



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE LUÍS EDUARDO MAGALHÃES
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL E DE SISTEMAS - EEIS

Felipe Ergueta Fernandes Ribeiro

Estudo da resposta a perturbações de consumo em cadeias de suprimentos estáveis

LUÍS EDUARDO MAGALHÃES - BA

2022

FELIPE ERGUETA FERNANDES RIBEIRO

Estudo da resposta a perturbações de consumo em cadeias de suprimentos estáveis

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal do Oeste da Bahia, Centro Multidisciplinar de Luís Eduardo Magalhães, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia Industrial e de Sistemas - EEIS.

Orientador: Profº. Dr. Pedro Dias Pinto

Co-Orientador: Profº. Me. Adriano David

Monteiro de Barros

LUÍS EDUARDO MAGALHÃES - BA

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

R484 Ribeiro, Felipe Ergueta Fernandes.

Estudo da resposta a perturbações de consumo em cadeias de suprimentos estáveis. /Felipe Ergueta Fernandes Ribeiro – 2022.

32 p.; il. color.

Orientador: Prof. Pedro Dias Pinto.

Trabalho de Conclusão de Curso: (Especialização em Engenharia Industrial e de Sistemas) – Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro Multidisciplinar de Luís Eduardo Magalhães, Luís Eduardo Magalhães, BA, 2022.

1. Cadeia de suprimentos – Efeito chicote. 2. Simulação de sistemas – estudo de tempo na produção. 3. Controle de estoque – parametrização.

I. Pinto, Pedro Dias. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro Multidisciplinar de Luís Eduardo Magalhães. III. Título.

CDD: 658.7

BIBLIOTECAS UFOB - Biblioteca Universitária de Luís Eduardo Magalhães

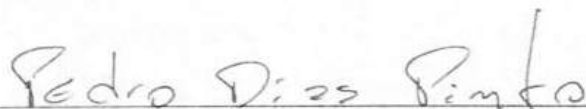
FELIPE ERGUETA FERNANDES RIBEIRO

ESTUDO DA RESPOSTA DE PERTURBAÇÕES DE CONSUMO EM
CADEIAS DE SUPRIMENTOS ESTÁVEIS

Trabalho de Conclusão de Curso de
Especialização apresentado à Universidade
Federal do Oeste da Bahia, como requisito
parcial de avaliação para a obtenção do título
de Especialista em Engenharia Industrial e de
Sistemas.

Aprovado em: 30/09/22

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Pedro Dias Pinto
Universidade Federal do Oeste da Bahia – UFOB



Prof. Dr. Bruno Trindade Reis
Universidade Federal do Oeste da Bahia – UFOB



Prof. Me. Luis Alberto Pargas Carmona
Universidade Federal do Oeste da Bahia - UFOB

RESUMO

As cadeias de suprimentos podem ser representadas por um modelo do tipo Entrada-Saída. Assim, neste trabalho implementou-se uma cadeia de suprimentos homogênea e aplicou-se uma perturbação nesta cadeia. O objetivo deste trabalho é encontrar a melhor parametrização para a cadeia de suprimentos homogênea, em que otimize o tempo de acomodação, os picos de produção e as variações no estoque, considerando a condição de cadeia estável, em que não há efeito chicote padrão ou reverso. Para alcançar este objetivo foi necessário implementar esta cadeia no *software* Matlab/Simulink, e para analisar o tempo de acomodação foi necessário a construção de um algoritmo, onde foram realizadas diversas simulações para garantir um resultado determinístico para as taxas de produção da cadeia. Os resultados mostram que em condições de cadeia controlada é possível determinar qual a melhor parametrização para os elos, com base no comportamento da cadeia.

Palavras-chave: Cadeia de Suprimentos, Resiliência, Efeito Chicote.

ABSTRACT

Supply chains can be represented by an Input-Output model. Thus, in this work, a homogeneous supply chain was implemented and a disturbance was applied to this chain. The objective of this work is to find the best parameterization for the homogeneous supply chain, in which it optimizes the settling time, production peaks and variations in stock, considering the stable chain condition, in which there is no standard or reverse bullwhip effect. To achieve this goal it was necessary to implement this chain in the Matlab/Simulink software, and to analyze the accommodation time it was necessary to build an algorithm, where several simulations were carried out to guarantee a deterministic result for the production rates of the chain. The results show that under stable chain conditions it is possible to determine the best parameterization for the links, based on the behavior of the chain.

Keywords: Supply chain, Resilience, Bullwhip effect.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cadeia de Suprimentos Linear.	12
Figura 2: τ vs β para $\epsilon = 0,2$. A curva preta indica a previsão teórica $\psi_t = 1$	21
Figura 3: τ vs ϵ para $\beta = 3,0$. A curva preta indica a previsão teórica $\psi_t = 1$	21
Figura 4: ϵ vs β para $\tau = 3,0$. A curva preta indica a previsão teórica $\psi_t = 1$	22
Figura 5: Taxa de consumo (produtos/ciclo).....	23
Figura 6: Quadro geral do comportamento de amostras de cadeias de suprimentos submetidas a perturbação no consumo para diferentes valores de τ e β com ϵ fixo.....	24
Figura 7: Quadro geral do comportamento de amostras de cadeias de suprimentos submetidas a perturbação no consumo para diferentes valores de τ e ϵ com β fixo.....	24
Figura 8: Quadro geral do comportamento de amostras de cadeias de suprimentos submetidas a perturbação no consumo para diferentes valores de ϵ e β com τ fixo.....	25
Figura 9: Comportamento de $q(t)$ para a melhor amostra. Os parâmetros foram $\tau = 1,00$, $\beta = 2,54$ e $\epsilon = 0,24$ sendo $fobj = 0,91$	27
Figura 10: Comportamento de $q(t)$ para a pior amostra. Os parâmetros foram $\tau = 3,50$, $\beta = 0,77$ e $\epsilon = 0,20$ sendo $fobj = 9,03$	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados dos melhores e piores desempenhos das cadeias estáveis para cada par de parâmetros testado.	26
---	----

LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo 1: Cálculo do Pico Máximo.	17
Algoritmo 2: Cálculo do Tempo de Acomodação.....	18
Algoritmo 3: Cálculo do Estoque Mínimo e Máximo.....	19

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1 OBJETIVO	10
1.1.1 Objetivo geral	10
1.1.2 Objetivos específicos	10
1.2 JUSTIFICATIVA	11
2. REFERENCIAL TEÓRICO	12
3. METODOLOGIA	15
4. RESULTADOS	20
4.1 Mapeamento das regiões de estabilidade	20
4.2 Análise do efeito da perturbação na cadeia	23
CONCLUSÕES	28
REFERÊNCIAS	29

1. INTRODUÇÃO

Uma cadeia de suprimentos consiste em todas as partes envolvidas, diretamente ou indiretamente, em satisfazer o pedido de um cliente (BASAK, 2014). O gerenciamento de cadeia de suprimentos abarca atividades relacionadas com provisões, produção e distribuição de um produto, todas estas atividades estão entre um nó superior, que se chama fábrica, e um nó inferior, que se chama mercado consumidor (PONTE, 2013).

O efeito chicote é um dos conceitos mais populares e mais celebrados no campo de administração e pesquisa de operações. Este termo descreve o efeito de uma lenta movimentação de demanda do mercado consumidor que cria uma grande amplitude de produção para os fornecedores ao longo da cadeia de suprimentos (WANG, 2016).

As consequências do aumento da amplitude ao longo da cadeia de suprimentos são: a necessidade de aumentar os estoques de segurança (o que aumenta o investimento), gera uma produção acima das capacidades e o aumento do espaço de armazenamento. Períodos de intenso uso de recursos são acompanhados de períodos de subutilização (CHATFIELD, 2004).

Não tão comum é o chamado “efeito chicote reverso”. Ele é caracterizado como o fluxo contrário ao do efeito chicote, a variação da demanda é maior no mercado consumidor e este diminui ao longo da cadeia de suprimentos até chegar ao fornecedor de matéria-prima. Este fenômeno tem como principal causa as interrupções nas entregas (RONG, 2017).

Em recessões econômicas ou situações atípicas como a crise causada pela pandemia de COVID-19, as cadeias de suprimentos podem sofrer perturbações inesperadas, causadas por uma demanda que foge dos padrões. Após cessar a perturbação, para que estas cadeias normalizem a sua operação, leva-se um tempo conhecido na área de sistemas lineares como tempo de acomodação (OGATA, 2003).

As cadeias de suprimentos são afetadas por vários fatores, os mais destacados são: desastres naturais, mudanças climáticas, conflitos políticos, terrorismo e mudanças radicais na demanda, como as ocorridas por consequência do COVID-19. A resiliência na cadeia de suprimentos é uma resposta para esses riscos (LENORT, 2014).

Em Rice (2003) são apresentados dois caminhos para implementar a resiliência da cadeia de suprimentos, são eles: a flexibilidade e a redundância. Por meio da flexibilidade, uma organização pode projetar seu sistema de produção para se adaptar a novos cenários em tempo real, com um tempo e custo aceitáveis. Enquanto que pela redundância o projeto do sistema de

produção requer um excesso de capacidade, para que seja mantida a produção durante uma perturbação na cadeia de suprimentos.

É proposta uma definição da resiliência na cadeia de suprimentos em Carvalho (2011), que é: a habilidade do sistema em retornar para seu estado original ou para um novo (se for desejável), após a ocorrência de uma perturbação, e também de evitar estados indesejáveis em que falhas possam acontecer.

Em Helbing (2005) usa-se um modelo linear de cadeia de suprimentos que permite o estudo analítico dos comportamentos da cadeia de suprimentos, e propõe-se uma estratégia de controle para o efeito chicote através da parametrização deste modelo, para que a cadeia fique em estado controlado.

Em Brito (2020), nota-se que os parâmetros usados pela estratégia de controle em Helbing (2005) podem causar o efeito chicote reverso, caracterizado por amplificar as taxas de produção da fábrica para o mercado consumidor, gerando desabastecimento na cadeia de suprimentos e consequente não atendimento das demandas.. Por fim, esse trabalho se propõe a responder a seguinte pergunta de pesquisa: É possível encontrar parâmetros de controle ótimos para cadeia de suprimentos linear que minimizem o tempo de acomodação, os picos de produção e as variações indesejadas no estoque?

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo geral

Encontrar a melhor parametrização para a cadeia de suprimentos homogênea em que otimize o tempo de acomodação, os picos de produção e as variações no estoque, considerando a condição de cadeia estável, na qual não há efeito chicote padrão ou reverso.

1.1.2 Objetivos específicos

- Implementar a cadeia de suprimentos sequencial e homogênea;
- Analisar o estado da cadeia para diferentes combinações de parâmetros, se está estável ou se apresenta efeito chicote padrão ou reverso;
- Desenvolver algoritmos para identificar o tempo de acomodação, os picos de produção e as variações no estoque;
- Analisar o efeito de uma perturbação na taxa de consumo na cadeia de suprimentos implementada, quando ela está em estado estável.

1.2 JUSTIFICATIVA

No trabalho de Tang (2006) diz-se que o mundo tem testemunhado muitos tipos de desastres não previsíveis, como: ataques terroristas, guerras, terremotos, SARS, tsunamis, greves, ataques cibernéticos. E quando um destes desastres ocorre, segue-se a quebra financeira de muitos negócios. Então, ele afirma que é essencial que uma estratégia de controle das cadeias de suprimentos seja robusta (MONOSTORI, 2018; BRANDON-JONES, 2014), que possa sustentar a operação durante e depois de um desastre.

Em Helbing (2005) e em Brito (2020) discute-se que as cadeias de suprimentos sequenciais e homogêneas apresentam parâmetros específicos para estarem em estado estável, pois tanto o efeito chicote quanto o efeito chicote reverso são prejudiciais para a cadeia. No entanto, não se tem um estudo para identificar os melhores parâmetros para uma cadeia estável para que se minimize o efeitos prejudiciais que uma perturbação pode provocar, como um alto tempo de acomodação, maiores picos de produção e altas variações nos estoques.

Um estudo que identifique os melhores parâmetros para que se minimize os efeitos prejudiciais após uma perturbação é importante, ele complementa estudos anteriores feitos para cenários de recessão, como apresentado nos trabalhos de Dooley (2010) e Tang (2006) e demonstra que a cadeia estar em estado estável não significa que tem resiliência, e que é necessário investigar quais combinações de parâmetros aumentam a resiliência da cadeia em estado estável.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este trabalho utiliza um modelo proposto por Helbing e Lammer (2005) onde considera-se uma cadeia de suprimentos com estrutura linear, na qual o fluxo de produtos ocorre como mostrado na Figura 1. A quantidade N_i representa o nível de estoque do elo i da cadeia, sendo N_0 o estoque do fornecedor de matéria prima e N_{u+1} o “estoque do consumidor”, que é a quantidade de produtos consumida. Neste modelo Q_i representa tanto a demanda por produtos do elo i como também a taxa de entrega de produtos pelo elo $i - 1$ imediatamente anterior.

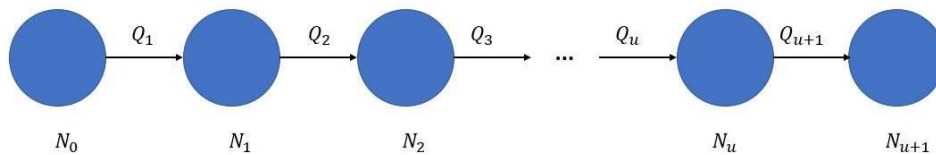


Figura 1 : Cadeia de Suprimentos Linear.

Então, assumindo a conservação de produtos entre elos da cadeia, o estoque do i -ésimo fornecedor varia no tempo de acordo com a Eq. (2.1). Onde $Q_i(t)$ é a demanda de produtos solicitada ao elo $i - 1$ e $Q_{i+1}(t)$ é a taxa de produtos fornecidos ao elo $i + 1$, nesse sentido, Q_{u+1} representa a taxa de consumo.

$$\frac{dN_i}{dt} = Q_i(t) - Q_{i+1}(t) \quad i = 0, \dots, u \quad (2.1)$$

Em complemento à equação anterior, a taxa de pedidos de produtos do elo i varia no tempo de acordo com a sua função de gerenciamento que é proporcional ao desvio da demanda desejada \widehat{W} em relação a demanda real $Q_i(t)$ e dada pela Eq. (2.2).

$$\frac{dQ_i}{dt} = \frac{1}{T_i} \left[\widehat{W}_i \left(N_i, \frac{dN_i}{dt} \right) - Q_i(t) \right] \quad (2.2)$$

onde T_i é um tempo de relaxamento ou de adaptação e a demanda desejada é função tanto do nível de estoque como da taxa de variação temporal desse nível.

É possível construir um caso particular para a Eq. (2.2) como feito em Helbing e Lammer (2005), no qual a taxa de pedidos é controlada para que se obtenha um estado de estoque e taxa de produção ótimas, respectivamente, N_i^0 e Q_i^0 . Este caso específico de função de gerenciamento também busca regular os pedidos de acordo com a variação do estoque no tempo, de forma que pode ser expresso como:

$$\frac{dQ_i}{dt} = \frac{1}{T_i} \left\{ \frac{N_i^0 - N_i(t)}{\tau_i} - \beta_i \frac{dN_i}{dt} + \epsilon_i [Q_i^0 - Q_i(t)] \right\} \quad (2.3)$$

sendo τ_i , o tempo de ajuste do nível de estoque e os parâmetros β_i e ϵ_i grandezas adimensionais associadas ao tempo de antecipação do estoque e a intensidade de ajuste da taxa de pedidos, respectivamente.

Considerando os valores N_i^0 e Q_i^0 como correspondentes a situação de estado estacionário da cadeia de suprimentos e definindo $n_i(t) = N_i(t) - N_i^0$ e $q_i(t) = Q_i(t) - Q_i^0$ como os desvios do estoque e taxa de produção em relação ao estado estacionário, respectivamente, é possível combinar as Eqs. (2.3) e (2.1) obtendo

$$\frac{dn_i}{dt} = q_i(t) - q_{i+1}(t) \quad (2.4)$$

e

$$\frac{d^2q_i}{dt^2} + 2\gamma_i \frac{dq_i}{dt} + \omega_i^2 q_i = f_i(t) \quad (2.5)$$

A Eq. (2.5) trata-se de uma equação diferencial de segunda-ordem que modela o comportamento do desvio da taxa de produção do fornecedor i . Esta equação é equivalente a de um oscilador harmônico amortecido forçado com a força dada por

$$f_i(t) \equiv \frac{1}{T_i} \left[\frac{q_{i+1}(t)}{\tau_i} + \frac{\beta_i dq_{i+1}(t)}{dt} \right] \quad (2.6)$$

onde $\gamma_i \equiv (\beta_i + \epsilon_i)/2T_i$ é a constante de amortecimento e $\omega_i \equiv \sqrt{1/T_i\tau_i}$ a frequência natural. É possível ver que a “força externa” que impulsiona o movimento do fornecedor i é exercida pelo vizinho imediatamente próximo $i + 1$ sendo então o consumidor final o responsável por impulsionar toda a dinâmica da cadeia.

Helbing e Lammer (2005) estudaram a condição de efeito chicote para o modelo descrito pela Eq. (2.5), onde a amplitude das taxas de pedidos $q_i(t)$ é amplificada no sentido do consumidor para o fornecedor de matéria-prima e interpretaram esta condição fazendo analogias com o fenômeno de ressonância em sistemas de osciladores. A partir desta interpretação os autores chegaram numa condição de instabilidade, na qual a taxa de pedidos é amplificada caso os parâmetros atendam à condição:

$$T_i > \epsilon_i\tau_i \left(\beta_i + \frac{\epsilon_i}{2} \right) \quad (2.7)$$

Esta condição foi testada para cadeias homogêneas em Brito (2020), onde todos os fornecedores possuem os mesmos valores para cada um dos parâmetros e foi verificado, por meio de simulações, que na região de cadeia estável prevista teoricamente ocorria o efeito chicote reverso. Tendo em vista a necessidade de uma melhor delimitação da região de estabilidade do modelo, foram propostas duas métricas neste trabalho que serão discutidas na seção de metodologia.

3. METODOLOGIA

Neste trabalho considerou-se uma cadeia de suprimentos homogênea, com parâmetros de gerenciamento iguais para todos os elos (T, ϵ, τ, β). O intuito aqui foi estudar o efeito global desses parâmetros na resiliência da cadeia e não a melhor estratégia individual para cada elo. Para delimitar numericamente a região de estabilidade da cadeia foram utilizadas duas métricas associadas ao fluxo de produtos na cadeia de suprimentos. A primeira ψ_t foi definida a partir da relação teórica de instabilidade Eq. (2.7) para uma cadeia homogênea

$$\psi_t = \frac{T}{\epsilon\tau\left(\frac{\epsilon}{2} + \beta\right)} \quad (3.1)$$

e a segunda para ser aplicada nos dados de simulação ψ_s , com base em métricas padrões associadas ao estudo do efeito chicote por Chen (2000), expressa como a razão das variâncias da taxa de fornecimento de produtos do fornecedor de matéria prima $\sigma[q_0]$ e da taxa de consumo $\sigma[q_{u+1}]$ em um intervalo de tempo de t a $t + \Delta t$.

$$\psi_s = \frac{\sigma[q_0(t, t + \Delta t)]}{\sigma[q_{u+1}(t, t + \Delta t)]} \quad (3.2)$$

de modo que Δt é o intervalo de tempo do estado estacionário.

Ambas as métricas definidas anteriormente podem assumir os seguintes valores

$$\psi_t, \psi_s \begin{cases} = 1, & \text{cadeia estável (caso 1)} \\ > 1, & \text{efeito chicote padrão (caso 2)} \\ < 1, & \text{efeito chicote reverso (caso 3)} \end{cases} \quad (3.3)$$

que indicam o regime de estabilidade da cadeia. O primeiro caso indica um fluxo adequado de produtos ao longo da cadeia, já os outros dois estão associados à distorções na percepção de demanda levando a estados de acúmulo (caso 2) e escassez de produtos (caso 3) ao longo da cadeia de suprimentos.

Em primeiro momento, essas métricas foram utilizadas para comparar as regiões de estabilidade previstas teoricamente com as obtidas a partir das simulações computacionais.

Após a caracterização numérica dessas regiões, a região de cadeia estável foi melhor investigada com o intuito de encontrar a combinação de parâmetros de gerenciamento que

possibilitavam uma resposta mais rápida da cadeia em picos de consumo, ou seja, combinações de parâmetros que levavam a uma melhor resiliência.

Quanto a implementação da simulação do modelo descrito pela Eq. (2.5), foi construída uma cadeia sequencial com 5 elos no software *Matlab/Simulink*, sendo 4 elos representando fornecedores e 1 elo o mercado (que também é um fornecedor). A taxa de consumo foi modelada por um ruído branco, representado por uma distribuição gaussiana de desvio padrão 1 produto/ciclo. Para garantir resultados determinísticos no mapeamento das regiões de estabilidade, a mesma simulação foi repetida 5 vezes e posteriormente foram calculados e salvos os valores médios.

A perturbação no consumo utilizada consistiu em um pulso de amplitude de 10 produtos que permaneceu por 50 ciclos, cessando posteriormente. Este pulso foi somado ao ruído branco da taxa de consumo. Para a integração numérica das equações diferenciais ordinárias, foi utilizado o solver *ode3* (conhecido também como método Bogacki–Shampine) do Matlab, que consiste na implementação do método de Runge-Kutta de ordem três, com tempo de amostragem fixo de 0.01 ciclos.

Para encontrar a melhor combinação de parâmetros dentre os que produzem uma cadeia estável é necessário medir e monitorar comportamentos na cadeia de suprimentos importantes na tomada decisão em situações de controle. Foram escolhidos os seguintes comportamentos para serem quantificados: pico de produção (p_{max}) de cada elo da cadeia após a perturbação, tempo de acomodação (t_{aco}) após a perturbação cessar e estoques mínimo (E_{min}) e máximo (E_{max}) de produtos atingido por cada elo durante a perturbação.

Para medir o pico de produção p_{max} de cada elo da cadeia após a perturbação em $q_{u+1}(t)$, os valores de taxa de produção em cada instante de tempo foram armazenados em um arquivo de dados. Posteriormente os valores máximos $p_{max}(t)$ para cada elo foram selecionados por meio da função *max()* da linguagem *Python* e reservados juntamente com seus respectivos instantes de tempo de ocorrência. É mostrado o cálculo de $p_{max}(t)$ no Algoritmo 1, ele é medido após o fim da perturbação, por isto soma-se o tempo de duração da perturbação, que foi de 50 ciclos, ao tempo que em que ela iniciou (t_{pulso}).

Algoritmo 1: CÁLCULO DO PICO MÁXIMO

Entrada: $q_i(t)$, t_{pulso} , t_{final}
Saída: p_{max}
1 início
2 | $p_{max} = \max(q_i(t = (t_{pulso} + 50)$ até $t_{final})$
3 fim
4 retorna p_{max}

Algoritmo 1: Cálculo do Pico Máximo.

Para medir o tempo de acomodação (t_{aco}), foram realizados os seguintes passos:

- Foi medida a amplitude máxima e mínima da taxa de produção ($q_i(t)$) antes da perturbação e estes valores foram considerados as amplitudes do estado estacionário;
- Após a perturbação, se a taxa de produção ($q_i(t)$) permanece-se entre as amplitudes máxima e mínima definidas no passo anterior por 5 ciclos contínuos, considerava-se que a cadeia tinha retornado o seu estado estacionário;
- É feita a diferença entre o tempo em que a cadeia retornou ao seu estado estacionário e o tempo em que a perturbação cessou, dessa forma determinou-se o tempo de acomodação (t_{aco}).

Os passos seguidos para o cálculo da tempo de acomodação (t_{aco}) foram sintetizados no Algoritmo 2.

Algoritmo 2: CÁLCULO DO TEMPO DE ACOMODAÇÃO

Entrada: $q_i(t)$, t_{pulso} , t
Saída: t_{aco}

```

1 início
2    $A_{max} = \max(q_i(t = 0 \text{ até } t_{pulso}))$ 
3    $A_{min} = \min(q_i(t = 0 \text{ até } t_{pulso}))$ 
4   cont = 0
5   para cada  $t > (t_{pulso} + 50)$  faça
6     se  $A_{min} < q_i(t) < A_{max}$  então
7       cont = cont + 1
8       se cont == 5 então
9          $t_{aco} = t - (t_{pulso} + 50)$ 
10        break
11      fim
12    senão
13      cont = 0
14    fim
15  fim
16 fim
17 retorna  $t_{aco}$ 

```

Algoritmo 2: Cálculo do Tempo de Acomodação.

Para medir o estoque mínimo (E_{min}) e máximo (E_{max}), foi feita a integração da equação Eq. (2.4) e posteriormente foi quantificado o estoque mínimo e máximo da seguinte maneira:

- Foi feita a diferença entre as taxas de produção do fornecedor i ($q_i(t)$) e a taxa de ordenamento do fornecedor $i + 1$ ($q_{i+1}(t)$);
- O resultado desta diferença foi multiplicado pelo tempo de amostragem de 0.01 ciclos e armazenado numa variável acumulativa e a cada ciclo esse valor foi armazenado em um vetor;
- Foi aplicada as funções do *Python* chamadas $\min()$ e $\max()$, no vetor de estoque acumulado no período em que a perturbação permaneceu, para guardar o valor mínimo e máximo.

Os passos seguidos para o cálculo do estoque mínimo (E_{min}) e máximo (E_{max}) foram sintetizados no Algoritmo 3.

Algoritmo 3: CÁLCULO DO ESTOQUE MÍNIMO E MÁXIMO

Entrada: $q_i(t), q_{i+1}(t), t$
Saída: E_{min}, E_{max}
1 início
2 $N_i = 0$
3 $t_s = 0.01$
4 **para cada t faça**
5 $N_i = N_i + t_s(q_i(t) - q_{i+1}(t))$
6 **fim**
7 $E_{min} = \min(N_i)$
8 $E_{max} = \max(N_i)$
9 fim
10 retorna (E_{min}, E_{max})

Algoritmo 3: Cálculo do Estoque Mínimo e Máximo.

Por fim, para definir qual é a melhor combinação de parâmetros para o estado de cadeia controlada, definiu-se uma função objetivo que considera os comportamentos quantificados. A função objetivo, dada pela equação Eq. (3.4) pune os desvios do estoque ótimo causados pela perturbação, bem como, os tempos de acomodação mais longos e diferenças nos picos de produção entre o fornecedor de matéria-prima e o mercado. Para compor a função objetivo foram usados apenas as medidas feitas nos elos das extremidades da cadeia, por simplificação.

$$f_{obj} = |E0_{max}| + |E0_{min}| + |Eu_{max}| + |Eu_{min}| + 2t0_{aco} + 2tu_{aco} + 4|p0_{max} - pu_{max}| \quad (3.4)$$

Sendo, f_{obj} a função objetivo, $E0_{max}$ (produtos) o estoque máximo do fornecedor de matéria-prima, $E0_{min}$ (produtos) o estoque mínimo do fornecedor de matéria-prima, Eu_{max} (produtos) o estoque máximo do mercado, Eu_{min} (produtos) o estoque mínimo do mercado $t0_{aco}$ (ciclos) o tempo de acomodação do fornecedor de matéria-prima, $2tu_{aco}$ (ciclos) o tempo de acomodação do mercado, $p0_{max}$ (produtos/ciclos) o pico máximo da taxa de produção do fornecedor de matéria-prima e pu_{max} (produtos/ciclos) o pico máximo da taxa de produção do mercado.

As variáveis foram normalizadas para valores entre 0 e 1, e os pesos foram escolhidos para equilibrar a influência de cada comportamento na função objetivo. Portanto, a função objetivo foi criada para quantificar a resiliência nas cadeias de suprimentos, pode assumir valores entre 0 e 12, sendo que o valor 0 representa a cadeia de suprimentos mais resiliente e o valor 12 representa a menos resiliente.

4. RESULTADOS

4.1 Mapeamento das regiões de estabilidade

Foi calculado o ψ_s varrendo faixas de valores de cada par de parâmetros (τ, β) , (τ, ϵ) e (ϵ, β) mantendo o terceiro fixo. Considerando o estado estacionário do sistema, cada simulação teve um tempo de duração de 400 ciclos e foi repetida 5 vezes com diferentes *seeds* de geração de números aleatórios para a garantia de resultados determinísticos. Sendo assim, ψ_s foi obtido a partir de uma média das 5 simulações para cada par de parâmetros.

Os gráficos das Figs. (2), (3) e (4) mostram os resultados obtidos. Através das simulações foi possível comparar a curva de cadeia controlada prevista teoricamente com $\psi_t = 1$ (curva preta) com a região de estabilidade simulada (região cinza do gráfico de cores). Devido à natureza estocástica das simulações, foi considerada a cadeia controlada quando $\psi_s = 1.00 \pm 0.01$. Nas regiões verde e vermelha, para um dado par de parâmetros, a cadeia apresenta efeito chicote reverso, sendo o vermelho mais intenso que o verde, e nas regiões azul e roxa, a cadeia apresenta efeito chicote padrão, sendo o roxo mais intenso que o azul.

Percebe-se nos gráficos que a curva prevista teoricamente de cadeia controlada está acima da região obtida pelas simulações na maior parte dos casos e que o formato da região de estabilidade varia a depender do par de parâmetros analisado. Esse fato pode ser explicado considerando que a linearização efetuada para obtenção da relação analítica de estabilidade Eq. (2.7) assumiu pequenos desvios do estoque e taxa de produção dos seus valores estacionários e os resultados obtidos nas simulações não impõem essa restrição na dinâmica do sistema.

Na Fig. (2) que apresenta os resultados para τ e β , nota-se que a região de cadeia controlada aparece em maior quantidade para valores de τ pequenos e de β grandes, no total foram 263 amostras de cadeia controlada. Na Fig. (3) que apresenta os resultados para τ e ϵ , nota-se que a região de cadeia controlada é estreita e acompanha o perfil da curva teórica, no total foram 77 amostras de cadeia controlada. Na Fig. (4) que apresenta os resultados para β e ϵ , nota-se que a região de estabilidade aumenta no sentido de menores valores de ϵ e valores de β grandes, no total foram 552 amostras de cadeia controlada.

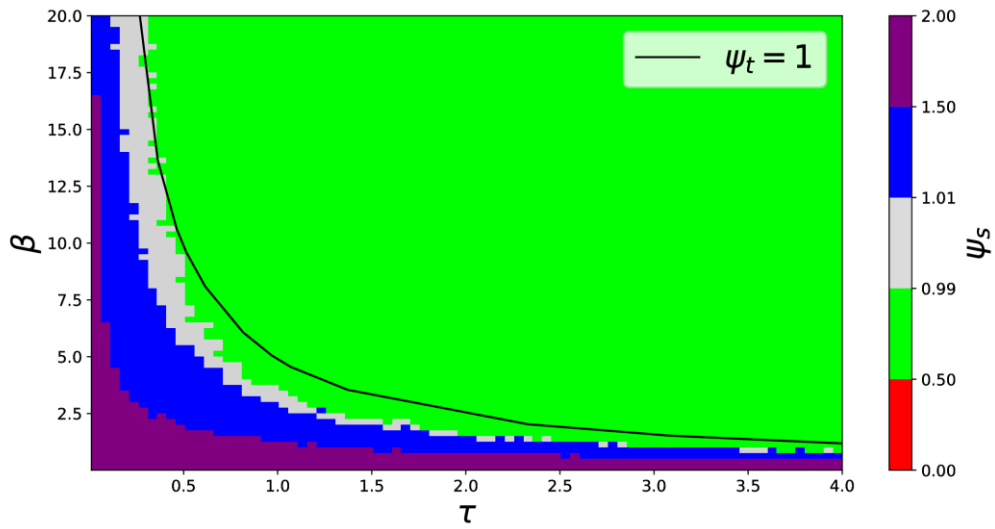


Figura 2: τ vs β para $\epsilon = 0,2$. A curva preta indica a previsão teórica $\psi_t = 1$.

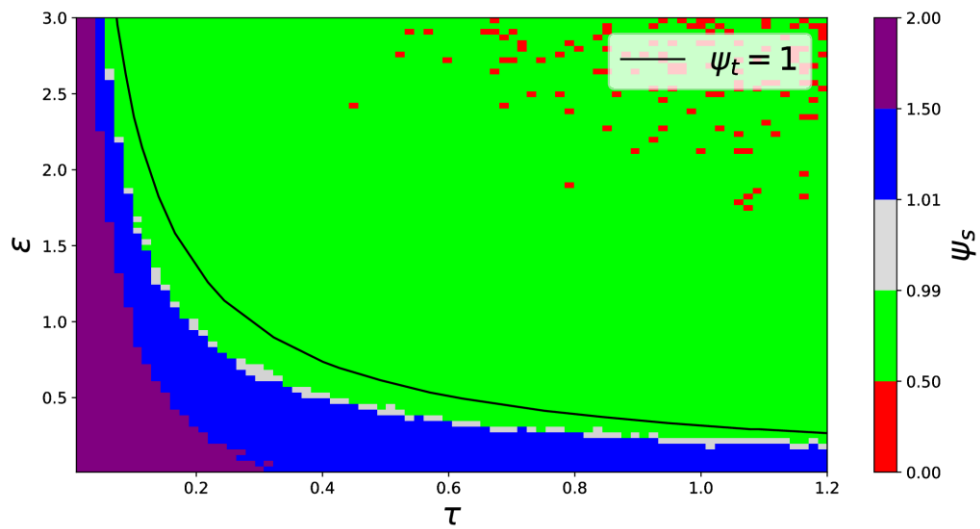


Figura 3: τ vs ϵ para $\beta = 3,0$. A curva preta indica a previsão teórica $\psi_t = 1$.

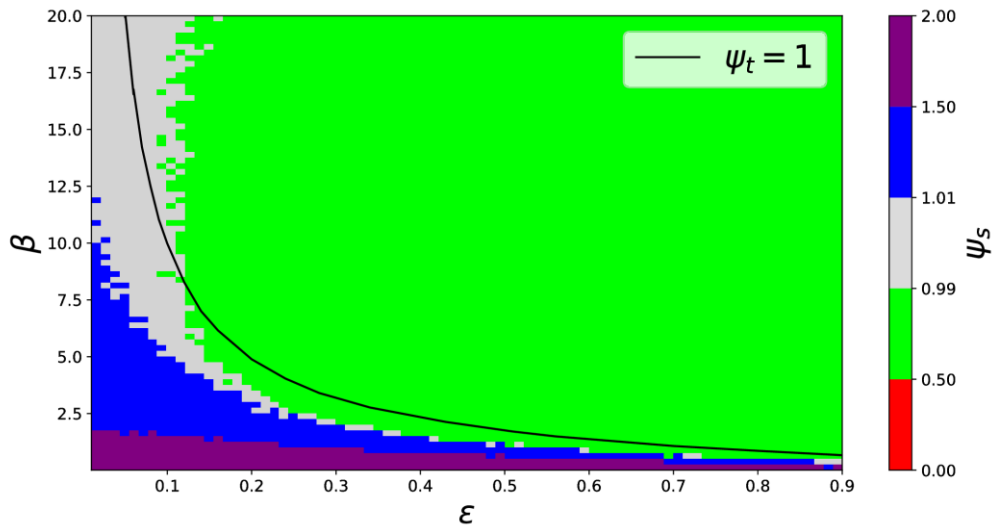


Figura 4: ϵ vs β para $\tau = 3,0$. A curva preta indica a previsão teórica $\psi_t = 1$.

Após o mapeamento das regiões de estabilidade do modelo, as amostras de cadeia controlada ($\psi_s \approx 1$) foram reservadas para serem analisadas. O intuito agora foi obter as respostas a uma perturbação de consumo em cadeias controladas com diferentes valores de parâmetros de gerenciamento.

4.2 Análise do efeito da perturbação na cadeia

A perturbação escolhida é do tipo degrau, de amplitude de 10 produtos e duração de 50 ciclos, ela se inicia no ciclo 200 e termina no ciclo 250, como pode ser visto na Fig. (5).

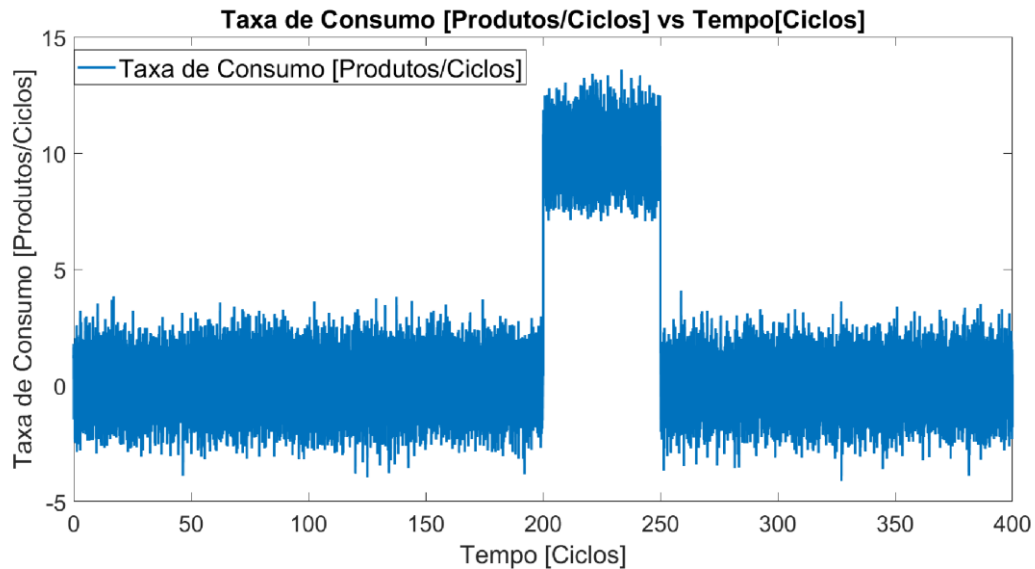


Figura 5: Taxa de consumo (produtos/ciclo).

Com base na determinação da região de estabilidade feita na subseção anterior, todas as amostras de cadeias controladas foram simuladas e submetidas a esta perturbação e foram calculadas as métricas: tempo de acomodação da taxa de produção, máximo e mínimo do estoque acumulado e pico máximo na taxa de produção.

Nos gráficos das figuras Figs. (6), (7) e (8) são apresentados quadros gerais com as respostas à perturbação das amostras de cadeias controladas com cada par de parâmetros testado. São apresentados 12 gráficos em cada quadro geral, nos quais o eixo horizontal é comum e corresponde ao índice da amostra para o dado par de parâmetros em que a cadeia ficou controlada. Então para a amostra i , os 12 gráficos de cada quadro geral representam os valores dos parâmetros e das métricas medidas. Tendo em vista a descrição dos resultados, os gráficos foram contados da esquerda para direita e de cima para baixo.

Para uma amostra i , os dois primeiros gráficos dos quadros gerais apresentam os valores dos parâmetros de gerenciamento, no terceiro, quarto e quinto gráficos são mostrados, respectivamente, o valor absoluto da diferença entre os picos nas taxas de produção do fornecedor de matéria-prima e de consumo, o pico na taxa de produção do fornecedor de matéria-prima e o pico na taxa de consumo. No sexto gráfico é mostrado o valor da função

objetivo, no sétimo e oitavo gráfico, são mostrados, respectivamente, o tempo de acomodação para o fornecedor de matéria-prima e para o consumo. No nono, décimo, décimo primeiro e décimo segundo gráfico, são mostrados, respectivamente, os estoques mínimo e máximo do fornecedor de matéria-prima, as quantidades mínima e máxima do consumo.

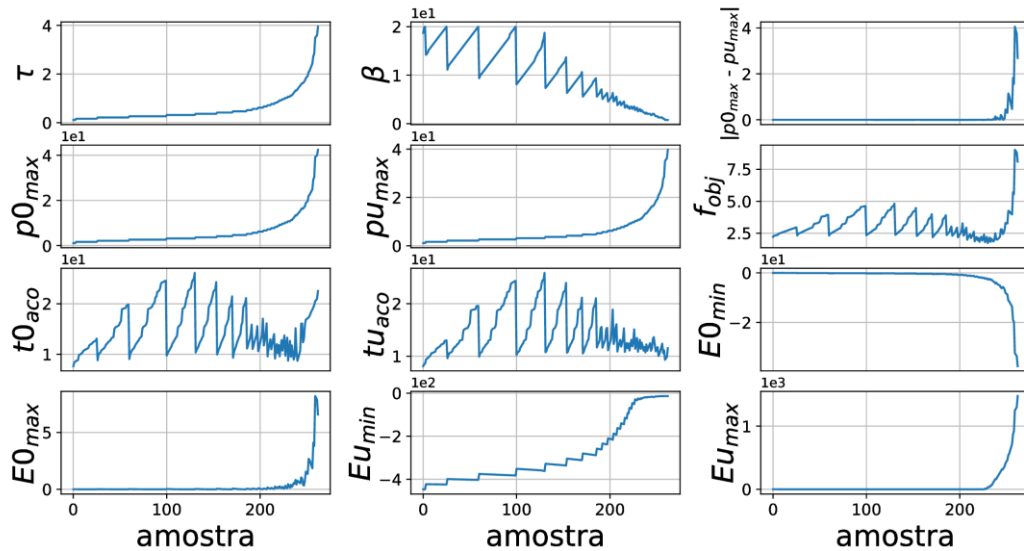


Figura 6: Quadro geral do comportamento de amostras de cadeias de suprimentos submetidas a perturbação no consumo para diferentes valores de τ e β com ε fixo.

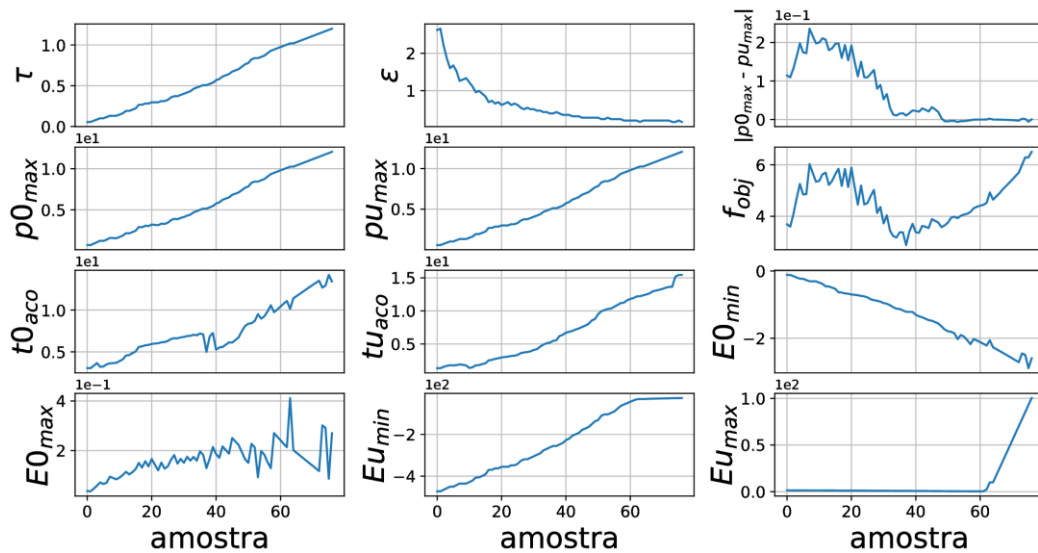


Figura 7: Quadro geral do comportamento de amostras de cadeias de suprimentos submetidas a perturbação no consumo para diferentes valores de τ e ε com β fixo.

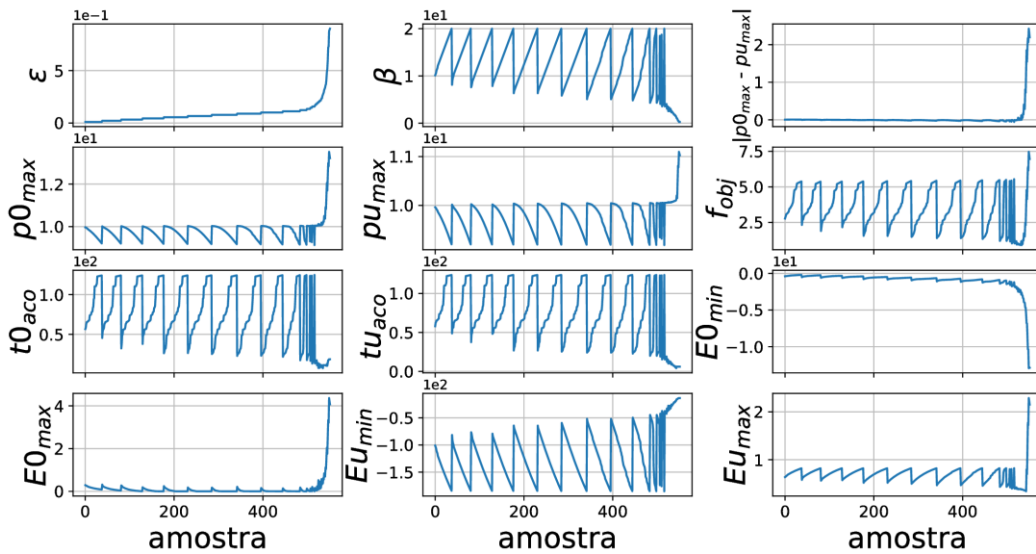


Figura 8: Quadro geral do comportamento de amostras de cadeias de suprimentos submetidas a perturbação no consumo para diferentes valores de ϵ e β com τ fixo.

Para o quadro geral da Fig. (6), que representa as simulações feitas variando o par de parâmetros τ e β , a melhor amostra foi a de número 231, em que $\tau = 1,07$ e $\beta = 2,54$, e o parâmetro fixo $\epsilon = 0,20$, o valor de $f_{obj} = 1,73$. O pior par de parâmetros foi a amostra de número 260, em que $\tau = 3,50$ e $\beta = 0,77$, com um valor de $f_{obj} = 9,03$.

Para o quadro geral da Figura (7), que representa as simulações feitas variando o par de parâmetros τ e ϵ , a melhor amostra foi a de número 38, na qual $\tau = 0,51$ e $\epsilon = 0,43$ com parâmetro fixo $\beta = 3,0$, o valor de $f_{obj} = 2,88$. O par de parâmetros da amostra de número 77 com pior desempenho foi $\tau = 1,20$ e $\epsilon = 0,16$, com um valor de $f_{obj} = 6,51$.

Para o quadro geral da Figura (8), que representa as simulações feitas variando o par de parâmetros ϵ e β , a melhor amostra foi a de número 534, na qual $\epsilon = 0,24$ e $\beta = 2,54$ com parâmetro fixo $\tau = 1,00$, o valor da função objetivo foi $f_{obj} = 0,91$. O par de parâmetros da amostra de número 550 com pior desempenho foi $\epsilon = 0,88$ e $\beta = 0,26$, com um valor de $f_{obj} = 7,47$.

O resumo dos resultados com os valores dos parâmetros de melhor e pior desempenho das cadeias para cada par de parâmetros testado se encontram na tabela Tab. (1). Para estratégias de gerenciamento que mantêm a intensidade de ajuste das taxas de produção ϵ fixas, a cadeia de melhor desempenho teve um tempo de antecipação do estoque β maior e um tempo de ajuste dos níveis de estoque τ menor. No caso de estratégias que mantêm o tempo de antecipação do estoque β fixo, a cadeia de melhor desempenho foi a com menor tempo de ajuste dos níveis de estoque τ e maior intensidade de ajuste das taxas de produção ϵ . Já as cadeias com estratégias

de gerenciamento que mantém o tempo de ajuste de nível de estoque τ fixo, a de maior resiliência foi a com maior tempo de antecipação do estoque β e menor intensidade de ajuste das taxas de produção ϵ .

Gerenciamento	Resultado	Amostra	τ	β	ϵ	f_{obj}
(τ, β) com ϵ fixo.	Melhor	231	1,07	2,54	0,20	1,73
	Pior	260	3,50	0,77	0,20	9,03
(τ, ϵ) com β fixo.	Melhor	38	0,51	3,00	0,43	2,88
	Pior	77	1,20	3,00	0,16	6,51
(β, ϵ) com τ fixo.	Melhor	534	1,00	2,54	0,24	0,91
	Pior	550	1,00	0,26	0,88	7,47

Tabela 1: Resultados dos melhores e piores desempenhos das cadeias estáveis para cada par de parâmetros testado.

O comportamento da taxa de produção para a melhor amostra pode ser visto na Fig. (9), sendo o *Fornecedor 0*, o fornecedor de matéria-prima e o *Fornecedor 4*, representando o mercado. Já o comportamento da taxa de produção para a pior amostra pode ser visto na Fig. (10). Comparando estas figuras, verifica-se que para a melhor amostra a diferença entre os picos das taxas de produção do fornecedor de matéria-prima e de consumo é pequena e o tempo de acomodação de ambos também pequeno, fazendo com que os estoques não desviem tanto do seu nível ótimo por causa da perturbação. Já para a pior amostra, a diferença entre os picos das taxas de produção do fornecedor de matéria-prima e de consumo é grande e, conseqüentemente, o tempo de acomodação de ambos também é grande. Apesar de não ser considerado na função objetivo, observa-se que o tempo de acomodação do consumo é mais rápido que o do fornecedor de matéria-prima, a consequência disso é um grande desvio do nível de estoque em relação ao nível ótimo.

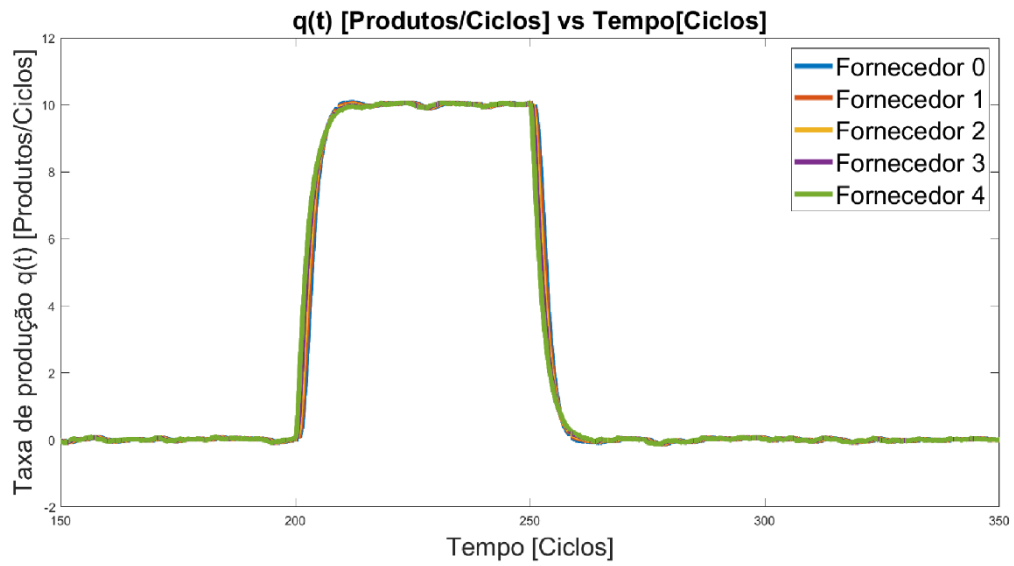


Figura 9: Comportamento de $q(t)$ para a melhor amostra. Os parâmetros foram $\tau = 1,00$, $\beta = 2,54$ e $\varepsilon = 0,24$ sendo $fobj = 0,91$.

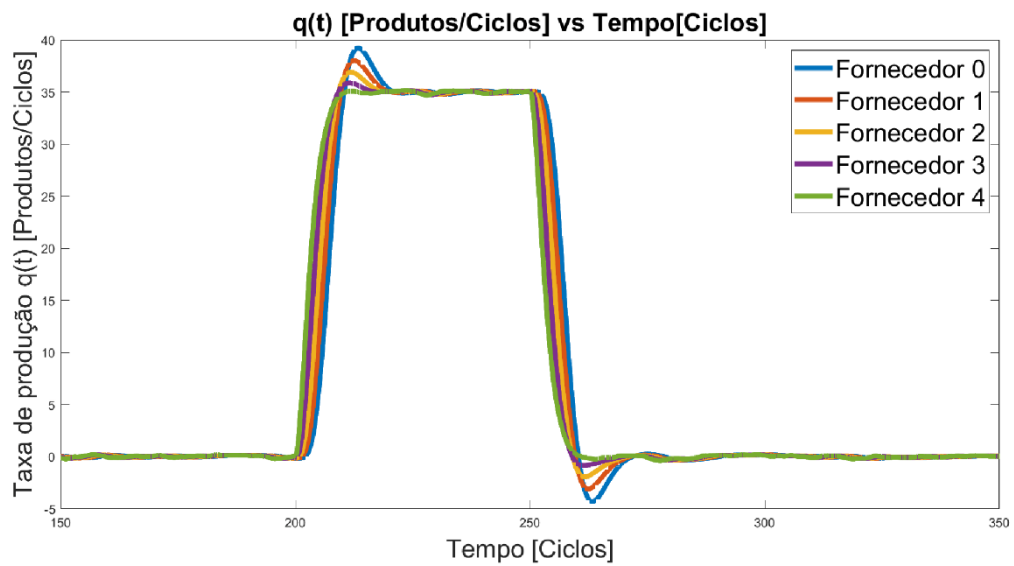


Figura 10: Comportamento de $q(t)$ para a pior amostra. Os parâmetros foram $\tau = 3,50$, $\beta = 0,77$ e $\varepsilon = 0,20$ sendo $fobj = 9,03$.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados alcançados foi possível perceber que, para uma cadeia em regime estável, a otimização de seus parâmetros de controle pode diminuir o efeito de comportamentos indesejados, como altos picos de produção, atraso para retornar ao mesmo nível de produção e de estoques anterior à uma perturbação, bem como, situações que levam ao acúmulo ou escassez de estoques, tornando a cadeia mais resiliente a esses efeitos.

Para que esta análise pudesse ser feita, foi necessário delimitar a região de estabilidade “empírica” da cadeia de suprimentos, obtida a partir das simulações, tendo como guia a região de estabilidade obtida teoricamente. Os resultados de simulação mostraram que as regiões diferiam e isso pode ser explicado devido às aproximações efetuadas para obtenção da solução analítica.

Foi aplicado uma mesma perturbação na demanda de produtos, de forma repentina, representada por um sinal degrau, em todas as amostras de cadeias de suprimentos dentro da região de estabilidade. As amostras demonstraram diferentes respostas a esta perturbação, de acordo com seus parâmetros de controle, e em algumas combinações destes parâmetros, mesmo a cadeia estando na região de estabilidade, foi mostrado que ocorreu um efeito chicote padrão transiente.

Logo, pode-se concluir que algumas combinações de parâmetros em que a cadeia de suprimentos está classificada como estável não garantem que ela esteja resiliente a perturbações, enquanto que outras são mais resilientes, exibindo respostas rápidas na manutenção da produção e níveis de estoques próximos dos valores ótimos.

REFERÊNCIAS

- BASAK, A. *et al.* Supply chain management in garments industry. **Global Journal of Management and Business Research: A Administration and Management**, [S. l.], v. 14, n. 11, p. 94–97, 2014.
- BRANDON-JONES, Emma *et al.* A Contingent Resource-Based Perspective of Supply Chain Resilience and Robustness. **Journal of Supply Chain Management**, [s. l.], v. 50, n. 3, p. 55–73, 2014.
- BRITO, G. D.; PINTO, P. D.; BARROS, A. D. M. de. Reverse bullwhip effect: duality of a dynamic model of Supply Chain. **Independent Journal of Management & Production**, [S. l.], v. 11, n. 6, p. 2043, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.14807/ijmp.v11i6.1043>
- CARVALHO, Helena *et al.* Supply chain resilience: A simulation study. **Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium**, [s. l.], n. January, p. 1611–1612, 2011.
- CHATFIELD, D. C. *et al.* The bullwhip effect - Impact of stochastic lead time, information quality, and information sharing: A simulation study. **Production and Operations Management**, [S. l.], v. 13, n. 4, p. 340–353, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2004.tb00222.x>
- CHEN, Frank *et al.* Quantifying the bullwhip effect in a simple supply chain: the impact of forecasting, lead times, and information. **Management Science**, [s. l.], v. 46, n. 3, p. 436–443, 2000.
- DOOLEY, K. J. *et al.* Inventory management and the bullwhip effect during the 2007-2009 recession: Evidence from the manufacturing sector. **Journal of Supply Chain Management**, [S. l.], v. 46, n. 1, p. 12–18, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2009.03183.x>
- HELBING, D.; LÄMMER, S. Supply and Production Networks: From the Bullwhip Effect To Business Cycles. [S. l.], p. 33–66, 2005. Disponível em: https://doi.org/10.1142/9789812703248_0002
- LENORT, Radim *et al.* Model for simulation of supply chain resilience. **METAL 2014 - 23rd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings**, [s. l.], n. October 2016, p. 1803–1809, 2014.
- MONOSTORI, Judit. Supply chains robustness: Challenges and opportunities. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 67, p. 110–115, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2017.12.185>.
- OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno – 4ª Edição, 2003, Prentice-Hall. (OGATA, 2003)
- PONTE, B. *et al.* Supply Chain Management by Means of Simulation. **Polibits**, [S. l.], v. 48, n. 48, p. 55–60, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.17562/pb-48-7>

RICE, James B; CANIATO, Federico. Building a Secure and Resilience Supply Chain.Pdf. **Supply Chain Management Review**, [s. l.], v. 5, n. September/ October, p. 22–30, 2003.

RONG, Ying; SNYDER, Lawrence V.; SHEN, Zuo Jun Max. Bullwhip and reverse bullwhip effects under the rationing game. **Naval Research Logistics**, [s. l.], v. 64, n. 3, p. 203–216, 2017.

WANG, X.; DISNEY, S. M. (2016) The bullwhip effect: Progress, trends and directions. **European Journal of Operational Research**, v. 250, n. 3, p. 691–701.

TANG, C. S. Robust strategies for mitigating supply chain disruptions. **International Journal of Logistics Research and Applications**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 33–45, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/13675560500405584>