

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



**Simulação da Dinâmica do Controle de Carga: Controle de Entrada/Saída
com Realimentação**

ALLAN FREITAS OLIVEIRA

MONOGRAFIA EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
Departamento de Engenharia de Produção

Allan Freitas Oliveira

**Simulação da Dinâmica do Controle de Carga: Controle de Entrada/Saída com
Realimentação**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Campus São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Produção

Orientador: Prof.^a. Dr.^a Juliana Keiko Sagawa

SÃO CARLOS-SP
2021

Observação: Este trabalho de conclusão de curso foi elaborado no formato de artigo para ser submetido a periódico científico, em conformidade com o disposto no Projeto Pedagógico do Curso de Engenharia de Produção, válido a partir de 2019. Por esta razão, o trabalho não contém os elementos pré-textuais e possui estrutura e formatação diferentes do formato convencional de trabalho de conclusão de curso. O Projeto Pedagógico mencionado pode ser acessado em: <https://www.prograd.ufscar.br/cursos/cursos-oferecidos-1/engenharia-de-producao/sao-carlos>.

SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DO CONTROLE DE CARGA: CONTROLE DE ENTRADA/SAÍDA COM REALIMENTAÇÃO

Allan Freitas Oliveira – allanfreitas17@gmail.com (Universidade Federal de São Carlos)

Juliana Keiko Sagawa – juliana@dep.ufscar.br (Universidade Federal de São Carlos)

Gasper Mušič - gasper.music@fe.uni-lj.si (University of Ljubljana)

Resumo

Com a crescente necessidade de respostas rápidas ante perturbações de demanda, a modelagem de sistemas dinâmicos surge como uma alternativa à simulação de eventos discretos, normalmente utilizada na aplicação de regras de controle de carga. Faltam, porém, aplicações que utilizem ferramentas de modelagem dinâmica para tratar de modelos de controle de carga, como controle dinâmico com laço de realimentação. Assim, o objetivo desse trabalho é modelar um sistema de Controle de Carga no Planejamento e Controle da Produção que atenda essa lacuna – com aplicação simultânea de controle de entrada e saída - e analisar seu comportamento perante perturbações na demanda. A política de liberação da *job pool* (controle de entrada) baseia-se na carga das duas máquinas a jusante e da própria *pool*. O ajuste de capacidade das máquinas (controle de saída) é baseado no nível do estoque em processo antecedente. Foram conduzidas 3 simulações com variações na demanda. Os resultados mostraram que o controle de realimentação implementado leva o sistema a atingir o equilíbrio nas simulações A e B, onde os níveis dos estoques intermediários atingem os valores de referência e as frequências de processamento das máquinas estabilizam. Na Simulação C o sistema respondeu às variações cíclicas de demanda com um valor máximo de 15% de variação na capacidade. Mesmo com um aumento de 20% na demanda, os valores de estoque em processo não variaram substancialmente. Essa abordagem inédita fornece diretrizes prescritivas para um chão de fábrica mais equilibrado e previsível, além de reativo às perturbações.

Palavras chave: controle de carga, modelagem dinâmica, controle de entrada e saída, teoria de controle, planejamento e controle da produção, sistema de malha fechada

Abstract

With the growing need for a fast response to the demand disturbances, dynamic models rise as an alternative to discrete events simulation, usually used on the application of Workload Control rules. However, applications of dynamic modeling tools, like dynamic control with feedbacks, to Workload Control models, are not explored on literature. Therefore, the objective of this paper is to model a Production Planning and Control Workload Control system which fills this gap – with the implementation of simultaneous input and output control – and analyze the system's behavior up to demand perturbations. The order release policy (input control) is based upon the load of the machines downstream and also the load of the pool itself. The capacity adjustment of each machine (output control) is based on the level of the preceding buffer. Three simulations with demand/input fluctuation were carried out. The results show that the feedback control implemented leads the system to balance on simulations A and B, in which the buffer levels reach the reference levels and the processing frequencies stabilize. In Simulation C, the system responded to the cyclic demand disturbances with a maximum increase of 15% on the capacity adjustment. Furthermore, even

with a 20% demand increase, the buffer levels didn't vary significantly. This novel approach (closed loop) provides prescriptive directions for a more balanced and predictable shop floor, and also reactive to disturbances.

Keywords: workload control, dynamic modeling, input and output control, control theory, production planning and control, closed-loop system.

1. INTRODUÇÃO

O Planejamento e Controle da Produção (PCP) pode ser visto como um fator determinante para o desempenho da organização e, sendo assim, um ponto chave nas empresas segue sendo a escolha de sistemas de PCP. Este é um fator que afeta significativamente o desempenho da organização, por estar relacionado à sua função principal de produzir bens ou serviços. Tal decisão deve estar bem alinhada às características do sistema de produção em questão. Alguns autores, como MacCarthy e Fernandes (2000), por exemplo, propõe sistemas multidimensionais de classificação de sistemas de produção, de tal forma que as várias nuances do sistema sejam bem entendidas e possibilitem a escolha de um sistema de PCP adequado.

As abordagens clássicas do PCP não podem ser tão bem aplicadas a empresas que não trabalham com previsão de demanda, como as empresas que operam por encomenda, já que tais abordagens são focadas em grandes empresas com ambiente repetitivo (Shaladdin Muda & Hendry, 2003). Por outro lado, as empresas que produzem sob encomenda vêm apresentando uma importância cada vez maior no mercado, considerando-se a crescente demanda por produtos personalizados. Nesse sentido, o sistema de Controle de Carga (WLC) é uma alternativa para empresas com sistema MTO (Make-To-Order) e fluxo de produção do tipo job shop, em que os produtos fabricados possuem diferentes roteiros de produção. Para Lödding (2012), o Controle de Carga é uma técnica simples para o controle da produção que equilibra as cargas das estações de trabalho dentro de um sistema de produção, e só permite liberações controladas para o chão de fábrica, eliminando a variabilidade de entrada dos pedidos. O termo carga diz respeito à capacidade que é requerida num sistema de produção.

O ponto chave do Controle de Carga é o entendimento de que a produção no modelo de job shops inevitavelmente vai apresentar filas de ordens de produção/material em processo competindo pela capacidade dos centros de trabalho. Sendo assim, o conceito de *Workload Control* busca tornar as filas pequenas e estáveis, ou mais precisamente, estabelecer níveis baixos e estáveis de carga direta (Breithaupt, Land e Nyhuis, 2002).

Deve-se observar, também, que o Controle de Carga, por meio da redução e balanceamento do *work-in-process*, torna possível a existência de um chão de fábrica mais transparente, e sem necessidade de um apressamento do sistema (Breithaupt, Land e Nyhuis, 2002). É válido mencionar que tal metodologia pode ser utilizada por empresas de qualquer porte que trabalham sob encomenda, entretanto, um nicho de aplicação interessante é o das pequenas empresas.

As regras de Controle de Carga são geralmente aplicadas no domínio discreto, ou seja, a entrada do sistema de produção são os pedidos individuais. Assim, a metodologia é geralmente estudada na academia utilizando-se simulação de eventos discretos, com a chegada de ordens, os prazos e os tempos de processamento sendo modelados como distribuições de probabilidade (Sagawa e Land, 2018).

Por outro lado, exige-se frequentemente a habilidade de modificar os planos de produção rapidamente, em resposta a mudanças nas demandas de mercado e outras perturbações. Nesse sentido, a modelagem de sistemas dinâmicos é uma alternativa à simulação de eventos discretos (DES), pois permite um entendimento mais analítico da dinâmica fundamental do sistema. Enquanto a simulação de eventos discretos é um método de tentativa e erro (Duffie, Roy, & Shi, 2008), se usada isoladamente, a modelagem de sistemas dinâmicos permite que sejam adicionados laços de realimentação ao sistema, i.e. controle automático. Há ainda ferramentas que auxiliam a encontrar boas opções para o controle do sistema (advindas da Teoria de Controle).

Usualmente, as áreas de Modelagem de Sistemas Dinâmicos e Teoria de Controle costumam ser aplicadas em sistemas eletrônicos e mecânicos. Contudo, Lin, Naim e Spielger (2019) comentam sobre como a teoria de controle possibilita que haja um melhor entendimento da dinâmica do sistema, de forma que um projeto viável economicamente no longo prazo seja criado. Tal entendimento pode ser obtido por meio da utilização dos já citados laços de realimentação e também de algumas ferramentas analíticas que tornam possível a solução dos problemas de alta variação na demanda, sem que se elevem os níveis de estoque ou haja uma falha no atendimento da demanda. Sagawa e Music (2019) também salientam que a utilização da teoria de controle possibilita interpretações interessantes e relevantes sobre o comportamento dinâmico de sistemas de produção.

Ferney (2000), por sua vez, propõe que estações produtivas sejam representadas com base em analogias com componentes como: resistor, capacitor e fonte de esforço. Esse tipo de

representação pode ser encontrado nos trabalhos de Sagawa, Nagano e Speranza Neto (2017), e se mostra relevante para a aplicação de teoria de Controle no contexto de simulação do Controle de Carga.

Na área de Controle de Carga, Thürer, Stevenson e Land (2016) propõem a implementação simultânea de controles de entrada e saída, e analisam o impacto conjunto dessa implementação. Assim como a maior parte dos trabalhos relacionados ao assunto, os autores trabalham com um sistema discreto e com simulação de eventos discretos.

Essas discussões se relacionam às seguintes questões de pesquisa:

- Como realizar uma representação do sistema WLC alternativa aos modelos de simulação de eventos discretos, visando a obtenção de vantagens associadas às modelagens de sistemas dinâmicos?

- Qual o comportamento do modelo proposto? Ele responde bem a perturbações na demanda?

Seguindo o direcionamento das questões de pesquisa, esse artigo tem como objetivo modelar um sistema de PCP de Controle de Carga como um sistema dinâmico contínuo com laço de realimentação (i.e. um sistema de malha fechada), e analisar o comportamento do sistema perante perturbações na demanda.

A implementação desse modelo em malha fechada (controlado automaticamente por um controlador) é uma abordagem incomum para simulações de WLC.

Uma lacuna adicional na área de pesquisas de Controle de Carga está na ausência de pesquisas de WLC que abordem, simultaneamente, controles de entrada e de saída. O controle de entrada consiste em restringir a liberação de ordens, enquanto o controle de saída refere-se aos ajustes de capacidade das máquinas (nesse trabalho, refere-se ao controle das frequências de processamento das máquinas). Tradicionalmente, o enfoque da literatura está nas implementações relacionadas ao controle de entrada apenas, sendo escassas as publicações que abordem controle de saída, e ainda mais escassas as publicações abordando a aplicação simultânea dos controles. O modelo proposto também endereça essa lacuna ao propor regras de controle pautadas na aplicação de ambos os controles, de entrada e de saída.

O artigo se desenvolverá da seguinte maneira: a seção 2 traz uma Revisão de Literatura referente a modelagens de controle de carga, com ênfase em modelagem dinâmica; a seção 3 especifica com maiores detalhes como se desenvolveram as simulações; a seção 4 apresenta

detalhes da implementação e discute os resultados obtidos nas simulações realizadas; e por fim, a seção 5 apresenta a conclusão e possibilidades de pesquisa futura no assunto.

2 – REVISÃO DE LITERATURA

Para construir as bases teóricas desta pesquisa, foram procurados artigos que apresentassem algum tipo de relação entre WLC e Teoria de Controle, ou seja, artigos que abordassem a aplicação de Teoria de Controle ao WLC. Mais especificamente, foram buscados modelos de WLC de malha fechada, que incluíssem controle de realimentação (feedback control). Nesse sentido, não foi encontrado nenhum modelo que apresentasse tal controle exatamente como abordado na Teoria de Controle. Porém, foram encontrados artigos que de alguma forma realizam ajustes dinâmicos dos parâmetros, como é o caso de Thürer, Stevenson e Land (2016), que reajustam os parâmetros de capacidade, ou seja, fazem o controle de saída em função do estado do chão de fábrica, mas sem utilizar um controlador. O ajuste é feito aplicando-se regras pré-determinadas de controle e os incrementos são valores constantes. Foram também encontrados artigos de WLC inspirados no controle autônomo e em sistemas multi-agentes, nos quais os módulos de liberação de ordens e de despacho no chão de fábrica são modelados como agentes.

Foram procurados também artigos que abordassem o controle simultâneo de entrada e de saída no WLC. Nessa linha, foram encontradas algumas abordagens teóricas, como Kingsman, Tatsiopoulos e Hendry (1989) e, também, uma aplicação de simulação vista em Thürer, Stevenson e Land (2016). Os artigos considerados relevantes para o desenvolvimento da discussão serão brevemente abordados a seguir.

Wu e Weng (2005), Weng et al. (2008) e Akillioglu, Ferreira e Onori (2013) desenvolvem um sistema de controle de carga utilizando multi-agentes. Os dois primeiros artigos se relacionam diretamente, com ambos trabalhando com multi-agentes que têm papel na coordenação da entrada de ordens, liberação de ordens e sequenciamento em tempo real. Wu e Weng (2005) trabalham com três agentes. O primeiro agente, de entrada de ordens (OEA), é responsável pelos pedidos em negociação, colocados pelos clientes, atuando na determinação das datas de entrega por meio de uma equação definida para tempo de fluxo, que leva em consideração informações como: número de ordens no chão de fábrica no momento t , número de máquinas, utilização do chão de fábrica, entre outras. Tais informações são obtidas por meio de *feedback*, sendo coletadas pelos outros agentes e enviadas para o OEA. O segundo agente, agente de ordens (JA), atua no roteamento das ordens, enquanto o terceiro

agente, agente de máquinas (MA), atua na alocação das ordens às filas de cada máquina. Por sua vez, o trabalho desenvolvido por Weng et al. (2008) apresenta uma abordagem similar, mas que utiliza quatro agentes. O primeiro deles, agente de entrada de ordem (OEA), apresenta o mesmo funcionamento já apresentado em Wu e Weng (2005), e se comunica com todos os outros agentes, solicitando e repassando informações. O segundo, agente de liberação de ordens (JRA) trabalha como um mecanismo de liberação de ordens, com objetivo de regular o *work in process*. O agente de liberação recebe as ordens do OEA e redireciona essas ordens para a *job pool*. O agente de roteamento (RSA) consiste em dois sub-agentes: o agente de ordens (JA) e o agente de máquinas (MA), que apresentam funcionalidades análogas às vistas aos agentes de mesmo nome na pesquisa anterior dos autores. Por fim, o último agente, agente de feedback informacional (IFA), utiliza uma equação estabelecida para estimar o atraso médio, um parâmetro que será utilizado pelos outros agentes, especialmente o OEA, na tomada de decisão (Weng et al., 2008).

Akillioglu, Ferreira e Onori (2013), por sua vez, apresentam uma abordagem estruturada com base em três agentes de planejamento. O JPA (agente da *job pool*) contém as informações referentes aos tipos de produtos disponíveis na *job pool*, além de outras informações referentes a tais produtos, como tempos de processamento e prazos de entrega. Esse agente se comunica com o agente de liberação de ordens (JRA) para oferecer as informações referentes à *job pool* e aos tipos de produtos. O segundo agente é o agente de avaliação do chão de fábrica (SAA), responsável pela coleta de informação do chão de fábrica quanto às ordens já liberadas, como as operações faltantes, entre outras. Esse agente também executa a simulação do chão de fábrica de acordo com dados coletados. Os resultados obtidos são, então, enviados para o JRA. O último dos agentes, agente de liberação de ordens (JRA), atua no desenvolvimento de agentes de produto (PAs), que são abstrações lógicas de cada produto utilizadas na construção de análises quanto ao impacto que a liberação de cada produto terá no status do chão de fábrica. Todas as informações importantes e necessárias para atuação do JRA são resultado da simulação realizada pelo SAA ou foram coletadas pelo JPA.

Paralelos podem ser estabelecidos entre os trabalhos citados anteriormente, afinal, o JSA visto em Akillioglu, Ferreira e Onori (2013) apresenta uma função semelhante à função combinada dos agentes OEA e JRA de Weng et al. (2008), e o SAA apresenta um funcionamento semelhante ao RSA. Porém, é válido salientar que o modo como esses agentes atuam é diferente, pois a maneira como são estruturadas as liberações de ordens

variam consideravelmente. Weng et al. (2008) trabalham com cargas contínuas e agregadas como mecanismo de liberação de ordens, enquanto Akillioglu, Ferreira e Onori (2013) trabalham com índices de prioridade, referentes a cada produto, para realizar o sequenciamento e liberação.

Como mencionado, uma das lacunas existentes na área de pesquisas de Controle de Carga está na ausência de pesquisas de WLC que abordem, simultaneamente, controles de entrada e de saída. Foram procurados artigos que se encaixassem nesse contexto, e os que foram obtidos serão apresentados e discutidos na sequência.

Em Kingsman, Tatsiopoulos e Hendry (1989), diferentes possibilidades de controle de entrada e saída são apresentadas conceitualmente (Fig. 1).

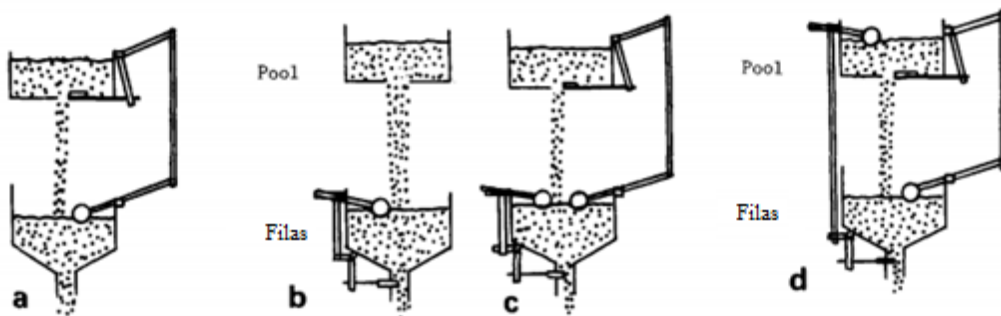


Figura 1 – Representação visual de conceitos de controle de entrada e saída. a: controle de entrada, b: controle de saída, c,d: duas abordagens de controle de entrada/saída.

Fonte: Adaptado de Kingsman, Tatsiopoulos e Hendry (1989)

Nas Figuras 1.a, 1.b, 1.c e 1.d é apresentada uma analogia entre funis e os centros de trabalho. Em tal analogia, o compartimento superior representa a espera das ordens no estoque inicial de ordens ou, em outras palavras, na *pool*. Enquanto isso, o compartimento inferior, ou seja, o controle de vazão dos funis, representa a saída, ou seja, o ajuste de capacidade. É interessante observar que alguns autores realizam essa analogia visualizando o funil como o chão de fábrica como um todo ou como um centro produtivo. Analisando mais profundamente tal analogia, a Figura 1.a representa um sistema de controle de entrada, no qual o foco está em controlar a quantidade de trabalho permitida com base na carga do chão de fábrica (ou seja, as filas). Esse é o conceito mais adotado em pesquisas de WLC. De maneira similar, a Figura 1.b representa o controle de saída, onde a quantidade de trabalho recebida não é controlada e o foco de controle é colocado no ajuste de capacidade dos centros produtivos, de forma a manter as filas em um nível constante. Nesse caso, é o controle de saída que se baseia na carga do chão de fábrica. Por outro lado, as Figuras 1.c e 1.d apresentam alternativas de

controle simultâneo de entrada e saída. Na Figura 1.c, para se manter um nível constante de filas, a liberação de ordens e as capacidades dos centros produtivos são ambas controladas (ou sejam têm-se controle de entrada e de saída simultaneamente baseados na carga do chão de fábrica). Na Figura 1.d, por sua vez, a liberação de ordens é controlada em função da carga dos centros produtivos, enquanto a capacidade dos centros é controlada em função dos níveis da *job pool* (Kingsman et al., 1989).

Kingsman (2000) propõe uma análise interessante quanto a controles de entrada e saída, discutindo como o conceito pode ser desenvolvido em sistemas de produção, e destacando sua importância para empresas MTO de manufatura versátil. O autor aborda como o controle simultâneo de entrada e saída pode ser aplicado nos diferentes estágios da produção, como entrada de ordens, aceitação de ordens, entre outros, e apresenta modelos matemáticos desenvolvidos para auxiliar nas aplicações.

Thürer, Stevenson e Land (2016) simulam a aplicação simultânea do controle de entrada e saída e analisam o efeito de tal aplicação conjunta no sistema. No modelo, as ordens se concentram em uma *pool* anterior ao chão de fábrica, e aguardam a liberação que será realizada de acordo com o método LUMS COR. Os ajustes de capacidade são representados na simulação como reduções do tempo de processamento das ordens, e são implementados por meio de três parâmetros: tamanho da redução do tempo de processamento (α), limite de carga que dispara os ajustes de capacidade (β) e o limite que sinaliza que a redução de carga é suficiente para que o ajuste possa cessar (representado por γ). Esses ajustes representam o controle de saída do sistema. O estudo considerou 5 níveis de ajustes para α (0, 10, 20, 30 ou 40%), 3 níveis para β (85, 90 ou 95 percentil), e 3 níveis para γ (0, 5 e 10 pontos percentuais) (Thürer, Stevenson e Land, 2016).

Ainda sobre o trabalho de Thürer, Stevenson e Land (2016), é válido salientar que os autores trabalham com modelagem discreta, trabalhando com incrementos constantes de capacidade, pertencentes a um conjunto finito de valores. Tal ajuste de capacidade, como já mencionado, ocorre em formato de degrau, ou seja, quando ocorre um pico de utilização, maior do que 85%, por exemplo, o sistema ativa um ajuste de capacidade constante, que volta a ser desativado quando a utilização atinge novamente valores inferiores a 85%. A modelagem dinâmica de um sistema WLC, ou seja, sua representação como um sistema dinâmico contínuo, utilizando equações diferenciais, permite a aplicação de controle de realimentação (utilizando controladores). A metodologia implementada nesse trabalho, por fim, incita novos questionamentos relacionados à definição de parâmetros no WLC e ao comportamento do sistema caso tais parâmetros sejam definidos de maneira dinâmica e

contínua, com base, por exemplo, na carga instantânea do chão de fábrica, ao invés de serem definidos como valores constantes/fixos, obtidos com base em experimentos.

3 – MODELAGEM E SIMULAÇÕES

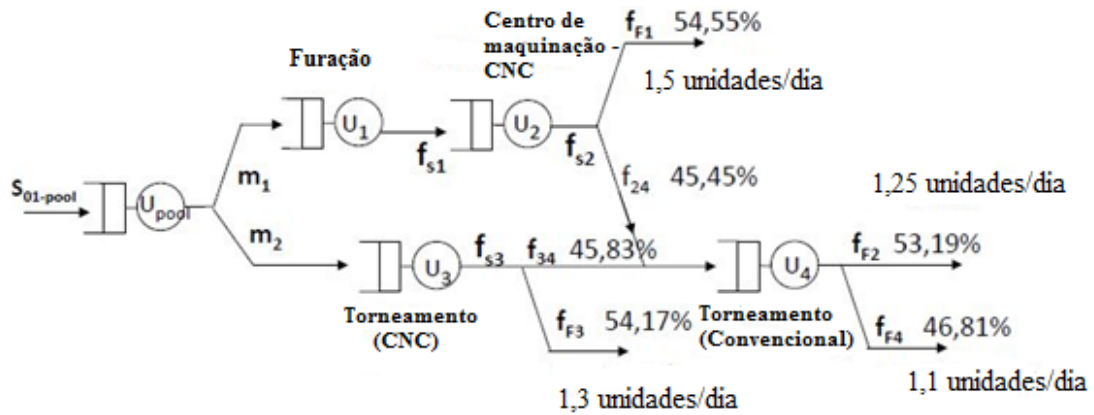


Figura 2: Sistema composto por 4 estações de trabalho e 1 *job pool*.

Fonte: Sagawa e Land (2018).

O trabalho aqui desenvolvido se utiliza do mesmo sistema base trabalhado por Sagawa e Land (2018), sendo que o mesmo consiste em um sistema de produção composto por quatro estações de trabalho, todas alimentadas por uma mesma fonte. Além das quatro estações de trabalho, esse modelo conta também com uma outra estação representando a *job pool*, ou seja, o estoque inicial de ordens. Esse sistema opera no regime de *job shop* unidirecional, ou seja, existem diferentes famílias de produtos e cada uma possui uma rota diferente pelas 4 estações apresentadas, seguindo uma direção principal, sem retrocessos. Uma representação desse sistema pode ser vista na Figura 2.

O sistema aqui abordado trabalha com controle de entrada e controle de saída sendo executados simultaneamente. O controle de entrada consiste na liberação de ordens, o que no modelo em questão, corresponde ao controle da frequência de processamento da *job pool*, U_{pool} . O controle de saída, por outro lado, refere-se ao controle das frequências de processamento de cada máquina, indo de U_1 a U_4 . Tal controle pode ser interpretado como ajustes na capacidade de processamento das máquinas.

A abordagem utilizada no desenvolvimento da modelagem se baseia em grafos de ligação, que são uma representação da transmissão de energia entre elementos ideais. De tal representação é possível derivar seu modelo matemático com base na correspondência de cada elemento ideal e sua equação constitutiva, definida de acordo com as leis da Física (Sagawa e Land, 2018)

A abordagem por *bond graphs* tradicionalmente não foi desenvolvida para utilização em sistemas de manufatura, porém, algumas adaptações foram realizadas tornando tal aplicação possível. Ferney (2000) propõe que estações produtivas sejam representadas com base em analogias com componentes como: resistor, capacitor e fonte de esforço. Nesse contexto, a variável física básica é o fluxo de material ou de quantidade de trabalho, o que implica que o modelo resultante seja baseado em fluxos e taxas, como a quantidade de trabalho por unidade de tempo ou a taxa de fluxo de material (medidos em unidades/tempo). Ainda de acordo com Ferney (2000), partindo do pressuposto que os *buffers* apresentam capacidade ilimitada, o fluxo de saída de cada centro produtivo i pode ser definido como:

$$f_i = U_i \min(1, q_i) \quad (1)$$

onde U_i representa a frequência de processamento da estação de trabalho em questão e q_i a quantidade de material armazenada no buffer que alimenta o centro de produção (estoque em processo, em unidades). Essa formulação é baseada na analogia entre o fluxo de material e a corrente elétrica que passa em um resistor, de forma que a frequência U_i é inversa à resistência. Maiores detalhes quanto a essa formulação e a utilização da função mínimo podem ser obtidos em Ferney (2000).

A taxa de armazenagem ou consumo de material \dot{q}_i em um *buffer* intermediário pode ser vista como a diferença entre os fluxos de entrada e saída, ou seja:

$$\dot{q}_i = f_{ei} - U_i \min(1, q_i) \quad (2)$$

onde f_{ei} é o fluxo de entrada em determinada estação i , e U_i e q_i são definidos como em (1). Maiores detalhes da aplicação dessas equações em sistemas multi-produtos podem ser encontrados em Sagawa, Nagano e Speranza Neto (2017). O sistema simulado nesse trabalho parte da representação vista na Figura 2, como já citado. Nesse modelo, os centros produtivos e a *job pool* são os elementos controlados, de forma que a variável manipulada do sistema seja a frequência (tanto de processamento das máquinas, representada por U_i com $i = 1, 2, 3$ e 4 , quanto de liberação, representada por U_{pool}); a variável controlada, por sua vez, é a quantidade em estoque, tanto na *pool* (q_{pool}) quanto nos *buffers* intermediários ($q_i, i = 1, 2, 3$ e 4); os fluxos de cada seção do sistema também são variáveis que são influenciadas pela aplicação dos controles. Por fim, têm-se que o percentual de divisão do fluxo de material são parâmetros calculados com base em uma função do mix de produção; as taxas de demanda são mantidas fixas porém podem ser alteradas de forma a representarem algum grau

de volatilidade da demanda; e m_1 e m_2 também são parâmetros calculados de forma a manter o balanceamento do sistema (maiores informações quanto a esses cálculos podem ser obtidas em Sagawa e Land (2018)). Olhando de maneira mais específica, as variáveis podem ser definidas como:

- \dot{q}_{pool} : taxa de liberação de ordens/materiais na *pool*. Corresponde à diferença entre o fluxo de entrada e de saída na *pool*;
- \dot{q}_i : taxa de armazenagem ou consumo de material em cada *buffer* i . No caso em questão, $i = 1, 2, 3$ e 4 ;
- q_{pool} : quantidade de ordens esperando liberação na *pool*;
- q_i : quantidade de material estocada em cada um dos *buffers* i , com $i = 1, 2, 3, 4$;
- U_{01pool} : frequência da fonte de material/ordens que alimenta a *pool*. É a entrada primária do sistema, representa a entrada de pedidos;
- U_{pool} : frequência na qual é realizada a liberação de ordens para o sistema. No sistema modelado, a liberação é vista como uma operação e a *pool* trabalha de maneira similar a um centro de trabalho;
- U_i : frequência de processamento da máquina i , com $i = 1, 2, 3, 4$

A aplicação da equação (2) à *pool* e ao *buffer* da estação 2 origina, respectivamente:

$$\dot{q}_{pool} = -U_{pool} \min(1, q_{pool}) + U_{01pool} \quad (3)$$

$$\dot{q}_2 = U_1 \min(1, q_1) - U_2 \min(1, q_2) \quad (4)$$

A estação 2 está conectada em série com a estação 1, sendo assim, a saída da estação 1 é a entrada da estação 2, como pode ser visto na equação 4. Como já citado, esse trabalho aborda um *job shop* composto por 4 famílias de produtos, com diferentes demandas, diferentes rotas, porem unidirecional. O mix de produtos é calculado com base nas demandas para cada produto e na demanda total do sistema. O Quadro 1 apresenta os dados relacionados a famílias, roteiros de produção e demandas. Esses valores possibilitam os cálculos dos percentuais de material que seguem para cada parte do sistema, como visto na Figura 2 (Sagawa e Land, 2018).

Quadro 1: Famílias de produto, roteiros de produção e demanda

S1	S2	S3	S4	Taxa de demanda (unidades/dia)
----	----	----	----	-----------------------------------

Família 1	X	X			1.5
Família 2	X	X		X	1.25
Família 3			X		1.3
Família 4			X	X	1.1

Fonte: Sagawa e Land (2018).

Tendo como base junções convergentes ou divergentes, também por conta dos princípios dos *bond graphs*, essa modelagem é construída. As junções convergentes podem ser representadas como uma junção-1 na metodologia de *bond graphs*, o que estabelece a conservação de fluxo como vista em:

$$f_{si} = \sum_{p=1}^P f_{ep} \quad (5)$$

onde f_{si} representa o fluxo de saída em uma determinada junção convergente i , e f_{ep} , com $p = 1, 2, \dots, P$, são os ramos de chegada de fluxo. Por outro lado, as junções divergentes de um sistema de manufatura podem ser representadas por transformadores na metodologia de *bond graphs*, de forma que o fluxo de saída da transformada q (ou seja, f_{sq}) é o fluxo total f_{ei} multiplicado pelo módulo m_q :

$$f_{sq} = m_q f_{ei} \quad (6)$$

com $\sum_q^Q m_q = 1$ e $q = 1, 2, \dots, Q$. (Sagawa e Land, 2018)

Para a primeira junção divergente (Figura 2), a qual divide o fluxo para as máquinas 1 e 3, os módulos dos transformadores m_1 e m_2 são deixados como variáveis de forma a aumentar os graus de liberdade da *pool*. Sendo assim, aplicando as equações (6) e (2), respectivamente, à primeira junção divergente e às máquinas 1 e 3, obtêm-se:

$$\dot{q}_1 = m_1 U_{pool} \min(1, q_{pool}) - U_1 \min(1, q_1) \quad (7)$$

$$\dot{q}_3 = m_2 U_{pool} \min(1, q_{pool}) - U_3 \min(1, q_3) \quad (8)$$

As junções divergentes restantes do sistema apresentam módulos definidos, ou seja, o fluxo é dividido de acordo com percentuais médios calculados com base nos dados apresentados na Tabela 1. Com a aplicação das equações nas junções convergentes e divergentes da Figura 2, obtêm-se:

$$f_{e4} = f_{24} + f_{34} \quad (9)$$

$$f_{24} = 0,4545U_2 \min(1, q_2) \quad (10)$$

$$f_{34} = 0,4583U_3 \min(1, q_3) \quad (11)$$

$$\dot{q}_4 = 0,4545U_2 \min(1, q_2) + 0,4583U_3 \min(1, q_3) - U_4 \min(1, q_4) \quad (12)$$

As taxas de armazenagem ou consumo de material nos *buffers* representam o estado do sistema, já que a integral de tais taxas corresponde ao *work in process* instantâneo no chão de fábrica e a quantidade de ordens na *pool*. Reorganizando as equações (3), (7), (4), (8), e (12) é possível obter a representação de estado do sistema, como visto em:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_{pool} \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ m_1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ m_2 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,4545 & 0,4583 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{pool} \min(1, q_{pool}) \\ U_1 \min(1, q_1) \\ U_2 \min(1, q_2) \\ U_3 \min(1, q_3) \\ U_4 \min(1, q_4) \\ U_{01pool} \end{bmatrix} \quad (13)$$

A variável que vai permitir ao controlador realizar comparações com as referências para definir os direcionamentos do sistema é o chamado erro relativo, calculado para cada *buffer*. Tal erro é calculado de acordo com a equação vista em:

$$e_i = \left(\frac{q_i - q_{ic}}{q_{ic}} \right) \quad (14)$$

onde e_i é o erro relativo do *buffer* i , q_i é o nível instantâneo do *buffer* em questão (quantidade de material) e q_{ic} é o nível de referência do *buffer*.

Na abordagem original de Controle de Carga, a liberação de ordens é realizada apenas em função da carga do chão de fábrica. Visando que o sistema consiga atingir maiores níveis de responsividade, a abordagem utilizada nesse trabalho vai além do proposto na abordagem original, apresentando um cenário onde o controle de entrada, ou em outras palavras, o controle de liberação de ordens da *job pool* (U_{pool}) é uma função da carga do chão de fábrica, e também, do seu próprio estoque de ordens. Essa carga é medida com base nos níveis dos estoques intermediários (*buffers*) das máquinas 1 e 3, que são as estações diretamente alimentadas pela *pool*, localizada à montante, e também, dos valores apresentados pelo própria *pool* quanto a ordens esperando liberação.

Já o controle de saída, que corresponde ao ajuste de capacidade de determinada máquina, será realizado de forma que o controle da frequência de processamento de cada máquina responda à quantidade de estoque presente no próprio *buffer* que antecede a

máquina, individualmente. Sendo assim, o controle das máquinas apresenta uma visão local do sistema, onde as informações que direcionam a decisão do controlador são obtidas única e exclusivamente do respectivo estoque de cada máquina.

Trazendo uma representação análoga à mostrada na Figura 1, a Figura 3 apresenta a visualização do controle de entrada e saída utilizado ao longo das simulações.

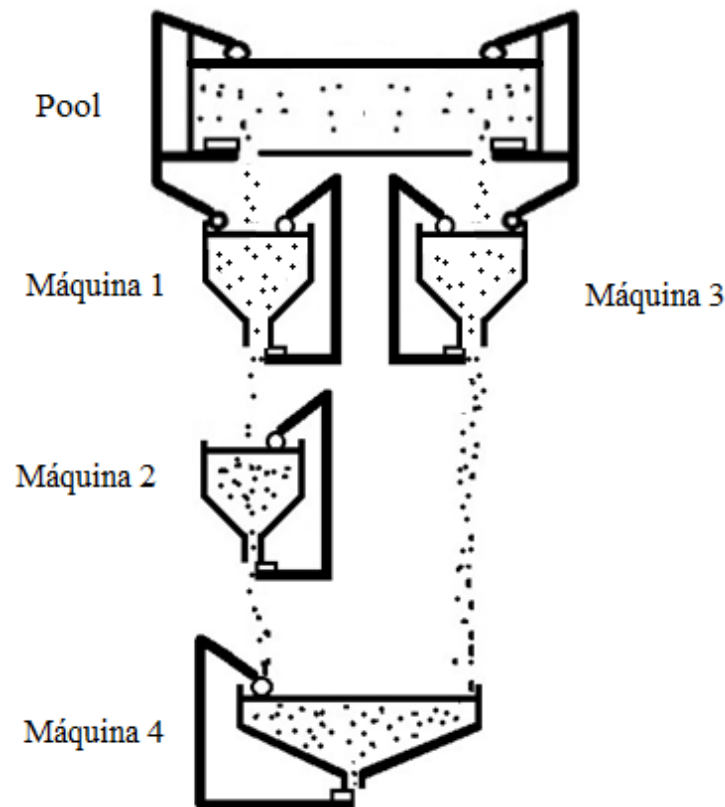


Figura 3: Representação visual das regras de controle de entrada e saída .

Fonte: Autor (2021).

Como é possível notar, a regra de controle utilizada se assemelha bastante à regra de controle vista na Figura 1.c, com os controles de entrada e de saída sendo ambos construídos com base na carga do chão de fábrica. Porém, a regra apresentada na Figura 3, e utilizada nesse trabalho, conta com um diferencial já que o controle de entrada se baseia também na carga da *pool*, algo que não foi visto em nenhuma das abordagens de Kingsman, Tatsiopoulous e Hendry (1989). Essa alteração dá uma nova perspectiva ao controle de entrada, possibilitando uma visão mais global do sistema já que ele se baseia simultaneamente na carga do chão de fábrica e na carga da *pool*.

De modo a também auxiliar na simplificação do entendimento do fluxo de informação do sistema, as relações estão representadas na Figura 4.

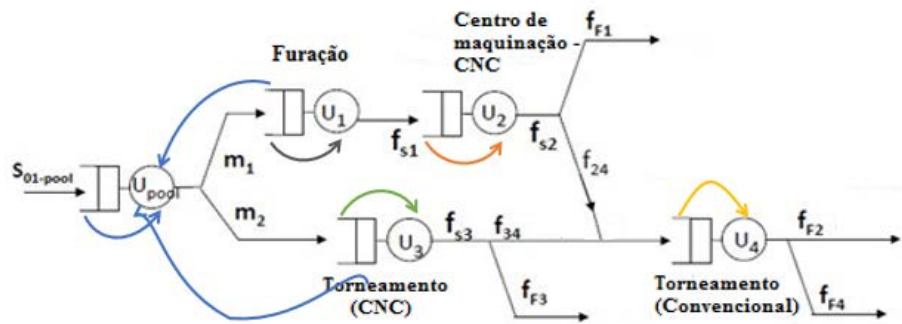


Figura 4: representação do fluxo de sinais no esquemático do sistema.
 Fonte: adaptado de Sagawa e Land (2018)

Na primeira simulação implementada, intitulada Simulação A, o sistema foi programado para iniciar com valores de estoque nulos, de forma que fosse possível observar a resposta do sistema, como ele se comportaria, e se conseguiria alcançar o equilíbrio. Os valores estão contidos na Tabela 2.

Tabela 1: parâmetros da simulação A.

Componente	Referência (unidades)	Estado inicial (unidades)
Pool	7	0
Buffer da máquina 1	7	0
Buffer da máquina 2	7	0
Buffer da máquina 3	7	0
Buffer da máquina 4	6	0

Fonte: Autor (2021)

Outras duas simulações foram desenvolvidas, intituladas Simulações B e C. O objetivo com tais simulações foi verificar qual seria o comportamento do sistema com o acréscimo de perturbações no sinal da fonte material e como ocorreria a resposta dinâmica do sistema. Em tais simulações, o sistema é iniciado operando já nos valores de referência, de forma que seja possível observar como as perturbações impactam um sistema que estava no estado de equilíbrio, e se posteriormente, o sistema conseguiria alcançar novamente tal estado. É importante salientar que perturbações, flutuações e outras alterações na entrada de ordens, que nesse caso representam a demanda externa, são muito comuns no cotidiano de sistemas produtivos, fazendo com que tais cenários sejam representativos e importantes para uma melhor compreensão do sistema.

Sendo assim, para a Simulação B foi escolhido um sinal em formato de degrau para representar as perturbações, enquanto na Simulação C foi escolhido um sinal em formato senoidal.

como entrada para a função de produção, que está representada pelo box de cor amarela na Figura 5. Essa função executa o cálculo das taxas de geração ou consumo de material (\dot{q}_{pool} e \dot{q}_i) conforme a equação de estado do sistema (Eq. 13). Para que os cálculos relacionados à Eq.13 sejam realizados nesse bloco, existe dentro do mesmo um bloco de função que conta com uma implementação por meio de um código personalizado para que os cálculos sejam realizados. Nesse bloco há também um integrador, que transforma taxas em quantidades/volume estocado.

Assim, a saída da função de produção, por fim, são os valores de estoque em processo na *pool* e em cada uma das máquinas. Tais valores são reenviados por meio de um laço de realimentação – representado pelas conexões na cor roxa vistas na Figura 5 - para serem então comparados com os valores de referência na etapa representada pelo box de cor vermelha. Tal comparação define o erro, que servirá como variável para a primeira etapa do sistema apresentada, fechando assim o ciclo desse sistema de malha fechada.

4.2 – Resultados

Para análise do comportamento do sistema ao longo das simulações, dois tipos de gráficos foram construídos e aqui apresentados. O primeiro desses gráficos apresenta a frequência relativa de processamento das máquinas e da *pool*, ao longo do tempo. Os gráficos obtidos para as três simulações desenvolvidas estão contidos na Figura 6.

O segundo tipo de gráfico obtido contém as informações referentes às quantidades em estoque para as máquinas e para a *pool*, ao longo do tempo (Figura 7).

Como já citado, na simulação A, tanto a *pool* quanto as máquinas foram programadas para iniciar a simulação com os estoques iniciais nulos. Nesse caso, o controle da *pool* recebe do estoque das máquinas 1 e 3 sinais que direcionam para o aumento da frequência de liberação, já que os níveis de ambos os estoques encontram-se abaixo do valor de referência e um aumento da frequência de liberação os aproximaria da referência. Porém, como já mencionado, o controlador da *pool* também recebe sinais referentes ao “estoque” de ordens aguardando liberação, que também se encontra abaixo do valor de referência. O ideal, para que o nível de ordens na *pool* atingisse o nível de referência, seria uma diminuição da frequência de liberação de forma que, assim, houvesse certo represamento das ordens. Assim, o sinal enviado ao controlador da *pool* resulta de uma sobreposição destrutiva de sinais.

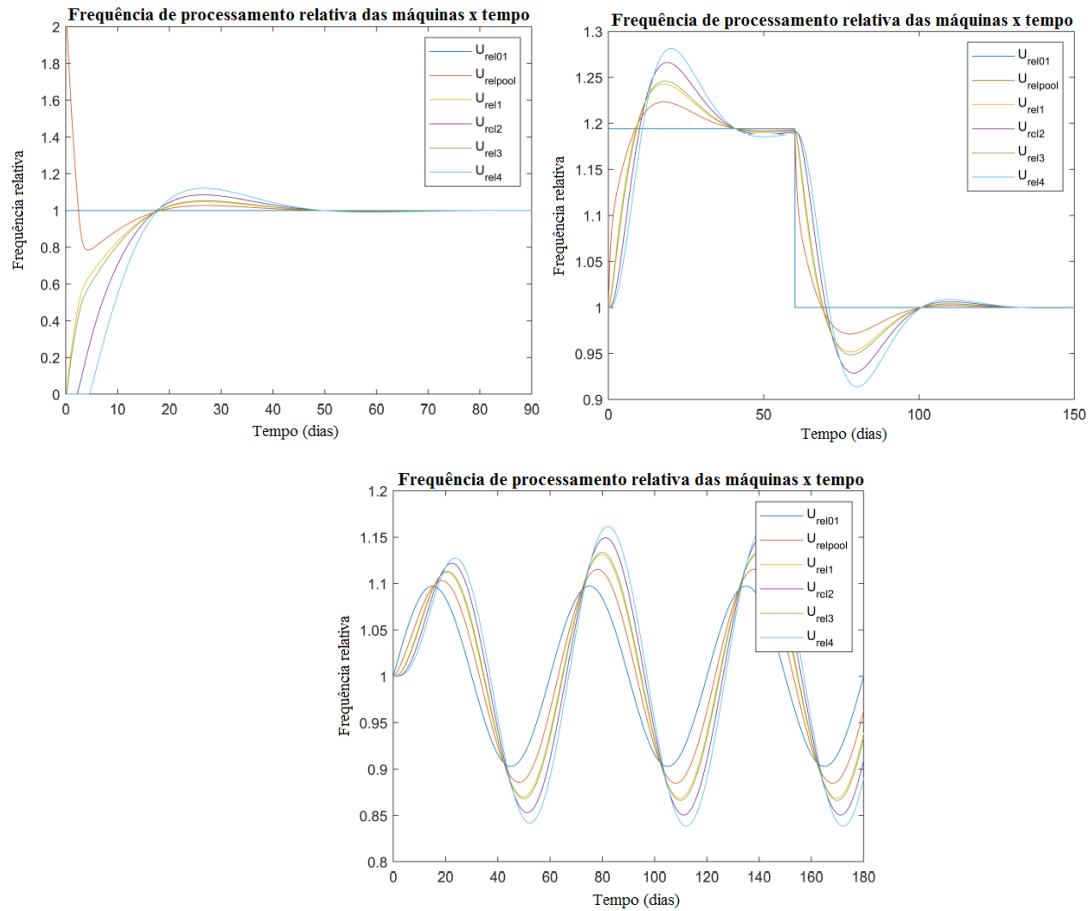


Figura 6: gráficos de frequência relativa para as simulações. a: Simulação A, b: Simulação B, c: Simulação C.
 Fonte: Autor (2020)

O resultado dessa sobreposição de sinais, como pode ser visto na Figura 6.a, é que os sinais vindos dos estoques 1 e 3, que estão abaixo da referência, tem maior influência para o controle neste momento, e a frequência de liberação de ordens (U_{pool}) aumenta, visto que a *pool* inicia a simulação operando a 200% do seu valor de referência. Com o passar da simulação, tal valor vai diminuindo gradativamente conforme os níveis de estoque das máquinas 1 e 3 aumentam e se aproximam da referência (Figura 7.a). O ponto de inflexão no comportamento da frequência de liberação ocorre após as máquinas 2 e 4 iniciarem seu processamento, já que isso diminui a tendência de crescimento dos estoques das máquinas 1 e 3, e os mesmos voltam a enviar sinais favoráveis a uma maior liberação.

Observando o comportamento das máquinas na Simulação A, por sua vez, é possível notar que todas iniciam com frequência de processamento nula. Esse comportamento se mostra compatível com as regras implementadas já que os únicos sinais que seus controladores recebem são os sinais referentes aos níveis de seus próprios estoques, que por iniciarem com valores nulos, enviam sinais favoráveis a uma frequência de processamento mais baixa. Tal informação pode ser vista na Figura 6.a.

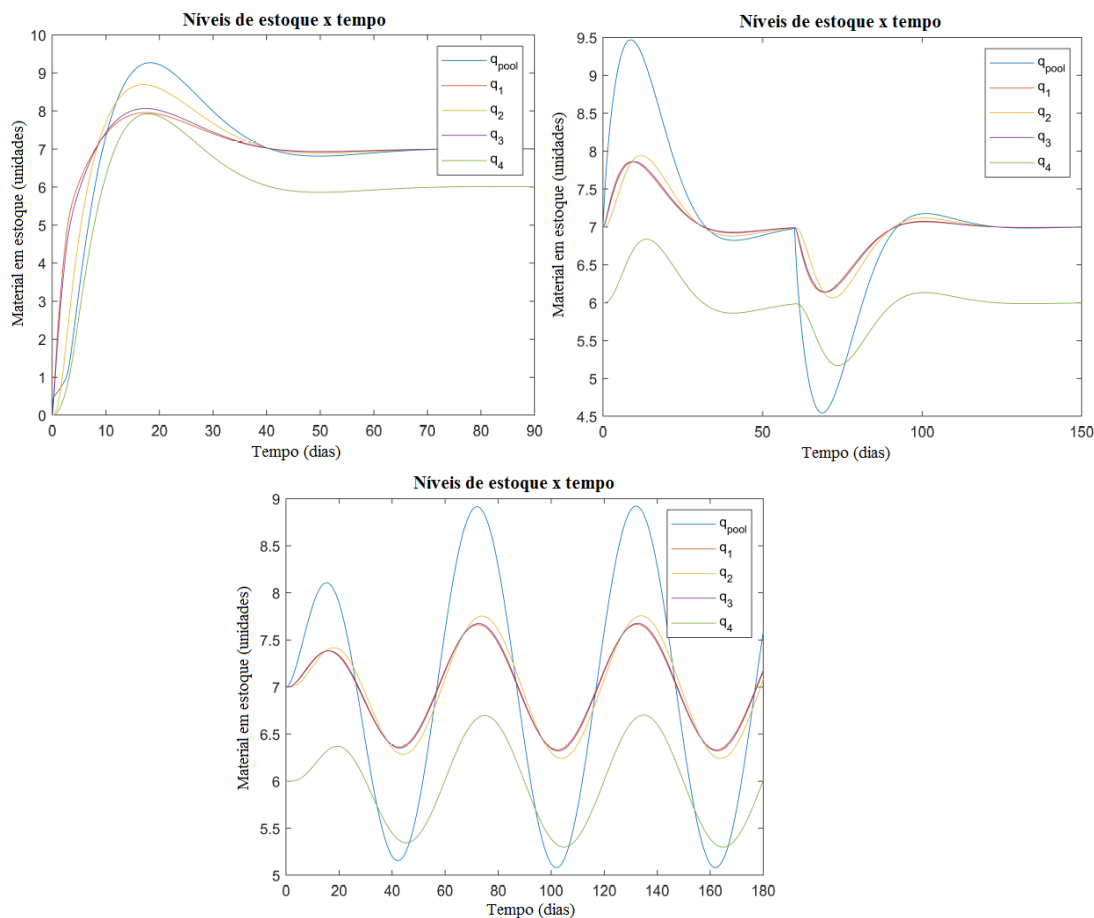


Figura 7: gráficos de níveis de estoque para as simulações. a: Simulação A, b: Simulação B, c: Simulação C.
Fonte: Autor (2020)

Olhando o aspecto geral da simulação, observa-se que as regras estão sendo efetivas, e com o passar do tempo o sistema consegue atingir o equilíbrio, nos valores de referência estabelecidos para os estoques intermediários.

Nas Simulações B e C, por sua vez, os níveis de estoque iniciais correspondem aos valores de referência. Dessa forma, o comportamento da simulação vai estar completamente relacionado às mudanças geradas pelo sinal de entrada.

Na simulação B, o sinal tem formato de degrau, e define um aumento de quase 20% na chegada de ordens até aproximadamente o sexagésimo dia. Se adequando a tal comportamento, a primeira frequência de processamento a aumentar é a da própria *pool*, que aumenta sua liberação devido à alta que começa a acontecer na quantidade de ordens esperando liberação. Logo em seguida, há um aumento no processamento das máquinas 1 e 3, que são as primeiras máquinas a jusante, e por fim, esse aumento alcança as máquinas 2 e 4, as máquinas mais a jusante no sistema. Esses resultados podem ser vistos na figura 6.b.

Outro ponto interessante a ser observado é que, mesmo havendo variações nos estoques em processo, ou seja, nos *buffers* das máquinas 1 a 4, tal variação não foi acentuada, o que mostra que, mesmo com as perturbações, aumento de quase 20% no sinal de entrada, o sistema não sofreu grandes penalidades no que diz respeito aos valores de estoque em processo, como pode ser visto na figura 7.b. Esse comportamento só foi possível por conta do aumento nas frequências de processamento apresentado anteriormente.

Com a chegada do sexagésimo dia, e o retorno dos valores de demanda ao valor padrão da simulação, ocorre um período de baixa nos valores de estoque (tanto inicial quanto em processamento), que culmina em um breve período onde o sistema opera levemente abaixo de 100% da capacidade. Porém, essa alteração é rapidamente gerenciada, e o sistema é direcionado para atingir o equilíbrio.

Por fim, na Simulação C o sinal de entrada apresenta uma variação em formato senoidal. A amplitude de tal variação foi de aproximadamente 10%, para mais e para menos, ao longo da simulação.

Assim como na simulação anterior, o comportamento do sistema vai se alterando, iniciando-se com uma maior liberação na *pool* e propagando-se a jusante, com o aumento da capacidade de processamento das máquinas. Nota-se um pequeno atraso (defasagem) nessa propagação. A amplitude das alterações também aumenta gradativamente nesse sentido, o que significa que a máquina mais a jusante (máquina 4) teve o maior pico e a maior baixa, apresentando uma amplitude de aproximadamente 15%, enquanto a *pool*, sendo o componente mais a montante, teve a menor variação, tendo uma amplitude de aproximadamente 10%. Essas informações podem ser vistas na figura 6.c.

O comportamento geral do sistema segue diretamente o sinal de entrada, apenas com certo atraso, e também com certa propagação da perturbação, devido ao fato de as máquinas mais a jusante serem mais impactadas. Observa-se que o sistema responde às variações cíclicas de demanda com cerca de 15% de variação de capacidade, no máximo.

Olhando sob o aspecto gerencial, em todas as simulações, os níveis de estoque atingiram um estágio de “equilíbrio”, sendo que no caso C esse equilíbrio é dinâmico, e segue a curva de demanda. Esse é um resultado positivo, já que o objetivo é obter-se um chão de fábrica mais estável e previsível.

Além disso, os resultados obtidos na Simulação C apresentam um benefício extra, afinal, mesmo com o aumento de 10% no sinal de entrada, ou seja, um aumento de 10% na demanda, o sistema não sofreu grandes penalidades no que diz respeito aos valores de estoque em processo. No ponto de vista gerencial, isso significa que o sistema foi capaz de atender ao aumento da demanda sem que fosse necessário um aumento demasiado no tempo de atravessamento. Isso foi possível por conta do aumento que ocorre nas frequências de processamento e, nesse quesito, caberá ao gerente a responsabilidade de realizar análises quanto à viabilidade de implementação desse aumento de capacidade das máquinas de forma a garantir um valor estável de tempo de atravessamento, e conseqüentemente, menos atrasos.

Por fim, cabe dizer que o sistema aqui desenvolvido apresenta uma característica prescritiva, ou seja, seus resultados tratam de apontar quando e em que quantidade devem ser tomadas as ações para atender as flutuações da demanda – por exemplo, aumentar em 15% a capacidade a partir do vigésimo dia. A partir dessas recomendações que são derivadas da simulação do sistema em malha fechada (com controlador), os gestores podem definir ações para garantir que esse aumento de capacidade seja implementado - o que pode acontecer por meio da contratação de novos funcionários, da realização de horas extras, da implementação de turnos extras, ou mesmo da redução da jornada de trabalho de determinados recursos (definindo pausas programadas na programação de produção das máquinas), por exemplo, quando há queda na demanda.

5 – CONCLUSÕES

Quando se observa a literatura de controle de carga, é comum encontrar-se implementações de WLC por meio de modelagem discreta. Porém, mesmo que incomum, a realização de implementações alternativas é possível, sendo uma dessas alternativas desenvolvida nesse trabalho, que objetiva trazer uma abordagem com aplicação simultânea de controle de entrada e saída em um modelo dinâmico contínuo e de malha fechada. Como se sabe, um sistema de malha fechada possui um controle automático, de forma que a liberação de trabalho e os ajustes de capacidade, i.e. operação das máquinas acima ou abaixo da programação de regular/média - são definidos de maneira dinâmica (em função do estado do chão de fábrica) e variam de maneira contínua.

Ao todo, foram realizadas 3 simulações com uma mesma regra de controle, que trabalha com aplicação simultânea dos controles de entrada e de saída. A Simulação A é programada para se observar o comportamento do sistema mediante aplicação dessa regra,

iniciando-se com valores nulos de estoque intermediário. As Simulações B e C, por sua vez, tem como objetivo simular flutuações e outros distúrbios na demanda, por meio de um sinal degrau e um sinal senoidal para a mesma.

Foi possível observar que o controle de realimentação implementado leva o sistema a atingir o equilíbrio nas Simulações A e B, ou seja, os níveis dos estoques intermediários atingem os valores de referência e as frequências de processamento das máquinas estabilizam. Na Simulação C por sua vez, é possível observar que o sistema respondeu às variações cíclicas de demanda com um valor máximo de 15% de variação na capacidade. Além disso, mesmo ocorrendo um aumento de quase 20% no sinal de entrada, ou seja, um aumento de 20% na demanda, o sistema não sofreu grandes penalidades no que se refere aos valores de estoque em processo. Tal resultado é positivo por expor um chão de fábrica mais equilibrado e previsível, além de reativo às perturbações, o que facilita consideravelmente a gestão desse sistema. A implementação desse modelo em malha fechada se mostra vantajosa pela oportunidade de se realizar ajustes mais rápidos e adequados à situação instantânea do chão de fábrica.

A primeira contribuição desse trabalho está na proposição de um modelo prescritivo que possibilite à organização informações referentes a quando e quanto se deve realizar a liberação de ordens e os ajustes de capacidade no sistema. À gerência fica a incumbência de realizar as análises descritivas, definindo como tais ajustes serão realizados e se os mesmos se mostram viáveis para a organização. Outra contribuição está na aplicação simultânea de controle de entrada e saída, visto que, como já mencionado, são escassas as aplicações desse tipo que são encontradas na literatura.

Além disso, outro ponto importante que pode ser observado é que a integração das disciplinas de Teoria de Controle e Gestão de Operações pode trazer informações interessantes sobre o comportamento do sistema de Controle de Carga em condições dinâmicas, por exemplo, diante de perturbações. Tais informações, por sua vez, podem fornecer diretrizes prescritivas quanto a como ajustar as liberações dinamicamente, diante de diferentes situações e de maneira a responder às perturbações.

Essa pesquisa permite concluir, também, que ainda existe espaço na literatura para implementações de simulações dinâmicas em Controle de Carga. Esse tipo de implementação se mostra interessante por ampliar o leque de ferramentas disponíveis para utilização em pesquisas, com o uso de métodos e ferramentas não usualmente aplicados na Engenharia de

Produção. Tal característica é um incentivo à construção de pesquisas com maior grau de interdisciplinaridade, com potencial de agregar conhecimento por meio da sinergia de diferentes áreas. É válido salientar que; no desenvolvimento da revisão de literatura, não foi encontrado nenhum modelo que aplicasse o conceito de controle como abordado na Teoria de Controle aplicada a Modelagem Dinâmica. Essa pesquisa, por sua vez, aplica tal conceito no âmbito das simulações de Controle de Carga, sendo essa mais uma das contribuições que esse trabalho trás para a literatura.

Para pesquisas futuras, fica a sugestão de implementação de diferentes cenários, com outras mudanças nos valores iniciais e de referência, além de diferentes formatos do sinal da fonte externa de pedidos/materiais. Além disso, recomenda-se também o desenvolvimento e simulação de novas regras de controle tanto de entrada quanto de saída, de forma a observar os comportamentos obtidos para regras mais complexas, com maior fluxo de informações e que possibilitem ao controlador uma visão mais geral do sistema. Por fim, pode-se também adequar as regras aplicadas nesse sistema a sistemas mais complexos, com mais componentes, de forma ver se o padrão de comportamento se mantém nesses novos ambientes.

6 – Agradecimentos

Agradecimento ao apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento em Pesquisa e Tecnologia (CNPq) que possibilitou que essa pesquisa fosse realizada.

7 – Referências Bibliográficas

- Akillioglu, H., Ferreira, J., & Onori, M. (2013). "Demand responsive planning: workload control implementation", *Assembly Automation*, 33(3), 247-259.
- Breithaupt, J-W., Land, M. & Nyhuis, P. (2002) The workload control concept: theory and practical extensions of Load Oriented Order Release, *Production Planning & Control: The Management of Operations*, 13:7, 625-638.
- Chen, Y. R., Zhou, H. M., Guan, Z. L., & Shao, X. Y. (2012). Model of Production Planning and Control with the Integration of WLC and TOC Mechanism. In: *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications Ltd, p. 2230-2236.
- Duffie, N. A., Roy, D., & Shi, L. (2008). Dynamic modeling of production networks of autonomous work systems with local capacity control. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1), 463-466.
- Ferney, M. Modelling and controlling product manufacturing systems using bond-graphs and state equations: Continuous systems and discrete systems which can be represented by continuous models. *Production Planning and Control*, v. 11, n.1, p. 7-19, 2000.

- Hayes, R., Pisano, G., Upton, D., Wheelwright, S. *Operations, Strategy and Technology: Pursuing the Competitive Edge*. New York: John Wiley, 2005.
- Kingsman, B. G. (2000) Modelling input–output workload control for dynamic capacity planning in production planning systems. *International journal of production economics*, v. 68, n. 1, p. 73-93.
- Kingsman, B. G.; Tatsiopoulos, I. P.; Hendry, L. C. (1989) A structural methodology for managing manufacturing lead times in make-to-order companies. *European journal of operational research*, v. 40, n. 2, p. 196-209.
- Kluever, C.A. *Sistemas dinâmicos: modelagem, simulação e controle.*/ Craig A. Kluever ; tradução: Mauro Speranza Neto. – 1. Ed. – Rio de Janeiro : LTC, 2018.
- Lin, J., Naim, M. M., & Spiegler, V. L. (2019). Delivery time dynamics in an assemble-to-order inventory and order based production control system. *International Journal of Production Economics*, 107531
- Lödding, H. (2012). *Handbook of manufacturing control: Fundamentals, description, configuration*: Springer Science & Business Media.
- MacCarthy, B. L., & Fernandes, F. C. (2000). A multi-dimensional classification of production systems for the design and selection of production planning and control systems. *Production Planning & Control*, 11(5), 481-496.
- Sagawa, J.K.; & Land, M.J.(2018). Representing workload control of manufacturing systems as a dynamic model. *IFAC-PapersOnLine* Volume 51, Issue 2, 825-830.
- Sagawa, J.K. and Mušič, G., 2019. Towards the use of bond graphs for manufacturing control: Design of controllers. *International Journal of Production Economics*, 214, 53-72.
- Sagawa, J.K., Nagano, M.S., and Speranza Neto, M. (2017). A closed-loop model of a multi-station and multi-product manufacturing system using bond graphs and hybrid controllers. *European Journal of Operational Research*, 258(2), 677{691. doi:10.1016/j.ejor.2016.08.056.
- Shaladdin Muda, M., & Hendry, L. (2003). The SHEN model for MTO SMEs: a performance improvement tool. *International Journal of Operations & Production Management*, 23(5), 470-486.
- Thürer, M., Stevenson, M., & Land, M. J. (2016). On the integration of input and output control: Workload Control order release. *International Journal of Production Economics*, 174, 43-53.
- Weng, M.X., Wu, Z., Qi, G., & Zheng, L. (2008). Multi-agent-based workload control for make-to-order manufacturing, *International Journal of Production Research*, 46:8, 2197-2213.
- Wu, Z.; Weng, M. X. (2005) Dynamic due date setting and shop scheduling for make-to-order companies. In: *IIE Annual Conference. Proceedings*. Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE), p. 1.
- Zhao, B., Gao, J., Chen, K., & Xu, A. (2015). Workload control-related Workload Route Decision. *IFAC-PapersOnLine*, v. 48, n. 3, p. 1422-1427.