

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ARTHUR SARRO MALUF

**MODELOS DINÂMICOS APLICADOS A SISTEMAS DE MANUFATURA
UTILIZANDO GRAFOS DE LIGAÇÃO: PROPOSTA DE MODIFICAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientação: Prof^a. Dra. Juliana Keiko Sagawa

São Carlos
2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Arthur Sarro Maluf, realizada em 24/08/2020.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Juliana Keiko Sagawa (UFSCar)

Prof. Dr. Roberto Fernandes Tavares Neto (UFSCar)

Profa. Dra. Maíra Martins da Silva (USP)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

AGRADECIMENTOS

À Prof.^a Dra. Juliana Keiko Sagawa, pela orientação, conselhos e atenção comigo durante todo o desenvolvimento da pesquisa.

Aos professores Dr. Roberto Fernandes Tavares Neto e Dra. Maíra Martins da Silva pela presença em banca de avaliação.

À minha família e amigos, por todo apoio e carinho.

Aos docentes e funcionários do Departamento de Engenharia de Produção da UFSCar.

À CAPES e a FAPESP (#2019/12023-1) por financiarem a pesquisa.

RESUMO

MALUF, S. A. Modelos dinâmicos aplicados a sistemas de manufatura utilizando grafos de ligação: proposta de modificações. 2020. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – Departamento de Engenharia de Produção – Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, 2020.

As empresas competem em um mercado acirrado, onde o principal foco é a satisfação do consumidor, obrigando-as a responderem de uma forma dinâmica às mudanças e instabilidades do mercado. Devido a esses fatores são necessários modelos mais precisos, adaptáveis, robustos e exploráveis para representar esses sistemas de produção. Desta forma, o presente estudo analisa modelos dinâmicos aplicados à manufatura que utilizam o método de grafos de ligação. Busca-se apresentar uma análise comparativa detalhada, discutindo-se as variáveis utilizadas nos modelos, o equacionamento matemático e o contexto de aplicação destes. A partir da análise dos modelos existentes, tomou-se um modelo como base. O modelo escolhido utiliza uma fonte de esforço, representada por uma função mínimo, que introduz uma não linearidade e dificulta o projeto de controladores. A variável de esforço não possui um sentido físico e torna-se nula em razão das capacidades infinitas dos estoques, tornando também nula a transferência de potência entre os elementos, sendo esta a principal característica da abordagem. As novas equações para o modelo limitam as capacidades dos estoques, permitindo a transferência de potência entre os elementos e a utilização da função mínimo não é necessária. A busca sistemática e abrangente realizada na literatura mostrou que os modelos com base em grafos de ligação com aplicação em manufatura são escassos. Assim, esse trabalho busca contribuir para o desenvolvimento de trabalhos futuros nessa linha de pesquisa. A área de manufatura e gestão de operações se beneficia deste tipo de abordagem, que permite o uso de ferramentas da teoria de controle para análise dinâmica e para proposta de diretrizes gerenciais prescritivas advindas da simulação de sistemas de malha fechada. Em relação a outras abordagens utilizadas na modelagem de sistemas de produção, a abordagem de grafos de ligação se destaca pela modularidade, que permite a integração de diferentes sistemas, subsistemas e componentes. Isto, por sua vez, permite a representação de diferentes configurações de sistemas de produção (e.g. *flow shop*, *job shop*).

Palavras-chave: Grafos de ligação, modelagem dinâmica, manufatura, controle da produção, revisão sistemática de literatura.

ABSTRACT

Companies compete in a fierce market, where the main focus is consumer satisfaction, forcing them to respond dynamically to market changes and instabilities. Due to these factors, more accurate, adaptable, robust and exploitable models are needed to represent these production systems. In this way, the present study analyzes dynamic models applied to manufacturing using the bond graph method. The aim is to present a detailed comparative analysis, discussing the variables used in the models, the mathematical equation and the context of their application. From the analysis of existing models, a model was taken as a basis. The chosen model uses a source of effort, represented by a minimum function, which introduces non-linearity and makes the design of controllers difficult. The effort variable has no physical meaning and becomes null due to the infinite capacities of the stocks, also making the transfer of power between the elements null, which is the main feature of the approach. The new equations for the model limit the capacities of the stocks, allowing the transfer of power between the elements and the use of the minimum function is not necessary. The systematic and extensive search carried out in the literature showed that models based on bond graphs with application in manufacturing are scarce. Thus, this work aims to contribute to the development of future works in this line of research. The manufacturing and operations management area benefits from this type of approach, which allows the use of control theory tools for dynamic analysis and for proposing prescriptive management guidelines from the simulation of closed-loop systems. In relation to other approaches used in the modeling of production systems, the bond graph approach stands out for its modularity, which allows the integration of different systems, subsystems and components. This, in turn, allows the representation of different configurations of production systems (e.g. flow shop, job shop).

Keywords: *Bond graphs, dynamic modeling, manufacturing, production control, systematic literature review.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Grafos de ligação	15
Figura 2 – Aspectos fenomenológicos dos componentes.....	16
Figura 3 – Etapas da revisão bibliográfica	21
Figura 4 – Filtros da RBS	23
Figura 5 – Modelo agregado.....	26
Figura 6 – Modelo de uma estação.....	27
Figura 7 –Estação de armazenamento	29
Figura 8 – Elemento resistor.....	29
Figura 9 – Elemento transformador.....	29
Figura 10 – Sistema empurrado e puxado	30
Figura 11 – Sistema de produção	31
Figura 12 – Modelo de grafos de ligação do sistema apresentado	31
Figura 13 – Modelo de uma estação.....	33
Figura 14 – Modelo de uma estação final.....	33
Figura 15 – Sistema considerado.....	33
Figura 16 – Modelo de grafo de ligação do sistema.....	34
Figura 17 – Resultados da simulação do modelo	35
Figura 18 – Modelo de estoque	36
Figura 19 – Modelo de máquina.....	37
Figura 20 – Modelo de uma estação.....	38
Figura 21 – Fonte de fluxo forçado	39
Figura 22 – Modelo de um poço.....	39
Figura 23 – Junção convergente	39
Figura 24 – Junção divergente.....	40
Figura 25 – Estações de trabalho.....	41
Figura 26 – Grafo de ligação do sistema	41
Figura 27 – Nível dos estoques durante a simulação	42
Figura 28 – Sistema de produção	43
Figura 29 – Grafos de ligação do sistema de produção.....	44
Figura 30 – Fluxograma da organização do trabalho	52
Figura 31 – Processo de modelagem do sistema	52
Figura 32 – Estação sem fonte de esforço mínimo.....	56

Figura 33 - Modelo completo com estoques finitos.....	57
Figura 34 - Estrutura de realimentação de estados	62
Figura 35 – Estrutura de controle integral	64
Figura 36 – Modelo no Simulink® sem controlador	65
Figura 37 – Frequências de processamento sem controlador	67
Figura 38 – Volume dos estoques sem controlador	67
Figura 39 – Volume dos estoques sem controlador e capacidade reduzida.....	68
Figura 40 – Modelo no Simulink com LQR	70
Figura 41 – Frequências de suprimento com nivelamento	71
Figura 42 – Volume dos estoques com nivelamento	72
Figura 43 – Volume dos estoques sem nivelamento.....	73
Figura 44 – Frequência das fontes de suprimento sem nivelamento	73
Figura 45 – Modelo LQR estendido	74
Figura 46 – Frequências de processamento das fontes com LQR estendido	75
Figura 47 – Volumes dos estoques com LQR estendido	75
Figura 48 – Erro relativo dos estoques com LQR estendido	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Elementos de grafos de ligação	18
Quadro 2 - <i>Strings</i> de busca.....	21
Quadro 3 - Artigos selecionados na RBS	23
Quadro 4 - Modelos aplicados à manufatura.....	49

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 ANÁLISE DOS MODELOS DINÂMICOS APLICADOS A SISTEMAS DE MANUFATURA UTILIZANDO ABORDAGEM BOND-GRAPHS	13
2.1 INTRODUÇÃO	13
2.2 CONCEITOS BÁSICOS	15
2.2.1 Grafos de ligação.....	15
2.2.2 Elementos básicos da abordagem.....	15
2.2.3 Grafos de ligação aplicados a sistemas de manufatura	19
2.3 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	20
2.4 MODELOS DE GRAFOS DE LIGAÇÃO REPRESENTANDO SISTEMAS DE MANUFATURA	24
2.4.1 Modelo 1	24
2.4.2 Modelo 2.....	28
2.4.3 Modelo 3.....	32
2.4.4 Modelo 4.....	36
2.4.5 Modelo 5.....	42
2.5 DISCUSSÃO	46
2.6 CONCLUSÃO	50
3 MÉTODO DE PESQUISA.....	51
3.1 MODELAGEM.....	51
4 MODIFICAÇÃO DO MODELO	55
4.1 EQUAÇÕES DO MODELO	56
4.2 CONTROLADOR PARA O MODELO	61
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
6 CONCLUSÃO	79
DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE	81
REFERÊNCIAS.....	82
APÊNDICE A – Código de programação MATLAB	85

1 INTRODUÇÃO

A grande variedade de produtos ofertados, o crescente número de peças, os diferentes locais de fabricação e requisitos mais exigentes dos clientes em relação aos prazos de entrega, obrigam as empresas a possuírem a habilidade de responder de forma ágil as mudanças nas necessidades dos consumidores ou instabilidades do ambiente (SAGAWA; MUŠIČ, 2019).

As metodologias de modelagem dinâmica e a teoria de controle fornecem ferramentas para modelagem e análise de sistemas dinâmicos que podem ser aplicados adequadamente ao planejamento de produção (SAGAWA; NAGANO, 2015a). A crescente complexidade dos sistemas de manufatura, combinada com a das abordagens multicritério de otimização de desempenho global, promove pesquisas de modelos aplicados a sistemas de manufatura (FERNEY, 2000). No entanto, no campo de pesquisa sobre manufatura, os modelos dinâmicos têm recebido menos atenção quando comparados a modelos estáticos para sequenciamento e controle de produção. (BESOMBES; MARCON, 1993; LAIR *et al* 1997).

Em disciplinas de engenharia, por exemplo, representações de rede, diagramas de blocos ou grafos lineares têm uma longa tradição (BORUTZKY, 2009). Na literatura, é comum o uso de transformada de Laplace aplicada a sistemas dinâmicos para resolver equações diferenciais lineares com coeficientes constantes. Esta técnica é uma das maneiras convenientes de se resolver equações diferenciais lineares analiticamente. Com o advento da simulação por computador, tornou-se simples resolver equações lineares numericamente (KARNOPP; MARGOLIS; ROSENBERG, 2012).

Na década de 1960, o professor H. M. Paynter, do MIT, propôs um método unificador e algorítmico para modelagem de sistemas. A técnica baseava-se em diagramas de fluxo de potência e era independente do domínio físico; ele a nomeou de grafos de ligação (DAS, 2009). Devido à natureza multidisciplinar da maioria dos processos industriais (mecânicos, térmicos, elétricos, etc.), era necessário um método unificado de modelagem para análise e síntese de modelos. A abordagem de grafos de ligação é adequada para esse propósito. Esta metodologia permite a integração, independente da natureza física do sistema estudado, graças à sua natureza gráfica de exibição da troca de potência em um sistema, que inclui armazenamento, dissipação e transformação (SAMANTARAY; BOUAMAMA, 2008).

Os grafos de ligação permitem uma representação precisa de um modelo matemático. Os diagramas esquemáticos não são tão claros se alguns efeitos nos modelos devem ser incluídos ou negligenciados. Os grafos de ligação usam apenas alguns símbolos padrão, permitindo que os modelos se comuniquem. Além disso, esta padronização permite que os computadores

interpretem mais facilmente os grafos de ligação do que os diagramas esquemáticos (KARNOPP, MARGOLIS, ROSENBERG, 2012).

A abordagem de grafos de ligação se destaca pela modularidade, que permite a integração de diferentes sistemas, subsistemas e componentes. Isto, por sua vez, permite a representação de diferentes configurações de sistemas de produção (e.g. *flow shop*, *job shop*), com relativa facilidade. Esta abordagem demonstra ser uma ferramenta de grande potencial na representação dos sistemas de manufatura, mas, mesmo assim, há um número pequeno de modelos aplicados a manufatura (LAIR *et al*, 1997; FERNEY, 2000; SAGAWA; NAGANO, 2013). Essa afirmação pôde ser corroborada com base nos resultados de uma revisão bibliográfica sistemática realizada para embasar este trabalho, a qual será exposta no próximo capítulo.

Além da quantidade escassa de trabalhos, alguns dos modelos de grafos de ligação são somente conceituais ou são modelos de pseudografos, ou seja, não respeitam o formalismo da metodologia e as equações constitutivas dos elementos, de forma que seja possível de fato gerar as equações de estado a partir dos grafos e realizar simulações com os modelos. Dentre os modelos disponíveis na literatura que respeitam esse formalismo e apresentam aplicações, a variável de esforço não possui uma interpretação física, no contexto de representação de sistemas de manufatura. Além disso, os estoques intermediários são modelados com capacidade infinita, zerando a variável de esforço e simplificando o equacionamento do modelo. A fonte de esforço, representada por uma função de mínimo, é utilizada na interface de acoplamento entre máquina e estoque para representar a transição até a primeira unidade a ser formada. Esta função introduz uma não linearidade que dificulta o projeto de controladores. Diante disso, o objetivo do presente trabalho é propor uma nova interpretação para a variável esforço em um modelo de grafos de ligação que represente um sistema de manufatura, não simplificando o equacionamento do modelo e evitando o uso da função de mínimo. Entende-se que este trabalho contribuirá para suprir as lacunas apontadas e para tornar mais viável e atrativa a aplicação de grafos de ligação à representação de sistemas de manufatura.

Neste primeiro capítulo é feita a contextualização da pesquisa e se apresentam quais contribuições espera-se alcançar. No segundo capítulo, estruturado em formato de artigo, é apresentada a revisão da literatura referente a modelos de grafos de ligação aplicados a sistemas de manufatura e a análise dos modelos encontrados. O terceiro capítulo apresenta a metodologia de pesquisa. O quarto capítulo modificação do modelo. Quinto capítulo de resultados e discussões e o sexto capítulo a conclusão.

2 ANÁLISE DOS MODELOS DINÂMICOS APLICADOS A SISTEMAS DE MANUFATURA UTILIZANDO ABORDAGEM BOND-GRAPHS

Este capítulo está organizado em formato de artigo. Por isso, além das subseções referentes ao conteúdo da revisão bibliográfica, o capítulo também contém as subseções de introdução (2.1), discussão (2.5) e conclusão (2.6). Essas subseções se referem à revisão bibliográfica sistemática realizada, e não ao texto completo da dissertação. O artigo, na versão em inglês, foi submetido a um periódico científico internacional.

2.1 INTRODUÇÃO

Um dos desafios encontrados pelas empresas é atender a demanda de clientes no curto prazo, dentro de uma rede ágil de parceiros competentes para ter sucesso na competição global. A sua superioridade não deve depender apenas de melhorias contínuas em relação a objetivos clássicos como custo, qualidade e tempo (WIENDAHL; BREITHAUPT, 2000). O sucesso de um fabricante depende em grande parte de seu desempenho em dois aspectos, o aspecto externo do atendimento ao cliente e o aspecto interno da fabricação e gestão. Uma medida eficaz relacionada à melhoria do desempenho interno de fabricação é a adoção de manufatura baseada em tempo (WENG; FUJIMURA, 2012).

Em vários ambientes de produção, os sistemas de produção estão sujeitos a perturbações de muitas fontes, como mudanças na demanda do produto e nos requisitos do cliente, interrupções na máquina, trabalhos urgentes, absenteísmo, flutuações financeiras e assim por diante. Todos esses fatores exigem agilidade. As empresas ágeis distinguem-se por sua velocidade no processo de planejamento e execução, bem como por sua adaptabilidade às mudanças de condições no ambiente de produção (WIENDAHL, 1995; SARIMVEIS *et al.*, 2008; IVANOV; SOKOLOV, 2013).

Em um mercado competitivo, o risco constitui a regra e não a exceção, e o ambiente se torna cada vez mais dinâmico, instável e exigente. Devido a esses fatores são necessários modelos mais precisos, adaptáveis, robustos e exploráveis, e o apoio de uma ferramenta de auxílio à tomada de decisões (BENMANSOUR *et al.*, 2004). A maioria dos modelos disponíveis para analisar os sistemas de produção é baseada no desempenho médio ou em condições de estado estacionário (ORTEGA; LIN, 2004; SURI; DESIRAJU, 1997).

A abordagem dinâmica permite capturar e lidar com variações no ambiente de produção e otimizar os indicadores de desempenho que são difíceis de expressar nos modelos estáticos e discretos. A área de manufatura poderia se beneficiar da aplicação da modelagem dinâmica e teoria de controle, possibilitando a interpretação dos processos de planejamento e

execução não como domínios isolados, mas sim como um processo adaptativo (IVANOV; DOLGUI; SOLOKOV, 2012).

A dinâmica dos sistemas e teoria de controle fornecem ferramentas para modelagem e análise de sistemas dinâmicos que podem ser aplicados ao planejamento de produção e controle de sistemas de manufatura. As diferentes estratégias de controle automático podem ser implementadas e avaliadas, e as decisões podem ser fundamentadas em uma análise dinâmica sistemática, em vez de basear-se apenas no conhecimento prévio e intuição do gerente de produção (SAGAWA; NAGANO; SPERANZA NETO, 2017). Uma vantagem dos modelos dinâmicos baseados em controle sobre os modelos baseados em simulação de eventos discretos é sua capacidade de fornecer soluções ou diretrizes prescritivas (SAGAWA e MUŠIČ, 2019).

Parte significativa dos trabalhos sobre teoria de controle aplicada a sistemas de manufatura está relacionada aos sistemas de produção e estoques (*production-inventory systems*) no contexto de cadeia de suprimentos (ORTEGA; LIN, 2004). Tais modelos são voltados principalmente à definição e análise de políticas de reposição de estoques. A literatura específica carece de uma variedade maior de modelos dinâmicos dedicados ao sequenciamento e ao controle de produção de chão de fábrica sob uma perspectiva de curto prazo (SAGAWA; NAGANO, 2015a).

A abordagem de grafos de ligação é uma ferramenta que permite descrever sistemas de engenharia em diferentes campos por meio de representação gráfica, independente de domínio, usando modelagem dinâmica geral para qualquer sistema físico (KOMURGOZ E GEITNER, 2019). Tal abordagem demonstra ser uma ferramenta de grande potencial na representação dos sistemas de manufatura. Mesmo assim, há um número pequeno de modelos aplicados à manufatura, conforme citado. A pesquisa na aplicação da abordagem grafos de ligação no campo do sistema de manufatura cruzou passos importantes, mas ainda não forneceu um método de modelagem efetivo e sistemático (BENMANSOUR *et al.*, 2004, BESOMBES; MARCON, 1993). O presente trabalho busca responder a seguinte questão: Quais são os modelos presentes na literatura, as principais abordagens e aproximações utilizadas, as correlações dos modelos com outros sistemas físicos e as variáveis básicas dos modelos?

Esta questão de pesquisa será respondida por meio de uma revisão bibliográfica sistemática com o objetivo de verificar e analisar os modelos de grafos de ligação aplicados a sistemas de manufatura disponíveis na literatura.

2.2 CONCEITOS BÁSICOS

2.2.1 Grafos de ligação

O método de grafos de ligação é baseado na análise de fenômenos físicos e, mais precisamente, na caracterização da troca de potência no sistema (KARNOPP; ROSENBERG, 1968; THOMA, 1975; ROSENBERG, 1973). A primeira etapa consiste em um estudo da estrutura topológica do sistema, ou seja, a interconexão entre os diferentes componentes ou o acoplamento entre os diferentes fenômenos observados. A segunda etapa é escrever as leis fundamentais dos diferentes componentes ou fenômenos (lineares ou não) e o vínculo da troca de potência (BESOMBES; MARCON, 1993).

Em vários domínios de energia há variáveis que, quando multiplicadas, resultam em potência. A multiplicação de força e velocidade resultam em potência para sistemas mecânicos e, em sistemas elétricos, tensão e corrente. Potência é geralmente definida como a multiplicação de uma variável de esforço $e(t)$ e um fluxo $f(t)$ (BORUTZKY, 2009).

$$P(t) = e(t)f(t) \quad (1)$$

Esforço e fluxo estão relacionados com as variáveis generalizadas de energia momento, $p(t)$, e deslocamento, $q(t)$, definidas como:

$$p(t) = p_0 + \int_{t_0}^t e(t)dt \quad (2)$$

$$q(t) = q_0 + \int_{t_0}^t f(t)dt \quad (3)$$

Nos grafos de ligação, os elementos são conectados por ligações através de portas de energia. Estas ligações representam um par de esforço e fluxo, que quando multiplicados fornecem a potência entrando ou saindo das portas conectadas. Em um grafo de ligação, a meia-seta indica a direção assumida do fluxo de potência positivo e a barra no início ou no final da meia-seta indica em qual porta o esforço é aplicado (Fig. 1) (KYPUROS, 2013). O esforço e o fluxo estão sempre em sentidos opostos e a barra de causalidade indica o sentido do esforço.

Figura 1 – Grafos de ligação



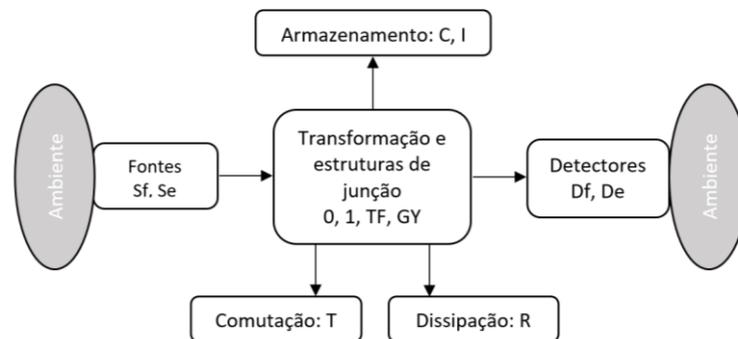
Fonte: Kypuros (2013).

2.2.2 Elementos básicos da abordagem

A modelagem por grafos de ligação consiste em dividir os sistemas em subsistemas cada vez mais simples, constituídos por componentes básicos. Estes componentes,

representados na Fig. 2, apresentam os aspectos fenomenológicos no sistema: fornecimento, armazenamento, dissipação, transferência ou conversão de energia.

Figura 2 - Aspectos fenomenológicos dos componentes



Fonte: Adaptado de Smata *et al*, (2010).

Há elementos de 1 porta armazenam energia potencial (elemento C), energia cinética (elemento I) ou dissipam energia (elemento R) (KYPUROS, 2013). Em cada porta existe um único par de variáveis de esforço e fluxo (KARNOPP; MARGOLIS; ROSENBERG, 1975). No elemento R , as variáveis de esforço e fluxo estão relacionadas de forma direta (THOMA; BOUAMAMA, 2013). Os elementos C são caracterizados por uma equação constitutiva que relaciona diretamente o esforço ao deslocamento generalizado (KYPUROS, 2013). Um elemento ideal de uma porta do tipo I é definido por uma equação constitutiva que relaciona diretamente a variável fluxo, f , da porta de potência ao momento generalizado p (BORUTZKY, 2009). As relações constitutivas dos elementos R , C e I são, respectivamente:

$$R = \frac{e}{f} \quad (4)$$

$$C = \frac{q}{e} \quad (5)$$

$$I = \frac{p}{f} \quad (6)$$

Existem elementos que não armazenam e não dissipam energia, mas transmitem energia de um elemento ou junção para outro, enquanto muitas vezes interagem entre diferentes domínios de energia. Há dois tipos de elementos desse tipo, de duas portas, o elemento transformador TF e o elemento girador GF . Os transformadores são caracterizados por uma relação constitutiva que relaciona diretamente o esforço de entrada com o esforço de saída ou o fluxo de entrada com o fluxo de saída (KYPUROS, 2013). O comportamento de um transformador ideal linear é dado pelas equações constitutivas:

$$e_1 = ne_2 \quad (7)$$

$$nf_1 = f_2 \quad (8)$$

Os giradores também são elementos que transmitem energia. Eles são caracterizados pela relação direta entre o esforço de entrada e o fluxo de saída e vice-versa (KYPUROS, 2013). As relações constitutivas de um girador ideal linear são dadas por:

$$e_1 r = f_2 \quad (9)$$

$$rf_1 = e_2 \quad (10)$$

Os elementos fonte de esforço e fonte de fluxo fornecem energia ao sistema. Esta energia vem de fora do sistema e não possui restrições. A fonte de esforço S_e impõe um esforço, que pode ser função do tempo, mas é independente do fluxo requerido, e a fonte de fluxo impõe um fluxo independentemente do esforço requerido (THOMA; BOUAMAMA, 2013).

As junções são utilizadas para realizar as conexões dos elementos básicos (KYPUROS, 2013) e são de dois tipos: tipo 0 e tipo 1. As junções de tipo 0 são utilizadas para representar a ligação dos elementos que estão sob o mesmo esforço. As junções do tipo 1 são utilizadas para representar a associação dos elementos que estão sob o mesmo fluxo (THOMA; BOUAMAMA, 2013). No Quadro 1 são mostrados os elementos de grafos de ligação nos domínios mais comumente utilizados.

Uma propriedade estrutural dos grafos de ligação é o conceito de causalidade. A determinação de causas e efeitos no sistema é diretamente deduzida da representação gráfica. A relação entre causa e efeito em um grafo de ligação é indicada por um traço vertical. Por convenção, o lado do traçado indica onde o esforço está agindo e o fluxo atua no sentido inverso. O conceito de causalidade permite a representação de duas conexões em sentido oposto em um diagrama de blocos (THOMA; BOUAMAMA, 2013), e torna possível não só deduzir o modelo matemático (e o modelo de simulação) a partir da representação gráfica, mas também para realizar, diretamente no diagrama de ligações, análises do modelo e estudos das propriedades estruturais dos sistemas (BENMANSOUR *et al.*, 2004).

Para sistemas tecnológicos, a quantidade que fornece uma medida unificadora entre domínios físicos é energia, no entanto, grafos de ligação também podem ser usados para domínios não tecnológicos. O pseudografo de ligação surge quando a potência/energia não é utilizada como uma variável unificadora (BESOMBES; MARCON; ALLA, 1992). Um grafo de ligação possui dois princípios: o princípio associado à variável de fluxo e o princípio associado ao produto de fluxo e esforço. Um pseudografo de ligação não possui o segundo

princípio, ou seja, o produto de esforço e fluxo não é mais uma potência e não possui significado (BREWER, 1991; THOMA, 1990).

Quadro 1: Elementos de grafos de ligação

Elementos	Mecânica (Translacional)	Mecânica (Rotacional)	Elétrica	Hidráulica
R				
C				
I				
TF				
GY				
0-Junction				
1-Junction				

Fonte: Adaptado de Franklin *et al* (2013)

A técnica de grafos de ligação apresenta algumas vantagens, como simplicidade, generalidade, uniformidade e clareza de representação. A principal característica dessa técnica é sua modularidade, que permite a integração de diferentes sistemas, subsistemas e componentes (SAGAWA; NAGANO, 2015b; KARNOPP; MARGOLIS; ROSENBERG,

1990). Baseado no fluxo de energia e informação, esta abordagem utiliza apenas um número reduzido de conceitos genéricos adaptáveis a qualquer campo, oferecendo uma grande flexibilidade de modelagem e permitindo a compreensão de um fenômeno tendo múltiplas dimensões vistas como complexas (BENMANSOUR *et al.*, 2004).

2.2.3 Grafos de ligação aplicados a sistemas de manufatura

A maioria das aplicações de grafos de ligação é dedicada a sistemas físicos como sistemas mecânicos, cinemáticos, elétricos. Poucos desenvolvimentos disponíveis na literatura são dedicados a descrever sistemas de manufatura e, entre estes, poucos apresentam modelos matemáticos, apresentando apenas proposições conceituais (SAGAWA; NAGANO; SPERANZA NETO, 2017). Essa abordagem é genérica na medida em que se baseia em variáveis generalizadas (i.e. esforço e fluxo), por um lado, e na implementação de modelos elementares para cada componente dos sistemas de produção, por outro, cuja montagem produzirá o modelo global.

A modularidade do método de grafos de ligação permite essa generalização, capacidade importante da abordagem, que permite a sua aplicação a sistemas de fabricação com diferentes números de máquinas e diferentes configurações, tais como máquinas paralelas, *flow shops* simples e paralelos, *job shops*. Todos esses sistemas são compostos das mesmas entidades básicas; assim, a representação matemática de diferentes modelos não depende da formulação de uma função de transferência diferente para cada sistema particular, como ocorre quando as ferramentas da teoria clássica de controle são utilizadas. Essa representação requer apenas combinações diferentes das entidades básicas para formar topologias diferentes. Em termos de modelagem matemática, a representação do estado pode ser obtida por meio da manipulação algébrica ordinária das equações constitutivas das entidades básicas, e não da dedução de equações diferenciais e suas funções de conversão para transferência, para cada caso particular (SAGAWA, NAGANO; SPERANZA NETO, 2017).

Segundo Benmansour *et al.* (2004), três abordagens utilizam os grafos de ligação aplicados ao campo do sistema de manufatura: a abordagem transitória, a produtiva e a informacional.

A abordagem transitória considera conjuntamente o fluxo de material e os componentes dinâmicos deste fluxo (efeito das cargas, níveis dos estoques, fluxo das fontes, frequência de processamento, taxas de utilização, etc.) destacando as funções logísticas relacionadas ao roteamento de matéria dentro do sistema de manufatura. A abordagem

produtiva considera uma dupla dimensão, qualitativa e quantitativa, que aponta a importância da manufatura integrada, levando em consideração não apenas o fluxo de produtos, mas também o fluxo financeiro que expressa as transformações que afetam a natureza dos produtos por variações do custo, ou seja, o valor monetário na produção. A abordagem informacional permite descrever o aspecto informacional do sistema de manufatura. Os conceitos elementares do modelo de grafos de ligação são generalizados para processar as trocas de informações no sistema, onde a informação é levada em conta como uma forma de energia das quais as expressões duais envolvidas como variáveis de força (f e e) são dados e tratamentos. (BENMANSOUR *et al.*, 2004). Como será visto na revisão sistemática apresentada, há um modelo na literatura (que será denominado Modelo 1) que segue a abordagem produtiva, considerando fluxo de material e custo. A vertente da abordagem transitória, até então, é a mais desenvolvida, com alguns modelos que seguem o formalismo da modelagem de grafos de ligação (não são pseudografos), e que foram de fato simulados.

2.3 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Uma revisão bibliográfica sistemática (RBS) foi realizada para identificar e analisar os modelos aplicados aos sistemas de manufatura que utilizam a abordagem de grafos de ligação presentes na literatura.

Tal RBS se propõe a responder as seguintes questões:

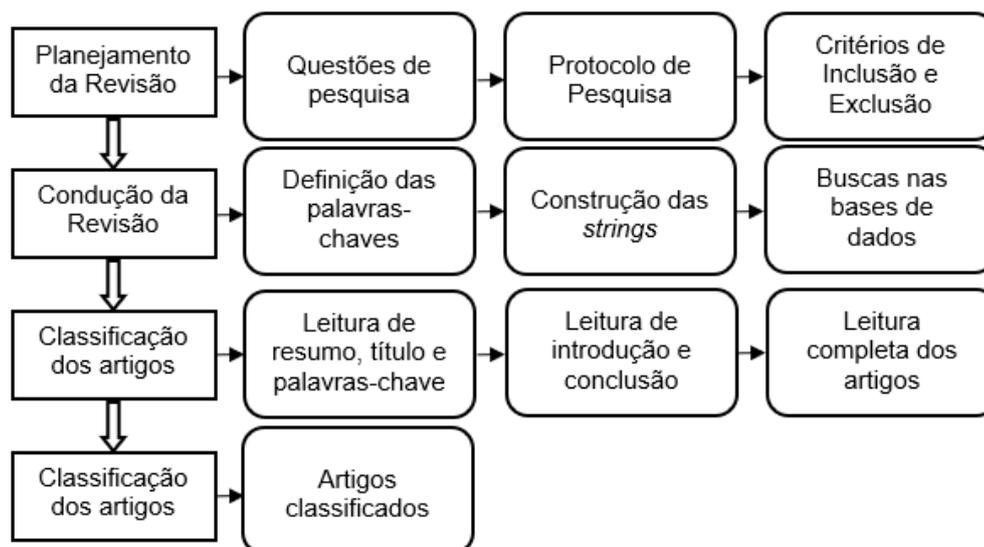
1. Quais os modelos dinâmicos que utilizam a abordagem de grafos de ligação aplicados a sistemas de manufatura presentes na literatura?
2. Quais são as interpretações das variáveis generalizadas utilizadas no processo de modelagem dos sistemas de manufatura?
3. Quais são os elementos básicos (Fig. 2) utilizados nos modelos e quais significados são atribuídos a eles?
4. Os modelos propostos possuem equacionamento matemático ou são apenas conceituais? Há resultados de simulações?

Modelos de grafos de ligação aplicados em outras áreas (não voltados à representação de sistemas de produção) não foram considerados nesta revisão.

Os passos realizados durante a revisão sistemática da literatura são definidos em três estágios. O primeiro estágio é o planejamento da revisão, no qual deve-se identificar a necessidade da revisão, preparar a proposta e desenvolver o protocolo de revisão, definindo as questões de pesquisa, as palavras chave e a expressão de busca, os filtros e os critérios que

serão utilizados para inclusão ou exclusão dos artigos. O segundo estágio está relacionado a condução da revisão, no qual se realiza a identificação da pesquisa, seleção dos estudos, análise da qualidade dos estudos, extração os dados e síntese dos dados. No terceiro estágio relatam-se os resultados, através de relatos, recomendações e evidências práticas. Por último é realizada a classificação dos artigos encontrados (TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003).

Figura 3 – Etapas da revisão bibliográfica



Fonte: Adaptado Denyer e Tranfield (2009).

Antes de se iniciar a revisão sistemática da literatura, foi realizada uma revisão de escopo simples para definir quais as palavras chaves, as bases de dados que foram utilizadas nas buscas dos artigos e a expressão de busca (*string*). O conjunto de palavras chaves formam as *strings* de busca que foram utilizadas nas bases de dados para realizar as pesquisas, conforme mostrado no Quadro 2. As bases de dados escolhidas para realizar a pesquisa foram a *Scopus*, *Engineering Village* e *Web of Science* devido ao grande número de publicações relacionados à engenharia nessas bases. Durante a busca, não houve restrição em relação às datas de publicação dos artigos, ou seja, utilizou-se o ano inicial do acervo de cada base de dados.

Quadro 2 – *Strings* de busca

Base	<i>String</i>	Artigos
Scopus	("bond graphs" OR "bond graph") AND ("production planning and control" OR "production planning" OR "production control" OR "production system" OR "supply chain" OR "shop floor" OR "manufacturing system" OR "manufacturing") AND ("system modelling" OR "system modeling" OR "dynamic systems" OR "dynamic modelling" OR "continuous simulation" OR "simulation model generation" OR "closed loop" OR "control theory" OR "feed back" OR "state equation" OR "state model")	660

Base	String	Artigos
Engineering Village	((bond graphs OR bond graph) AND (production planning and control OR production planning OR production control OR production system OR supply chain OR shop floor OR manufacturing system OR manufacturing) AND (system modelling OR system modeling OR dynamic systems OR dynamic modelling OR continuous simulation OR simulation model generation OR closed loop OR control theory OR feed back OR state equation OR state model))	389
Web of science	((bond graphs OR bond graph) AND (production planning and control OR production planning OR production control OR production system OR supply chain OR shop floor OR manufacturing system OR manufacturing) AND (system modelling OR system modeling OR dynamic systems OR dynamic modelling OR continuous simulation OR simulation model generation OR closed loop OR control theory OR feed back OR state equation OR state model))	168

Fonte: Elaborado pelos autores.

Depois de realizadas as buscas, os artigos foram classificados com o auxílio do software gratuito *StArt*, disponibilizado pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software (LAPES), facilitando a classificação utilizando os critérios de inclusão e exclusão.

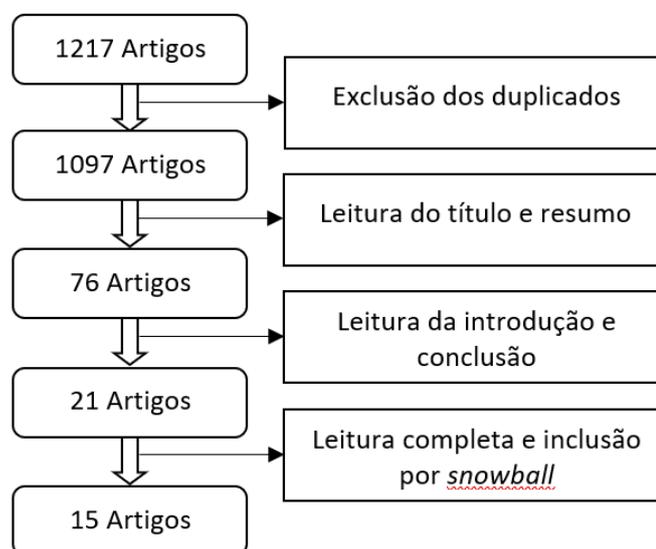
A *string* de busca é composta por três partes, ligadas por operadores AND; tais partes correspondem à abordagem (grafos de ligação), à aplicação que se deseja analisar (de forma mais específica, não somente a grande área) e a palavras que remetem aos processos de modelagem e simulação, pois se deseja selecionar trabalhos que apresentem os modelos, e não apenas citem os grafos de ligação como técnica de modelagem. Para cada uma das partes da expressão foram levantados sinônimos e termos correlatos, unidos entre si pelo operador OR. Como critério específico, foram buscados artigos nos quais as aplicações dos modelos eram voltadas à representação da dinâmica do chão de fábrica de sistemas de produção/sistemas de manufatura, ou aplicações relacionadas ao Planejamento e Controle da Produção e à Cadeia de Suprimentos.

A maioria dos artigos encontrados na revisão utiliza a abordagem de grafos de ligação e realiza um processo de modelagem e simulação, porém, uma pequena quantidade utiliza esta abordagem para representar sistemas de produção. A maioria dos artigos está relacionada a outras áreas do conhecimento, onde a abordagem de grafos de ligação é mais difundida, como em sistemas mecânicos, sistemas elétricos, sistemas hidráulicos, sistemas térmicos, etc.

Os artigos tratam, em sua maioria, de dispositivos mecânicos, elétricos ou eletromecânicos. A aplicação da abordagem de grafos de ligação é utilizada desde o projeto desses dispositivos até a supervisão e manutenção desses dispositivos em funcionamento. A abordagem também é utilizada em outras áreas como, engenharia de materiais para desenvolvimento de produtos, engenharia química para representar processos químicos, em

áreas biológicas para representar o crescimento populacional de bactérias, entre outras. Os critérios de exclusão estão relacionados a estas áreas, as quais não eram foco do estudo.

Figura 4 – Filtros da RBS



Fonte: Elaborado pelos autores.

Conforme dito anteriormente, há uma pequena quantidade de artigos de grafos de ligação aplicados à área de engenharia de produção. Alguns artigos são de um mesmo autor, ou seja, os artigos tratam de um mesmo modelo. Além disso, alguns artigos não trazem um modelo estruturado, mas apenas discussões conceituais sobre o uso de grafos de ligações na representação de sistemas de manufatura. A leitura completa dos 15 artigos selecionados durante o processo da RBS, mostrados no Quadro 3, permitiu a identificação de 5 modelos de grafos de ligação aplicados a sistemas de manufatura. Os modelos serão apresentados e analisados nas próximas seções.

Quadro 3 – Artigos selecionados na RBS

Número	Título	Autor	Ano
1	Application of generalized bond-graphs and continuous petri nets to modelling industrial processes and manufacturing systems	Besombes, B. Marcon, E. e Alla, A.	1992
2	Bond-graphs for modelling of manufacturing systems	Besombes, B. e Marcon, E.	1993
3	Proposition of manufacturing systems modelling by bond-graphs	Dembele, S. e Lhote, F.	1993
4	Modeling of containers flows in a workshop. A bond-graph approach	Dembele, S. e Lhote, F.	1994
5	Using bond graphs to model production systems with	Lair, P. O. Femey,	1997

Número	Título	Autor	Ano
	machine failure	M. e Zerhouni, N.	
6	Modelling and controlling product manufacturing systems using bond-graphs and state equations: Continuous systems and discrete systems which can be represented by continuous models	Ferney, M.	2000
7	Bond graphs for robust modelling of manufacturing systems	Benmansour, S. Benabdelhafid, A. Boudebous, D. e Boukachour, J.	2004
8	Dynamic models for production control and scheduling: A brief review	Sagawa, J.K. e Nagano, M.S.	2013
9	Modeling the dynamics of a multi-product manufacturing system: A real case application	Sagawa, J.K. e Nagano, M.S.	2015
10	Applying Bond Graphs for Modelling the Manufacturing Dynamics	Sagawa, J. K. e Nagano, M. S.	2015
11	A closed-loop model of a multi-station and multi-product manufacturing system using bond graphs and hybrid controllers	Sagawa, J. K. Nagano, M. S. e Neto, M. S.	2017
12	Combined synthesis/simulation approach to design and verification of production control strategies	Sagawa, J. K. e Gasper, M.	2017
13	Representing workload control of manufacturing systems as a dynamic model	Sagawa, J. K. e Land, M. J.	2018
14	Frequency Based Model Predictive Control of a Manufacturing System	Sprodowski, T. Sagawa, J. K. e Jurgen, P.	2018
15	Towards the use of bond graphs for manufacturing control: Design of controllers	Sagawa, J. K. e Gasper, M.	2019

Fonte: Elaborado pelos autores.

2.4 MODELOS DE GRAFOS DE LIGAÇÃO REPRESENTANDO SISTEMAS DE MANUFATURA

2.4.1 Modelo 1

O primeiro modelo analisado foi proposto por Besombes, Marcon e Alla (1992). O modelo utiliza uma representação técnico-econômica do sistema de manufatura, levando em consideração o fluxo de produto e a variação do custo do produto. Em um nível agregado, o comportamento do sistema aproxima-se de um sistema contínuo.

Segundo Besombes, Marcon e Alla (1992), os dois principais fluxos nos sistemas de manufatura são o fluxo de produtos e o fluxo de demanda. Os fluxos possuem uma natureza diferente e sentido de circulação diferentes nos sistemas de manufatura. O fluxo de demanda provoca a produção dos produtos e as informações percorrem o caminho inverso ao percorrido pelo fluxo de produtos.

A variável de esforço representa o custo das peças produzidas e a variável de fluxo representa a taxa de fluxo de peças; o produto das duas variáveis representa a movimentação de capital no sistema de manufatura. Esta variável representa uma noção do valor econômico

que define o custo unitário do produto em um determinado momento. Este custo pode sofrer variações durante o tempo de produção. A noção de potência representa o poder econômico instantâneo da produção, ou dinheiro prometido para a produção desse fluxo.

As junções são utilizadas para expressar a conservação de potência entre os elementos do sistema. A junção do tipo 0 introduz a noção de que a troca de um consumidor por outro não altera o custo unitário da demanda de produto. As junções do tipo 1 podem representar uma operação de montagem, a qual, segundo os autores, não possui custo. A somatória dos esforços é igual a zero, o que permite calcular o custo unitário do produto montado.

Os elementos ativos fonte de esforço e fonte de fluxo representam as ações exercidas pelos elementos externos aos sistemas de manufatura. A primeira impõe um custo unitário para a demanda e a segunda, um fluxo de demanda.

Segundo Besombes, Marcon e Alla (1992), o elemento *R* representaria o custo unitário direto da produção para satisfazer a demanda. A relação entre fluxo e esforço expressa o fato de que o custo do processamento de uma demanda é uma função do fluxo de produção.

No sistema de manufatura, o elemento *C* é utilizado para modelar o estoque de demanda¹ de produto, sendo necessário uma quantidade mínima econômica para a produção iniciar, e para modelar o estoque de produto. No estoque de produto, um elemento *R* é associado para levar em consideração a dissipação de energia durante o processo de armazenagem do produto.

O elemento *I* é utilizado no modelo para armazenar energia, sendo caracterizado pela relação entre fluxo e impulsão. Ele expressa o fato de que o fluxo é uma função da acumulação de valor ligado à produção que tem que ser desenvolvida durante o período.

Em um estado inicial, enquanto a produção não se iniciou, o fluxo no elemento *R* é nulo. É necessário haver pressão suficiente da demanda, em termos de acúmulo de custo unitário para se começar a produzir. Abaixo desse valor acumulado, o início da produção poderia induzir a uma perda monetária. O sistema evolui até que o fluxo é atingido, tal que o custo unitário de produção equilibre o custo unitário desejado para os produtos acabados. Em um estado estacionário o fluxo de produtos é constante e o custo unitário no elemento *I* será zero. A energia de produção acumulada no recurso é o dinheiro imobilizado durante a produção.

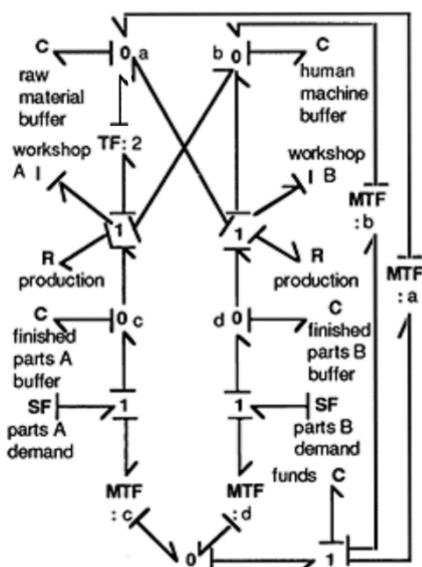
Os elementos *TF* e *GY* são utilizados para representar as transformações de potência ocorridas nos sistemas. O transformador é utilizado para representar a mudança de

¹ Aqui foi feita uma tradução do termo “stock of products demand” empregado pelos autores Besombes, Marcon e Alla (1992). No trabalho original, não há explicações detalhadas do significado desse conceito.

quantidades sem dissipação de energia, como em uma operação de montagem (i.e. agregação) ou de separação (i.e. desagregação) de materiais, onde não há custo durante o processo, segundo os autores. O girador é um elemento que permite expressar um fluxo em esforço ou vice-versa. Ele pode ser utilizado para representar a mudança entre o domínio da produção e o domínio econômico.

Os autores supracitados apresentam um modelo de grafos de ligação para um sistema de produção com 2 estações de trabalho (workshops A e B) (Fig. 5). O sistema possui duas fontes de fluxo (*SF*), uma para a demanda de peças do tipo A e outra para demanda de peças do tipo B. Essas demandas são atendidas por um estoque de componentes acabados de A e B. A junção do tipo 0 indica que o fluxo na junção é a soma de todos os fluxos impostos à essa junção, enquanto o custo é o mesmo em cada ligação. O elemento *R* representa a dissipação de energia, referente aos custos diretos na produção das peças, como obtenção de matéria primas em estoque, recursos humanos e de máquinas.

Figura 5 – Modelo agregado



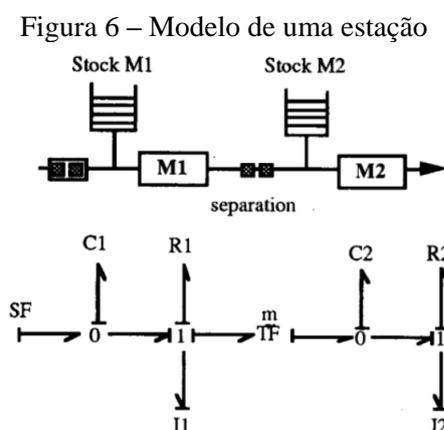
Fonte: Besombes, Marcon e Alla (1992).

Cada centro de trabalho contém um conjunto de máquinas que constitui um investimento e possui uma resistência às mudanças no fluxo; quando o fluxo é zero, há um custo de depreciação. O transformador *TF* é utilizado para indicar a quantidade de matéria prima para peças do tipo A necessárias. Os transformadores modulados (*MTF*) são utilizados para representar a mudança de unidades da mercadoria, ou seja, o fluxo de mudança de peças A para fluxo de caixa, devido às vendas das peças. O significado dos módulos dos transformadores é:

- a: custo unitário de matéria prima
- b: custo unitário dos recursos humanos e de maquinário
- c: custo unitário de peças acabadas tipo A
- d: custo unitário de peças acabadas tipo B.

Vale ressaltar que tais transformadores modulados não aparecem no conjunto de elementos básicos definidos por Besombes, Marcon e Alla (1992), na parte conceitual de seu artigo. Pela descrição dada pelos autores ao apresentar o sistema, na qual os transformadores representam a conversão de fluxo de peças para fluxo de caixa por meio da venda das peças, pode-se supor que seria mais adequado a utilização de giradores, nesse caso, pois os transformadores realizam conversão de fluxo em fluxo e esforço em esforço, alterando-se apenas a magnitude da entrada ou da saída. Os giradores são os elementos que realizam a conversão de esforço em fluxo ou vice-versa.

Em Besombes e Marcon (1993), são apresentadas as mesmas interpretações conceituais dos elementos anteriormente apresentadas por Besombes, Marcon e Alla (1992), porém, propõe-se um modelo diferente, o qual possui dois submodelos IRC em linha para representar as máquinas. Entre as máquinas *M1* e *M2* existe uma operação de separação, representada pelo elemento *TF*. O elemento *C2* representa o estoque induzido durante a operação de separação. Uma omissão deste elemento pode levar a um conflito de causalidade na junção 0, pois apenas uma causalidade deve ser desenhada próximo à uma junção do tipo 0. Os autores supracitados não apresentam mais informações sobre esse modelo, nem sobre a interação entres os elementos *I*, *R* e *C*.



Fonte: Besombes e Marcon (1993).

Deve-se notar que os modelos apresentados são de pseudografos e apresentam ideias interessantes para representar aspectos envolvidos na produção (inclusive aspectos econômicos), entretanto, eles não preservam o formalismo do método de grafos de ligação,

não sendo possível, dessa forma, obter as equações matemáticas a partir do modelo pictórico, nem realizar simulações. Este aspecto será melhor discutido nas seções finais deste artigo.

2.4.2 Modelo 2

No modelo de Dembélé e Lhote (1993) os sistemas de manufatura, de um ponto de vista espacial, formam uma rede composta por um conjunto de estações conectadas umas às outras, onde as operações realizadas são interligadas por caminhos unidirecionais de tráfego de cargas. O termo “carga unitária” é adotado pelos autores para designar um produto individual ou uma unidade de material em processo, enquanto “carga múltipla” denota vários produtos que são transportados (*conveyed*) em uma mesma caixa.

As estações representam as descontinuidades no fluxo desta rede, onde os fluxos de materiais se conectam. Os pontos de observação da estação são as portas de entrada e saída. As estações são agrupadas em dois tipos, denominados pelos autores de “famílias”. No primeiro tipo, as cargas são submetidas a operações destinadas a facilitar o tráfego, tais como armazenamento, agrupamento de produtos individuais em lotes ou desagrupamento. Nas estações do segundo tipo, os lotes são submetidos a operações de manufatura destinadas a modificar a natureza dos fluxos, como processos de usinagem e montagem.

A variável generalizada de esforço é representada por $M(t)$ e definida como o número de cargas em um determinado instante t , enquanto a variável generalizada de fluxo $F(t)$ representa uma frequência de processamento ou transporte em um dado tempo t .

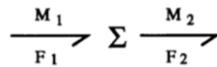
Assim, observa-se que a potência $Q(t)$, resultante da multiplicação de esforço e fluxo, consiste em uma taxa de fluxo, ou seja, quantidade de produtos transferidos por unidade de tempo, e a energia, $Vol(t)$, resultante da integração da potência, representa o número acumulado de produtos

No domínio mecânico e elétrico, há dois tipos de armazenamento: de energia potencial ou eletrostática, representadas pelo elemento C , e de energia cinética ou eletromagnética, representados pelo elemento I . Como se sabe, tais elementos possuem equações constitutivas bem definidas envolvendo as variáveis de esforço e fluxo. Devido à definição escolhida pelos autores (DEMBÉLÉ; LHOTE 1993; DEMBÉLÉ; LHOTE 1994) para as variáveis de esforço e fluxo, estas equações constitutivas já existentes não são adequadas para representar a quantidade de material armazenado, ou seja, as expressões matemáticas não são compatíveis com a grandeza que se deseja representar. Assim, os autores supracitados introduzem um elemento não existente na metodologia de grafos de ligação para representar os estoques, denominando-o Σ (Fig.7). A energia armazenada neste elemento, expressa em Eq.(11), corresponde ao número de produtos numa dada estação, dado pela integral da diferença entre

a taxa de fluxo de entrada (*input flow rate*) $M_1(t).F_1(t)$ e a taxa de fluxo de saída $M_2(t).F_2(t)$. U_{max} é a capacidade máxima de armazenagem.

$$U(t) = \int_0^t (M_1(\tau)F_1(\tau)M_2(\tau)F_2(\tau))d\tau + U(0) \quad (11)$$

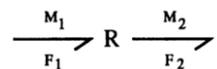
Figura 7 – Estação de armazenamento



Fonte: Dembélé e Lhote (1993).

O elemento R , Fig. 8, é utilizado para representar as perdas acidentais que ocorrem durante o processo de fabricação. O número de perdas aumenta quando a frequência de processamento das cargas ($F(t)$) também aumenta.

Figura 8 – Elemento resistor

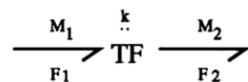


Fonte: Dembélé e Lhote (1993).

A fonte de fluxo é representada pela variável S no sistema e fornece o fluxo para as estações conectadas a ela. Os pontos finais de armazenagem (*wells*) são representados pela variável P , e recebem o fluxo das estações também conectadas a eles.

A interpretação do elemento transformador (Fig. 9) depende do valor do módulo k . Se o módulo k possui um valor inteiro positivo e superior a 1, ele representa uma estação onde ocorre o desagrupamento do lote recebido em unidades menores

Figura 9 – Elemento transformador



Fonte: Dembélé e Lhote (1993).

Em uma estação de espera ou de máquina única, o valor de k é igual a 1. Nas estações onde ocorre o agrupamento dos produtos em lotes ou é realizado algum processo de montagem, o valor do módulo k é o inverso de um número inteiro superior a 1, representado por $1/k$. As equações que representam o comportamento do elemento transformador são:

$$M_1(t) = k M_2(t) \quad (12)$$

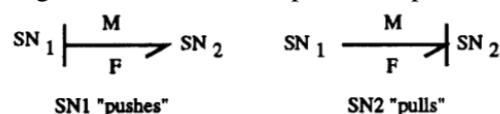
$$kF_1(t) = F_2(t) \quad (13)$$

As junções utilizadas pelos autores são do tipo 0 ou 1 (como na metodologia original de grafos de ligação), e possuem p fluxos/ramos de entrada (*input flows/branches*) e q

fluxos/ramos de saída (*output flows/branches*) de lotes da mesma natureza. Se p é unitário e q é maior do que 1, a junção é divergente; o caso oposto caracteriza uma junção convergente. Nas junções do tipo 0, o número de cargas em cada ramo é igual, e ocorre a soma das frequências na entrada da junção é igual à soma das frequências na saída. Nas junções do tipo 1, a frequência é comum aos elementos de entrada e saída, em todos os ramos, e ocorre uma conservação do número de cargas, ou seja, a somatória das cargas de entrada é igual à somatória de cargas na saída. As junções do tipo 1 convergentes são utilizadas por Dembélé e Lhote (1993) e Dembélé e Lhote (1994) para representar uma estação de agrupamento (caso os ramos de entrada sejam de mesma natureza) ou para representam uma estação de montagem, caso os ramos sejam de naturezas diferentes, ou seja, diferentes materiais são unidos para formar um produto ou módulo.

A causalidade permite introduzir um conceito de controle sobre os sistemas, que pode ser realizado de duas maneiras (Fig. 10). Quando a estação a montante define o ritmo de trabalho, o sistema é considerado com fluxo empurrado. Os elementos de estoque, fonte e poços podem trabalhar com sistema puxado e empurrado. No primeiro caso mostrado na Fig. 10, a barra de causalidade é posicionada no início da meia flecha, indicando que o sentido do esforço é de SN_2 para SN_1 . O sentido do fluxo é contrário ao sentido do esforço, portanto, o sistema é considerado empurrado. No segundo caso, a barra de causalidade é posicionada no final da meia flecha, indicando que o sentido do esforço é de SN_1 para SN_2 , neste caso o sistema é puxado.

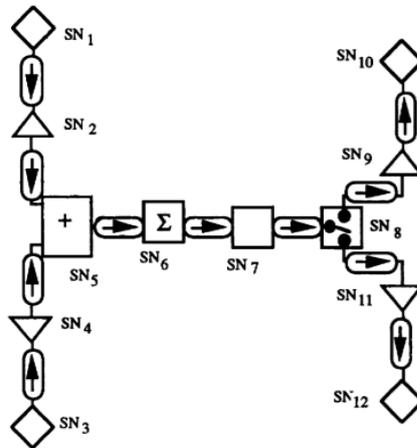
Figura 10 – Sistema empurrado e puxado



Fonte: Dembélé e Lhote (1993).

Os autores utilizam os elementos apresentados para modelar o sistema apresentado na Fig. 11.

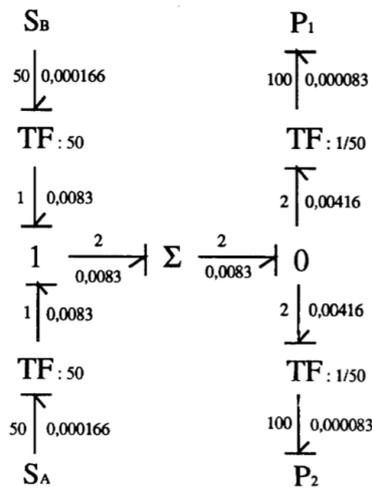
Figura 11 – Sistema de produção



Fonte: Dembélé e Lhote (1993).

O equivalente desse sistema em grafos de ligação é mostrado na Fig. 12.

Figura 12 – Modelo de grafos de ligação do sistema apresentado



Fonte: Dembélé e Lhote (1993).

- *SN1* e *SN3* são fontes de fluxo, fornecendo lotes de 50 produtos (componentes), respectivamente, tipo A e tipo B, a cada 100 minutos. Nos grafos de ligação eles são representados pelas fontes de fluxo S_A e S_B ;
- *SN2* e *SN4* são estações de desagrupamento em 50 representadas por transformadores TF com módulo igual a 50;
- *SN5* é uma estação de montagem representada por uma junção do tipo 1 em grafos de ligação;
- *SN6* é uma estação de armazenamento que o conteúdo é 45, representado pelo elemento

artificial Σ :

- *SN7* é uma estação de pintura modelada usando uma junção do tipo 0;
- *SN8* é uma estação de comutação, controlado regularmente em direção às estações de agrupamento por 50, *SN9* e *SN11*, que são transformadores com módulo 1/50;
- *SN10* e *SN12* são dois poços de fluxos recebendo lotes de 50 produtos a cada 200 mn, representado pelo elemento artificial *P*.

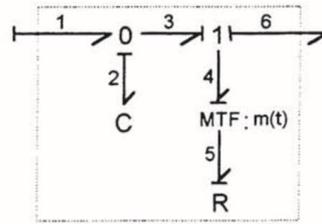
O modelo apresentado baseia-se na analogia da potência (i.e. do produto das variáveis esforço e fluxo) com uma taxa de fluxo de produtos (em unidades/tempo). Deve-se mencionar que os elementos Σ e *P* não fazem parte da metodologia convencional de grafos de ligação, ou seja, eles foram introduzidos pelos autores, o que constitui um modelo de pseudografos. Isso dificulta a obtenção das equações de estado diretamente a partir do modelo gráfico e também dificulta a simulação do modelo proposto e estudo de sua dinâmica. Os autores supracitados não apresentaram simulações deste modelo.

2.4.3 Modelo 3

No modelo apresentado por Lair, Ferney e Zerhouni (1997), a variável generalizada de fluxo tem a mesma interpretação apresentada no modelo 3, e os mesmos elementos básicos são usados na modelagem. A estação do sistema de produção é composta por uma máquina e um estoque. O elemento *C* representa o estoque de peças de cada estação e o elemento *R* representa a máquina neste modelo. O fluxo ligado ao elemento *R* representa o fluxo de saída da máquina. O fluxo de saída da estação depende dos níveis de estoques posicionados à montante e a jusante da máquina. Este fluxo varia em função da capacidade máxima dos estoques, das taxas de processamento da máquina e do número de peças em estoque. Os eventos possuem frequências suficientemente altas para comparar o fluxo de peças que fluem pelo sistema com um fluxo contínuo.

O elemento *MTF* é utilizado para introduzir a noção de descontinuidade, como as falhas em máquinas conforme mostrado na Fig. 13. O módulo deste elemento é booleano, dependente do tempo, e determina dois possíveis estados para as máquinas. Quando a máquina está produzindo, $m(t) = 1$ e o elemento *MTF* é invisível para o fluxo entre a junção 1 e o elemento *R*. Quando ocorre a falha, $m(t) = 0$ e o elemento *MTF* implica um fluxo $f_4 = 0$. Neste caso, o fluxo de saída da estação é nulo; como se trata de uma junção do tipo 1, o fluxo $f_6 = 0$ e $f_3 = 0$. A primeira junção é do tipo 0, portanto, $f_1 = f_2 + f_3$. Como $f_3 = 0$, o fluxo que entra na estação (f_1) é direcionado para o estoque (f_2), ou seja, $f_1 = f_2$, e o fluxo de saída (f_6) torna-se nulo.

Figura 13 – Modelo de uma estação

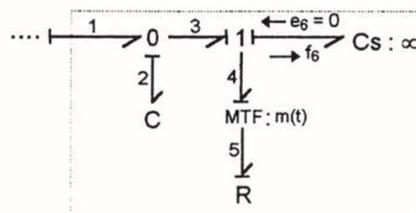


Fonte: Lair, Ferney e Zerhouni (1997).

O sistema apresenta ainda interfaces de origem e interfaces de saída. A interface de origem, ou fontes de fluxo, possuem uma variável de fluxo imposta, independente das características do sistema, que representa o suprimento ou as entradas fornecidas ao sistema. A interface de saída é representada pelo elemento C_s , posicionado a jusante das estações finais, como mostrado na Fig. 14.

O elemento C_s é considerado como um “poço” (*sink*), que recebe o fluxo de produção ao final do sistema. Estes elementos devem perder a característica dinâmica, ou seja, o esforço, em sentido contrário ao fluxo de produção, deve ser nulo para que esses elementos não exerçam qualquer influência nos elementos posicionados a montante. Considerando a capacidade dos estoques finas infinita, pela equação constitutiva do estoque $e_6 = q_6 / C_s$, o esforço relativo é nulo.

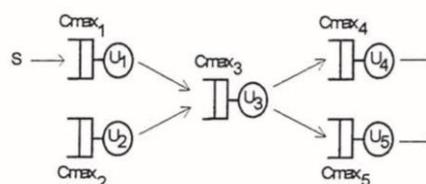
Figura 14 – Modelo de uma estação final



Fonte: Lair, Ferney e Zerhouni (1997).

Lair, Ferney e Zerhouni (1997) conduzem uma simulação para ilustrar o funcionamento dos elementos propostos. O modelo simulado possui cinco estações, como pode ser observado na Fig. 15.

Figura 15 – Sistema considerado



Fonte: Lair, Ferney e Zerhouni (1997).

A equação de estado é expressa da forma:

$$\dot{x} = A(x).x + B.u \quad (14)$$

A equação de saída é dada pela relação:

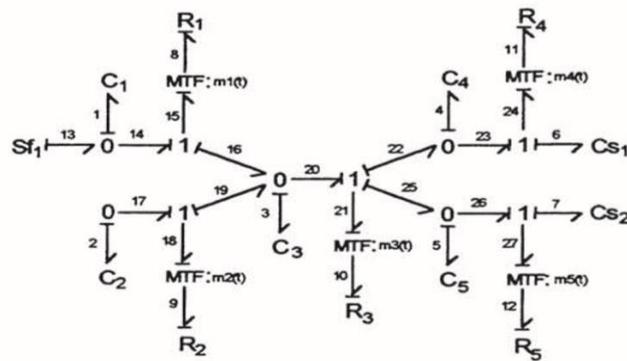
$$y = C(x).x \quad (15)$$

O modelo de grafos de ligação do sistema é mostrado na Fig. 16, a partir dele são geradas as equações de estado do sistema. O vetor de estado que corresponde ao modelo de grafo de ligação é:

$$x = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5 \ q_6 \ q_7]^t \quad (16)$$

O vetor de entrada U representa as fontes de fluxo do sistema e os elementos da matriz A são variáveis porque dependem do vetor de estado.

Figura 16 – Modelo de grafo de ligação do sistema



Fonte: Lair, Ferney e Zerhouni (1997).

Os elementos \dot{q}_6 e \dot{q}_7 representam o fluxo de peças que são armazenadas nos estoques C_{s1} e C_{s2} , que possuem capacidade ilimitada.

As equações propostas por Lair, Ferney e Zerhouni (1997) são apresentadas a seguir. O módulo m_i aparece na matriz de estado A , pois tem influência direta sobre o funcionamento das máquinas.

$$\dot{q}_1 = f_1 = f_{13} - \frac{m_1^2}{R_1 C_1} q_1 + \frac{m_1^2}{R_1 C_3} q_3 \quad (17)$$

$$\dot{q}_2 = f_2 = -\frac{m_2^2}{R_2 C_2} q_2 + \frac{m_2^2}{R_2 C_3} q_3 \quad (18)$$

$$\dot{q}_3 = f_3 = \frac{m_1^2}{R_1 C_1} q_1 - \left(\frac{m_1^2}{R_1} + \frac{m_2^2}{R_2} + \frac{m_3^2}{R_3} \right) \frac{1}{C_3} q_3 + \frac{m_2^2}{R_2 C_2} q_2 - \frac{m_3^2}{R_3 C_4} q_4 - \frac{m_3^2}{R_3 C_5} q_5 \quad (19)$$

$$\dot{q}_4 = f_4 = \frac{m_3^2}{R_3 C_3} q_3 - \left(\frac{m_3^2}{R_3 C_4} + \frac{m_4^2}{R_4 C_4} \right) q_4 - \frac{m_3^2}{R_3 C_5} q_5 \quad (20)$$

$$\dot{q}_5 = f_5 = \frac{m_3^2}{R_3 C_3} q_3 - \left(\frac{m_3^2}{R_3 C_5} + \frac{m_5^2}{R_5 C_5} \right) q_5 - \frac{m_3^2}{R_3 C_4} q_4 \quad (21)$$

$$\dot{q}_6 = f_6 = \frac{m_4^2}{R_4 C_4} q_4 - \frac{m_4^2}{R_4 C_{S1}} q_6 \quad (22)$$

$$\dot{q}_7 = f_7 = \frac{m_5^2}{R_5 C_5} q_5 - \frac{m_5^2}{R_5 C_{S2}} q_7 \quad (23)$$

As equações para os elementos R são expressas como:

$$R_1 = \frac{\frac{q_1}{C_1} \frac{q_3}{C_3}}{u_1 \min(1, q_1, C_3 - q_3)} \quad (24)$$

$$R_2 = \frac{\frac{q_2}{C_2} \frac{q_3}{C_3}}{u_2 \min(1, q_2, C_3 - q_3)} \quad (25)$$

$$R_3 = \frac{\frac{q_3}{C_3} \frac{q_4}{C_4} \frac{q_5}{C_5}}{u_3 \min(1, q_3, C_4 - q_4, C_5 - q_5)} \quad (26)$$

$$R_4 = \frac{q_4}{C_4 u_4 \min(1, q_4)} \quad (27)$$

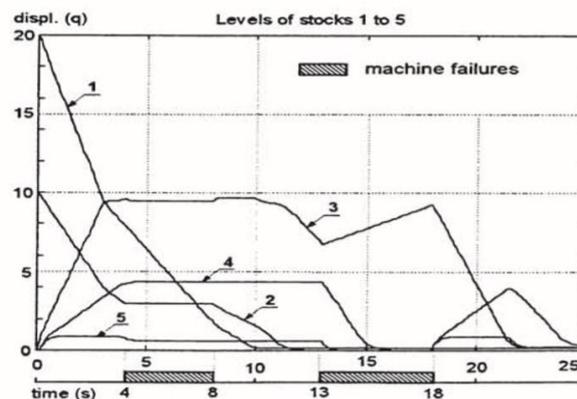
$$R_5 = \frac{q_5}{C_5 u_5 \min(1, q_5)} \quad (28)$$

As etapas de como são obtidas as equações e a justificativa pela introdução da função mínimo $u_i \min$ nas Eqs. (24) a (28) não são apresentadas pelos autores supracitados. O resultado da simulação do sistema é apresentado na Fig. 17.

Em $t = 25$ s o fluxo f_i ligado ao elemento C_i permanece igual a zero. Isto significa que o sistema atinge seu regime permanente. A fonte de fluxo constante S_f continua fornecendo material ao sistema, exceto à estação 2.

Ocorrem duas quebras de máquinas durante o tempo de simulação de 25s. A primeira quebra ocorre na máquina 2 no período entre $t = 4$ s e $t = 8$ s e a segunda quebra ocorre no período entre $t = 13$ s e $t = 18$ s. Os fluxos de saída de cada estação em função do tempo são apresentados abaixo na Fig. 17.

Figura 17 – Resultados da simulação do modelo



Fonte: Lair, Ferney e Zerhouni (1997).

2.4.4 Modelo 4

O modelo 4 é apresentado por Ferney (2000). Nele, os sistemas de produção são formados por fontes, poços, estoques, máquinas e junções. Os parâmetros que definem cada agrupamento são classificados em duas categorias, parâmetros estáticos e dinâmicos.

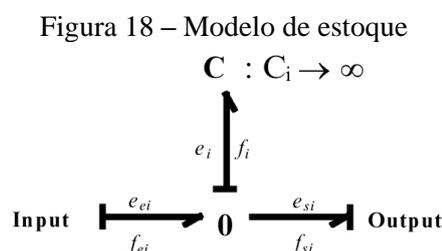
O fluxo de produção $f(t)$ representa a evolução do fluxo de material em uma determinada seção do sistema de manufatura e é expresso em unidades de material por segundo. A variável de esforço $e(t)$ é expressa em unidades de material e evolui em um intervalo de 0 a 1. Ela ilustra a característica ativa ou passiva de uma estação de produção, e o nível de atividade de uma entidade ativa em relação ao fenômeno de acoplamento.

A variável de esforço assume qualquer valor no intervalo definido quando há restrições no suprimento à montante de uma dada estação, valor 0 quando a estação anterior interrompe o suprimento e valor igual a 1 quando não há restrições.

Nessa abordagem, sistemas de produção com elementos discretos são modelados como sistemas contínuos. Essa aproximação baseia-se no uso de fluxos médios de produção. O fluxo médio f_i é definido pela relação geral que relaciona a variável de esforço e_i com a frequência de processamento da máquina U_i , a qual, ao ser multiplicada por 1 unidade de material, representa uma taxa de produção da máquina.

$$f_i = U_i e_i \quad (29)$$

O estoque é um elemento passivo e possui capacidade infinita, Fig.18. O fluxo de entrada é imposto pela entidade conectada à montante, e o fluxo de saída é imposto pela entidade localizada à jusante do estoque.



Fonte: Ferney, (2000).

O fluxo de material armazenado nos estoques é a diferença entre o fluxo de entrada e o fluxo de saída, onde a conservação do fluxo é representada por uma junção do tipo 0.

$$f_i(t) = f_{ei}(t) - f_{si}(t) \quad (30)$$

O volume de produção armazenado em um estoque durante um intervalo de tempo é

representado pela variável de deslocamento $q(t)$ e o volume inicial contido no estoque é representado pela variável q_{i0} .

$$q_i(t) = q_{i0} + \int_{t_0}^t f_i(\tau) d\tau \quad (31)$$

O volume de material estocado está relacionado com a variável de esforço pela equação constitutiva do elemento C no método de grafos de ligação, ou seja:

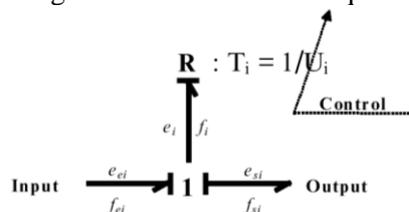
$$e_i(t) = \frac{1}{C_i} q_i(t) \quad (32)$$

O elemento R representa as máquinas de produção (Fig. 19). Em um resistor ideal, como se sabe, existe uma relação linear entre o fluxo de corrente elétrica e a tensão, onde R é a resistência elétrica.

$$f = \frac{1}{R} e \quad (33)$$

O parâmetro R_i corresponde ao inverso da frequência de processamento U_i de uma máquina, que é o período de processamento T_i de uma unidade de material.

Figura 19 – Modelo de máquina



Fonte: Ferney, (2000).

Todas as máquinas do sistema de manufatura (elemento R) são precedidas por um estoque (elemento C). Estas duas entidades estão ligadas por meio de estrutura de acoplamento (fonte de esforço Se) para constituir uma estação de produção (Fig. 20). No modelo proposto, a capacidade destes estoques é considerada ilimitada, i.e. $C_i \rightarrow \infty$. Assim, o esforço de saída do estoque tende a zero, e uma fonte de esforço é adicionada para estabelecer essa interface de acoplamento. A quantidade de esforço adicionado é mostrada na relação abaixo.

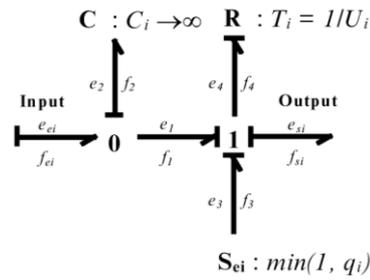
$$e_i(t) = \min(1, q_i) \quad (34)$$

A variável $e_i(t)$ expressa o fenômeno de acoplamento dinâmico em relação à disponibilidade de material na estação localizada à montante, ativando a máquina quando há qualquer quantidade de material no estoque precedente. Esta expressão garante uma transição contínua quando há menos de uma unidade de material em estoque. Quando há pelo menos

uma unidade, a máquina processará o fluxo de entrada com sua frequência de processamento total U_i , gerando um fluxo de saída $f_{si}(t) = U_i$ unidades de material por tempo.

A alocação da causalidade próxima ao elemento R indica que o fluxo de material processado é imposto à estação localizada à jusante.

Figura 20 – Modelo de uma estação



Fonte: Ferney, (2000).

Conforme já apresentado, as propriedades das junções 0 e 1 estabelecem que:

$$e_{ei} = e_1 = e_2 \text{ (junção 0)} \quad (35)$$

$$f_1 = f_3 = f_{si} = f_4 \text{ (junção 1)} \quad (36)$$

$$e_4 = e_1 + e_3 - e_{si} \text{ (junção 1)} \quad (37)$$

Com base em Eq. (29) e Eq. (37),

$$f_{si} = U_i e_4 = U_i (e_1 + e_3 - e_{si}) \quad (38)$$

Ainda, a substituição de Eq. (32) e Eq. (34) em Eq. (38) resulta em:

$$f_{si} = U_i \left[\frac{q_i}{C_i} + \min(1, q_i) - e_{si} \right] \quad (39)$$

O quociente q_i/C_i tende à zero, pois, $C_i \rightarrow \infty$. Além disso, a estação i estará ligada a uma estação k a jusante e o esforço de saída da estação i (e_{si}) é igual ao esforço de entrada da estação k (e_{ek}), i.e. $e_{si} = e_{ek} = q_k/C_k$. Com a capacidade do estoque k também ilimitada ($C_k \rightarrow \infty$), obtém-se $e_{si} = 0$. Isso permite reduzir a equação (39), obtendo-se (40).

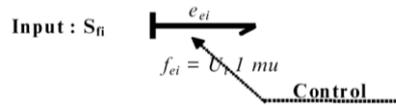
$$f_{si} = U_i \min(1, q_i) \quad (40)$$

Tomando-se Eq. (30) Eq. (40), obtém-se a equação básica de estado que indica a taxa de acumulação ou consumo de material em estoque (Eq. 41):

$$\dot{q}_i = f_{ei} - f_{si} = f_{ei} - U_i \min(1, q_i) \quad (41)$$

Para fornecer matéria prima ao sistema, Ferney (2000) utiliza fontes de fluxo imposto (Fig. 21). O fluxo é função da frequência de fornecimento da fonte U_i multiplicada por uma unidade de material. As fontes de fluxo imposto podem ser controladas ou não controladas. Em fontes controladas, o controle atua na frequência U_i , semelhante ao controle aplicado nas frequências das máquinas.

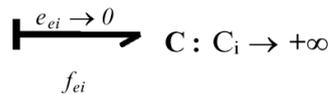
Figura 21 – Fonte de fluxo forçado



Fonte: Ferney, (2000).

O escoamento dos produtos acabados não possui restrições, e é representado por poços (Fig. 22), semelhantes aos estoques de capacidade infinita.

Figura 22 – Modelo de um poço

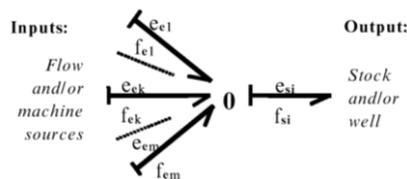


Fonte: Ferney, (2000).

As junções são utilizadas para realizar os acoplamentos entre os elementos básicos do sistema. Elas podem ser do tipo convergente, divergente ou convergente/divergente, sendo controladas ou não.

Nas junções convergentes, o fluxo de material converge para o centro da junção para formar o fluxo de saída. Este elemento é representado pela junção do tipo 0 para refletir a conservação do fluxo na junção.

Figura 23 – Junção convergente



Fonte: Ferney, (2000).

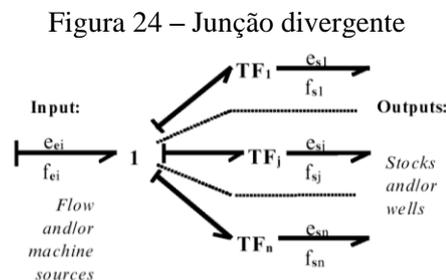
A alocação da barra de causalidade indica que as entidades localizadas a montante da junção impõem os fluxos de entrada e a somatória desses fluxos é imposta a entrada da entidade localizada à jusante da junção como mostrado na Fig. 23. O fluxo de saída da junção é definido pela relação abaixo:

$$f_{si} = \sum_{k=1}^{k=m} f_{ek} \quad (42)$$

Nas junções divergentes o fluxo de entrada é imposto no centro da junção onde é distribuído pelos vários canais de saída:

$$f_{si} = w_i f_{ei} ; \sum_{j=1}^{j=n} w_j = 1 ; w_j > 0 \quad (43)$$

A junção divergente é apresentada pela combinação de uma junção do tipo 1 e transformadores posicionados nos canais de distribuição como mostrado na Fig. 24. O transformador permite introduzir os ganhos através dos coeficientes de transformação, realizando simetricamente a distribuição do fluxo de entrada em cada canal de distribuição. A causalidade posicionada na origem do elemento de junção reflete a condição de fluxos empurrados para os canais de distribuição.



Fonte: Ferney, (2000).

A combinação de uma junção convergente e uma divergente produz uma junção convergente/divergente relacionada pela equação abaixo.

$$f_{si} = w_j \sum_{k=1}^{k=m} f_{ek} \text{ com } \sum_{j=1}^{j=n} w_j = 1 \text{ e } w_j > 0 \quad (44)$$

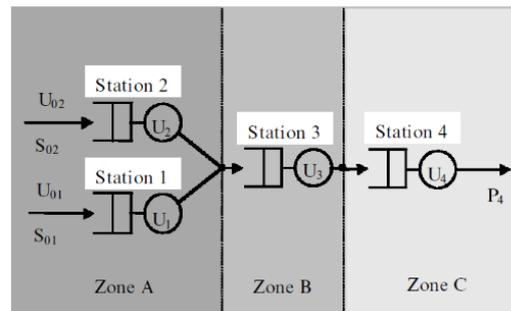
A representação do sistema em equação de estado permite a aplicação de controladores. A metodologia de grafo de ligação introduz a escrita sistemática da equação de estado.

$$\dot{x} = f(x) + Bu \quad (45)$$

O vetor de estado, x , representa a memória do sistema. Este vetor é constituído pelas variáveis de energia $q_i(t)$, associadas aos volumes de material disponíveis nos estoques. A derivada dessas variáveis, $\dot{q}_i(t)$, é igual ao fluxo $f_i(t)$. Como os fluxos estão diretamente relacionados com os estoques, a ordem do sistema é igual ao número de elementos C .

Para testar as entidades básicas propostas, Ferney (2000) propõe a modelagem e simulação do sistema mostrado na Fig. 25.

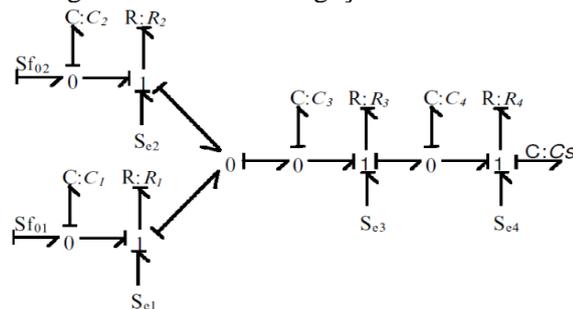
Figura 25 – Estações de trabalho



Fonte: Ferney, (2000).

O modelo de grafo de ligação é construído sistematicamente através da associação dos elementos básicos (Fig. 26). Essa representação, que está muito próxima dos desenhos de engenharia, permite a visualização dos principais itens do sistema, para a criação de interfaces homem-máquina para o gerenciamento desses sistemas.

Figura 26 – Grafo de ligação do sistema.



Fonte: Ferney, (2000).

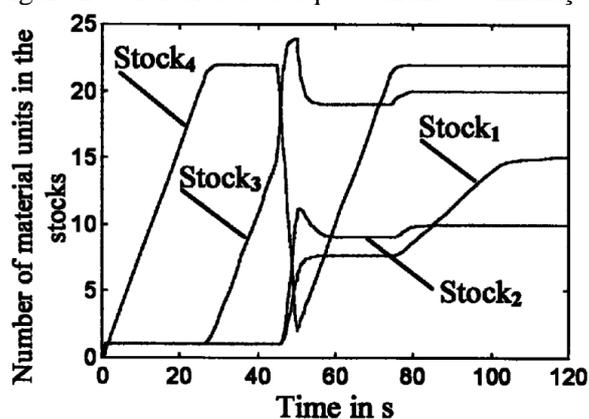
As equações de estado do modelo são baseadas na equação associada às estações (Eq. 41), e nas equações de distribuição dos fluxos de materiais entre as estações (Eq. (42-44) e das fontes de fornecimento de material, resultando no sistema a seguir.

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -U_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -U_2 & 0 & 0 \\ U_1 & U_2 & -U_3 & 0 \\ 0 & 0 & U_3 & -U_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \min(1, q_1) \\ \min(1, q_2) \\ \min(1, q_3) \\ \min(1, q_4) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{01} \\ U_{02} \end{bmatrix} \quad (46)$$

No momento inicial da simulação os estoques intermediários estão vazios e a matriz de controle é reduzida à parte relacionada às fontes de suprimento. A dinâmica de acoplamento entre estação e estoque é quebrada quando o estoque de uma estação contiver mais de uma unidade de material. A partir deste ponto, a operação da máquina torna-se autônoma e o controle atua nas frequências de processamento das máquinas.

Os resultados obtidos durante a simulação são mostrados na Fig. 27. É necessário pouco mais de 1s para acumular uma unidade de material em cada um dos estoques das estações. Em $t = 45s$, é realizada a simulação da quebra da máquina 3 por um período de 5s. Durante este período, o estoque acumulado na estação 4 permite que a produção continue normalmente. As frequências das máquinas 1 e 2 e das fontes de fluxo 01 e 02 são reduzidas para evitar o acúmulo de material nos estoques intermediários. Após aproximadamente 120s de simulação, os valores definidos dos níveis dos estoques são atingidos e o sistema começa a operar em regime permanente. Como as frequências de processamento das estações são ajustadas em função dos estoques posicionados a jusante das estações, o estoque 1 é o último a atingir o valor de referência.

Figura 27 – Nível dos estoques durante a simulação



Fonte: Ferney, (2000).

2.4.5 Modelo 5

O modelo apresentado por Sagawa e Nagano (2015a) é uma extensão do modelo apresentado por Ferney (2000) (modelo 3), pois mantém a mesma interpretação para as variáveis básicas. Por outro lado, aborda-se a modelagem dinâmica de um sistema de manufatura de multiprodutos, enquanto os modelos anteriores consideravam um único produto. O modelo representa um sistema real do tipo *job shop* para a fabricação de sacos de propileno.

No caso analisado, cerca de 80 tipos de produtos são produzidos pela empresa. O processo de produção é composto pelas operações de extrusão, tecelagem, laminação, impressão, corte e costura. Para o desenvolvimento do modelo, os produtos foram agrupados com base nos roteiros de produção, identificando-se assim nove famílias de produtos. Para desenvolver um modelo físico para análise foram coletados dados históricos de demanda para cada família de produtos. Esses dados foram definidos como os valores para as saídas dos sistemas e utilizados para calcular as porcentagens do *mix* de produção em cada ramificação

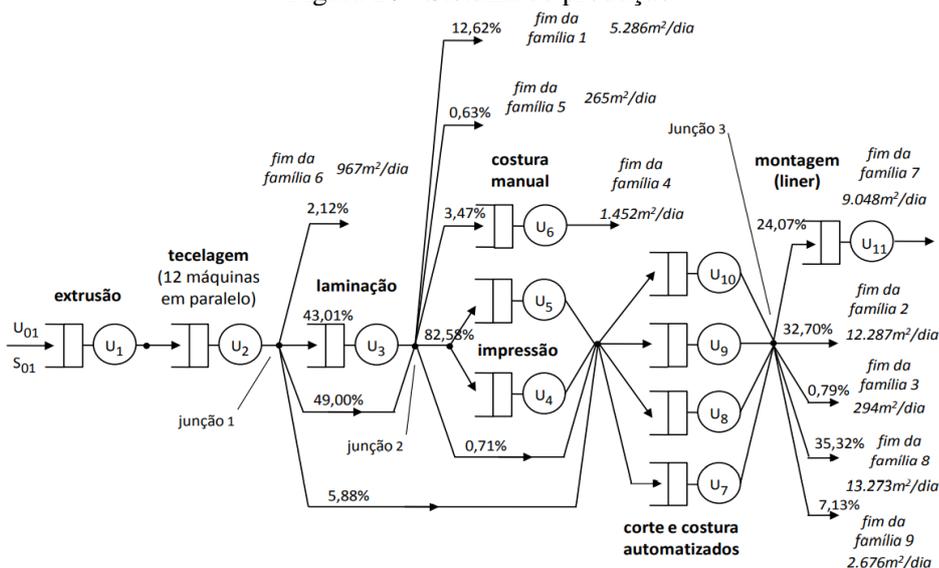
do sistema. A Tabela 1 mostra a demanda para cada família de produtos e o *mix* de produção.

Família de produto	Demanda [m ² /dia]	Mix de produto
1	5.286	11,61%
2	12.287	26,98%
3	294	0,65%
4	1.452	3,19%
5	265	0,58%
6	967	2,12%
7	9.048	19,86%
8	13.273	29,14%
9	2.676	5,88%
Total	45548	100%

Fonte: Adaptado de Sagawa e Nagano, (2015a).

O modelo físico do sistema de manufatura de múltiplos produtos de sacos de propileno é mostrado na Fig. 28. As variáveis U_i representam as frequências de processamento das máquinas e a frequência da fonte de matérias primas é representada por U_{01} . Os departamentos de tecelagem, impressão e corte e costura automáticos possuem mais de uma máquina para realizar a mesma operação. Quando as máquinas são idênticas, com o é o caso do setor de tecelagem, elas são consideradas como apenas uma máquina, reduzindo o número de variáveis do modelo e a complexidade de solução matemática. As máquinas com capacidades diferentes são descritas no modelo como máquinas individuais.

Figura 28 - Sistema de produção.

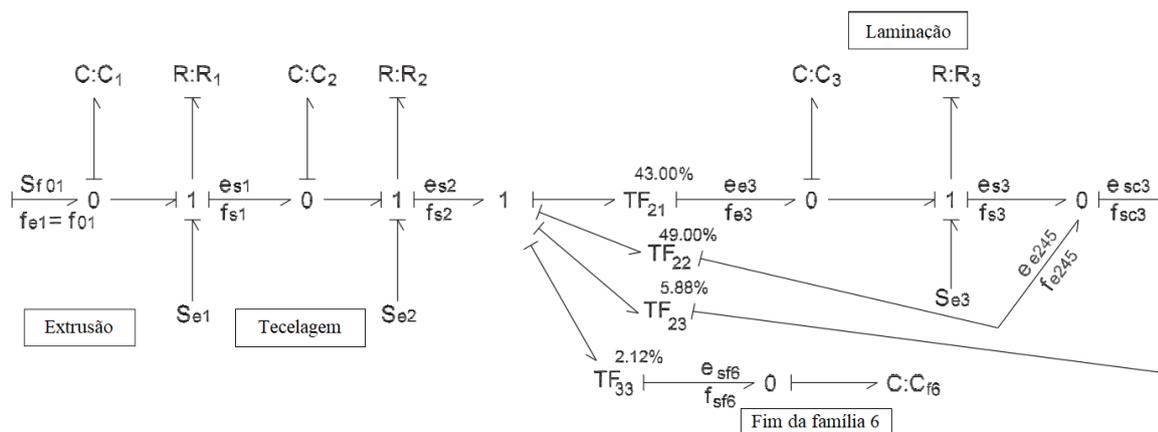


Fonte: Sagawa (2013).

O fragmento do modelo de grafos de ligação apresentado na Fig. 29, é derivado do modelo físico obtido anteriormente. Este modelo é conseguido através do acoplamento das entidades básicas, representando as três primeiras operações do processo de produção. As máquinas de

produção são modeladas como resistores e os estoques intermediários são modelados como capacitores. Os transformadores representam as junções divergentes do fluxo, e seu módulo corresponde à quantidade de fluxo, em porcentagem, que é distribuída para uma determinada estação subsequente do sistema. Esses percentuais estão relacionados ao *mix* de produção, ou seja, à quantidade relativa de cada produto ou família que é fabricado em relação ao volume total de produção. Para mais detalhes, pode-se consultar Sagawa, Nagano e Speranza Neto (2017).

Figura 29 - Grafos de ligação do sistema de produção



Fonte: Adaptado de Sagawa, Nagano e Speranza Neto (2017).

A representação de espaços de estado do sistema é derivada do modelo de grafo de ligação por meio das equações constitutivas dos elementos básicos.

O fluxo de material inicial f_{01} é imposto ao sistema com uma frequência U_{01} , que pode ser controlada. O fluxo de entrada na estação de tecelagem, f_{e2} é equivalente ao fluxo de saída do processo de extrusão, f_{s1} . A taxa de material estocado na primeira estação é dado pela diferença entre o fluxo de entrada f_{01} e o fluxo de saída f_{s1} . A formulação matemática para os três primeiros departamentos de produção e para as junções 1 e 2 é apresentada pelas relações a seguir.

Extrusão:

$$f_{01} = U_{01} \text{ m}^2/\text{dia} \quad (47)$$

$$f_{s1} = f_{e2} = U_1 \min(1, q_1) \quad (48)$$

$$\dot{q}_1 = f_{01} - U_1 \min(1, q_1) = U_{01} - U_1 \min(1, q_1) \quad (49)$$

Tecelagem:

$$f_{e2} = f_{s1} = U_1 \min(1, q_1) \quad (50)$$

$$f_{s2} = U_2 \min(1, q_2) \quad (51)$$

$$\dot{q}_2 = U_1 \min(1, q_1) - U_2 \min(1, q_2) \quad (52)$$

Junção 1(divergente):

$$f_{e3} = 0,4301f_{s2} \quad (53)$$

$$f_{ep} = 0,4900f_{s2} \quad (54)$$

$$f_{ec1} = 0,0588f_{s2} \quad (55)$$

$$f_{s6f} = 0,0212f_{s2} \quad (56)$$

Laminação:

$$f_{s3} = U_3 \min(1, q_3) \quad (57)$$

$$\dot{q}_3 = 0,4301f_{s2} - U_3 \min(1, q_3) = 0,4301U_2 \min(1, q_2) - U_3 \min(1, q_3) \quad (58)$$

Junção convergente após laminação:

$$f_{sc3} = f_{s3} + f_{e245} = U_3 \min(1, q_3) + 0,4900U_2 \min(1, q_2) \quad (59)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \\ \dot{q}_5 \\ \dot{q}_6 \\ \dot{q}_7 \\ \dot{q}_8 \\ \dot{q}_9 \\ \dot{q}_{10} \\ \dot{q}_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,4300 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,2508 & 0,5118 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1538 & 0,3140 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0170 & 0,0347 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0175 & 0,0020 & 0,2811 & 0,2811 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0087 & 0,0010 & 0,1399 & 0,1399 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0161 & 0,0018 & 0,2588 & 0,2588 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0200 & 0,0023 & 0,3204 & 0,3204 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2407 & 0,2407 & 0,2407 & 0,2407 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \min(1, q_1) \\ U_2 \min(1, q_2) \\ U_3 \min(1, q_3) \\ U_4 \min(1, q_4) \\ U_5 \min(1, q_5) \\ U_6 \min(1, q_6) \\ U_7 \min(1, q_7) \\ U_8 \min(1, q_8) \\ U_9 \min(1, q_9) \\ U_{10} \min(1, q_{10}) \\ U_{11} \min(1, q_{11}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{01} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (60)$$

Os coeficientes situados abaixo da diagonal da matriz demonstram as interdependências entre as estações. O volume armazenado no estoque 7 depende da frequência de processamento da máquina 7 posicionadas à jusante da estação, estações 8-11, e das frequências das máquinas das, posicionadas à montante da estação 7. estações de 2-5.

As equações obtidas na matriz expressam um sistema linear subdeterminado. Os fluxos de saída do sistema, representados pelas variáveis f_{sfi} , devem atender as demandas diárias, mostradas na Tabela 1. Baseado nos valores diários, equações adicionais foram estabelecidas.

$$f_{sf6} = 0,0212U_2 \min(1, q_2) = 967 \quad (61)$$

$$f_{sf4} = U_6 \min(1, q_6) = 1452 \quad (62)$$

$$f_{sf1} = 0,1262U_3 \min(1, q_3) + 0,0618U_2 \min(1, q_2) = 5286 \quad (63)$$

$$f_{sf5} = 0,0063U_3 \min(1, q_3) + 0,0031U_2 \min(1, q_2) = 265 \quad (64)$$

$$f_{sf2} = 0,3270[U_7 \min(1, q_7) + U_8 \min(1, q_8) + U_9 \min(1, q_9) + U_{10} \min(1, q_{10})] = 2287 \quad (65)$$

$$f_{sf3} = 0,0079[U_7 \min(1, q_7) + U_8 \min(1, q_8) + U_9 \min(1, q_9) + U_{10} \min(1, q_{10})] = 294 \quad (66)$$

$$f_{sf8} = 0,3532[U_7 \min(1, q_7) + U_8 \min(1, q_8) + U_9 \min(1, q_9) + U_{10} \min(1, q_{10})] = 13.273 \quad (67)$$

$$f_{sf9} = 0,0713[U_7 \min(1, q_7) + U_8 \min(1, q_8) + U_9 \min(1, q_9) + U_{10} \min(1, q_{10})] = 2676 \quad (68)$$

$$f_{sf7} = U_{11} \min(1, q_{11}) = 9048 \quad (69)$$

Se as equações geradas fossem adicionadas ao sistema linear, resultaria em um sistema sobre determinado. Para superar esta dificuldade, nove soluções diferentes para regime permanente foram calculadas. Em cada solução, uma das equações geradas foi adicionada ao sistema linear para realizar o cálculo. Os mesmos valores para as variáveis U_i , apresentados na Tabela 2, foram encontrados nas nove soluções. Portanto, os resultados mostraram que o modelo de estado é consistente.

Tabela 2 -Frequência de processamento em regime permanente (U_{ip})

U_{1p}	U_{2p}	U_{3p}	U_{4p}	U_{5p}	U_{6p}	U_{7p}	U_{8p}	U_{9p}	U_{10p}	U_{11p}	U_{01p}
45,551	45,551	19,587	21,449	13,157	1,454	10,564	5,257	9,726	12,041	9,048	45,551

Fonte: Sagawa, Nagano e Speranza Neto (2017).

A simulação é realizada definindo-se primeiramente as condições de contorno para o problema. O sistema de manufatura deve atender às demandas de cada família de produtos, no médio prazo. A solução de estado estacionário deste modelo é encontrar as frequências médias com as quais as máquinas e fontes devem operar. Essas frequências de processamento U_{ip} são usadas como valores de referência para o controle do sistema. O controlador ajustará a frequência de processamento instantâneo de cada máquina U_i em torno dos valores U_{ip} , a fim de regular o nível dos estoques intermediários (q_i), enquanto ao mesmo tempo atender as demandas a médio prazo.

O objetivo de utilizar um controlador é ajustar as frequências de processamento das máquinas U_i e a frequência da fonte primária de fluxo U_{01} para que as demandas de todas as famílias de produtos sejam atendidas no médio prazo e, simultaneamente, manter o estoque em processo nos níveis desejados. Por meio de manipulação algébrica das equações anteriores e juntamente com as outras equações análogas derivadas do modelo de grafo de ligação, é gerado o modelo de equação de estado.

2.5 DISCUSSÃO

Conforme destacado por Sarimveis et al. (2008), há outras abordagens associadas à teoria de controle para modelagem de sistemas de produção, como funções de transferência e controle ótimo. Entretanto, tais abordagens não são diretamente voltadas à representação da

dinâmica do chão de fábrica, com diferentes configurações (e.g. *flow shop*, *job shop*). Conforme mencionado, funções de transferência são empregadas na análise de decisões de reposição de estoques, como, por exemplo, nos sistemas de produção e estoques da família IOBPCS (SARIMVEIS et al., 2008). O controle ótimo também serve como base para muitas aplicações relacionadas a sistemas de produção, mas muitas das aplicações se referem a sistemas do tipo *open shop*, em que todos os recursos são suficientemente flexíveis para processar todos os produtos, sem restrições de roteiros de produção específicos.

Como pode ser observado, há uma pequena quantidade de modelos que utilizam a abordagem de grafos de ligação aplicados a sistemas de manufatura. Os modelos são aplicados para o controle de chão de fábrica, onde se deve lidar com as perturbações durante a produção, diferente dos modelos de sequenciamento, nos quais toma-se um conjunto de tarefas em um dado momento fixo no tempo, não havendo um laço de realimentação para controle do sistema.

Conforme apresentado, a abordagem por grafos de ligação possui duas variáveis principais, a variável de fluxo e a variável de esforço. O modelo proposto por Besombes, Marcon e Alla (1992) (modelo 1) utiliza a variável esforço para representar um valor econômico de custo unitário, sendo definido em um intervalo de tempo qualquer. De acordo com Ferney (2000), os autores negligenciaram a dinâmica do fluxo e utilizaram a variável de esforço para tentar introduzir uma noção econômica, porém, a principal força da abordagem de grafos de ligação é a preservação do conjunto de variáveis generalizadas à qual está ligada a noção de causalidade.

Benmansour *et al* (2004) também tentaram introduzir a noção econômica nos modelos de grafos de ligação aplicados a sistemas de manufatura, sugerindo um modelo multigrafos que estaria no espaço tridimensional, permitindo múltiplas visões para a interpretação das variáveis. No entanto, os autores supracitados não propõem um modelo concreto, apenas fazem suposições, discutindo o assunto conceitualmente.

A modelagem associada ao modelo 1, no entanto, exige algumas suposições sobre o tipo de sistemas de manufatura. Segundo Besombes e Marcon (1993), esta abordagem não pode ser aplicada a *flexible workshops* ou para *job shops*, onde a produção é em pequena ou média escala, com estoques de pequena capacidade e tendo que se adaptar à flutuação na demanda do produto em quantidade e.

Além disso, os modelos 1 e 2 são conceituais e baseados em pseudografos: eles introduzem novas interpretações para as variáveis básicas dos grafos de ligação. Em contrapartida, por não seguirem o formalismo exigido por essa abordagem, como o uso das equações

constitutivas de cada elemento básico, eles não permitem a simulação do modelo em programas computacionais, impossibilitando a validação dos modelos.

Os primeiros autores a aplicar o formalismo de grafos de ligação à representação de sistemas de manufatura foram Lair, Ferney e Zerhouni (1997) (modelo 3), que simularam um sistema de produção *flow shop* de um produto único, com um sistema produtivo de cinco estações de trabalho. Através da formalização matemática, utilizando as equações de estados, o modelo pôde ser validado matematicamente, implementado e simulado. Além disso, foi aplicado um controle para o sistema de produção, em cada máquina, obtendo-se um sistema de malha fechada. O sistema comporta-se como um sistema de fluxo puxado, regulando assim o fluxo de produção para o valor desejado.

Os estoques, nos modelos apresentados por Ferney (2000) e Sagawa e Nagano (2015a) (modelos 4 e 5), não possuem restrição de capacidade. Os autores, que seguem o formalismo da abordagem de grafos de ligação, representam o elemento de estoque utilizando o elemento C . No modelo apresentado por Dembèle e Lhote (1993) (modelo 2), o elemento de estoque não é representado por um elemento C ou I . Os estoques são representados por um único elemento chamado estoque e a sua capacidade é em função da área disponível de armazenamento.

A limitação da capacidade de estoque é introduzida por Lair, Ferney e Zerhouni (1997). O modelo não possui restrições na chegada e saída de material, as fontes de fluxo são capazes de fornecer material ao sistema de manufatura, e os poços, posicionados no final do modelo também não possuem restrição para recebimento de material. A capacidade infinita dos elementos posicionados no início e fim do sistema produtivo faz com que esses elementos percam sua característica dinâmica, pois o esforço é nulo neste caso. Isto é necessário para evitar que haja um esforço reativo desses elementos no sistema de produção.

O elemento R é utilizado para representar dissipação de energia nos sistemas que utilizam a abordagem de grafos de ligação. Nos modelos apresentado por Ferney (2000) e Sagawa e Nagano (2015a), o elemento R é utilizado para representar as máquinas do sistema produtivo. O parâmetro R corresponde ao inverso da frequência de processamento das máquinas U_i , ou seja, ele corresponde ao período de processamento T_i de uma unidade de material. No modelo apresentado por Besombes e Marcon (1993), o elemento R caracteriza o custo unitário direto da produção gerado pela produção para atender a demanda. Portanto, o custo unitário do processamento de uma demanda é uma função do fluxo de produção. Esta interpretação do elemento R busca ligar o domínio de produção, o número de peças produzidas, com o domínio econômico, pelo custo gerado por unidade de tempo. Outra

interpretação é apresentada por Dembélé e Lhote (1993), na qual o elemento *R* representa as perdas acidentais de produtos durante o processamento. Essas perdas geralmente aumentam com a frequência de processamento.

O modelo apresentado por Sagawa e Nagano (2015a) é uma extensão do modelo apresentado por Ferney (2000) e Lair, Ferney e Zerhouni (1997). O modelo representando um processo *flow shop* com quatro estações de trabalho e apenas um produto foi expandido para um sistema *job shop* de múltiplos produtos, seguindo a mesma interpretação para as variáveis básicas. A diferença entre os dois primeiros modelos citados e o último modelo citado é a limitação da capacidade dos estoques intermediários. Todos os modelos apresentados possuem dois pontos em comum: são aplicados à representação do chão de fábrica e são desenvolvidos no domínio contínuo (com base em fluxos e variáveis contínuas). O Quadro 4 apresenta as principais características de cada modelo exposto no artigo.

Quadro 4 – Modelos aplicados a manufatura

Autor	Tipo de fluxo	Número de produtos	Tipo de modelo	Significado da variável de fluxo	Significado da variável de esforço	Analogias
Besombes e Marcon	<i>flow shop</i>	produtos variados	Conceitual	Número de produtos demandados por unidade de tempo	Noção econômica de custo unitário	R: Custo unitário de produção I: Acúmulo de custo unitário C: Estoque de demanda de produtos ou estoque de produtos TF: Transformação peças/dinheiro SE: Custo unitário imposto SF: Fluxo de demanda imposto
Dembélé e Lhote	<i>flow shop</i>	produto único	Conceitual	Frequência das cargas transportadas	Número de cargas transportadas	R: Perdas acidentais TF: Agrupamento ou desagrupamento de lote GY: Estação de espera
Lair, Ferney e Zerhouni	<i>flow shop</i>	produto único	Funcional e aplicado (permite simulação)	Fluxo de unidades de material no sistema de manufatura	Entidade líder ou não; O nível de atividade das entidades (fenômenos de acoplamento)	R: Máquinas C: Estoques intermediários e finais TF: Junções divergentes SF: Fonte de fluxo SE: Fonte de esforço
Ferney	<i>flow shop</i>	produto único	Funcional e aplicado (permite simulação)	Fluxo de unidades de material no sistema de manufatura	Entidade líder ou não; O nível de atividade das entidades (fenômenos de acoplamento)	R: Máquinas C: Estoques intermediários e finais TF: Junções divergentes SF: Fonte de fluxo SE: Fonte de esforço
Sagawa e Nagano	<i>job shop</i>	produtos variados	Funcional e aplicado (permite simulação)	Fluxo de unidades de material no sistema de manufatura	Entidade líder ou não; O nível de atividade das entidades (fenômenos de acoplamento)	R: Máquinas C: Estoques intermediários e finais TF: Junções divergentes SF: Fonte de fluxo SE: Fonte de esforço

Fonte: Elaborado pelos autores.

2.6 CONCLUSÃO

Os padrões atuais exigem uma maior variedade de produtos, aumentando a complexidade dos sistemas de manufatura. A aplicação do método de grafos de ligação para o controle de sistemas de manufatura apresenta-se como uma ferramenta adequada para lidar com problemas de sincronização, instabilidades do ambiente de produção, mudanças nas necessidades dos clientes, dentre outras perturbações. Com este método é possível controlar o sistema de produção de forma automática através do laço de realimentação, o que não é possível quando utilizado os modelos convencionais, que não possuem este laço (modelos de malha aberta).

Na literatura, há um número reduzido de trabalhos que utilizam a aplicação de teoria de controle e modelagem de sistemas dinâmicos para o planejamento e controle da produção de curto prazo. O método de grafos de ligação é uma ferramenta aplicável para simulação, otimização e controle dos sistemas de manufatura. Sua modularidade permite a representação de vários sistemas de manufatura, e as simulações são realizadas a partir das equações de estados derivadas diretamente da representação gráfica do modelo.

Apesar de a modularidade do método permitir representar uma grande variedade de sistemas de produção, os modelos existentes na literatura possuem algumas limitações. Nos modelos 3, 4 e 5, em que o formalismo do método é preservado, permitindo simulações, a variável de esforço não possui um sentido físico no sistema de produção. Nos modelos 4 e 5, os estoques intermediários não possuem limitação e, quando se considera a capacidade infinita, a variável de esforço torna-se nula. Caso fossem considerados estoques intermediários com um valor finito, as variáveis de esforço não seriam nulas e, portanto, haveria transmissão de potência nesses pontos. Este é um dos princípios básicos desse formalismo, a transmissão de potência entre os elementos conectados do sistema. Por outro lado, essa consideração implica o surgimento de mais variáveis na equação básica que representa uma estação de produção e a necessidade de atribuir uma interpretação coerente a essas variáveis, em especial, à variável esforço. Ainda nos modelos 3, 4 e 5, uma fonte de esforço, representada por uma função de mínimo, é utilizada na interface de acoplamento entre máquina e estoque para representar a transição até a primeira unidade a ser formada. Esta função introduz uma não linearidade que dificulta o projeto de controladores.

As limitações apontadas indicam que há lacunas e pontos de melhoria nos modelos de grafos de ligação destinados à representação de sistemas de manufatura, a serem abordados em trabalhos futuros.

3 MÉTODO DE PESQUISA

Para atingir os objetivos do presente estudo, foi realizada uma pesquisa exploratória com abordagem qualitativa na primeira parte do estudo, que correspondeu à revisão sistemática da literatura. Na segunda parte do estudo, realizou-se o processo de modelagem dos sistemas de manufatura, o qual requer o uso de variáveis quantitativas, mensuráveis e linguagem matemática, portanto, uma abordagem quantitativa.

A pesquisa de abordagem quantitativa baseia-se no pressuposto de que se pode construir modelos objetivos que expliquem o comportamento dos processos operacionais da vida real ou que possam capturar problemas de tomada de decisão que são enfrentados pelos gerentes em processos operacionais da vida real (BERTRAND; FRANSOO, 2002).

3.1 MODELAGEM

De acordo com Felício (2007), o processo de modelagem possui quatro partes:

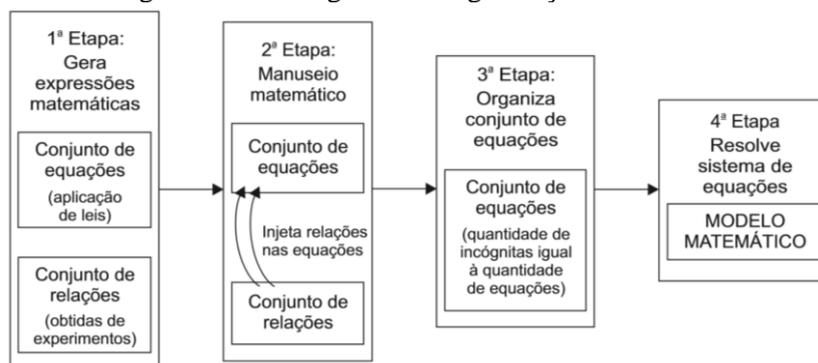
- hipóteses;
- aplicação de leis básicas do conhecimento científico;
- relações entre as variáveis;
- validação do modelo.

Na primeira parte, um conjunto de hipóteses é utilizado para simplificar as soluções matemáticas do modelo. Estas hipóteses simplificadoras permitem a obter resultados em menor tempo, embora sejam menos precisos.

A segunda parte é a aplicação das leis básicas. A abordagem tradicional segue o raciocínio de que o número de equações deve ser igual ao número de variáveis para obter-se uma solução matemática para o modelo. Portanto, as leis básicas são aplicadas o mesmo número de vezes para a obtenção das equações.

As expressões matemáticas são classificadas como equações e relações. As primeiras referem-se às expressões geradas por Leis, enquanto que as expressões que estabelecem funções entre as grandezas são chamadas de relações. Um modelo matemático é formado por um conjunto de equações obtidas pela aplicação das Leis e um conjunto de relações. Por meio do manuseio matemático, inserem-se as relações nas equações para que o sistema de equações tenha o mesmo número de incógnitas e equações, permitindo a solução deste sistema. O fluxograma deste processo é mostrado na Fig. 30.

Figura 30 – Fluxograma da organização do trabalho

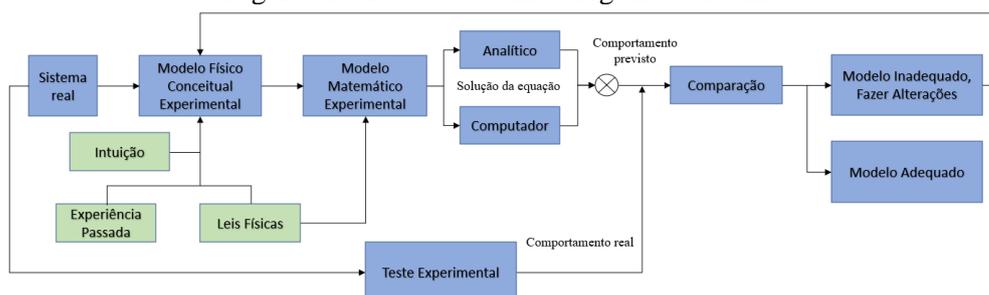


Fonte: Felício (2007).

A última parte do processo de modelagem é a validação. Nesta parte, o modelo gerado é comparado com o sistema real modelado, realizando uma verificação experimental. O resultado teórico do modelo é sempre uma aproximação do modelo real, portanto, a etapa de validação compreende a comparação dos resultados e a análise para se verificar se a diferenças são aceitáveis. Caso as diferenças não sejam aceitáveis, ocorre o processo de realimentação do sistema, ou seja, o processo retorna para estágios anteriores do desenvolvimento analítico ou computacional do modelo.

Essas etapas são similares as etapas propostas por Doebelin (1998) na Fig. 31. Os sistemas dinâmicos são modelados para obtenção de equações diferenciais ou algébricas capazes de representar a dinâmica do sistema. A primeira etapa consiste na elaboração e construção do modelo. Nesta etapa é realizada a elaboração do modelo físico. O próximo passo é a obtenção do modelo matemático. Como dito anteriormente, o método de grafo de ligação permite a obtenção de equações de estado que descrevem o comportamento do sistema. A solução das equações de estados é obtida com o auxílio de uma ferramenta computacional, como o software MATLAB® por exemplo, sendo a implementação e simulação dos sistemas realizados através do SIMULINK®. Desta forma pode-se analisar os resultados comparando a saída do sistema com os valores definidos no processo inicial de modelagem.

Figura 31 - Processo de modelagem do sistema



Fonte: Adaptado de Doebelin, (1998).

Identificadas as limitações do modelo de grafo de ligação, propôs-se modificações para o modelo. Para modelos inadequados, ou seja, que necessitam de mudanças, o laço de alimentação do processo de modelagem retorna para a etapa de definição conceitual do modelo. Portanto, as capacidades dos estoques antes consideradas infinitas passam a ter um valor finito. O modelo existente, tomado como base, permitiu a geração de um novo conjunto de equações básicas.

4 MODIFICAÇÃO DO MODELO

Conforme já mencionado, abordagem por grafos de ligação possui duas variáveis principais, fluxo e esforço. A potência transmitida entre os elementos básicos é representada por essas duas variáveis de potência. Segundo Ferney (2000), a variável de fluxo $f(t)$ representa o fluxo de material no sistema de produção e é expressa em unidades de material por segundo. A variável de esforço $e(t)$ representa a característica ativa ou passiva de uma estação de produção, e o nível de atividade de uma entidade ativa em relação ao fenômeno de acoplamento.

No modelo apresentado por Ferney (2000), discutido no capítulo 2, a estação de produção é formada por uma máquina, representada pelo elemento R , precedida de um estoque, representado pelo elemento C , e uma fonte de esforço, Se . A lei de comportamento do elemento R é definida pela relação linear entre esforço e fluxo, representada pela equação (29), e a lei de comportamento de um elemento C é definida pela relação linear entre a variável de deslocamento e a variável de esforço, representada pela equação (32).

Dentre os modelos identificados no processo de RBS, escolheu-se o modelo apresentado por Ferney (2000) para se propor melhorias, pois este modelo segue o formalismo da abordagem de grafos de ligação e permite a simulação do sistema. Este modelo utiliza uma fonte de esforço, representada por uma função mínimo, que introduz uma não linearidade e dificulta o projeto de controladores. Além disso, a variável de esforço não possui um sentido físico e torna-se nula em razão das capacidades infinitas atribuídas aos estoques, tornando também nula a transferência de potência entre os elementos, que é justamente a principal característica dos grafos de ligação. O objetivo é propor uma nova interpretação para a variável de esforço, evitando sua anulação e evitando a utilização da função mínimo.

A variável de esforço e_i , aplicada no capacitor, é uma função linear da relação q_i/C_i (ver Eq. 5). Essa variável assume valor 0 em função da capacidade infinita dos estoques, ou seja, a variável de esforço no capacitor torna-se nula, não havendo transmissão de potência nesses pontos. Esses estoques são conectados a outros elementos por meio de uma junção do tipo 0, portanto, as variáveis de esforços dos outros elementos ligados à junta do tipo 0 também se tornam nulas. Isso faz com que a máquina, representada pelo elemento R , fique desconectada do estoque em processo, sendo necessário introduzir uma fonte de esforço mínimo (usando-se a função $\min(1, q_i)$) para realizar o acoplamento entre máquina e estoque.

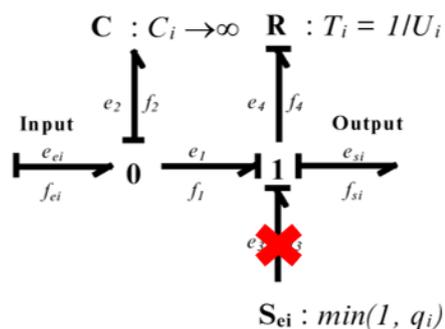
A variável de esforço, aplicada pela fonte de esforço, assume valor 0 quando a estação anterior a ela perde sua característica dinâmica, no caso de indisponibilidade de material. Quando não há qualquer tipo de restrição na estação anterior, a variável de esforço assume

valor igual a 1. A variável de esforço assume qualquer valor no intervalo definido no caso em que a capacidade de produção de uma estação é impedida por falta material disponível em uma estação a montante, i.e. quando há menos do que uma unidade de material. Portanto, a variável de esforço, no modelo apresentado por Ferney (2000), não possui um sentido físico no sistema de produção, ela representa a característica ativa ou passiva dos elementos.

4.1 EQUAÇÕES DO MODELO

O modelo aqui proposto mantém a mesma interpretação das variáveis propostas por Ferney (2000), mas a capacidade dos estoques intermediários passa a ter um valor finito. Esta mudança faz com que as variáveis de esforço, que antes eram nulas, em razão da função linear do estoque e do tipo de junção que os esforços estão conectados, passem a ter um valor finito. Isso permite que a fonte de esforço introduzida para ativar a máquina da estação possa ser retirada do modelo, como mostrado na Fig. 32.

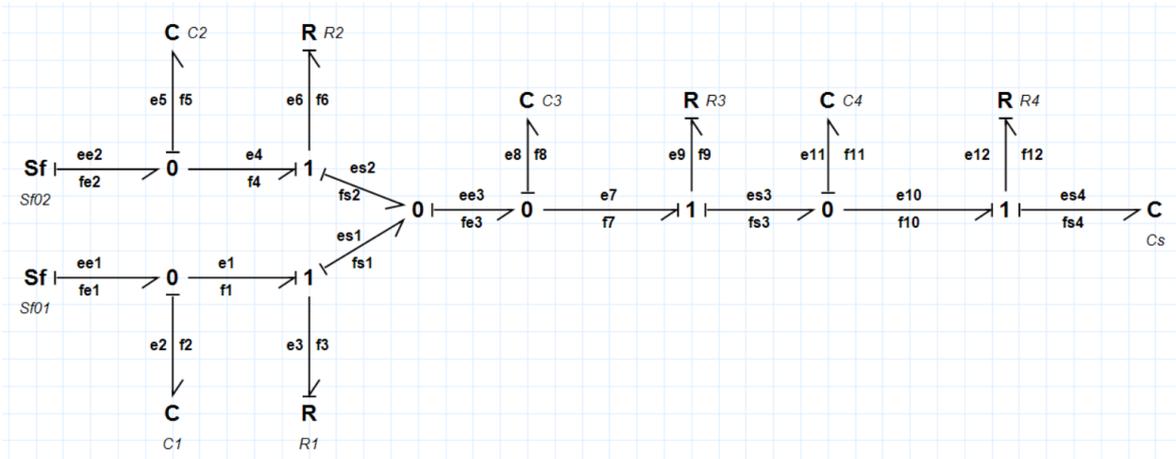
Figura 32 – Estação sem fonte de esforço mínimo



Fonte: Ferney (2000).

Para a modelagem, utilizou-se o mesmo sistema básico de produção apresentado por Ferney (2000). O número de estações do modelo e a disposição dessas estações é a mesma do trabalho supracitado, como mostrado na Fig. 33. As equações são geradas seguindo a linha de raciocínio utilizada para gerar as equações do modelo original.

Figura 33 – Modelo completo com estoques finitos



Fonte: Elaborada pelos autores.

O fluxo de material de entrada é dado pela frequência de processamento da fonte, U_{01} e U_{02} . Portanto, as equações para as duas fontes de fornecimento de material para o sistema são:

$$f_{e1} = f_{01} = U_{01} 1_{mu} \quad (70)$$

$$f_{e2} = f_{02} = U_{02} 1_{mu} \quad (71)$$

O fluxo fornecido pela fonte de suprimento é armazenado pelo estoque que antecede a máquina 1. O fluxo armazenado no estoque é a diferença entre o fluxo fornecido pela fonte de suprimento e o fluxo processado na máquina 1, descrito pela equação (30). A fonte de suprimento está ligada ao estoque por uma junção do tipo 0, ou seja, o esforço exercido nos dois elementos é igual. A máquina 1 está conectada à saída do estoque 1 por uma junção 1 e à entrada da junção do tipo 0 a jusante da estação. Portanto, têm-se:

$$e_{e1} = e_2 = e_1 \quad (72)$$

$$e_3 = e_1 - e_{s1} \quad (73)$$

Pela relação linear da variável de esforço aplicada na máquina 1 tem-se que:

$$e_1 = e_2 = q_1/C_1 \quad (74)$$

Além disso, olhando para a estação à jusante da estação 1, ou seja, estação 3, onde os fluxos se juntam em uma junção do tipo 0, pode-se deduzir que:

$$e_{s1} = e_{s2} = e_{e3} \quad (75)$$

$$e_{e3} = e_7 = e_8. \quad (76)$$

De forma análoga à Eq. (74), olhando-se a jusante no sistema, tem-se que o esforço e_8 está ligado diretamente ao estoque da estação 3, representado por C_3 . Assim, tem-se:

$$e_7 = e_8 = q_3/C_3 \quad (77)$$

O fluxo de saída da primeira estação é igual ao fluxo processado na máquina 1, em função do tipo de junção (tipo 1). Dessa forma o fluxo de saída da estação 1 é dado por:

$$f_{s1} = f_3 = U_1 e_3 \quad (78)$$

$$f_{s1} = U_1(e_1 - e_{s1}). \quad (79)$$

Utilizando a equação (74) para substituir o valor da variável e_1 , e as equações (75), (76) e (77) para substituir e_{s1} , a equação (79) transforma-se em:

$$f_{s1} = U_1(q_1/C_1 - q_3/C_3). \quad (80)$$

Seguindo o mesmo raciocínio para encontrar as equações referentes à variável de esforço da estação 2, obtém-se:

$$e_{e2} = e_4 = e_5 \quad (81)$$

$$e_6 = e_4 - e_{s2} \quad (82)$$

O fluxo de saída de material é dado por:

$$f_{s2} = f_6 = U_2 e_6 \quad (83)$$

$$f_{s2} = U_2(e_4 - e_{s2}) \quad (84)$$

$$f_{s2} = U_2(q_2/C_2 - q_3/C_3) \quad (85)$$

O fluxo de material que entra na estação 3 é a somatória do fluxo de saída da estação 1 e 2. A soma desse fluxo ocorre na junção do tipo 0 que antecede a estação 3, portanto têm-se:

$$f_{e3} = f_{s1} + f_{s2} \quad (86)$$

$$f_{s3} = U_3 e_9 \quad (87)$$

Olhando para a junção do tipo 0 que conecta a entrada de fluxo de material ao estoque da estação número 3 e a junção do tipo 1 que conecta o fluxo de saída do estoque com a entrada da máquina 3, pode-se deduzir que:

$$e_{s3} = e_{10} = e_{11} \quad (88)$$

$$e_9 = e_7 - e_{s3} \quad (89)$$

Utilizando as equações (80) e (85) e substituindo na equação (86) tem-se que:

$$f_{e3} = U_1(q_1/C_1 - q_3/C_3) + U_2(q_2/C_2 - q_3/C_3) \quad (90)$$

O fluxo de material da estação 3 é encontrado substituindo as equações (88) e (89) na equação (87), além de se utilizar a equação constitutiva associada ao capacitor. Então o fluxo de saída é:

$$f_{s3} = U_3(q_3/C_3 - q_4/C_4) \quad (91)$$

Utilizando uma manipulação análoga à realizada para a estação 3, encontram-se as equações para a estação 4:

$$e_{12} = e_{10} - e_{s4} \quad (92)$$

$$f_{e4} = f_{s3} = U_3(q_3/C_3 - q_4/C_4) \quad (93)$$

$$f_{s4} = U_4 e_{12} = U_4(q_4/C_4 - q_5/C_5) \quad (94)$$

As taxas de armazenagem de material \dot{q}_i nos estoques intermediários de cada estação são dadas pela diferença entre o fluxo de peças que entra na estação e o fluxo de peças que sai da estação:

$$\dot{q}_1 = f_{e1} - f_{s1} = U_{01} 1_{mu} - U_1 e_4 \quad (95)$$

$$\dot{q}_2 = f_{e2} - f_{s2} = U_{02} 1_{mu} - U_2 e_8 \quad (96)$$

$$\dot{q}_3 = f_{e3} - f_{s3} = (f_{s1} + f_{s2}) - f_{s3} \quad (97)$$

$$\dot{q}_4 = f_{e4} - f_{s4} = f_{s3} - f_{s4} \quad (98)$$

A combinação destas equações (Eq. (95-98)) com as equações de definição dos fluxos de saída e entrada anteriormente apresentadas permitem escrever o modelo matemático representativo do sistema. Tais equações do sistema podem ser escritas de duas formas. Na primeira, pode-se isolar as frequências de processamento das máquinas:

$$\dot{q}_1 = U_{01} - U_1 \left(\frac{q_1}{C_1} - \frac{q_3}{C_3} \right) \quad (99)$$

$$\dot{q}_2 = U_{02} - U_2 \left(\frac{q_2}{C_2} - \frac{q_3}{C_3} \right) \quad (100)$$

$$\dot{q}_3 = U_1 \left(\frac{q_1}{C_1} - \frac{q_3}{C_3} \right) + U_2 \left(\frac{q_2}{C_2} - \frac{q_3}{C_3} \right) - U_3 \left(\frac{q_3}{C_3} - \frac{q_4}{C_4} \right) \quad (101)$$

$$\dot{q}_4 = U_3 \left(\frac{q_3}{C_3} - \frac{q_4}{C_4} \right) - U_4 \left(\frac{q_4}{C_4} - \frac{q_5}{C_5} \right) \quad (102)$$

Na segunda forma, pode-se isolar os volumes de material nos estoques:

$$\dot{q}_1 = U_{01} - \frac{U_1}{C_1} q_1 + \frac{U_1}{C_3} q_3 \quad (103)$$

$$\dot{q}_2 = U_{02} - \frac{U_2}{c_2} q_2 + \frac{U_2}{c_3} q_3 \quad (104)$$

$$\dot{q}_3 = \frac{U_1}{c_1} q_1 - \frac{U_1}{c_3} q_3 + \frac{U_2}{c_2} q_2 - \frac{U_2}{c_3} q_3 - \frac{U_3}{c_3} q_3 + \frac{U_3}{c_4} q_4 \quad (105)$$

$$\dot{q}_4 = \frac{U_3}{c_3} q_3 - \frac{U_3}{c_4} q_4 - \frac{U_4}{c_4} q_4 + \frac{U_4}{c_5} q_5 \quad (106)$$

As equações apresentadas anteriormente são equações diferenciais ordinárias que representam um sistema dinâmico, neste caso, o sistema de produção modelado. As equações podem ser escritas na forma de espaço de estados. Essa representação utiliza equações diferenciais ordinárias para descrever como o sistema irá se comportar em função do seu estado atual. As variáveis de estado são o conjunto mínimo de variáveis que descrevem completamente o sistema (FRANKLIN *et al*, 2013).

De acordo com Ogata (2010), nos sistemas dinâmicos, estão presentes três tipos de variáveis: as variáveis de entrada, variáveis de estado e as variáveis de saída. Os sistemas contínuos possuem integradores que servem como dispositivos de memória e a saída desses integradores pode ser usada como variáveis de estado. As equações de estado e de saída podem ser escritas na forma padrão como:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (107)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} \quad (108)$$

O vetor \mathbf{x} é o vetor das variáveis de estado. O vetor de entrada ou vetor de controle é \mathbf{u} . A matriz \mathbf{A} descreve como os estados são ligados uns aos outros. A matriz de entrada \mathbf{B} descreve as entradas aplicadas ao sistema, ou seja, ela contém os termos que acoplam a entrada ao sistema. O vetor de saída \mathbf{y} é o vetor de saídas do sistema ou da parte do sistema que se está interessado, pois, as saídas do sistema não precisam ser necessariamente as variáveis de estado. A matriz de saída \mathbf{C} descreve como estados são combinados para se obter a saída. A matriz \mathbf{D} é a matriz de transmissão direta (NISE, 2013).

As equações do modelo (Eq. 99 a 106) podem ser escritas na forma de espaço de estados de duas formas. Na primeira, isolam-se as frequências de processamento das máquinas:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{q_1}{c_1} - \frac{q_3}{c_3}\right) & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\left(\frac{q_2}{c_2} - \frac{q_3}{c_3}\right) & 0 & 0 & 0 & 1 \\ \left(\frac{q_1}{c_1} - \frac{q_3}{c_3}\right) & \left(\frac{q_2}{c_2} - \frac{q_3}{c_3}\right) & -\left(\frac{q_3}{c_3} - \frac{q_4}{c_4}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{q_3}{c_3} - \frac{q_4}{c_4}\right) & -\left(\frac{q_4}{c_4} - \frac{q_5}{c_5}\right) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_{01} \\ U_{02} \end{bmatrix} \quad (109).$$

A segunda forma é obtida ao se isolar os volumes de material nos estoques:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-U_1}{c_1} & 0 & \frac{U_1}{c_3} & 0 \\ 0 & \frac{-U_2}{c_2} & \frac{U_2}{c_3} & 0 \\ \frac{U_1}{c_1} & \frac{U_2}{c_2} & \frac{-(U_1+U_2+U_3)}{c_3} & \frac{U_3}{c_4} \\ 0 & 0 & \frac{U_3}{c_3} & \frac{-(U_3+U_4)}{c_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{01} \\ U_{02} \end{bmatrix} \quad (110)$$

Os volumes de material nos estoques intermediários ($q_i(t)$) podem ser tomados como as variáveis de estado do sistema, pois eles retratam adequadamente a condição do sistema em um dado instante de tempo, ou seja, retratam os estoques em processo instantâneos. Com base nisso, observa-se que as equações da primeira forma não seguem a forma padrão, pois não é possível isolar as variáveis de estado: elas continuam embutidas na matriz. Por outro lado, é possível isolar, além das frequências de processamento das fontes de material, também as frequências de processamento das máquinas. De certa forma, este modelo é similar ao obtido por Ferney (2000), pois as frequências de processamento são isoladas. No entanto, no modelo do autor supracitado, a matriz obtida não depende da variável q_i . A matriz da Eq. (109), aqui denominada matriz A, depende da variável de estado e há um produto entre ela e o que seria o vetor de entrada ou de controle. Assim, o modelo, que não segue a forma padrão, seria:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x})\mathbf{u}. \quad (111)$$

Caso se conseguisse um controlador efetivo para este sistema, poder-se-ia controlar todas as frequências de processamento do sistema, ou seja, das fontes de material e das máquinas.

As equações escritas da segunda forma se aproximam da forma padrão, em que as matrizes da Eq. (110) equivalem às matrizes A e B da Eq. (107), respectivamente. A vantagem é que, nesse caso, o projeto do controlador é mais simples. A desvantagem é que, para assumir a forma padrão, as frequências de processamento das máquinas têm que ser interpretadas como parâmetros fixos. Portanto, escrevendo as equações dessa maneira, têm-se apenas como variáveis de controle as frequências de processamento das fontes de material U_{01} e U_{02} .

4.2 CONTROLADOR PARA O MODELO

As equações no espaço de estados geradas anteriormente permitem a implementação de técnicas de teoria de controle já consolidadas pra o projeto de controladores. Em sistemas de produção, um dos objetivos relevantes é manter os estoques intermediários em um valor

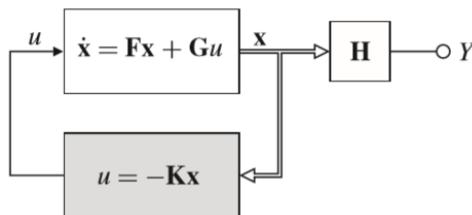
desejado. Isso faz com que o tempo de atravessamento da fabricação dos produtos não seja demasiadamente longo. Para tal, no sistema proposto, o controle do sistema de produção deve atuar sobre a frequência de fornecimento de material das fontes, caso seja adotada a segunda forma apresentada para o modelo de estado (Eq. 110).

Um sistema comum de controle com realimentação é utilizar a saída para a realimentar a junção de soma de um sistema padrão. Na realimentação completa de estados, em vez de se realimentar a saída, são realimentadas todas as variáveis de estado. Cada variável de estado é realimentada para definir o controle \mathbf{u} , através de um ganho \mathbf{K} (Eq. 112), havendo n ganhos. Estes ganhos podem ser ajustados para resultar nos valores desejados dos polos em malha fechada (Nise, 2013).

$$\mathbf{u}(\mathbf{t}) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(\mathbf{t}) = -[K_1 K_2 \dots K_n] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (112)$$

O sistema tem uma matriz constante na trajetória de realimentação do vetor de estados (Fig. 34).

Figura 34 – Estrutura de realimentação de estados



Fonte: Franklin *et al* (2013)

Substituindo a equação da lei de realimentação (Eq. 112) na Eq. 107, tem-se:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{B}\mathbf{K}\mathbf{x}. \quad (113)$$

Portanto, a equação característica em malha fechada para esse sistema é:

$$\det[s\mathbf{I} - (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})] = 0 \quad (114)$$

Os valores específicos da matriz de ganho \mathbf{K} podem ser obtidos por meio de vários métodos de síntese, sendo o mais simples o método de alocação de polos (SAGAWA; MUŠIČ, 2019). A matriz de ganho também pode ser obtida por meio do método do controle quadrático ótimo. A diferença entre o método de alocação de polos e o método do controle quadrático ótimo (LQR) está na forma em como se escolhe o valor da matriz \mathbf{K} . O último método citado fornece um modo sistemático de cálculo da matriz de ganho de controle por

realimentação de estado (OGATA, 2010). Segundo Franklin *et al* (2013) o regulador linear quadrático ótimo (LQR) é um método eficaz e amplamente utilizada por projetistas para o controle de sistemas lineares.

De acordo com Skogestad e Postlethwaite (2007), o problema do regulador quadrado ótimo (LQR), onde todos os estados são conhecidos, é um problema determinístico de valor inicial. Dado um sistema $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}$ com um dado estado inicial, $\mathbf{x}(0)$, diferente de zero, é encontrado o sinal de entrada $\mathbf{u}(t)$ que fará com que o sistema retorne ao estado zero ($\mathbf{x} = 0$) de uma maneira ideal, minimizando o índice de desempenho

$$\mathbf{J} = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T * \mathbf{Q}\mathbf{x} + \mathbf{u}^T * \mathbf{R}\mathbf{u}) dt, \quad (115)$$

em que a matriz \mathbf{Q} é uma matriz hermitiana definida positiva (ou semidefinida positiva) ou real simétrica e \mathbf{R} é uma matriz hermitiana definida positiva ou real simétrica (OGATA, 2010).

Segundo Franklin *et al* (2013), um método razoável para iniciar a iteração do projeto LQR é sugerido pela regra de Bryson (BRYSON; HO, 1969). Na prática, uma escolha apropriada para obter valores aceitáveis de \mathbf{x} e \mathbf{u} é inicialmente escolher as matrizes diagonais \mathbf{Q} e \mathbf{R} tais que:

$$\mathbf{Q}_{ii} = 1/\text{maior valor aceitável de } [\mathbf{x}_i^2] \quad (116)$$

$$\mathbf{R}_{ii} = 1/\text{maior valor aceitável de } [\mathbf{u}_i^2] \quad (117)$$

Para analisar a resposta transitória do sistema pode-se introduzir uma entrada de referência \mathbf{r} , alterando a lei de controle para:

$$\mathbf{u}(\mathbf{t}) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(\mathbf{t}) + \mathbf{r}. \quad (118)$$

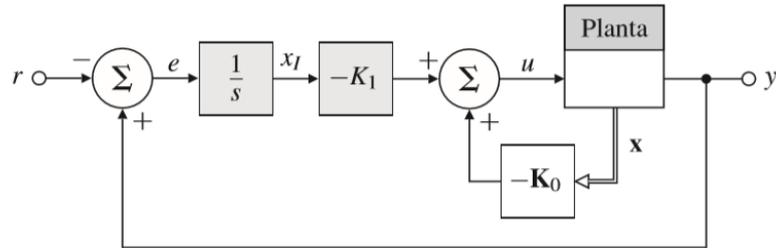
Porém, o sistema provavelmente apresentará um erro em estado estacionário não nulo. De acordo com Franklin *et al* (2013), uma forma de corrigir este problema é calcular os valores em estado estacionário do estado e da entrada de controle que irão resultar em erro nulo na saída, e então, forçá-los, variáveis de estado e entrada de controle, a assumir estes valores. Se os valores desejados finais das variáveis de estado e da entrada de controle forem \mathbf{x}_s e \mathbf{u}_s a formula de controle deve ser:

$$\mathbf{u}(\mathbf{t}) = \mathbf{u}_s - \mathbf{K}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_s) + \mathbf{r} \quad (119)$$

de modo que quando $\mathbf{x} = \mathbf{x}_s$ o erro é nulo, $\mathbf{u} = \mathbf{u}_s$.

Como o objetivo é manter os estoques intermediários em valores desejados, é necessário adicionar um termo integral para que o sistema convirja para o valor desejado (Fig. 35), ou seja, o sinal de saída no estado estacionário não será zero. O laço de realimentação externo faz a comparação entre os valores de referência definidos com os valores de saída; a diferença entre os dois valores é o erro.

Figura 35 – Estrutura de controle integral



Fonte: Franklin *et al* (2013)

Portanto, o estado da planta é aumentado com o estado extra x_I . Este estado extra obedece a equação:

$$\dot{x}_I = Cx - r_i \quad (120)$$

A matriz de ganho integral K_I atua sobre os estados extras, e o erro e_i é dado por:

$$e_i = r_i - x_i. \quad (121)$$

De acordo com Franklin *et al* (2013), as equações aumentadas do sistema são:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_I \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & C \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_I \\ x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix} u - \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} r. \quad (122)$$

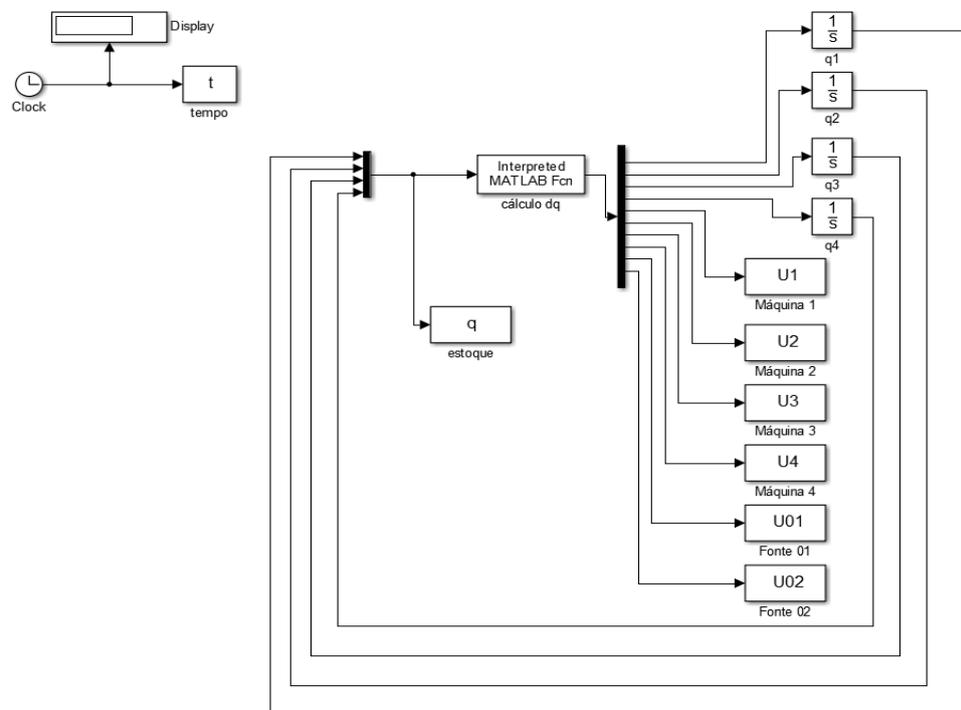
A lei de realimentação é:

$$u = -[K_I \quad K_0] \begin{bmatrix} x_I \\ x \end{bmatrix}. \quad (123)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Obtidas as equações de estado e do controlador, o sistema foi implementado no Simulink® (R2015b) para realização das simulações. O modelo utilizado para realizar a primeira simulação é mostrado na Fig. 36. Nesta primeira etapa, o modelo é simulado sem controlador, permitindo a análise do comportamento do sistema em malha aberta, ou seja, as frequências de processamento das máquinas de produção não são controladas nesta primeira etapa. As rotinas desenvolvidas para a simulação são apresentadas no Apêndice A.

Figura 36 – Modelo Simulink sem controlador



Fonte: Elaborado pelos autores

O bloco “interpreted MATLAB function” permite definir uma função escrita pelo usuário, a qual, nesse caso, é utilizada para calcular os fluxos de produção \dot{q}_i , descritos pela Eq. (110). Nesta função são definidas as entradas e saídas do bloco, as frequências de processamento das máquinas U_i e as capacidades dos estoques C_i . É utilizado um demultiplexador para separar o sinal de saída da função. As quatro primeiras saídas do demultiplexador são os sinais do fluxo de produção. Colocou-se um integrador para calcular o volume q_i acumulado nos estoques durante o tempo de simulação. As quatro saídas com o sinal do fluxo de produção são conectadas a um multiplexador e o volume estocado é mostrado após o multiplexador. As frequências de processamento das máquinas e das fontes de suprimento são encaminhadas às portas restantes do demultiplexador, apenas para que seus

valores sejam armazenados, possibilitando mostrá-los em gráficos. As frequências de processamento das máquinas e das fontes foram definidas utilizando-se os mesmos valores propostos por Ferney (2000) e correspondem as frequências de processamento que atendem à demanda calculada no regime permanente. As capacidades dos estoques também foram escolhidas arbitrariamente.

Os parâmetros de simulação são:

Frequências de processamento no regime permanente:

$$U_{1p}=4/3;$$

$$U_{2p}=8/3;$$

$$U_{3p}=4;$$

$$U_{4p}=4;$$

Frequências de processamento iniciais das fontes de suprimento:

$$U_{01p}=4/3;$$

$$U_{02p}=8/3;$$

As capacidades dos estoques:

$$C_1= 100 \text{ unidades}$$

$$C_2= 100 \text{ unidades}$$

$$C_3= 150 \text{ unidades}$$

$$C_4= 300 \text{ unidades}$$

Estoques iniciais:

$$q_{01}=0;$$

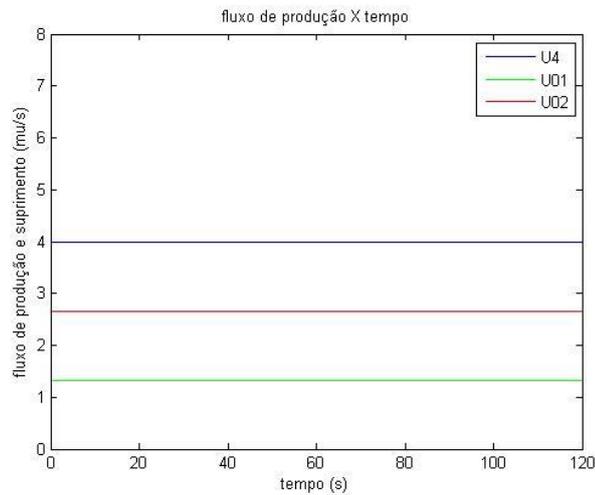
$$q_{02}=0;$$

$$q_{03}=0;$$

$$q_{04}=0;$$

Na simulação de malha aberta, as frequências de processamento são parâmetros, portanto, permanecem com o mesmo valor durante toda a simulação (Fig. 37).

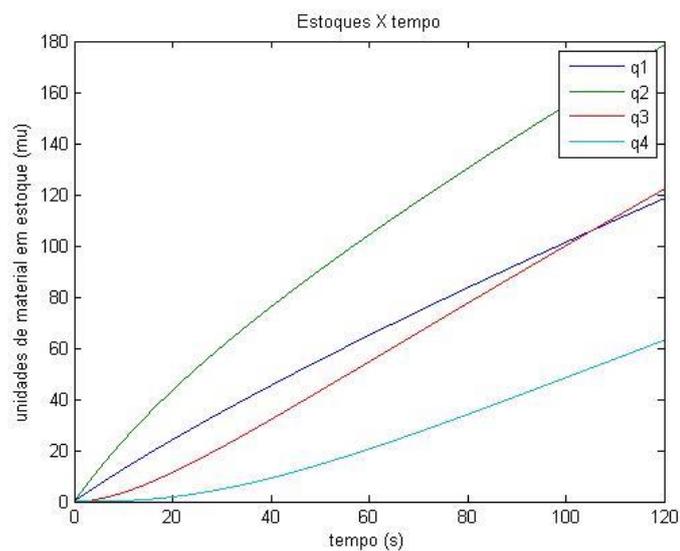
Figura 37 – Frequências de processamento sem controlador



Fonte: Elaborado pelos autores

Os estoques crescem durante todo o tempo de simulação (Fig. 38). Realizado uma análise de sensibilidade constatou-se que, quanto maior a frequência de processamento das máquinas, escolhidas arbitrariamente no início da simulação, menor é o volume acumulado nos estoques, pois maior é a quantidade de material processado nas máquinas. Quando se aumenta a frequência de processamento das fontes de suprimento, aumenta-se também o volume acumulado nos estoques, em razão da maior quantidade de material fornecida para o sistema. Para os estoques, quanto menor a sua capacidade C_i , menor é o volume acumulado q_i . Nas equações que caracterizam o sistema, as capacidades são os denominadores e as frequências de processamento das máquinas os numeradores, portanto, quanto maior o valor da capacidade do estoque, menor será o valor da fração.

Figura 38 – Volume dos estoques sem controlador



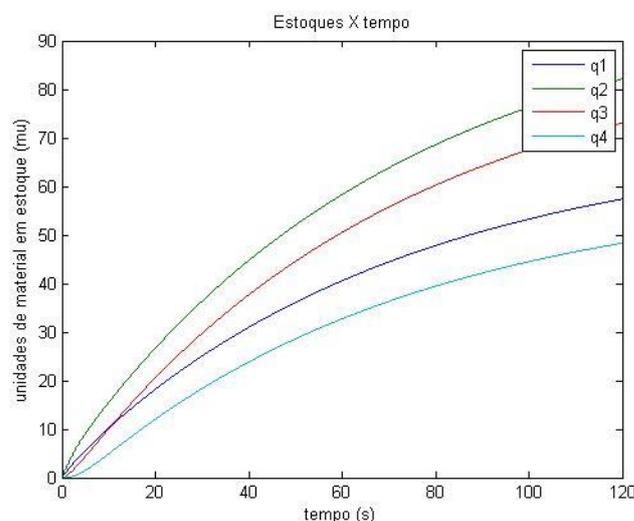
Fonte: Elaborado pelos autores

A frequência de processamento da máquina da primeira estação, U_1 , possui o mesmo valor da frequência da fonte de suprimento U_{01} . A frequência de processamento da máquina da segunda estação, U_2 , possui o mesmo valor da frequência da fonte de suprimento U_{02} que abastece a segunda estação. A diferença entre os valores encontrados nas curvas de estoque da Fig. 38 ocorre em função da diferença da capacidade de armazenagem de cada estação. O estoque armazenado na segunda estação, q_2 , é maior quando comparado ao estoque armazenado na primeira estação, q_1 .

Nota-se que o estoque armazenado na terceira estação, q_3 , possui um valor menor quando comparado ao estoque da primeira estação, q_1 , durante os primeiros instantes da simulação. O valor da frequência de processamento da máquina da terceira estação, U_3 , é igual a soma das frequências de processamento das máquinas da primeira e segunda estações. Como dito anteriormente, as capacidades dos estoques intermediários influenciam nos valores armazenados em cada estação, e como a capacidade do estoque da terceira estação é maior, o volume acumulado também é maior. Com o sistema sem controle há a tendência de se acumular material de forma a exceder o limite da capacidade dos estoques intermediários.

Reduzindo os valores das capacidades dos estoques para 10% dos valores anteriores e realizando uma nova simulação, percebe-se que o volume acumulado nos estoques é menor em comparação com a simulação anterior. Como mostrado na Fig. 39, o volume acumulado nos estoques não é reduzido para 10%, ou seja, a redução da capacidade dos estoques não é diretamente proporcional à redução dos volumes acumulados nos estoques. Aumentando-se os valores das frequências de processamento das máquinas, também acarreta em uma redução dos níveis de estoques das estações.

Figura 39 – Volume dos estoques sem controlador com capacidade reduzida



Fonte: Elaborado pelos autores

Na segunda rodada de simulação foi utilizado um controlador LQR para controlar o sistema. As capacidades dos estoques, C_i , possuem os mesmos valores adotados durante a primeira simulação. Os estoques iniciais não são nulos; para eles foram dados valores arbitrários com o propósito de analisar o decaimento dos volumes acumulados nos estoques durante o tempo de simulação.

Estoques iniciais:

$$\begin{aligned} q_{01} &= 70; \\ q_{02} &= 90; \\ q_{03} &= 60; \\ q_{04} &= 50; \end{aligned}$$

Os valores das frequências das fontes de suprimento, U_{01} e U_{02} , são definidas pelo controlador. Para as frequências de processamento das máquinas, U_{ip} , adotou-se valores arbitrários, maiores que os valores da simulação anterior, permitindo uma melhor visualização dos valores dos estoques nos gráficos gerados. Caso fossem mantidos os mesmos valores de frequências de processamento das máquinas, o tempo de simulação seria maior, prejudicando a visualização no gráfico.

Frequências de processamento no regime permanente:

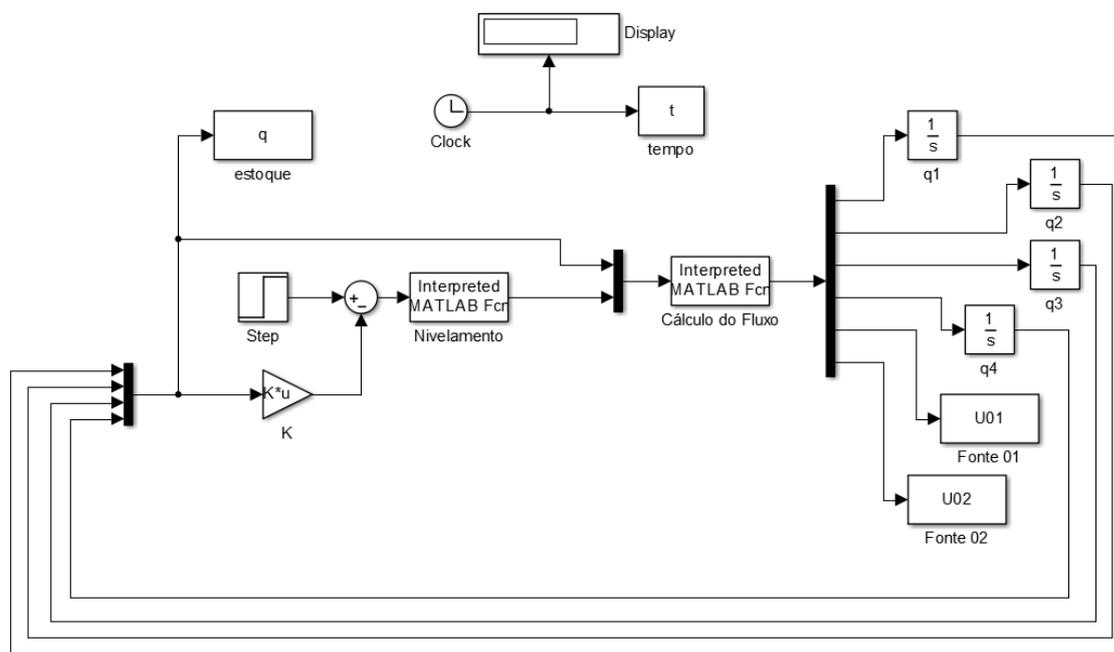
$$\begin{aligned} U_{1p} &= 40/3; \\ U_{2p} &= 80/3; \\ U_{3p} &= 40; \\ U_{4p} &= 40; \end{aligned}$$

O modelo do sistema com o controlador é apresentado na Fig. 40. Nele, a função “interpreted MATLAB function”, denominada Cálculo do Fluxo, assim como no modelo anterior, é utilizada para calcular os fluxos de produção. Nesta função, definida pelo usuário e associada ao bloco do Simulink, são definidas as entradas e saídas, semelhante ao que foi feito para o modelo anterior. Na saída do bloco é colocado um elemento integrador para calcular o estoque acumulado durante o tempo de simulação.

A função “interpreted MATLAB function”, denominada Nivelamento, é utilizada para realizar o cálculo dos valores das fontes de suprimento, U_{01} e U_{02} . Dentro desta função também são definidas limitações para as frequências das fontes de processamento. O sinal de saída deste bloco são os novos valores das frequências de suprimento. Esses valores são utilizados para realimentar a outra função “interpreted MATLAB function”, Cálculo do Fluxo, que realiza o cálculo dos fluxos de produção.

O sinal de entrada escolhido para a simulação foi uma função. Esta entrada representa um comando constate e assim são úteis na determinação da capacidade do sistema de controle de se posicionar em relação a um alvo estacionário. A função degrau unitário é 0 para $t < 0$ e 1 para $t > 0$. A função de degrau unitário e as variáveis de estado, multiplicadas pela matriz de ganho \mathbf{K} , alimentam o elemento de soma, que por sua vez, alimenta a função de Nivelamento.

Figura 40 – Modelo no Simulink com LQR



Fonte: Elaborado pelos autores

Nesta simulação, o controlador quadrático ótimo utiliza realimentação completa de estados. Nesse caso, o controlador leva as variáveis q_i a zero, conforme exposto no item 4.2. É colocado um elemento de ganho no laço interno de realimentação de estados. Este elemento é a matriz de ganho \mathbf{K} , que atua sobre as variáveis de estados que realimentam o sistema. Conforme já mencionado, o problema do regulador quadrado ótimo (LQR) tem como objetivo minimizar o índice de desempenho J descrito pela Eq. 115. De acordo com Sagawa e Mušič (2019), a matriz \mathbf{Q} define a importância relativa de termos relacionados aos estados, como mostra a Eq. 124. Portanto, um desvio na quantidade de peças no último estoque do processo de produção pode ter um peso diferente no custo em relação a um desvio da quantidade de peças no estoque de um processo inicial da linha de produção. Neste modelo, os desvios nos volumes dos estoques possuem o mesmo peso para todas as estações.

A matriz \mathbf{Q} neste modelo está relacionada como o custo em função do desequilíbrio dos estoques de produção. O nível dos estoques acima dos valores de referência pode

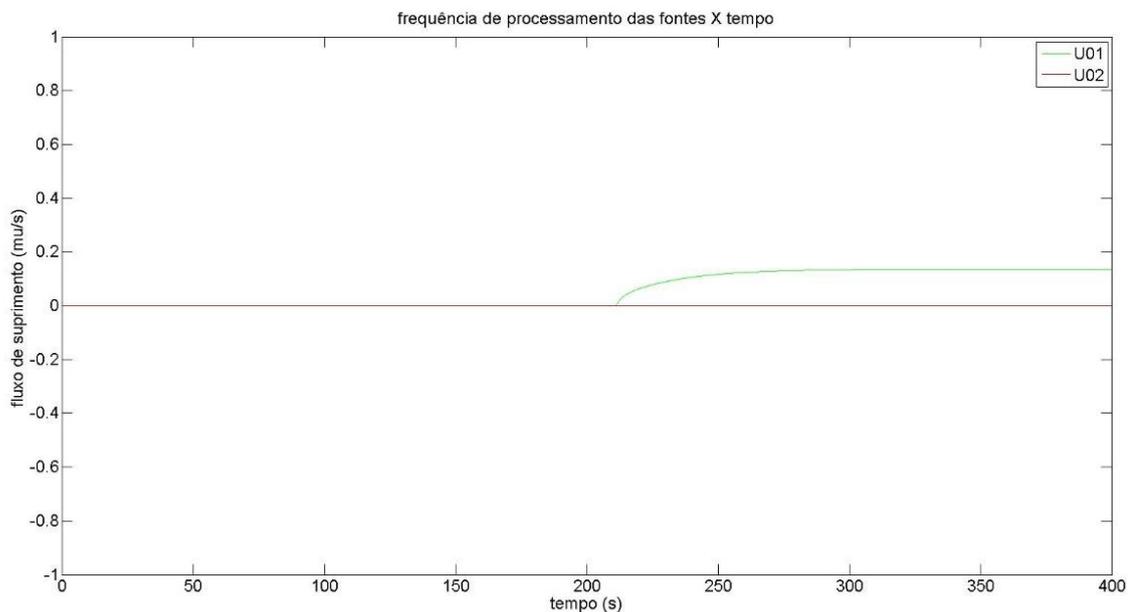
acarretar *lead time* de produção maior, volume maior de capital empatado, risco de obsolescência, além de dificultar a percepção de falhas durante o processo de produção. Níveis de estoque menores do que os valores de referência podem acarretar falta de produtos, incapacidade de atender variações na demanda, paralisação da linha de produção, entre outros problemas.

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \text{diag}(1/r_i^2) & 0 \\ 0 & \text{diag}(1/r_i^2) \end{bmatrix} \quad (124)$$

A matriz \mathbf{R} define a importância de termos relacionados a variáveis manipuladas. A matriz \mathbf{R} pode representar o custo em realizar o controle. Por exemplo, este custo pode estar relacionado com um aumento de produção através de turnos extras ou aquisição de novos maquinários.

As frequências de processamento das máquinas permanecem com o mesmo valor durante toda a simulação. As frequências de processamento das fontes são utilizadas como variáveis de controle para reajustar o sistema como mostrado na Fig. 41.

Figura 41 – Frequências de suprimento com nivelamento



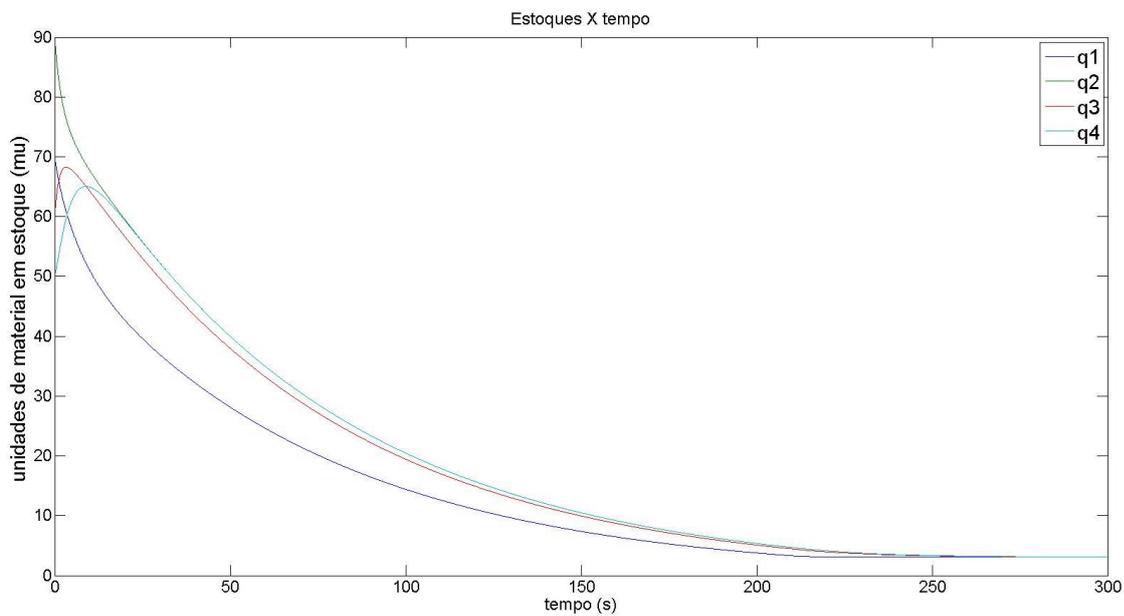
Fonte: Elaborado pelos autores

No início da simulação, os estoques possuem os valores definidos arbitrariamente já apresentados. Durante o tempo de simulação, as fontes de suprimento deixam de fornecer material para o sistema e os volumes dos estoques são reduzidos a valores próximos de zero (Fig. 42). Após os volumes dos estoques ficarem próximos de zero e estabilizarem, a fonte de

suprimento U_{01} volta a fornecer material para o sistema apenas para manter os estoques próximo de zero.

Para alguns sistemas de manufatura pode ser seja vantajoso manter os estoques próximo de zero. O processo de produção seria uma produção do tipo *just in time*, no limite, em que só há estoque em processo o suficiente para alimentar as máquinas, em sua taxa máxima de produção, mas não para ficarem acumulados.

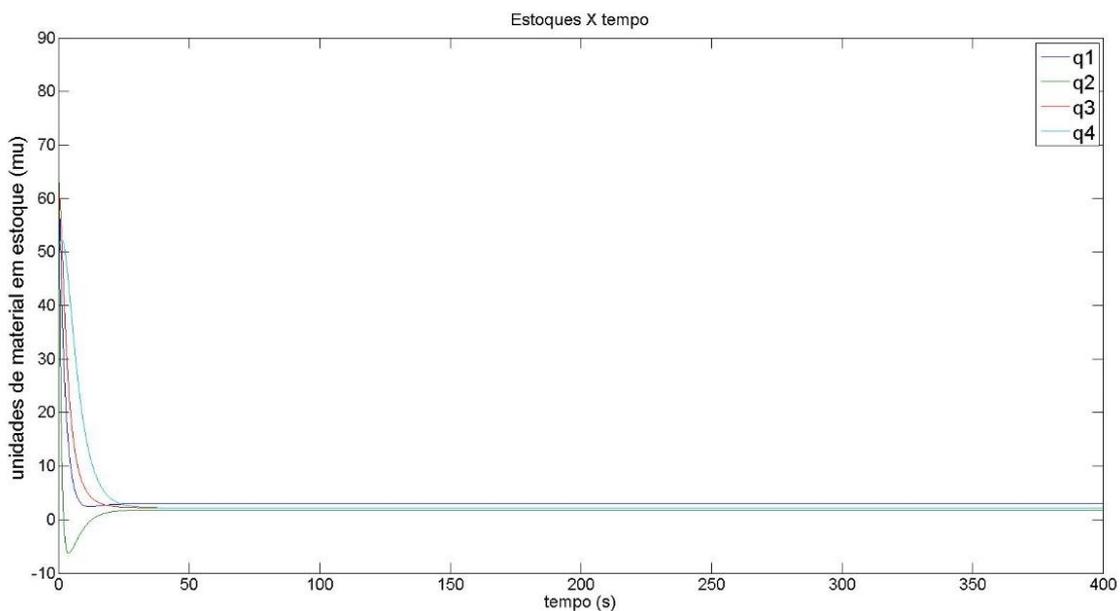
Figura 42 – Volume dos estoques com nivelamento



Fonte: Elaborado pelos autores

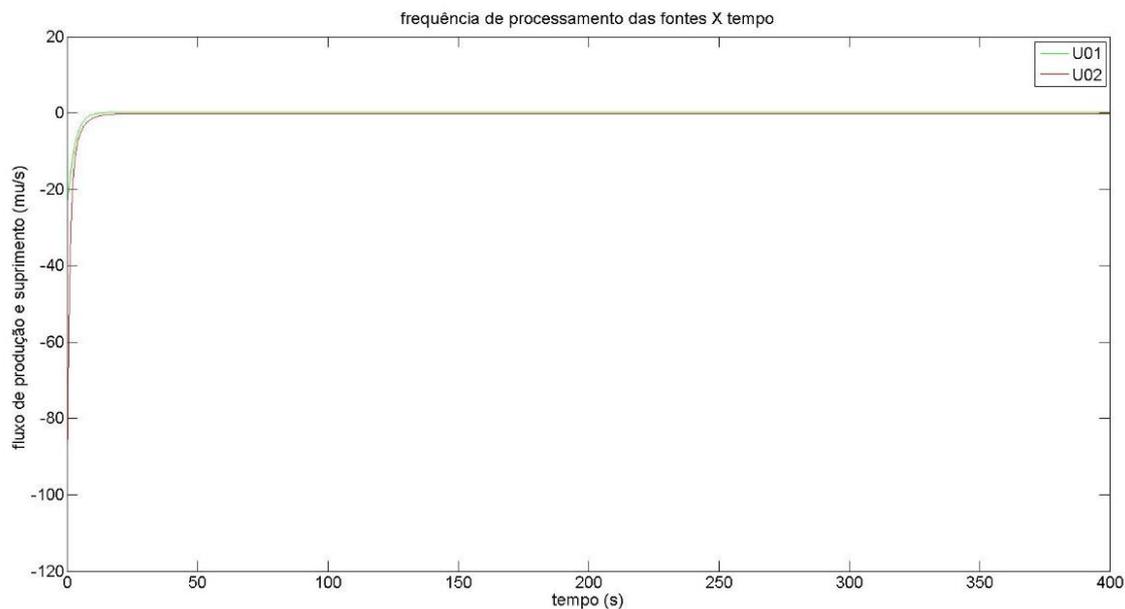
Como o objetivo do controlador LQR é reduzir as variáveis de estados para um valor igual a zero, caso não impostas limitações para os possíveis valores das frequências de suprimento, tanto as frequências de suprimento como os valores dos estoques poderiam assumir valores negativos, como mostrado na Fig. 43 e Fig. 44.

Figura 43 – Volume dos estoques sem nivelamento



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 44 – Frequência das fontes de suprimento sem nivelamento



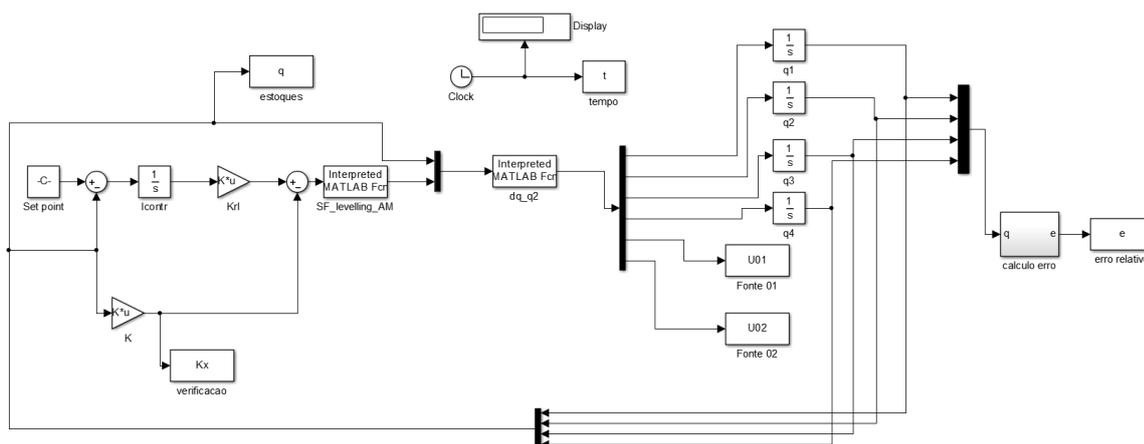
Fonte: Elaborado pelos autores

Para alguns sistemas de manufatura, talvez não seja vantajoso os estoques possuírem um valor próximo de zero, pois o sistema fica desprotegido em relação a eventos inesperados, como quebra de máquinas. Se o objetivo for manter os estoques intermediários em valores desejados, pode-se introduzir uma entrada de referência com valores em que se deseja manter

os estoques. Como já mencionado, isto pode ser conseguido utilizando um controlador LQR com vetor estendido.

O modelo apresentado na Fig. 45 possui uma estrutura semelhante a utilizada para o controlador LQR no caso anterior. Neste caso, é adicionado uma entrada de referência com os valores desejados para os estoques.

Figura 45 – Modelo LQR estendido



Fonte: Elaborado pelos autores

Estes valores de referência são comparados com os valores atuais dos estoques do sistema na junta de soma. Esse laço possui um elemento integrador, posicionado antes da matriz de ganho, para eliminar o erro em regime permanente, e uma matriz de ganho K_I , que atua sobre as variáveis de estado extras. No laço interno temos a matriz de ganho K multiplicando as variáveis de estado, semelhante ao modelo anterior. Essas variáveis servem como entrada para junta de soma, que está ligada à função “interpreted MATLAB function” para realizar o cálculo dos valores das fontes de suprimento, U_{01} e U_{02} . Os valores calculados para as fontes de suprimento são utilizados como entrada para a outra função “interpreted MATLAB function” que realiza o cálculo dos fluxos de produção.

As frequências de processamento das máquinas (parâmetros) são as mesmas utilizadas no exemplo sem controlador. As capacidades dos estoques, C_i , possuem os mesmos valores adotados para as duas primeiras simulações.

Estoques iniciais:

$$\begin{aligned} q_{01} &= 0; \\ q_{02} &= 0; \\ q_{03} &= 0; \\ q_{04} &= 0; \end{aligned}$$

Entrada de referência para os estoques:

$$q_{1c} = 90;$$

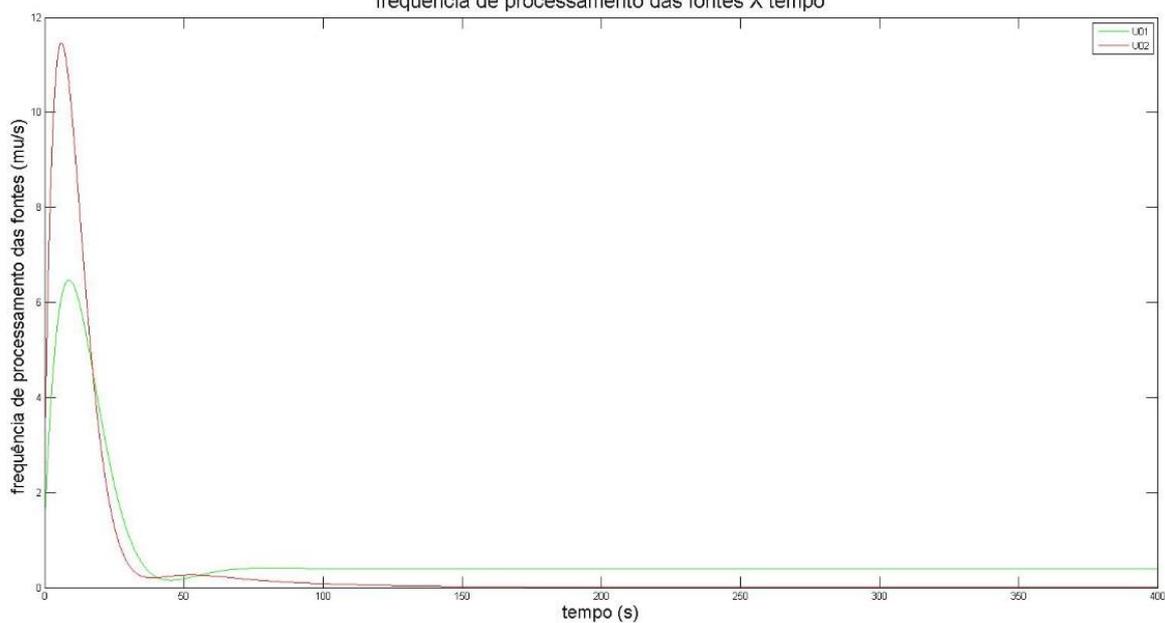
$$q_{2c}=90;$$

$$q_{3c}=90;$$

$$q_{4c}=90;$$

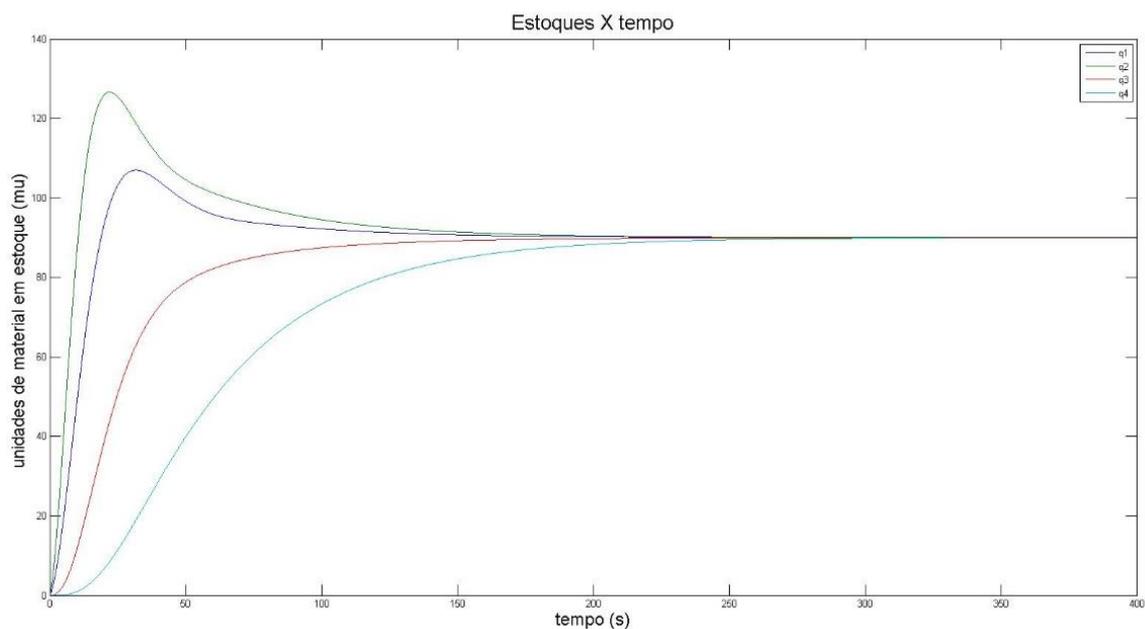
Durante a simulação, as frequências das fontes de suprimento de material aumentam (Fig. 46), para permitir que os estoques acumulem material (Fig. 47). Nota-se que há um sobressinal para as duas primeiras estações.

Figura 46 – Frequências de processamento das fontes com LQR estendido
frequência de processamento das fontes X tempo



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 47 – Volumes dos estoques com LQR estendido

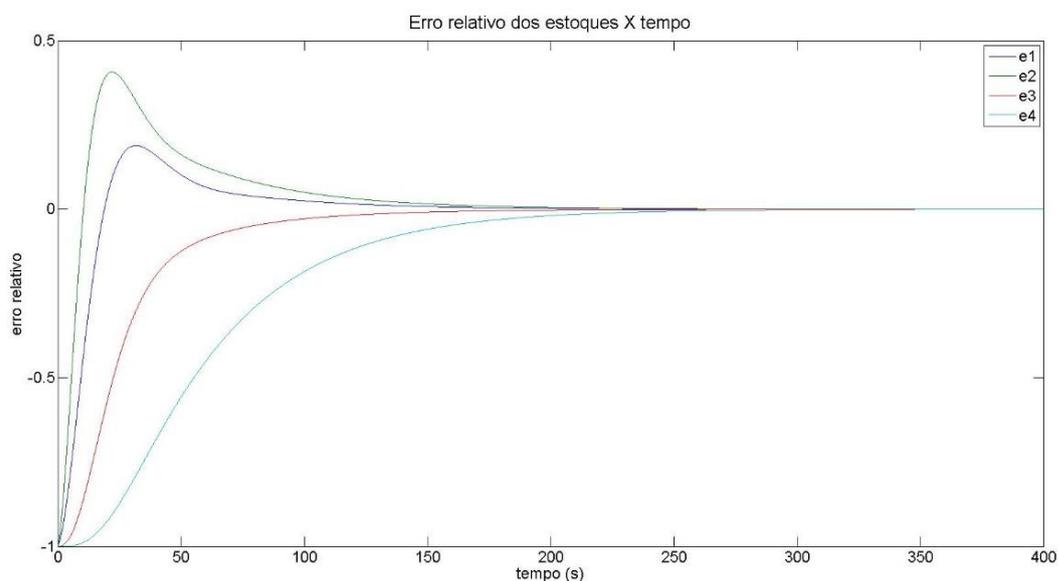


Fonte: Elaborado pelos autores

Este sobressinal faz com que os valores dos estoques intermediários extrapolem os valores definidos para as capacidades dos estoques. Portanto, este é um ponto a ser trabalhado em desenvolvimentos futuros.

Após os valores dos estoques se aproximarem dos valores de referência, os valores das frequências de processamento das fontes de suprimento começam a reduzir, semelhante ao ocorrido quando utilizado o controlador LQR, mantendo os volumes dos estoques nos valores de referência. O erro relativo dos estoques durante a simulação, Fig. 48, é calculado através da diferença entre os valores de referência e valores atuais do estoque, dividido pelos valores de referência. Como os valores iniciais dos estoques são nulos, o gráfico com os erros relativos dos estoques se assemelha com o gráfico dos estoques (Fig. 47).

Figura 48 – Erro relativo dos estoques com LQR estendido



Fonte: Elaborado pelos autores

Realizando uma análise de sensibilidade, percebeu-se que no modelo apresentado, apesar de os estoques convergirem para os valores de estoque desejados, há limitações em relação aos valores a serem rastreados. Quando os valores de referência dos estoques são diferentes, por exemplo, o valor de referência do último estoque é o dobro do valor do primeiro estoque, o sistema encontra dificuldade para atingir esses valores. A capacidade dos estoques também é uma limitação, pois influencia diretamente nos volumes acumulados no sistema. Nesses casos o procedimento da síntese do controlador pode não ser capaz de calcular a matriz de ganho para o sistema.

O controle realizado apenas nas fontes de suprimento de material limita as ações de controle. As estações a jusante são dependentes das estações a montante do sistema. Caso

fosse possível controlar também as frequências de processamento das máquinas, o sistema se adaptaria mais facilmente às variações durante o processo de produção, pois as estações de produção seriam menos dependentes umas das outras. Para que o controle das frequências de processamento das máquinas seja possível, é necessário definir controladores e procedimentos de síntese de controladores que não dependam da forma padrão para serem aplicados e que comportem o formato $\mathbf{A}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{u}$ do modelo de estado (Eq. 111).

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho realizou-se uma revisão bibliográfica da literatura onde identificaram-se os modelos de grafos de ligação aplicados à manufatura presentes na literatura. Os modelos foram analisados e constatou-se que parte deles são apenas teóricos ou não seguem o formalismo da abordagem de grafos de ligação, de forma que poucos modelos permitiam simulação.

A partir da análise dos modelos existentes, tomou-se um modelo como base. O modelo escolhido segue o formalismo requerido pela abordagem e permite simulação, porém, apresenta algumas limitações. A principal limitação deste modelo é a capacidade infinita dos estoques, que faz com que a variável de esforço torna-se nula, zerando a transmissão de potência entre os elementos. A transmissão de potência entre os elementos é justamente a principal característica da abordagem de grafos de ligação. Portanto, é necessária a introdução uma fonte de esforço, representada por uma função mínimo, para acoplar máquina e estoque. Esta função mínimo introduz uma não linearidade e dificulta o projeto de controladores, além de impor a premissa simplificadora de capacidade infinita de armazenagem.

Identificadas as limitações, foram propostas mudanças para este modelo. Ao limitar as capacidades dos estoques, a variável de esforço não se torna nula e não é necessária a introdução de um elemento de esforço mínimo. A variável de esforço passa a representar a carga de trabalho dos estoques intermediários, quanto maior o volume armazenado nos estoques, maior o esforço. Além disso, o modelo respeita o princípio de transmissão de potência requerido pela abordagem e as novas equações permitem adicionar aos sistemas restrições mais realistas.

As análises das simulações do modelo sem controlador através do Simulink mostraram que quando aumenta-se a capacidade dos estoques, aumenta-se também os volumes armazenados nos estoques. Quando aumenta-se os valores das frequências de processamento das máquinas, diminui-se os volumes estoques, pois há maior consumo de material por parte das máquinas. Quanto aumenta-se as frequências de fornecimento de material das fontes, aumenta-se também os volumes estocados, pois há uma maior quantidade de material sendo fornecido para o sistema.

Utilizando um controlador LQR, pensando em um sistema tipo *just in time*, o sistema consegue manter o volume dos estoques próximo à zero. Esta abordagem pode ser utilizada por empresas que desejam um *lead time* menor. Apesar de apresentar um erro em regime permanente, o sistema utiliza os recursos disponíveis, mas de forma que não haja acúmulos nos estoques. Com o controlador LQR de vetor estendido, o sistema consegue rastrear valores

desejados para os estoques, porém, o sistema apresenta limitações em relação aos parâmetros escolhidos para o sistema.

O comportamento dinâmico do modelo ainda não é totalmente conhecido, fica um ponto em aberto sobre como implementar um controlador que permita também controlar, além das frequências de processamento das fontes, as frequências de processamento das máquinas. A síntese do controlador proposto que permita uma escolha mais flexível de parâmetros e a influência destes no comportamento dinâmico do sistema também pode ser objeto de pesquisas futuras. Além disso, pode-se explorar outros tipos de controladores que não foram abordados no presente texto.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Esta pesquisa foi financiada em parte pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP): #2019/12023-1. As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do(s) autor(es) e não necessariamente refletem a visão da FAPESP.

REFERÊNCIAS

BENMANSOUR, S., BENABDELHAFID, A., BOUDEBOUS, D., BOUKACHOUR, J. Bond graphs for robust modelling of manufacturing systems. In: **Second IEEE International Conference on Computational Cybernetics**, ICCC 2004. IEEE, p. 291-295. 2004.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.

BESOMBES, B.; MARCON, E.; ALLA, A. Application of Generalised Bond-Graphs and Continuous Petri Nets to Modelling Industrial Processes and Manufacturing Systems. In: **Information Control Problems in Manufacturing Technology 1992**. Pergamon, p. 429-434. 1992.

BESOMBES, B; MARCON, E. Bond-graphs for modelling of manufacturing systems. In: **Proceedings of IEEE Systems Man and Cybernetics Conference-SMC**. IEEE, p. 256-261. 1993.

BORUTZKY, W. **Bond graph methodology: development and analysis of multidisciplinary dynamic system models**. Springer Science & Business Media, 2009.

BREWER, J. W. Progress in the bond graph representations of economics and population dynamics. **Journal of the Franklin Institute**, v. 328, n. 5-6, p. 675-696, 1991.

DAS, S. **Mechatronic modeling and simulation using bond graphs**. CRC Press, 2009.

DEMBÉLÉ, S.; LHOTE, F. Proposition of manufacturing systems modelling by Bond Graphs. In: **Proceedings of IEEE Systems Man and Cybernetics Conference-SMC**. IEEE, p. 262-267. 1993.

DEMBÉLÉ, S.; LHOTE, F. Modelling of Containers Flows in a Workshop: A Bond-Graph Approach. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 27, n. 4, p. 115-119, 1994.

DENYER, D; TRANFIELD, D. Producing a systematic review. **The Sage handbook of organizational research methods**, p. 671-689, 2009.

DOEBELIN, E. **System dynamics: modeling, analysis, simulation, design**. CRC Press, 1998.

FELÍCIO, L. C. Modelagem da dinâmica de sistemas e estudo da resposta. 2007.

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 & Control**, v. 11, n. 1, p. 7-19, 2000. Forrester, J. W. **Industrial Dynamics**. Cambridge: MIT Press, (1961).

IVANOV, D.; DOLGUI, A.; SOKOLOV, B. Applicability of optimal control theory to adaptive supply chain planning and scheduling. **Annual Reviews in control**, v. 36, n. 1, p. 73-84, 2012.

IVANOV, D.; SOKOLOV, B. Control and system-theoretic identification of the supply chain dynamics domain for planning, analysis and adaptation of performance under uncertainty. **European Journal of Operational Research**, v. 224, n. 2, p. 313-323, 2013.

KARNOPP, D. C.; MARGOLIS, D. L.; ROSENBERG, R. C. **System dynamics: modeling, simulation, and control of mechatronic systems**. John Wiley & Sons, 2012.

KARNOPP, D.; ROSENBERG, R. C. *System Dynamics: A Unified Approach*, 2nd Edition. John Wiley & Sons, New York, 1990.

KARNOPP, D.; ROSENBERG, R. C. *System Dynamics: A Unified Approach*. John Wiley, New York, 1975.

KARNOPP, D.; ROSENBERG, R. C. **Analysis and simulation of multiport systems**. MIT Press, 1968.

KYPUROS, J. *System dynamics and control with bond graph modeling*. CRC Press, 2013.

KOMURGOZ, G.; GEITNER, G.-H. Systems featuring chain structures—a generalized Bond Graph modelling. **International Journal of General Systems**, v. 48, n. 8, p. 861-889, 2019.

MARCON, E. et al. A Modular Approach for Modeling of Manufacturing Systems with Bond Graph: Single-Part-Type Systems. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 30, n. 6, p. 145-150, 1997.

LAIR, P.O. ZERHOUNI, N. FERNEY, M. Using bond graphs to model production systems. In *Proceedings of the CIMAT'96*, Grenoble, France, pp. 19–23. (1997).

OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. 2010.

ORTEGA, M.; LIN, L. Control theory applications to the production–inventory problem: a review. **International Journal of Production Research**, v. 42, n. 11, p. 2303-2322. 2004.

ROSENBERG, R. C. Modeling and simulation of large-scale, linear, multiport systems. **Automatica**, v. 9, n. 1, p. 87-95, 1973.

SAGAWA, J. K. **Análise da dinâmica e da prática do planejamento e controle da produção: uma abordagem combinada de estudo de caso e modelagem de sistemas dinâmicos**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SAGAWA, J. K.; NAGANO, M. S. Dynamic models for production control and scheduling: A brief review. In: **2013 12th Mexican International Conference on Artificial Intelligence**. IEEE, p. 38-44. 2013.

SAGAWA, J. K.; NAGANO, M. S. Modeling the dynamics of a multi-product manufacturing system: A real case application. **European Journal of Operational Research**, v. 244, n. 2, p. 624-636, 2015a.

SAGAWA, J. K.; NAGANO, M. S. Applying bond graphs for modelling the manufacturing dynamics. **IFAC-PapersOnLine**, v. 48, n. 3, p. 2047-2052, 2015b.

SAGAWA, J. K.; NAGANO, M. S.; NETO, Mauro Speranza. A closed-loop model of a multi-station and multi-product manufacturing system using bond graphs and hybrid controllers. **European Journal of Operational Research**, v. 258, n. 2, p. 677-691, 2017.

SAGAWA, J. K.; MUŠIČ, G. Combined Synthesis/Simulation Approach to Design and Verification of Production Control Strategies. **EMSS The European Modeling and Simulation Symposium**. 2017.

SAGAWA, J. K.; LAND, M. J. Representing workload control of manufacturing systems as a dynamic model. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 2, p. 825-830, 2018.

SAGAWA, J. K.; MUŠIČ, G. Towards the use of bond graphs for manufacturing control: Design of controllers. **International Journal of Production Economics**, v. 214, p. 53-72, 2019.

SAMANTARAY, A. K.; BOUAMAMA, B. O. **Model-based process supervision: a bond graph approach**. Springer Science & Business Media, 2008.

SARIMVEIS, H. et al. Dynamic modeling and control of supply chain systems: A review. **Computers & operations research**, v. 35, n. 11, p. 3530-3561, 2008.

SKOGESTAD, Sigurd; POSTLETHWAITE, Ian. **Multivariable feedback control: analysis and design**. New York: Wiley, 2007.

SMATA, N. et al. From car transport to supply chain: Modelisation and performance evaluation. In: **EFEEA'10 International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications, 2-4 November 2010, Ghardaia, Algeria**. p. 1-7. 2010.

SPRODOWSKI, T.; SAGAWA, J. K.; PANNEK, Jürgen. Frequency Based Model Predictive Control of a Manufacturing System. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 2, p. 801-806, 2018.

SURI, R.; DESIRAJU, R. Performance analysis of flexible manufacturing systems with a single discrete material-handling device. **International Journal of Flexible Manufacturing Systems**, v. 9, n. 3, p. 223-249, 1997.

THOMA, J.; BOUAMAMA, B. O. **Modelling and simulation in thermal and chemical engineering: A bond graph approach**. Springer Science & Business Media, 2013.

THOMA, J. U. **Simulation by Bond-graphs**. Springer Verlag, 1990.

THOMA, J. U. **Introduction to bond graphs and their applications**, 1975.

WENG, W.; FUJIMURA, S. Control methods for dynamic time-based manufacturing under customized product lead times. **European Journal of Operational Research**, v. 218, n. 1, p. 86-96, 2012.

WIENDAHL, Hans-Peter et al. **Load-oriented manufacturing control**. Berlin etc.: Springer, 1995.

WIENDAHL, H.-P.; BREITHAUPT, J.-W. Automatic production control applying control theory. **International Journal of Production Economics**, v. 63, n. 1, p. 33-46, 2000.

APÊNDICE A – Código de programação MATLAB

1. Código – Malha aberta

```

% Rotina principal

clc
clear all
close all

global U1p U2p U3p U4p U01p U02p C1 C2 C3 C4
% Parâmetros
% Frequencias de processamento
U1p=4/3; % Hz
U2p=8/3; % Hz
U3p=4; % Hz
U4p=4; % Hz

% Frequencia das fonte de suprimento
U01p=4/3; %Hz
U02p=8/3; %Hz

% Capacidades dos estoques
C1=100; % Cap Estoque 1
C2=100; % Cap Estoque 2
C3=150; % Cap Estoque 3
C4=300; % Cap Estoque 4

% Estoques iniciais
q1o=0; % mu
q2o=0; % mu
q3o=0; % mu
q4o=0; % mu

%Tempo de simulação
tf=120;

% Modelo Simulink
sim('EDO_dq_q2')

% Plotar gráficos
figure(1)
plot(t,U4,'-b');
hold on
plot(t,U01,'-g');
hold on
plot(t,U02,'-r');
hold off
title('fluxo de produção X tempo')
xlabel('tempo (s)')
ylabel('fluxo de produção e suprimento (mu/s)')
legend('U4','U01','U02')
axis([0 120 0 6])

figure(2)
plot(t,q);
title('Estoques X tempo')
xlabel('tempo (s)')
ylabel('unidades de material em estoque (mu)')
legend('q1','q2','q3','q4')

```

```

% Calculo dos fluxos de produção
function [dq]=dq_q2(q1,q2,q3,q4)

global U1p U2p U3p U4p U01p U02p C1 C2 C3 C4

%dq - taxa de acumulo de estoque
%q - volume de produção (estoque)

dq1 = (-1)*(U1p/C1)*q1 + (U1p/C3)*q3 +U01p;
dq2 = (-1)*(U2p/C2)*q2 + (U3p/C3)*q3 +U02p;
dq3 = (U1p/C1)*q1 + (U2p/C2)*q2 - ((U1p+U2p+U3p)/C3)*q3 + (U3p/C4)*q4;
dq4 = (U3p/C3)*q3 - ((U3p+U4p)/C4)*q4;

U1=U1p;
U2=U2p;
U3=U3p;
U4=U4p;
U01=U01p;
U02=U02p;
dq = [dq1; dq2; dq3; dq4; U1; U2; U3; U4; U01; U02];
end

```

2. Código – Controlador LQR

```

% Rotina principal

clc
clear all
close all

global U1p U2p U3p U4p U01p U02p C1 C2 C3 C4
% Parâmetros
% Frequencias de processamento
U1p=40/3; % Hz
U2p=80/3; % Hz
U3p=40; % Hz
U4p=40; % Hz
U01p=4/3; %Hz
U02p=8/3; %Hz

%Valor para ser mudado
k = 0.05;
% tamanho da matriz
n = 4;
% Capacidade dos estoques
C1=100; % Cap Estoque 1
C2=100; % Cap Estoque 2
C3=150; % Cap Estoque 3
C4=300; % Cap Estoque 4

% Estoques iniciais
q1o=70; % mu
q2o=90; % mu
q3o=60; % mu
q4o=50; % mu

tf=400;

```

```

% Realimentação completa de estados
A = [-(U1p/C1), 0, (U1p/C3), 0;
      -(U2p/C2), 0, (U3p/C3), 0;
      (U1p/C1), (U2p/C2), -(U1p+U2p+U3p)/C3, U3p/C4;
      0, 0, (U3p/C3), -(U3p+U4p)/C4];
B = [ U01p 0; 0 U02p ; 0 0; 0 0];
C = eye(size(A));
D = zeros(size(B));
Spc=ss(A,B,C,D);
f=0.1;
Q=f*eye(size(A));
%Matriz custo do controle
R=[1 0; 0 1];
% Controlador LQR
K = lqr(A, B, Q, R);

sim('Modelo')

figure(1)
plot(t,U01,'-g');
set(gca,'FontSize',18)
hold on
plot(t,U02,'-r');
set(gca,'FontSize',18)
hold off
title('frequência de processamento das fontes X tempo')
xlabel('tempo (s)')
ylabel('fluxo de suprimento (mu/s)')
legend('U01','U02')
axis([0 400 -1 1])

figure(2)
plot(t,q);
set(gca,'FontSize',18)
title('Estoques X tempo')
xlabel('tempo (s)', 'FontSize',18)
ylabel('unidades de material em estoque (mu)', 'FontSize',22)
legend({'q1','q2','q3','q4'}, 'FontSize',22)
axis([0 300 0 90])

%Calculo dos fluxos de produção
function [dq]=dq_q2(q1,q2,q3,q4,U01,U02)

global U1p U2p U3p U4p U01p U02p C1 C2 C3 C4

dq1 = (-1)*(U1p/C1)*q1 + (U1p/C3)*q3 +U01;
dq2 = (-1)*(U2p/C2)*q2 + (U3p/C3)*q3 +U02;
dq3 = (U1p/C1)*q1 + (U2p/C2)*q2 - ((U1p+U2p+U3p)/C3)*q3 + (U3p/C4)*q4;
dq4 = (U3p/C3)*q3 - ((U3p+U4p)/C4)*q4;

dq = [dq1; dq2; dq3; dq4; U01; U02];
end

% Função de nivelamento

function [U]=Nivelamento_AM(u1,u2)

global U01p U02p

```

```
%definicao do controle
U01 = U01p*(1+u1);
U02 = U02p*(1+u2);
```

```
if U01<0,
    U01 = 0;
end
if U02<0,
    U02 = 0;
end
```

```
U = [U01;U02];
```

3 Código – Controlador LQR estendido

```
% Rotina principal
```

```
clc
clear all
close all
```

```
global U1p U2p U3p U4p U01p U02p C1 C2 C3 C4
```

```
% Parâmetros
% Frequencias de processamento
U1p=4/3; % Hz
U2p=8/3; % Hz
U3p=4; % Hz
U4p=4; % Hz
U01p=4/3; %Hz
U02p=8/3; %Hz
```

```
%Valor para ser mudado
k = 0.05;
% tamanho da matriz
n = 4;
% Capacidade dos estoques
C1=100; % Cap Estoque 1
C2=100; % Cap Estoque 2
C3=150; % Cap Estoque 3
C4=300; % Cap Estoque 4
```

```
% Estoques iniciais
q1o=0; % mu
q2o=0; % mu
q3o=0; % mu
q4o=0; % mu
```

```
% Valores de referência dos estoques 90%
q1c=90; % unidades
q2c=90; % unidades
q3c=90; % unidades
q4c=90; % unidades
```

```
tf=300;
```

```
% Realimentação completa de estados
A = [-(U1p/C1), 0, (U1p/C3), 0;
     -(U2p/C2), 0, (U3p/C3), 0;
     (U1p/C1), (U2p/C2), -(U1p+U2p+U3p)/C3, U3p/C4;
```

```

    0, 0, (U3p/C3), -(U3p+U4p)/C4];
B = [ U01p 0; 0 U02p ; 0 0; 0 0];
C = eye(size(A));
D = zeros(size(B));
SpC=ss(A,B,C,D);
f=0.1;
Q=f*eye(size(A));
%Matriz custo do controle
R=[1 0; 0 1];
% Controlador LQR
%K = lqr(A, B, Q, R);
B0 = [0 0; 0 0; 0 0; 0 0];
% Controlador com matriz estendida
n=4;
Ae=[zeros(n,n),C;zeros(n,n),A];
Be=[B0;B];
Ce=[zeros(n,n),C];
Spce=ss(Ae,Be,Ce,0);

%-----
--%
%
% Valores de referencia
qc=[q1c, q2c, q3c, q4c];
% Matrix de custo
Qx=diag(1./qc.^2);
% Mudar o desempenho do integrador (uma parte da matriz de ganho Kre)
ri=1;
% Matriz de custo estendida
Q=blkdiag(ri*Qx,Qx);
% Matriz de custo
R=[1 0; 0 1];

Kre=lqr(Ae,Be,Q,R);

% separação do ganho de realimentação de estado e matriz de ganho do
integrador
KI=Kre(:,1:n);
K=Kre(:,n+1:end);

sim('Modelo')

e_rel = (-1)*e;

figure(1)
plot(t,U01,'-g');
hold on
plot(t,U02,'-r');
hold off
title('frequência de processamento das fontes X tempo','FontSize',20)
xlabel('tempo (s)','FontSize',18)
ylabel('frequência de processamento das fontes (mu/s)','FontSize',18)
legend('U01','U02')
axis([0 300 0 12])

figure(2)
plot(t,q);
title('Estoques X tempo','FontSize',20)
xlabel('tempo (s)','FontSize',18)
ylabel('unidades de material em estoque (mu)','FontSize',18)

```

```

legend('q1','q2','q3','q4')

figure(3)
plot(t,e_rel);
set(gca,'FontSize',18)
title('Erro relativo dos estoques X tempo','FontSize',20)
xlabel('tempo (s)','FontSize',18)
ylabel('erro relativo','FontSize',18)
legend('e1','e2','e3','e4')

% Calculo dos fluxos de produção
function [dq]=dq_q2(q1,q2,q3,q4,U01,U02)

global U1p U2p U3p U4p U01p U02p C1 C2 C3 C4

%dq --> taxa de acumulo de estoque
%q --> volume de produção (estoque)

dq1 = (-1)*(U1p/C1)*q1 + (U1p/C3)*q3 +U01;
dq2 = (-1)*(U2p/C2)*q2 + (U3p/C3)*q3 +U02;
dq3 = (U1p/C1)*q1 + (U2p/C2)*q2 - ((U1p+U2p+U3p)/C3)*q3 + (U3p/C4)*q4;
dq4 = (U3p/C3)*q3 - ((U3p+U4p)/C4)*q4;

dq = [dq1; dq2; dq3; dq4; U01; U02];
end

% Função de nivelamento
function [U]=Nivelamento_AM(u1,u2)

global U01p U02p

%definicao do controle
U01 = U01p*(1+u1);
U02 = U02p*(1+u2);

if U01<0,
    U01 = 0;
end
if U02<0,
    U02 = 0;
end

U = [U01;U02];

```