt time* pode inclusive ser maior

que o tempo anterior. Uma forma de planejar essa reconfiguração sem atingir diretamente o sistema físico é através de modelos em Redes de Petri. Na literatura, redes de Petri têm sido usadas, por exemplo, para reconfiguração de sistemas robustos de alocação de recursos [Jun et al. \(2012\)](#), reconfiguração de estruturas [Mai et al. \(2018\)](#), para modelagem de sistemas dinâmicos [Lenka e Dai \(2012\)](#), etc. Entretanto, não encontrou-se na literatura trabalhos que utilizam redes de Petri para sincronização de tempo takt em sistemas de manufatura enxuta e planejamento de produção.

1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um modelo em Redes de Petri para representar processos de manufatura enxuta sujeitos a variações de *takt time*. Dado um sistema de manufatura como parâmetro inicial, pretende-se através de simulação do modelo, retornar cenários de reconfiguração do processo que sincronize e otimize as atividades de produção.

1.2 Objetivos Específicos

- Construir um modelo genérico para representar os componentes de um fluxo produtivo a serem rearranjados, como máquinas, estações de trabalho e pessoas;
- Desenvolver estratégias de análise do modelo parametrizado, baseando-se nas técnicas de manufatura enxuta;
- Definir um sistema real de manufatura para ser usado como estudo de caso;
- Aplicar o modelo genérico para todas as máquinas do modelo real, parametrizar, simular e discutir os resultados através de gráficos e tabelas;

2 Referencial teórico

Embora a evolução tecnológica aplica-se a variados contextos, é na produção industrial que possui maior identidade. Os sistemas de produção modernos são formados essencialmente pelo enlace entre eletricidade (como forma de alimentação dos componentes), sistemas de controle (responde às instruções lógicas e as executa junto à estrutura de atuação), e conjunto de instruções (define a ordem lógica do processo). A integração entre esses elementos pode ser sumarizada por um diagrama comumente conhecido na literatura como pirâmide da automação, apresentada na Fig. 1.

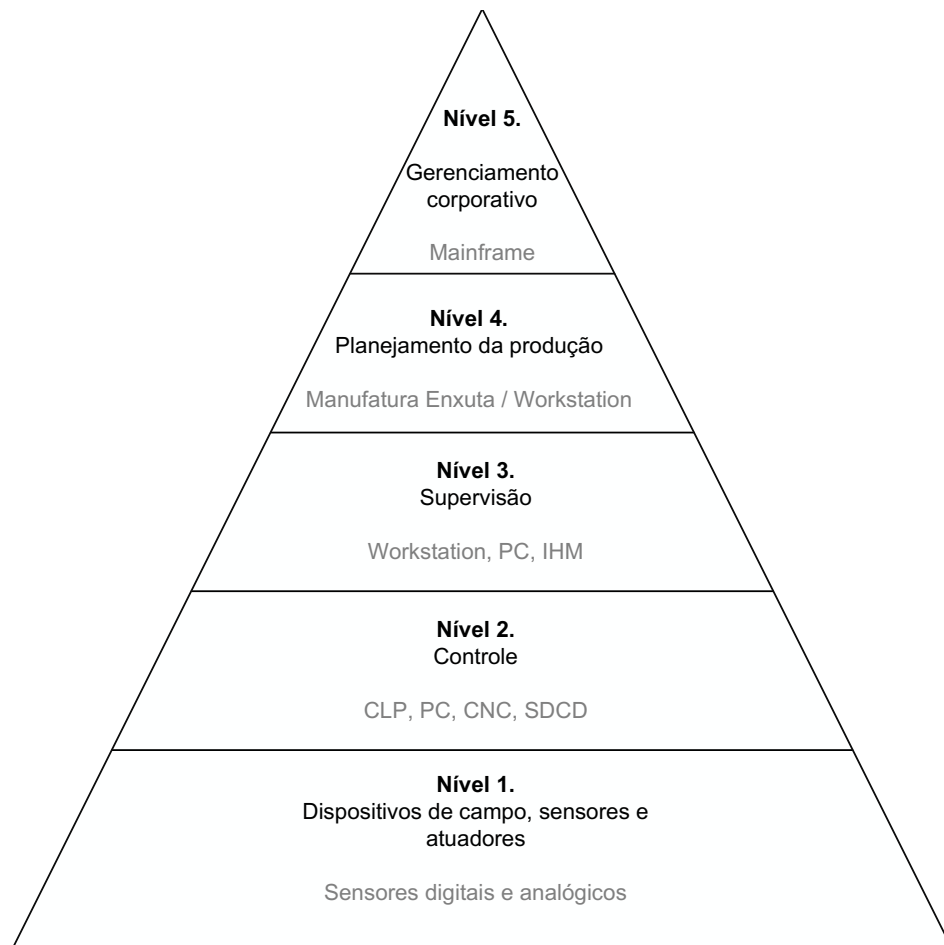


Figura 1 – Pirâmide da automação.

Fonte: Adaptado de (MORAES; CASTRUCCI, 2008).

- O nível 1 representa o chão de fábrica, é composto essencialmente por dispositivos de campo, instrumentos de medição e atuadores, que em conjunto compõem a planta. Em outras palavras, são os equipamentos que se enxerga ao entrar em uma fábrica.
- O nível 2 é composto por controladores digitais, que estão diretamente ligados ao nível 1, realizando o controle da planta. O nível 2 é o cérebro da operação, coordenando quais ações a planta deve executar baseado nos sinais coletados no nível 1.
- O nível 3 permite o controle do processo produtivo da planta. Normalmente é constituído por bancos de dados com informações dos índices de qualidade da produção,

relatórios e estatísticas de processo, índices de produtividade, algoritmos de otimização da operação produtiva.

- O nível 4 é responsável pela programação e pelo planejamento da produção, realizando o controle e a logística dos suprimentos. O nível 4 faz com que a estimativa de vendas seja refletida no nível de chão de fábrica.

- O nível 5 é responsável pela administração dos recursos da empresa, em que se encontram os softwares para gestão de vendas e financeira. É também onde se realiza a decisão e o gerenciamento de todo o sistema.

Cada nível da pirâmide da automação conta com um conjunto conexo, robusto e integrado de *hardware* e *software*. Em geral os níveis inferiores da pirâmide explicitam maior enfoque em *hardware*, enquanto os níveis superiores migram gradativamente sua afinidade para softwares. Dessa forma, a engenharia como um todo trabalha continuamente no desenvolvimento de modelos, métodos e ferramentas que, juntos, integram o meio físico a estruturas lógicas de controle que respondem ao ambiente de maneira automática, dentro do tempo e com sincronia esperada.

2.1 Planejamento de produção

Sobre a ótica da pirâmide da automação apresentada na Fig. 1, [Silva e Lobo \(2014\)](#) destacam como fundamental o alinhamento entre os diversos níveis da pirâmide para realizar um bom plano de produção. Segundo os autores, o planejamento de produção inicia-se na previsão de demanda ou estimativa de vendas. Para fazer a estimativa, leva-se em conta o ciclo de vida do produto a curto, médio e longo prazo. Alguns produtos tem uma demanda grande no curto prazo, e uma demanda baixa no médio e longo prazo. Um exemplo clássico são empresas de roupas, que produzem roupas para frio ou calor levando em conta as estações do ano.

O próximo passo é conhecido como planejamento agregado da produção, e consistem em alinhar a produção com a estimativa de vendas. Nessa etapa verificam-se quais condições devem ser satisfeitas pelo sistema de manufatura para que a demanda seja atingida. As estratégias clássicas utilizadas nos sistemas produtivos para manter um fluxo constante entre produção e demanda são três:

- Trabalhar com estoque. Quando a estimativa for menor que a produção, o excedente irá para o estoque; quando a estimativa for maior que a produção, consumirá o estoque excedente;

- Admitindo e demitindo funcionários constantemente de modo a nivelar a produção com estimativas de vendas;

- Nivelar a produção com as estimativas através de horas extras;

As três formas representadas refletem uma empresa desbalanceada. Admitir e demitir funcionários constantemente pode acarretar em diversos problemas para a empresa, horas extras excessivas afetam diretamente a produtividade, já que os trabalhadores podem estar mais cansados, e trabalhar com estoque gera gastos que podem ser evitados utilizando-se de outros métodos menos invasivos. Outro fator negativo nessa estratégia é o horizonte de tempo. Algumas variações na economia não são previsíveis no médio e longo prazo, o que pode, acarretar em prejuízos.

2.2 Métodos de planejamento de produção

Dessa forma, as estratégias apresentadas acima não são mais aceitas no cenário atual da indústria e dos sistemas de produção. Embora por algum tempo essas estratégias fossem suficientes, atualmente a engenharia propõem-se a estudar e desenvolver uma série de métodos

que favorecem simultaneamente os colaboradores e a fábrica como um todo. Os métodos mais comuns encontrados na literatura para planejamento de produção são: *seis sigma*, *kanban*, *just in time* e *Lean manufacturing* ou manufatura enxuta.

2.2.1 Manufatura enxuta

O método de manufatura enxuta, objeto de interesse nesse trabalho, baseia-se na absoluta eliminação de desperdícios e é sustentado por dois pilares fundamentais: **just in time** e **automação** - automação com um toque humano.

2.2.2 Just in time

Just in time significa que, em um processo de fluxo, as partes corretas necessárias à montagem alcançam a linha de montagem no momento em que são necessários e somente na quantidade necessária. Uma empresa que estabeleça esse fluxo integralmente pode chegar ao estoque zero (OHNO, 1978).

Entretanto, o sucesso da aplicação de um sistema *just in time* depende de três elementos técnicos fundamentais: *takt time*, fluxo Contínuo e *pull system* ou sistema Puxado, os quais são detalhados a seguir:

- *takt time*: É o tempo que determina a velocidade do sistema produtivo. Ou seja, ele é o ritmo de produção de uma peça para atender à demanda do cliente. O cálculo desse ritmo resulta da razão entre o tempo de trabalho disponível e a demanda de mercado. Uma produção mais alta que o tempo *takt* indica uma superprodução, enquanto uma produção mais lenta remete a atrasos.

- Fluxo contínuo: Remete a organização da produção, de modo que o fluxo produtivo ocorra de forma contínua. Leva em consideração a disposição física das máquinas e o delay em cada estágio da produção, resultando no mínimo de estocagem e ociosidade.

- *pull system*: Consiste em seguir rigorosamente a agenda de produção, ou seja, uma peça só é produzida quando há necessidade. Dessa forma, o estoque é mínimo e a produção ocorre com base no *takt time* definido. Isso contrasta com o método de produção em massa, que literalmente empurra o máximo possível de produção ao próximo estágio, ignorando limitações de estoque e tempo *takt*.

Aplicações em *just in time*, destacadas por Ohno (1978) são bastante complexas de serem aplicadas de forma ordenada. Por exemplo, a fabricação de um automóvel em que o número de componentes envolvidos no processo é enorme, obviamente é difícil aplicar de forma ordenada o *just in time* para todos os componentes, um simples erro na montagem de um equipamento pode ocasionar desperdícios ou atrasos no processo final de montagem. Em resumo, aplicações reais de *just in time* para processos muito grandes são praticamente impossíveis de sincronizar.

2.2.3 Automação

O outro pilar de sustentação da manufatura enxuta é a automação. Para explicar automação considera-se o seguinte contexto: As máquinas atualmente utilizadas nos processos produtivos possuem elevado grau de eficiência e precisão na execução de tarefas, porém limitam-se apenas a eventos que ocorrem dentro do escopo já planejado. Na maioria das vezes as máquinas não estão preparadas para anormalidades, como por exemplo, a simples queda de um fragmento em seu interior pode danificá-las, ocasionando a produção de componentes defeituosos, atrasos, acúmulo de materiais na linha e muitos outros problemas no processo.

Diante disso, a automação se refere á maquinas que possam evitar esses problemas com a assistência humana.

Idealmente, o enlace entre *just in time* e automação reflete em uma fábrica operando com a máxima eficiência possível. Na literatura, a abordagem *just in time* proposta por Ferrari (2017) visa diminuir o horizonte de tempo entre os lotes de itens na produção. Ao invés de se produzir grandes lotes com enormes quantidades, projetando uma venda para meses, pode-se diminuir a quantidade e diversificar em vários lotes, produzindo o suficiente para suprir a demanda do cliente por um curto prazo.

Por exemplo, se a demanda semanal a ser atendida por uma linha de montagem for de 2.000 unidades do item A, 3.000 do item B e 5.000 do item C, muito provavelmente essas serão as quantidades das três ordens de montagem emitidas para a semana, de forma que, a linha começará montando 2.000 itens A, após passará para a produção de 3.000 itens B, e, finalmente, já na segunda metade da semana, entrará com os 5.000 itens C (FERRARI, 2017).

A programação proposta por Ferrari (2017) busca padronizar a produção em pequenos lotes (por exemplo, lotes com 1000 itens). Essa forma proporciona que os clientes sejam constantemente atendidos com itens que estão saindo da linha e não com os estoques formados nas semanas passadas. A grande dificuldade desse tipo de programação está relacionada a preparação das linhas de montagem, onde existiam 3 paradas, agora se tornaram 10 paradas. Em contrapartida, a grande vantagem é que assim que superada essa dificuldade, o sistema apresenta benefícios como redução de estoque e padronização de lotes a serem produzidos.

2.2.4 Manufatura Flexível

Observa-se que o modelo proposto por Ferrari (2017) baseia-se em uma arquitetura de produção flexível, ou seja, diversos produtos competem pela mesma linha de produção. Realizar planejamento de produção em sistemas flexíveis é ainda mais difícil comparado aos sistemas tradicionais de produção em que uma linha produtiva é ocupada por apenas um tipo de item, uma vez que deve-se considerar as estimativas de demanda de todos os produtos e chegar a um denominador comum.

Por exemplo, nesse mesmo contexto, um determinado cliente demanda a produção de 5000 unidades do item A, e dividindo em pequenos lotes a empresa não possui condições de suprir tal demanda dentro do tempo estipulado. Uma pergunta a ser respondida é se existe uma forma de realocar os recursos na linha de produção, reprogramar a planta fabril de modo a atingir tal demanda sem alterar a produção dos outros itens?

Em tese, a aplicação de uma política enxuta reflete em uma maior agilidade no processo de produção. A literatura comprova e quantifica tais melhorias. Por exemplo, em Alexandria (2015) a aplicação de uma politica enxuta em uma empresa de transformadores resultou em um aumento de 20% na produção diária ao mesmo tempo em que o número de colaboradores diminuiu em 30%.

Pode-se considerar os resultados de Alexandria (2015) como satisfatórios, porém, também é comprovado pela literatura que o nível de maturidade organizacional da empresa é fundamental para um sucesso ou fracasso na aplicação de políticas enxutas. Os resultados de PAOLI (2016) dão conta que empresas com maturidade organizacional alta obtiveram otimização entre 57% e 78%, enquanto empresas com dificuldades organizacionais obtiveram resultados entre 1,7% e 31,7% de otimização.

É comprovado pela literatura que a aplicação de uma política enxuta reflete em aumento de eficiência no fluxo produtivo, porém, a maior dificuldade ainda está associada ao método de aplicação prática. Em geral isso é implementado baseado em testes de tentativa e erro, ou seja, propõem-se a mudança no *layout* da linha de produção e através de medidas e

comparações conclui-se se a mudança resulta em uma otimização do fluxo produtivo ou não. O mesmo acontece para realocação de trabalhadores, recursos e equipamentos na linha de produção.

O maior problema proveniente de um método tentativa e erro é que se der errado a empresa pode resistir em aplicar uma nova mudança, ao mesmo tempo em que se der certo, pode haver outra configuração que fornece métricas de desempenho melhores, mas somente testando para obter validação. Outra dificuldade está relacionada ao tempo, para algumas empresas, parar para executar esses testes é inadmissível, pois ocasiona atrasos e prejuízos para a produção.

2.3 Modelagem

O problema do método tentativa e erro pode ser facilmente solucionado utilizando-se de modelos de simulação computacionais para o sistema. A simulação computacional de sistemas consiste na utilização de determinadas técnicas matemáticas, empregadas em computadores digitais, as quais permitem imitar o funcionamento de, praticamente, qualquer tipo de operação ou processo do mundo real (FILHO, 2008).

A simulação de sistemas busca essencialmente responder a questões no sentido de: "O que aconteceria se?". Aplicado aos sistemas de manufatura, objeto de estudo deste trabalho, um modelo de simulação fornece diversas métricas atribuídas a diferentes variações no contexto físico da malha produtiva. Por exemplo, pode-se saber o desempenho de aumentar ou diminuir a quantidade de funcionários na linha, de variar a ordem do fluxo de produção, de aumentar a taxa de entrada de matéria prima na linha, etc.

O primeiro passo para realizar a simulação de um sistema, é definir com clareza o modelo de simulação a ser adotado. Um modelo de simulação caracteriza matematicamente um sistema, com elevado teor de abstração, cujo estado pode ser descrito em um determinado instante por um conjunto de variáveis estocásticas e determinísticas, conhecidas como variáveis de estado (Silva, 2006). Os modelos podem ser classificados como discretos ou contínuos no tempo. Nos modelos discretos as variáveis de estado só mudam seus valores em pontos bem definidos no tempo; já nos sistemas contínuos, as variáveis assumem valores a qualquer instante de tempo (FILHO, 2008).

De interesse particular nesse trabalho estão sistemas de manufatura que evoluem a eventos de maneira aleatória, porém obedecendo certa distribuição de probabilidade no tempo. Uma ferramenta utilizada para a representação computacional desse tipo de sistema são as redes de Petri.

2.3.1 Redes de Petri

Redes de Petri é uma ferramenta de modelagem gráfica, com fundamentação matemática sólida, que pode ser aplicada para representar, estimar e simular fluxo dos mais variados domínios de problemas. Como ferramenta gráfica, redes de Petri podem ser usadas na comunicação visual representando algo similar a fluxogramas (Murata, 1989).

Com a utilização de redes de Petri, pode-se modelar o sistema de manufatura, e através desse modelo, simular computacionalmente o comportamento do sistema. A grande vantagem é que não necessita de uma realocação física na planta produtiva para concluir se a configuração proposta é aceitável ou não. Dessa forma, para um único modelo, pode-se testar diversas configurações da planta e qual o impacto de cada uma, sem depender de acesso físico ao sistema de produção.

As redes de Petri são formadas por dois tipos de nós: um ativo denominado transição e outro passivo denominado lugar. Os lugares correspondem as variáveis de estado e as transições às ações realizadas pelo sistema. Graficamente, os lugares são representados por círculos e as transições por traços ou barras. Arcos são responsáveis por ligar alguns lugares a algumas transições ou algumas transições a alguns lugares. Um arco nunca liga um lugar a um lugar ou uma transição a uma transição. Eles representam o fluxo entre estados e eventos. Marcas ou tokens são utilizados para representar a existência de alguns estados. Cada lugar pode conter uma ou mais marcas, representadas por tokens. Estas marcas permitem modelar a dinâmica do sistema.

Extensões em Redes de Petri permitem incluir tempo e probabilidade nas transições, sendo útil para projetar sistemas a eventos discretos e dinâmicos no tempo, que evoluem com uma determinada distribuição de probabilidade. Redes de Petri Estocásticas Generalizadas (GSPN), por exemplo, representam o tempo por variáveis aleatórias distribuídas exponencialmente associadas a transições temporizadas, combinadas a transições não temporizadas (ou imediatas) (Murata, 1989).

Formalmente, uma GSPN é uma 7-tupla $N = (P, T, \Pi, I, O, M, W)$, onde:

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ representa o conjunto finito de lugares;
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ representa o conjunto finito de transições;
- $\Pi : T \rightarrow \mathbb{N}$ é a função prioritária, onde:

$$\Pi(t) = \begin{cases} \geq 1, & \text{se } t \in T \text{ é uma transição imediata;} \\ 0, & \text{se } t \in T \text{ é uma transição temporizada.} \end{cases}$$

- $I : (T \times P) \rightarrow \mathbb{N}$ é a relação de entrada que define a multiplicidade de arcos direcionados de lugares para transições;
- $O : (T \times P) \rightarrow \mathbb{N}$ é a relação de saída que define a multiplicidade de arcos direcionados de lugares para transições;
- $M : P \rightarrow \mathbb{N}$ mapeia o estado inicial $\#$, correspondente a quantidade de *tokens* em cada lugar $p \in P$ denotada $\#p$;
- $W : T \rightarrow \mathbb{R}^+$ é a função de ponderação que representa o peso ($w_t \in \mathbb{N}$), em um *delay* determinístico ($\lambda_{dt} \in \mathbb{R}$), ou um *delay* estocástico ($\lambda_{st} \in \mathbb{R}$), de tal modo que:

$$W(t) = \begin{cases} w_t \geq 0, & \text{se } t \in T \text{ é imediato;} \\ \lambda_{dt} > 0, & \text{se } t \in T \text{ is é cronometrado deterministicamente;} \\ \lambda_{st} > 0, & \text{se } t \in T \text{ é cronometrado estocasticamente.} \end{cases}$$

A trajetória através do espaço de estados de N depende das prés e pós condições de t , definidas respectivamente pelo conjunto $\bullet t = \{p \in P \mid I(t, p) > 0\}$ e $t \bullet = \{p \in P \mid O(t, p) > 0\}$. Então, t é dito habilitado em uma marcação M se, e somente se, $\forall p \in \bullet t, M(p) \geq I(t, p)$. Portanto, um estado N muda quando uma transição habilitada dispara, e apenas as transições habilitadas podem disparar. Transições imediatas disparam assim que forem ativadas, enquanto as transições temporizadas aguardam um *delay* λ_{dt} para disparar; e transições estocasticamente temporizadas aguardam um *delay* associado a uma variável aleatória.

Quando uma transição habilitada é acionada, ela move tokens do local de entrada para o local de saída. Portanto, o disparo de uma transição $t \in T$, habilitada na marcação M , provoca uma nova marcação M' de tal modo que $\forall p \in (\bullet t \cup t \bullet), M'(p) = M(p) - T(t, p) + O(t, p)$.

N é dito limitado se existe um limite $k > 0$ para o número de *tokens* em cada lugar, garantindo um espaço finito de estados. Outras propriedades sobre redes de Petri podem ser encontradas em (Murata, 1989).

Graficamente, esse formalismo é geralmente expresso pelos elementos mostrados na Fig. 2.



Figura 2 – Exemplo de Rede de Petri

Esses elementos da Fig. 2 representam a composição básica de uma rede de Petri, em que as setas unidirecionais são os arcos, os círculos são lugares, o retângulo representa uma transição temporizada e por fim, a marcação circular preta presente no Lugar1 é denominada token. Pode-se observar na Fig. 2(a) que existe um token no Lugar 1, quando habilita-se a transição temporizada, esse token circula pela rede de petri, chegando ao Lugar2, conforme representado por Fig. 2(b).

Aplicações em GSPN podem ser encontradas na literatura em diversas áreas. [Marsan et al. \(1998\)](#) aplicou GSPN para modelagem em sistemas distribuídos. Aplicações em Engenharia de desempenho de software são propostas por [Lopez, J. e Campos \(2004\)](#). [Oliveira \(2008\)](#) propõem estruturas em GSPN que, quando conectadas, permitem modelar e analisar *workflows* de diferentes processos voltados para a produção de estruturas metálicas.

Conforme observa-se na pirâmide da automação e comprovado pela literatura, os sistemas de manufatura modernos necessitam de elevado grau de tecnologia agregado aos processos, essencialmente para a sincronização de tarefas de produção. Nesse trabalho, pretende-se sincronizar um sistema de *workflow* utilizando GSPN como ferramenta de modelagem. As análises são focadas em simular diferentes configurações para o mesmo modelo, com o intuito de encontrar a configuração de chão de fábrica que apresente maior grau de sincronização entre as tarefas.

3 GSPN para a sincronização do fluxo de manufatura

Este capítulo apresenta uma proposta para a sincronização do fluxo de produção em sistemas de manufatura enxuta, usando GSPNs. O exemplo de um sistema de manufatura sequencial com múltiplas estações de trabalho (Fig. 3), é adotado com o propósito de melhor ilustrar a abordagem, sua aplicabilidade, vantagens e limitações. No entanto, salienta-se que a mesma abordagem se aplica naturalmente a outros perfis de fluxos, requerendo, para isso, tão somente o esforço de modelagem para o seu ajuste de fluxo.

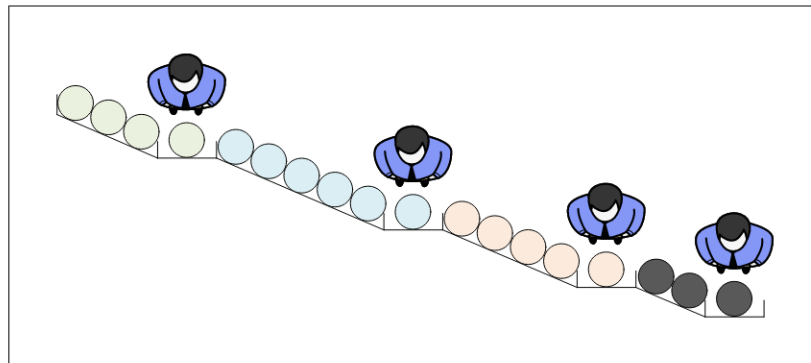


Figura 3 – Exemplo de sistema de produção sequencial com múltiplos operadores.

O processo retrata a linha de produção de um item, cuja manufatura envolve quatro etapas de montagem. Cada estação de trabalho realiza uma etapa da montagem. Sendo assim, o fluxo de produção funciona em série e cada etapa depende do término da etapa anterior.

3.1 Cenário motivador

Em sistemas de fluxo com diversas estações de trabalho em série, conforme proposto nesse cenário, é de grande importância a sincronização das atividades de produção. Um planejamento adequado evita desperdícios, essencialmente de tempo e recursos, pois um possível gargalo em alguma das etapas compromete toda atividade subsequente da linha.

Porém, a detecção desses possíveis gargalos é uma tarefa que depende essencialmente de medir o fluxo real para o entendimento do seu perfil e posterior reconfiguração da linha. Essa estratégia remete a uma alternativa de reconfiguração pautada em tentativa e erro, pois trata-se de um ciclo envolvendo: manufatura, medição e reconfiguração. Além de cara, uma vez que requer experimentos sobre uma linha física real, essa estratégia também é demorada, propensa a erros e intolerante a uma grande quantidade de variações no perfil de manufatura.

Para compreensão prática da importância da sincronização de produção e do prejuízo que um simples gargalo pode causar na linha de produção, quantificou-se o sistema apresentado na Fig. 3 com dados de tempo para a execução de cada tarefa do processo. É possível determinar, possivelmente por meio de medições no sistema real ou registros em bases de dados, as seguintes unidades de tempo (ut) que se referem às médias para execução das tarefas de manufatura em cada estação de trabalho do sistema em estudo.

- Manufatura na estação de trabalho 1: 3 ut.
- Manufatura na estação de trabalho 2: 2 ut.
- Manufatura na estação de trabalho 3: 5 ut.
- Manufatura na estação de trabalho 4: 3 ut.

Conforme observa-se na Fig. 3, cada estação de trabalho é composta por uma etapa de processamento e uma fila de entrada. Cada item, para ser processado pelo sistema de manufatura, passa obrigatoriamente pela fila de entrada, onde aguarda chegar sua vez para ser processado e posteriormente seguir o fluxo para a etapa seguinte. Se interessa nesse trabalho em descobrir e diminuir o tempo que cada item aguarda na fila de entrada, visto que a aplicação de técnicas enxutas baseia-se em eliminação de desperdícios, e um item parado, aguardando na linha de produção é um desperdício que deve ser tratado.

Com os dados de tempo coletados em cada etapa de processamento do sistema de manufatura, não se pode calcular com precisão quanto tempo cada item permanece na fila até ser processado em cada uma das estações de trabalho. Portanto, para fins de comparação com os dados provenientes da simulação dos modelos em GSPN apresentados nesse capítulo, adotou-se como aceitáveis valores no intervalo entre o melhor e o pior caso. O melhor caso refere-se a um sistema de manufatura totalmente sincronizado, sem filas de espera, enquanto que o pior caso representa um sistema de manufatura completamente saturado, com filas lotadas em todas as etapas.

- Para o melhor caso o tempo de fila T_f é idealmente aceitável como $T_f = 0$.
- Para o pior caso o tempo de fila T_f é definido pela equação:

$$T_f = \text{CapacidadeFila} * \text{TempoProcessamento};$$

CapacidadeFila indica a quantidade máxima de recursos suportados pela fila.

TempoProcessamento indica o tempo de processamento do item na estação de trabalho.

Portanto, as características do sistema de manufatura são representadas pela tabela 1.

Tabela 1 – Características do sistema de manufatura

	Tempo de processamento	T_f - melhor caso	T_f - pior caso
Estação de trabalho 1	3 ut	0 ut	9 ut
Estação de trabalho 2	2 ut	0 ut	10 ut
Estação de trabalho 3	5 ut	0 ut	20 ut
Estação de trabalho 4	3 ut	0 ut	6 ut

Dada essa configuração para o sistema representado na Fig. 3, algumas análises são pertinentes de serem executadas:

- Identificar o quanto o sistema está sincronizado, ou seja, se o início da execução de cada tarefa possui sincronia com o término da tarefa anterior. Caso o sistema não esteja com a sincronia esperada, quais ações poderiam melhorá-la?
- Existe algum gargalo no fluxo produtivo? Se sim, em que etapa e como resolver?
- Suponha que se deseja aumentar a produção e, por conseguinte, os recursos da linha. Em qual etapa do processo essa modificação seria mais adequada?
- Se, do contrário, quisesse diminuir os recursos na linha de produção. Qual seria a melhor forma de realocação dos recursos restantes, de modo que a produtividade seja minimamente afetada?

Responder a tais perguntas se baseando puramente em experimentação sobre o sistema físico pode ser muito pouco eficiente, haja visto que cada cenário possível de reconfiguração precisa ser testado na prática e que um sistema, em geral, contempla uma grande quantidade de possíveis cenários.

Alternativamente, um modelo de simulação poderia ser usado para impor variabilidades sobre os parâmetros sistema, detectando comportamentos sobre os quais se pudesse ter

interesse sem, necessariamente, necessitar da infraestrutura real. Nesse sentido, este trabalho auxilia na ordem lógica de problemas de reconfiguração física, sem necessitar do sistema real, o que tende a reduzir custos, tempo e desgaste na realocação dos recursos. E, como a manufatura enxuta define um ambiente sujeito à restrições severas de fluxo, alta demanda de sincronização sob alta variabilidade de parâmetros e cenários de reconfiguração, ela se torna um estudo de caso natural para os resultados desta pesquisa.

Note que o cenário descrito acima, embora ilustrativo, generaliza alguns problemas de tomada de decisão que são inerentes à maioria dos processos industriais. Então, sem perda de generalidade, esse cenário foi usado ao longo deste trabalho para ilustrar o modelo em GSPN proposto que, posteriormente, espera-se que possa ser utilizado e adaptado para diferentes perfis, situações e fluxos de processos. O modelo a ser descrito na sequência foi simulado sobre esse exemplo sequencial, sob o efeito de diferentes perfis de variabilidade de parâmetros e carga. Como saída, ele antecipa o comportamento do processo sob a variabilidade imposta, representando então uma ferramenta valiosa para tomada de decisão de reconfiguração da planta produtiva. Será mostrado, ainda, que a reconfiguração de parâmetros do modelo é fácil e intuitiva, consistindo apenas na personalização de valores de variáveis, ao passo que no sistema físico esse mesmo efeito seria de complexa (e cara) reprodução.

3.2 METODOLOGIA

O fluxograma da Fig. 4 expõem, de maneira geral, as etapas para análise e a implantação de políticas de manufatura enxuta, com base nos resultados a serem estimados pelo modelo em GSPN proposto e simulado neste trabalho.

Cada etapa desta metodologia é explicada na sequência.

3.2.1 Etapa 1: Modelo genérico da estação de trabalho

Inicialmente, define-se um modelo em GSPN que represente, de maneira genérica, as operações ou etapas que consomem tempo de produção. No caso do cenário da Fig. 3, por exemplo, tais operações correspondem ao trabalho realizado em uma estação de trabalho. Perceba que, sem perda de generalidade, essa operação poderia representar um operador, uma tarefa robótica, uma esteira, ou outro aspecto temporal qualquer, para os quais o modelo continua sendo representativo, de modo que a única alteração é no parâmetro de tempo associado. Nessa direção, propõe-se um modelo temporizado genérico, denominado P, construído em GSPN e mostrado na Fig. 5. Sua extensão e composição sobre problemas mais gerais são exploradas oportunamente ao longo do trabalho.

Na GSPN P, algumas variáveis devem ser compreendidas:

- A transição TI modela o tempo médio λ_{TI} de chegada de matéria prima a ser processada na estação de trabalho;
- A transição TS modela o tempo médio λ_{TS} para a matéria prima ser processada na linha de produção;
- O lugar Q modela a fila de entrada de peças;
- O lugar RQ modela a quantidade de recursos admitidos na fila Q, denotado por $\#RQ$;
- S- Lugar que modela o serviço;
- O lugar RS modela a quantidade de recursos disponíveis no serviço S, denotado por $\#RS$;

Em outras palavras, a cada λ_{TI} ut o buffer recebe uma peça para ser processada na linha de produção. Cada peça leva λ_{TS} ut para ser processada. Os tokens em $\#RQ = 3$ indicam que o recipiente (fila) possui capacidade de armazenamento de apenas três componentes,

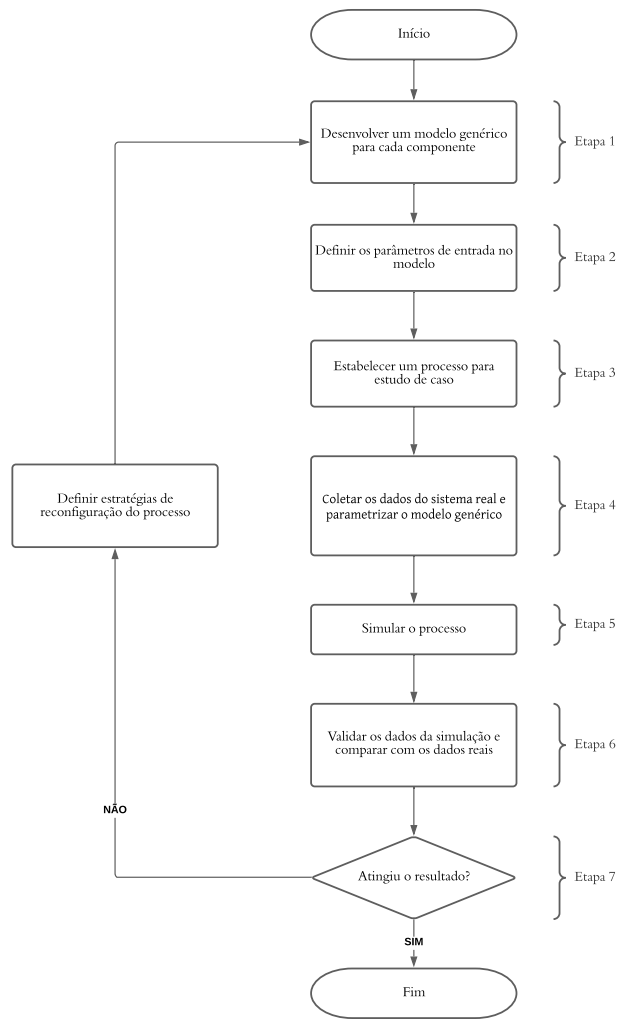


Figura 4 – Fluxograma de execução

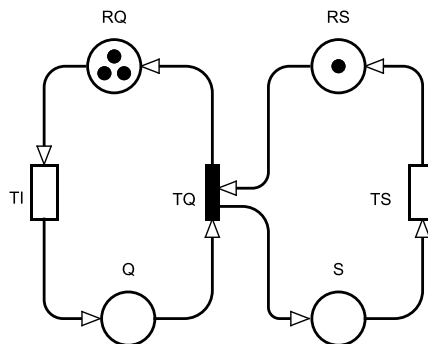


Figura 5 – GSPN genérica P para um componente temporizado de produção.

enquanto que o token em $\#RS = 1$ indicam a capacidade de processamento de apenas 1 item por vez. Esses valores são definidos baseando-se em medições do sistema real. Por exemplo,

uma capacidade de fila de três itens indica que a linha de manufatura limita-se a apenas três itens aguardando para serem processados, trata-se de uma limitação física do sistema. O mesmo ocorre com a quantidade de recursos, indicando que estamos modelando um sistema de manufatura que necessita apenas um recurso para a execução da tarefa, por exemplo, seria diferente se estivéssemos modelando um processador multicore, em que vários processos poderiam ser executados em paralelo.

3.3 Experimentos

Para a simulação de todos os modelos em GSPN desse trabalho foi usado a ferramenta TimeNet, com o algoritmo de análise transitória, considerando um intervalo de confiança de 95% e um erro relativo de 10%.

3.3.1 Ferramenta Time NET

Time NET consiste de uma ferramenta gráfica interativa para modelagem com redes de Petri estocásticas. Foi desenvolvida pela Technische Universit at Berlin, Alemanha. O projeto foi motivado pela necessidade de um software poderoso para a avaliação eficiente de redes de Petri com *delays* arbitrários no disparo (TIME...).

A ferramenta conta com todos os componentes de análise para redes de Petri determinísticas e estocásticas, podendo incluir atrasos nas transições. Para a simulação, TimeNET fornece um unificado *framework* para modelagem e avaliação de desempenho, o qual inclui:

- Algoritmo para análise transitória;
- Análise determinística de estado estacionário e transiente de tempo discreto;
- Um componente projetado especialmente para sistemas de manufatura que incluem modelagem com redes de Petri coloridas, análise e simulação de estado estacionário e uma interface gráfica que integra todas as classes de rede e algoritmos de análise;

Todos os experimentos desse trabalho foram realizados na ferramenta TimeNet e simulado com o algoritmo de análise transitória.

Da forma como a ferramenta foi utilizada, estimou-se três informações da linha de produção:

- Probabilidade de a fila estar ocupada $\mathcal{U}(Q)$, representado matematicamente na ferramenta pela fórmula: $\mathcal{U}(Q) = (\#Q \geq 0)$
- Probabilidade de o serviço estar ocupado $\mathcal{U}(S)$, representado matematicamente na ferramenta pela fórmula: $\mathcal{U}(S) = (\#S \geq 0)$
- Tempo médio que um item permanece na fila enquanto aguarda para ser processado $T(Q)$, representado matematicamente na ferramenta pela fórmula: $T(Q) = (\#Q * TI)$

3.3.2 Experimentos iniciais

Para esse experimento inicial, fixou-se o valor do delay de entrada λ_{TI} e variou-se o delay de processamento λ_{TS} , pelo fato de serem valores facilmente manipulados pelo sistema de manufatura, simplesmente aumentando ou diminuindo recursos na linha. Para alinhar-se e responder às questões anteriormente propostas, analisou-se a probabilidade do buffer estar ocupado e a probabilidade do serviço estar sendo utilizado, ou seja, a probabilidade de uma estação de trabalho estar em funcionamento.

Como teste inicial, simulou-se o comportamento de uma única estação de trabalho, exatamente como representado pelo modelo P na Fig. 5. Para esse teste, fixou-se o delay λ_{TI}

em 10 ut, e variou-se a variável λ_{TS} de 5 em 5 ut, desde 5 até 30 ut. O comportamento do modelo P em razão da variação de λ_{TS} é representado pela tabela 2 e pelo gráfico da Fig. 6.

Tabela 2 – Resultado dos experimentos com $\lambda_{TI} = 10$ e variação de λ_{TS}

λ_{TS}	$\mathcal{U}(Q)$	$\mathcal{U}(S)$
5	22.58%	48.38%
10	59.99%	79.99%
15	81.04%	94.41%
20	90.32%	96.77%
25	94.56%	98.44%
30	96.69%	99.17%

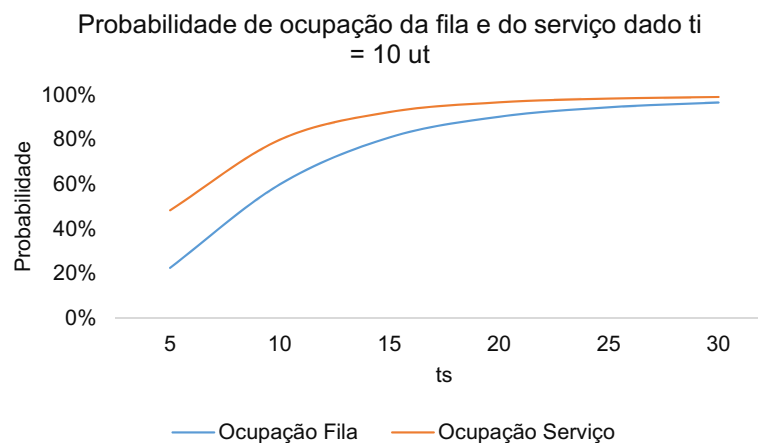


Figura 6 – Comportamento do sistema sob variação de λ_{TS} .

Como esperado, quando o tempo de processamento de um item é menor do que o tempo de chegada de itens na fila, a probabilidade da fila encontrar-se ocupada também é menor (22.58%). Porém, na medida que o tempo de processamento λ_{TS} aumenta, também ocorre aumento nas probabilidades de ocupação do serviço e da fila. Quando o valor de λ_{TS} é o dobro de λ_{TI} , percebe-se que o sistema ultrapassa o limite de sua capacidade, atingido valores próximos a 100 % de probabilidade de ocupação do buffer e do serviço, o que na prática sugere a saturação do sistema, algo que queremos evitar.

A partir de P, pode-se modelar o sistema de manufatura composto da Fig. 3, replicando esse modelo para cada estação de trabalho. A composição automática de modelos GSPN, como P, é explorada em (TEIXEIRA et al., 2015). Como o sistema de manufatura em estudo é composto por quatro estações de trabalho, a GSPN que representa esse sistema pode ser observada na Fig. 7.

Para compreensão prática, os experimentos iniciais replicaram as características de funcionamento do sistema em chão de fábrica, conforme descrito na sessão 3.1. Se associou a cada transição temporizada da GSPN o tempo médio de cada estação de trabalho, medido na linha de produção. O objetivo desse experimento é identificar pontos críticos na linha, que possam ser reconfigurados e sincronizados.

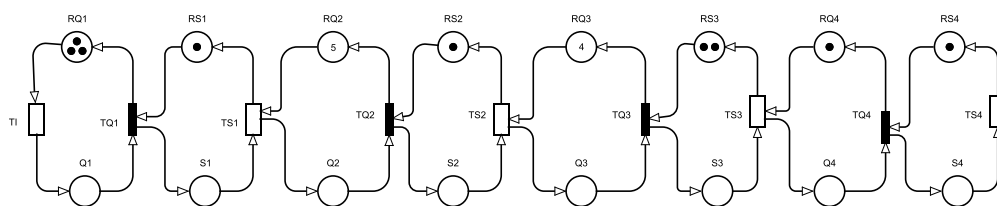


Figura 7 – Modelo composto P^C para o sistema de produção com 4 estações sequenciais.

3.3.3 Parametrização do modelo

Dada a GSPN da Fig. 7, observa-se que o modelo genérico P dá origem ao modelo composto P^C , que é então parametrizado com os valores do sistema real, correspondendo ao passo metodológico 4 da Fig. 4. Como cada estação de trabalho i (Et^i) em P^C possui características distintas, seus parâmetros são assim estabelecidos:

- Delay entrada na linha: $\lambda_{TI} = 3$ ut;
- Et^1 : $RQ1 = 3$; $RS1 = 1$; e $\lambda_{TS1} = 3$ ut;
- Et^2 : $RQ2 = 5$; $RS2 = 1$; e $\lambda_{TS2} = 2$ ut;
- Et^3 : $RQ3 = 4$; $RS3 = 1$; e $\lambda_{TS3} = 5$ ut;
- Et^4 : $RQ = 2$; $RS4 = 1$; e $\lambda_{TS4} = 3$ ut;

A etapa de parametrização consiste, portanto, em associar cada componente da GSPN aos detalhes temporais observados no sistema real.

3.3.4 Simulação e Validação

Através da simulação desse modelo, identificou-se as variações temporais médias no comportamento do sistema. Os resultados da simulação desse modelo são representados pelo gráfico da Fig. 8 e tabela 5.

Tabela 3 – Tabela da ocupação do sistema em cada estação de trabalho de P^C

Et^i	$\mathcal{U}(Q_i)$	$\mathcal{U}(S_i)$
Et^1	86.85%	95.06%
Et^2	95.49%	98.14%
Et^2	98.73%	99.67%
Et^2	26.34%	53.94%

Se observa no gráfico da Fig. 8 que as estações de trabalho Et^1 , Et^2 , Et^3 estão com elevados índices de ocupação da fila e do serviço, isso em outras palavras quer dizer que a taxa de entrada de matéria prima em cada uma dessas três estações de trabalho está sendo mais rápida que a taxa de saída de matéria prima processada, e esse é um ponto crítico da linha de produção. Pela tabela observa-se que o ponto mais crítico está em Et^3 , em que os valores encontram-se muito próximos a 100%. Esse gargalo é ocasionado em razão de uma dessincronização das tarefas em Et^3 , refletindo em sobrecarga para as estações de trabalho que antecedem e causando ociosidade nas etapas seguintes de produção.

Observando os parâmetros iniciais do sistema nota-se que o causador do gargalo em Et^3 é justamente a Et^2 . Como o delay λ_{TS2} é muito menor que o λ_{TS3} , a Et^2 produz de uma forma tão rápida que a Et^3 não dá conta de acompanhar o ritmo do fluxo, ocasionando em sobrecarga de matéria na fila. Isso além de prejudicar o ritmo da produção em Et^3 , faz com

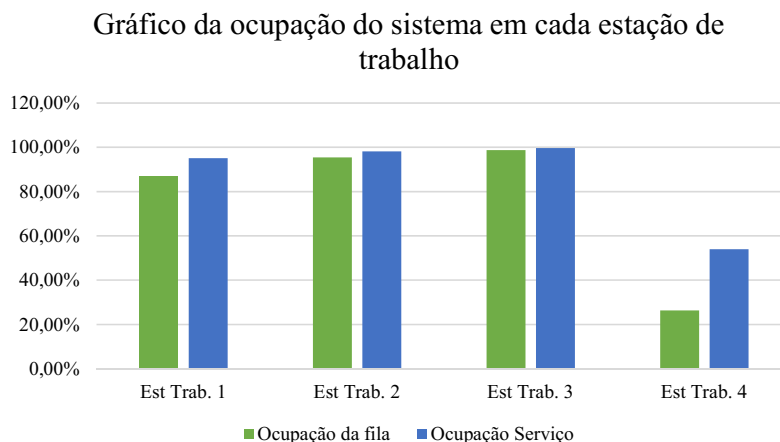


Figura 8 – Gráfico da ocupação do sistema em cada estação de trabalho de P^C

que as estações anteriores também fiquem com sobrecarga visto que devem acompanhar o ritmo de Et^3 .

Com esse experimento se consegue responder duas das perguntas descritas na sessão 3.1. Ou seja, existe claramente um gargalo no fluxo produtivo, exatamente em Et^3 , e esse também é o ponto mais adequado para agregação de novos recursos ao sistema de manufatura. Uma forma de solucionar esse gargalo é inserindo um novo recurso em Et^3 , trabalhando em paralelo ao recurso existente. Para reproduzir esse efeito no modelo P^C , basta incrementar um token em RS3.

Dessa forma, foi incrementado um token em RS3, criando o modelo $P^{C'}$ e simulado o comportamento do sistema com essa alteração. Os resultados da simulação estão representados pelo gráfico da Fig. 9 e tabela 4.

Tabela 4 – Tabela do comportamento do sistema de manufatura

Et^i	$U(Q_i)$	$U(S_i)$
Et^1	67.56%	84.68%
Et^2	60.93%	77.61%
Et^3	78.06%	95.33%
Et^4	46.97%	74.36%

Conforme se observa, o acréscimo de um recurso em Et^3 diminuiu a probabilidade de ocupação da fila e do serviço. Isso ocorre porque agora se tem o dobro de recursos para a realização da mesma tarefa. Também observa-se que as estações Et^1 e Et^2 reduziram os percentuais de ocupação da fila e do serviço, isso ocorre pelo fato da linha não estar mais tão congestionada em Et^3 .

Na Et^4 nota-se um aumento de percentuais de ocupação da fila e do serviço. Isso se dá em razão de Et^3 estar gerando mais fluxo de produção, fazendo com que Et^4 que antes estava maior parte do tempo ocioso, agora apresenta dados melhores de ocupação.

Em suma, pode-se dizer que o sistema de produção ficou mais sincronizado, mas ainda não se sabe o impacto que essa nova configuração causou na produção. Como forma de

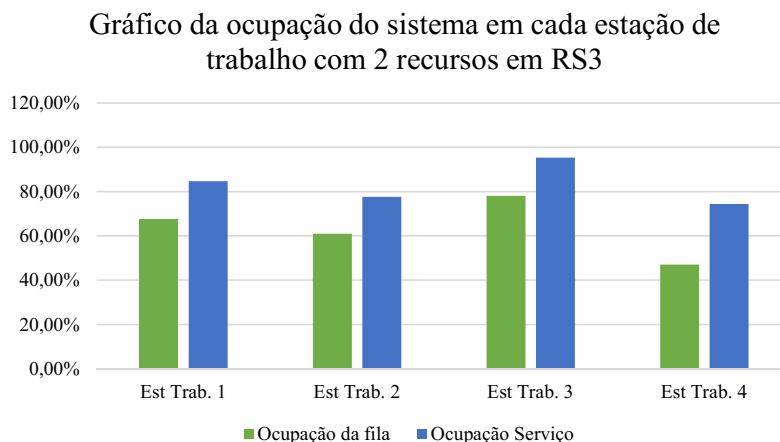


Figura 9 – Gráfico da ocupação do sistema em cada estação de trabalho com 2 recursos em RS3

validar esse experimento, mediu-se o tempo médio que a matéria prima permanece na fila, em cada estação de trabalho em $P^{C'}$, comparando-se com P^C e com os valores de pior e melhor caso. Os valores são representados pelo gráfico da Fig. 10.

Tabela 5 – Tabela da ocupação do sistema em cada estação de trabalho

Et^i	$TQ(P^C)$	$TQ(P^{C'})$	Pior caso	Melhor caso
Et^1	6.15 ut	4.23 ut	9 ut	0 ut
Et^2	7.58 ut	3.53 ut	10 ut	0 ut
Et^2	17.2 ut	11.36 ut	20 ut	0 ut
Et^2	1.08 ut	1.92 ut	6 ut	0 ut

Com esse experimento, analisando os resultados obtidos na tabela 5 pode-se considerar válidos os resultados dos experimentos do modelo P^C e $P^{C'}$, por apresentarem valores dentro do intervalo aceitável, entre o pior e o melhor caso. Quando simulou-se uma situação de saturação do sistema em Et^3 , nota-se que o modelo retornou valores de tempo de fila de 17.2ut, muito próximo do pior caso, conforme esperado, dadas as circunstâncias. Quando simulou-se a situação oposta, em Et^4 , observa-se que o valor de tempo na fila de 1.08ut fica muito próximo do melhor caso, também dentro do esperado.

Dessa forma, pode-se concluir que a reconfiguração do modelo P^C , expressa pelo modelo $P^{C'}$, aumenta os índices de produtividade do sistema de manufatura em 34.27% considerando o tempo total de fila do sistema de produção, visto que o tempo médio em que a matéria prima fica na fila diminuiu.

Entretanto, observa-se que o sistema de produção $P^{C'}$ ainda não está totalmente sincronizado, pelo fato de ainda haver desequilíbrio entre as probabilidades de ocupação da fila e do serviço entre as diversas estações de trabalho. Nesse caso, para dar prosseguimento ao processo de sincronização bastaria identificar um novo ponto de gargalo, que pode ser novamente em Et^3 , e repetir o processo, que corresponde ao ciclo de tarefas explicitado na sessão metodologia pela Fig. 4.

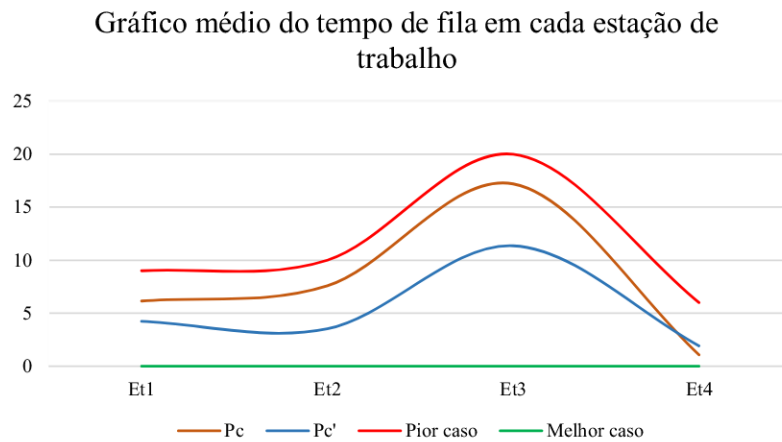


Figura 10 – Gráfico do tempo médio de fila em cada modelo no sistema de produção

3.3.5 Modelo Alternativo

Outro ponto a ser analisado e que também pode solucionar o problema no fluxo de produção é a realocação de recursos entre as estações de trabalho, ou seja, promover a fusão de duas ou mais Et . Como a Et^1 e a Et^2 de P^C possuem respectivamente os tempos de produção de $\lambda_{TS1} = 3$ e $\lambda_{TS2} = 2$ ut, pode-se criar uma estação Et^{12} com $\lambda_{TS12} = 5$ ut. Então, desenvolveu-se uma nova variação de composição de módulos com base em P , similar ao modelo P^C , mas agora adaptado para um sistema de produção com apenas três Et , causado pela fusão entre Et^1 e Et^2 , representado pela Fig. 11.

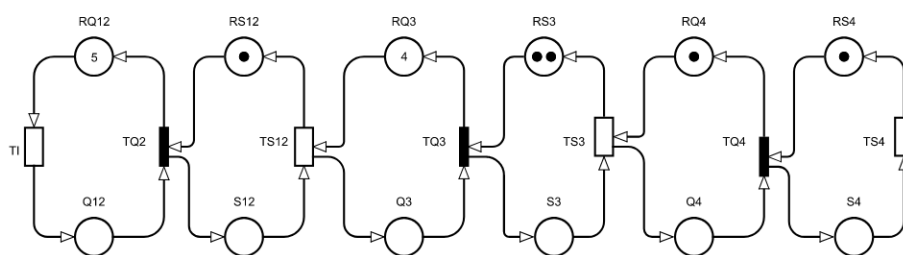


Figura 11 – Modelo Juncão P^{12}

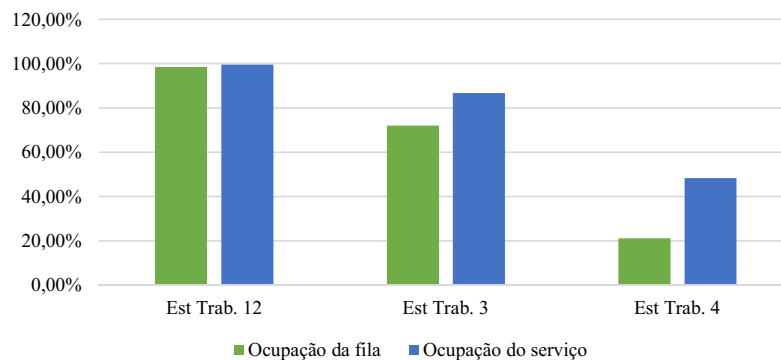
Os resultados da simulação desse modelo pode ser observado no gráfico da Fig. 12 e na Tabela 6.

Com a simulação, observa-se que a nova reconfiguração proposta não deixou o sistema de produção completamente sincronizado, as probabilidades de ocupação da fila e do serviço estão muito altas nas etapas iniciais em razão do delay de entrada λ_{TI} ser menor que o delay de processamento λ_{TS12} , e isso já causa um gargalo na entrada do fluxo de produção que compromete a sincronia de toda a linha.

Tabela 6 – Tabela do comportamento do sistema de manufatura com a junção de Et^1 e Et^2 em Et^{12}

Et^i	$U(Q_i)$	$U(S_i)$	$T(Q_i)$
Et^{12}	98.5%	99.56%	12.41 ut
Et^3	72.02%	86.72%	9.23 ut
Et^4	21.14%	48.32%	0.84 ut

Gráfico da ocupação do sistema de manufatura em cada estação de trabalho

Figura 12 – Gráfico da ocupação dos sistema de manufatura em cada estação de trabalho, com a junção de Et^1 e Et^2 em Et^{12}

Porém, quando analisamos o tempo total de fila, calculado pelo somatório do tempo de fila em cada uma das estações de trabalho, e representado por $T(Q_{total})$, observa-se que o modelo P^{12} obtém resultados muito melhores que o modelo P^C , e valores muito próximos com o modelo otimizado $P^{C'}$. Os valores de tempo total de fila em cada modelo estão representados abaixo:

- P^C : $T(Q_{total}) = 32.01\text{ut}$;
- $P^{C'}$: $T(Q_{total}) = 21.04\text{ ut}$;
- P^{12} : $T(Q_{total}) = 22.28\text{ ut}$.

Dados os valores de tempo de fila em cada um dos modelos, fica claro que o modelo $P^{C'}$ possui melhor desempenho e provavelmente irá produzir mais peças que os demais modelos estudados. Porém o modelo P^{12} pode ser uma alternativa atrativa visto que utiliza menos recursos que o sistema $P^{C'}$, e ainda está ocupando uma estação de trabalho a menos.

Para o sistema de manufatura em estudo, e baseando-se nos resultados obtidos, recomenda-se a reconfiguração da linha de produção, replicando o modelo P^{C12} . A recomendação justifica-se pelo fato do modelo P^{12} fazer uso de apenas 3 recursos de produção e mesmo assim apresentar resultados de otimização de tempo de fila de 30.39% em razão de P^C , enquanto que $P^{C'}$ necessita de 5 recursos de produção para uma otimização de tempo de fila de 34.27%.

Com base nos resultados dos experimentos fica claro que as GSPNs podem ser uma ferramenta de grande valor pra se estimar comportamentos de sistemas de manufatura. Comprovou-se pelas comparações entre modelos, uma melhora significativa de 34.27%

nos tempos de fila pra o sistema de manufatura em estudo, que ainda poderia ser melhorado mais, através da reconfiguração seguindo o fluxo metodológico da sessão [3.2](#).

4 Conclusão

Neste trabalho aplicou-se técnicas enxutas de sincronização de produção em sistemas de manufatura. A primeira abordagem foi a utilização de GSPNs para desenvolver um modelo genérico facilmente adaptável a diferentes perfis de fluxo de produção. Com a simulação desse modelo pode-se capturar como resposta estimativas de comportamento relevantes do sistema, como o tempo que um item fica ocioso na fila de produção e os percentuais de ocupação do serviço e da fila.

A utilização dessa ferramenta mostrou-se atrativa por permitir impor e estudar variabilidades sobre os parâmetros do sistema, sem a necessidade de reconfiguração do sistema real, o que tende a reduzir custos, tempo e desgaste na malha física. Para o sistema de produção em estudo apresentou-se modelos com redução do tempo médio de fila de 34.27% e 30.39%, indicando uma significativa melhoria no processo de fluxo.

Pautando-se nos sistemas de manufatura, essa abordagem permite a fácil aplicação de técnicas enxutas e de otimização de processos, fatores essenciais para sistemas de manufatura modernos. Para trabalhos futuros, pretende-se aplicar esse modelo em um sistema de manufatura real, a fim de validar a aplicação prática, algo que não foi conseguido realizar ao longo desse trabalho por razões de saúde pública.

Também para trabalhos futuros, pode-se reconfigurar e simular o modelo para um sistema de manufatura flexível, com estações de trabalho concorrentes entre si, tornando as GSPNs uma ferramenta realmente útil para essa finalidade, contribuindo essencialmente para a engenharia de produção.

Referências

- ALEXANDRIA, F. G. e Jéssyca Bessa e Lorena Moura e Darlan Barroso e José Wally Menezes e Auzuir de. AlteraÇÃO de um layout funcional para layout celular motivado pelos fundamentos da manufatura enxuta: Estudo de caso em uma indústria de transformadores. **HOLOS**, v. 6, n. 0, p. 156–169, 2015. ISSN 1807-1600. Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/1556>. Citado na página 6.
- ANTUNES, J. **Sistemas de Produção, Conceitos e práticas para projetos e gestão da manufatura enxuta**. [S.l.], 2008. Citado na página 1.
- COSTA, E. A. **Gestao Estratégica, Da empresa que temos para a empresa que queremos**. 2. ed. São Paulo: [s.n.], 2007. Citado na página 1.
- FERRARI, T. D. **Planejamento e Controle da Produção**. Grupo GEN, 2017. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597013726/>. Acesso em: 30 Jun 2020. Citado na página 6.
- FILHO, P. J. de F. **Introdução a modelagem e simulação de sistemas**. 1. ed. 2008: Visual Books, 2008. Citado na página 7.
- GROOVER, M. P. **Automação industrial e sistemas de Manufatura**. 3. ed. São Paulo: [s.n.], 2014. Citado na página 1.
- JUN, L. et al. Robust control reconfiguration of resource allocation systems with petri nets and integer programming. **Automatica**, 2012. Citado na página 2.
- LENKA, A.; DAI, C. A review of petri net modeling of dynamical systems. **Indian Journal of Computer Science and Engineering**, v. 3, 2012. Citado na página 2.
- LOPEZ, J.; J., M.; CAMPOS, J. De diagramas de atividades uml a redes de petri estocásticas: Engenharia de desempenho de aplicativos para software. **Association for Computing Machinery**, Nova York, NY, EUA, v. 29, 2004. Citado na página 9.
- MAI, C. et al. Adaptive petri nets – a petri net extension for reconfigurable structures. **The Tenth International Conference on Adaptive and Self-Adaptive Systems and Applications**, 2018. Citado na página 2.
- MARSAN, M. A. et al. Modelling with generalized stochastic petri nets. **SIGMETRICS Perform. Evaluation Rev.**, v. 26, n. 2, p. 2, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/288197.581193>. Citado na página 9.
- MORAES, C.; CASTRUCCI, P. **Engenharia de Automação Industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2008. Citado na página 3.
- Murata, T. Petri nets: Properties, analysis and applications. **Proceedings of the IEEE**, v. 77, n. 4, p. 541–580, 1989. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 8.
- OHNO, T. **O sistema Toyota de Produção**. Edição brasileira. [S.l.: s.n.], 1978. Citado na página 5.

OLIVEIRA, C. A. L. de. Uma abordagem para melhoria de workflow baseada em redes de petri estocásticas generalizadas. 2008. Citado na página 9.

PAOLI, F. M. Implantação da manufatura enxuta e a cultura organizacional: estudo de múltiplos casos. p. 47–69, 2016. Citado na página 6.

Silva, A. K. da. Métodos para avaliação e seleção de softwares de simulação de eventos discretos aplicados à análise de sistemas logísticos. p. 191, 2006. Citado na página 7.

SILVA, D. L. da; LOBO, R. N. **Planejamento e Controle da Produção**. Editora Saraiva, 2014. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597013726/>. Acesso em: 30 Jun 2020. Citado na página 4.

TEIXEIRA, M. et al. A quality-driven approach for resources planning in service-oriented architectures. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 12, p. 5366 – 5379, 2015. Citado na página 15.

TIME NET user Manual, Organization = Technische universit Berlin, Year= 2007, AdressA-
lemanha. [S.l.]. Citado na página 14.