

REVISTA

IPT

Tecnologia
e inovação

17

ipt
INSTITUTO DE
PESQUISAS
TECNOLÓGICAS

Agosto/2021



PROCESSOS INDUSTRIAIS

Reaproveitamento do mel residual do açúcar granulado

KANBAN NA INDÚSTRIA

Aplicação da ferramenta no setor têxtil

VENDAS DO VAREJO

Método X12-Arima para análise do setor em São Paulo



REVISTA IPT | Tecnologia e Inovação

v.5, n.17, agosto, 2021

Quadrimestral

Editores-chefes

Eduardo Luiz Machado

Andreia Longuinho da Silva

Conselho Editorial

Eduardo Luiz Machado

Silas Derenzo

Assistentes Editoriais

Augusto Max Colin

Bruno D. Francisco da Silva

Ester Garcia Ferreira da Silva

Hamilton Lelis Ito

João Antonio Rodrigues Garcia

Luiz Silviano

Maria Natalina Martins

ISSN 2526-5830

Copyright© IPT. Todos os direitos reservados. Todos os textos, imagens, gráficos, e outros materiais são protegidos por direitos autorais e outros direitos de propriedade intelectual pertencentes ao IPT. A reprodução dos textos da Revista IPT somente será permitida para fins didáticos e de pesquisa, desde que com a citação deste material. Proibida a reprodução total ou parcial, com intuito de lucro direto ou indireto, por qualquer meio ou processo.

Créditos técnicos

DIAGRAMAÇÃO E ARTE:
Luiz Silviano

REVISÃO:
Eduardo Luiz Machado

Av. Prof. Almeida Prado, 532 - Cidade Universitária - Butantã
05508-901 - São Paulo - SP

ISSN 2526-5830

#17

Revista IPT:
Tecnologia
e inovação



SUMÁRIO

Artigos técnicos
e de opinião

p.06	Utilização da ferramenta Kanban na indústria têxtil Autores: Rondineli Aparecido Vieira de Araújo, Eduardo Luiz Machado
p.25	Refinery 'Plannuling' Autores: Marcel Joly, Aline Heymi Morimoto, Kevin Akira Onoda, Mario Yoshikazu Miyake, Galo Antonio Carrillo Le Roux.
p.45	Avaliação de viabilidade técnica do reaproveitamento do mel residual Autores: Douglas Dias Barbosa, Silas Derenzo
p.63	Oxi-combustão - uma alternativa para a indústria Autor: Renato Vergnhanini Filho
p.76	Análise da série de vendas do varejo restrito no Estado de São Paulo: uma aplicação do Método X12-ARIMA Autor: Mario Antonio Margarido

A MARCA DA MULTIDISCIPLINARIDADE



Jefferson de Oliveira Gomes
Diretor-Presidente do IPT

Chega pontualmente a leitoras e leitores a décima sétima edição da 'Revista IPT, Tecnologia e Inovação' com cinco artigos técnicos selecionados. Seu conteúdo compõe um mosaico tecnológico da melhor qualidade, fruto da competência multidisciplinar das equipes do Instituto, consolidada com a participação de colaboradores externos. Focalizam temas variados como planejamento da produção de refinarias, aproveitamento do mel residual da produção de açúcar, combustão industrial e estudo metodológico de varejo.

Abrimos esta edição com um excelente artigo sobre a "Utilização da ferramenta Kaban na indústria têxtil". Seus autores Rondineli Aparecido Vieira de Araújo, mestre em Processos Industriais, e Eduardo Luiz Machado, professor e orientador do mestrado em Processos Industriais no IPT, mostram porque a ferramenta Kaban é um sucesso no gerenciamento de estoques no setor.

O artigo intitulado "The impact of time aggregation level on solving oil supply chain planning problems" vem na sequência. Seus autores Aline H. Morimoto, Kevin A. Onoda, Galo A.C. Le Roux, da USP; Mario Y. Miyake, do IPT, e Marcel Joly, da USP e IPT, discutem o planejamento da produção de quatro refinarias de petróleo paulistas responsáveis aproximadamente pela metade da capacidade nacional de refino.

Apresenta-se a seguir a "Avaliação de viabilidade técnica do reaproveitamento do mel residual do açúcar granulado via cristalização por resfriamento". Os autores Douglas Dias Barbosa, do Mestrado Profissional em Processos Industriais do IPT, e Silas Derenzo, pesquisador do Laboratório de Processos Químicos e Tecnologia De Partículas do IPT, analisam a viabilidade técnica de um ciclo adicional de reaproveitamento do mel do açúcar granulado, utilizando cristalização por resfriamento em quatro velocidades buscando aumentar o rendimento do processo.

"Oxi-combustão – uma alternativa para a indústria" vem na sequência. Neste artigo o autor Renato Vergnhanini Filho, pesquisador do Laboratório de Bioenergia e Eficiência Energética do IPT, avalia uma série de benefícios, como redução do consumo de combustível e das emissões poluentes, com emprego da chamada oxi-combustão. Neste processo utiliza-se um comburente com teor de oxigênio superior aos 21 % encontrados normalmente na atmosfera.

Sob o título "Análise da série de vendas do varejo restrito no estado de São Paulo: uma aplicação do método X12-ARIMA", o autor e pesquisador Mario Antonio Margarido aponta mudanças decorrentes do comportamento do consumidor na dinâmica do ambiente econômico, no período de janeiro de 2003 a março de 2019, a partir da análise detalhada da série de vendas do varejo restrito paulista, com dados da Pesquisa Mensal do Comércio Restrito do IBGE.

Boa leitura!

Artigo técnico

Utilização da ferramenta Kanban na indústria têxtil

Use of Kanban tool applied in textile industry

Rondineli Aparecido Vieira de Araújo^a, Eduardo Luiz Machado^b

^a Mestre em Processos Industriais pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

^b Professor Orientador do Mestrado em Processos Industriais, Instituto de Pesquisa Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil

E-mail: rondiaraujo@yahoo.com

Palavras-chave:

controle de estoque; otimização; redução de custos e gestão de processos.

Keywords:

inventory control; optimization; cost reduction and process management

Resumo

A gestão é um elemento fundamental para o sucesso dos processos industriais e o gerenciamento de estoque merece um foco especial, por sua grande influência nos custos operacionais. Este estudo aborda a aplicação do Kanban em uma empresa brasileira do segmento têxtil, tratando desde a organização física dos estoques, endereçamento das prateleiras e boxes, passando pela eliminação de estoques obsoletos ou inoperantes por meio de programas de 5S, até a introdução de alguns conceitos de Lean Manufacture. Conclui-se que a melhoria na gestão do estoque e nivelamento da produção, promoveu a redução do custo de estocagem e de movimentação. O equilíbrio gerado pelo balanceamento da produção levou a ganho de eficiência no processo produtivo. A redução dos níveis de estoque eliminou a obsolescência de peças e componentes e diminuiu o número de horas de máquina parada, com isso melhorou os índices de qualidade do produto final.

Abstract

The management is a key element for the success of industrial processes, and inventory management needs special focus for its wide influence in operating costs. This study aims to address the application of Kanban in a Brazilian company in the textile sector, dealing from the physical organization of inventories, addressing the shelves and boxes, through the elimination of obsolete or dead inventory through 5S programs, until the introduction of some concepts Lean Manufacture. It is concluded that the improvement in inventory management and leveling of production promoted a reduction in the cost of storage and movement. The balance generated by balancing production led to gains in efficiency in the production process. The reduction in stock levels eliminated the obsolescence of parts and components and reduced the number of hours of machine downtime, thus improving the quality indices of the final product.

1 Introdução

Algumas características são comuns a qualquer processo industrial, independentemente da atividade fabril. Buscar controlar seus estoques de matéria prima, de insumos, de produtos em beneficiamento e de produtos acabados é questão primordial para se manter competitivo. Com efeito, deve-se ter preocupação constante com o controle apurado do custo operacional com a organização e administração dos níveis de estoques.

A gestão baseada na qualidade e nas estratégias produtivas, bem como, em ações de prevenção e melhoria contínua pode auxiliar as empresas a garantir a competitividade desejada. Slack *et al.* (2002), relatam a importância da constante preocupação com a redução do desperdício, o controle apurado dos custos e a adoção de práticas capazes de elucidar os conceitos de gestão para o sucesso da empresa.

Com a instabilidade e incerteza existentes no cenário industrial nacional, torna-se ainda maior a necessidade de se buscar ferramentas que sejam capazes de mitigar os custos de estoque. A sustentabilidade financeira e a competitividade serão potencializadas pela efetividade das ações que culminarão em maior controle dos processos. Controlar efetivamente todo o inventário, de forma cíclica e constante, e torná-lo visível a todos no dia a dia, possibilitará a identificação dos desvios no fluxo da produção.

O *Kanban* surge como ferramenta de gestão de estoques capaz de contextualizar visualmente os níveis de estoques. Atualmente algumas variações desta metodologia apresentam não somente o controle por placas, mas também por áreas demarcadas, caixas ou boxes onde são alocadas as peças, enfim o objetivo é buscar a melhor maneira para se identificar rápida e visualmente os níveis de estoque.

Objetivou-se neste artigo mostrar a aplicação da ferramenta *Kanban* em uma empresa do setor têxtil brasileiro que tem foco na produção e beneficiamento de malhas na cidade de Guarulhos. Será abrangido o processo produtivo, desde a chegada da matéria prima, passando pelas etapas de produção e beneficiamento até a expedição do produto final.

2 Referencial teórico

O tema central do artigo é a utilização da ferramenta *Kanban* aplicada à gestão de estoques. Assim, a revisão bibliográfica será utilizada para estudar dados e fatos convergentes, e buscará as diferentes abordagens sobre o tema.

2.1 Gestão e estratégia da manufatura

A estratégia da manufatura é definida por um padrão de decisões, estruturais e infraestruturais, determinante das competências do seu sistema; também especifica como este irá operar no sentido de alcançar os objetivos da manufatura, que devem ser consistente com os da empresa (PLATTS *et al.*, 2004).

A crescente pressão competitiva tem obrigado as empresas a buscarem alternativas que propiciem tanto a redução nos prazos de atendimento quanto à redução de custos em toda a cadeia produtiva.

A adoção de estratégias pode delinear as ações, e gerar gestão dos processos de forma mais assertiva para que se possa, com grande chance, se desdobrar em resultados altamente positivos para a empresa. A este propósito, Tubino (2000), escreveu, que uma vez que a empresa tenha definido suas prioridades competitivas, esta deve tomar as decisões corretas para alcançar o seu objetivo.

Segundo Slack *et al.* (2002), as diferentes decisões podem ser relacionadas como sendo:

- decisões estruturais são as que influenciam, sobretudo, as atividades de projeto (escolha do processo, instalações, capacidade e integração vertical), todas consideradas a longo prazo,
- decisões infraestruturais atuam sobre as forças de trabalho, as atividades de planejamento, de controle e de melhoria da manufatura, considerado como táticas, pois podem ser modificadas em um tempo relativamente curto.

Entre as políticas alternativas de suprimento da demanda encontra-se: manutenção da capacidade; acompanhamento da demanda por meio do ajuste na capacidade e mudança na demanda existente, de modo a manter a capacidade instalada. (SLACK *et al.*, 2002).

Deve-se sempre buscar uma visão ampla do processo, expondo gargalos, filas, variabilidade e desperdícios. Conforme Slack *et al.* (2002) um dos grandes objetivos a ser alcançado é a transparência sobre as atividades em andamento e as concluídas.

O uso da capacidade ociosa, a implantação de novas tecnologias, a adoção de técnicas efetivas de programação e controle, contratação de pessoal ou até mesmo a reorganização do arranjo físico são muitas vezes implantados com o objetivo de aumentar da capacidade (CORREA; GIANESI; CAON, 2001).

O gerenciamento da capacidade deve ser feito de forma rígida, evitando a priorização de exceções imprevistas no negócio, e, com foco no desenvolvimento dos itens conforme estabelecido na estratégia do projeto. É recomendado que a atenção da gestão seja mais dedicada para melhorar a capacidade e previsibilidade de entrega. Buscando a maturidade na produção é fundamental aprender a construir códigos de alta qualidade, e equilíbrio no trabalho em andamento para cumprir suas datas de entrega (IMAI, 2005).

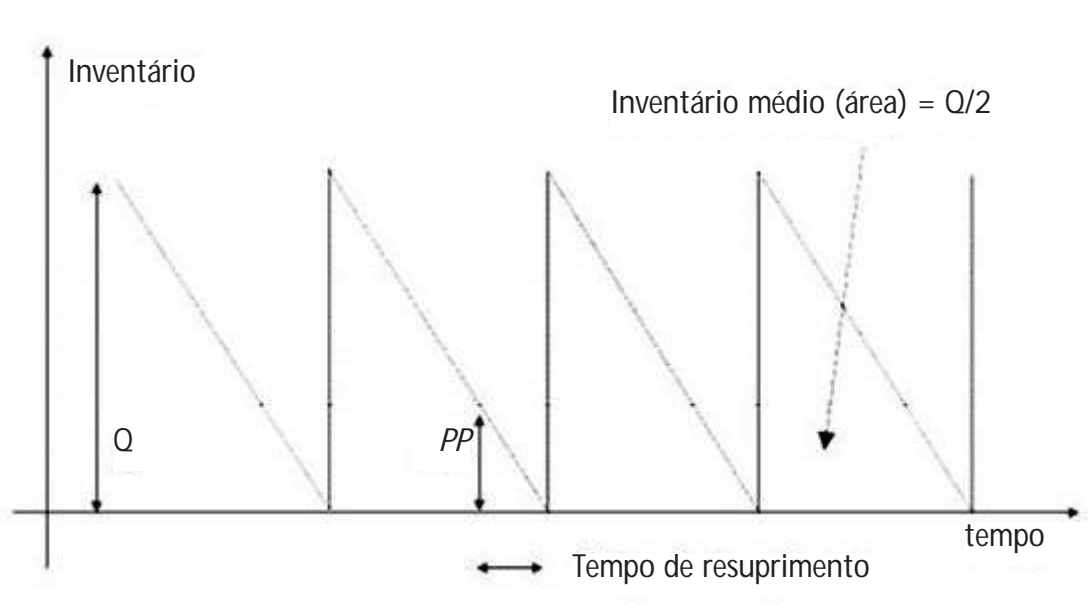
A melhoria da qualidade está conectada com a velocidade de produção. Neste sentido, o desempenho da equipe de desenvolvimento é beneficiado com a eliminação de retrabalhos, com isso se pode alcançar um ritmo de produção de alto desempenho (CORREA; GIANESI; CAON, 2001).

2.2 Revisão dos ciclos de ordem e quantidades

Ponto de pedido é a quantidade que dispara a reposição de estoque virtual quando alcançado: a quantidade do saldo em estoque suporta o consumo durante o tempo de reposição. Assim, o ponto do pedido será o resultado da soma da demanda média no tempo de reabastecimento e o estoque de segurança. E sabendo-se que a manutenção dos estoques tem um custo, deve-se procurar reduzir ao máximo os níveis de estoque, sem prejudicar o andamento dos processos (SLACK *et al.*, 2002).

Deste modo, a **figura 1** mostra que quanto maior o tempo de reposição e menor a assertividade de seu fornecedor quanto aos prazos de abastecimento, maiores deverão ser os seus níveis de estoque (SLACK *et al.*, 2002).

Figura 1 - Gestão de inventários.



Fonte: Slack et al. (2002)

2.3 Melhoria contínua (Kaizen)

Para Oishi (1995) palavra *Kaizen* é sinônimo de melhoria contínua, e pode ser associada aos mais diversos campos, assuntos, ideias geradas, objetos materiais ou não. E, sobretudo, este conceito de aplicabilidade do *Kaizen* é válido inclusive para as empresas.

Tubino (2000) escreveu que o *Kaizen* conota inovação e melhoria contínua, e que deve ser desenvolvida ao longo do tempo. Sendo reiterado por Moreira (2001) que se trata das mais diversas esferas de melhoria, seja da qualidade e/ou produtividade em qualquer natureza, área ou extensão. A preocupação inicial deverá ser com a capacidade de

manutenção do patamar de qualidade e/ou produtividade já alcançada, para em uma etapa posterior ser implantada a conscientização da importância da melhoria contínua.

Um aspecto importante a ser considerado em melhoria contínua, quando se trata da gestão dos estoques e dos processos industriais são os dados de entrada, ou seja, os controladores relevantes da demanda. Seja pelo histórico de vendas, pelo marketing ou vendas, cada um destes fatores estará influenciando a demanda por meio de preços e da atividade de promoção. (MOREIRA, 2001)

Neste sentido, a busca pela inovação é fator imprescindível, pois poderá proporcionar melhorias

significativas e intensas, e até mesmo revolucionar toda a estrutura do processo, tornando-se uma poderosa ferramenta para empresas que buscam se posicionar melhor frente as concorrentes (SLACK *et al.*, 2002).

Por meio do Kaizen, a empresa pretende alcançar uma série de melhorias em diversos pontos de vista, como o econômico, técnico, e de eficácia, dentre outros. Porém, sempre dentro de um contexto visando a melhoria da produtividade ou da lucratividade da empresa sem piorar os condicionantes humanos envolvidos neste processo (OISHI, 1995).

2.4 Produção enxuta (*Lean Manufacturing*)

O mundo produtivo industrial observou, no Japão, a partir da década de 1950, uma reestruturação na gestão da produção e na forma de organização do trabalho decorrentes do desenvolvimento do Sistema Toyota de Produção (STP). O pensamento enxuto, originado em meados da década de 50 e consolidado na década de 70, tem como princípio básico a extinção de perdas no sistema produtivo industrial (LÉXICO, 2003).

A quebra de paradigmas, juntamente com a necessidade de realizações de melhorias contínuas no processo industrial, fez com que STP fosse o berço dessa nova mentalidade de produção baseada na eliminação de desperdícios. A produção enxuta visa identificar valor, parametrizar e alinhar a melhor sequência das ações que geram resultados e realizam as atividades sem que ocorram interrupções no processo (HENDERSON; LARCO, 1999).

A busca da obtenção dessa nova forma de produção está inserida em objetivos e técnicas, até então não utilizadas pela manufatura tradicional, que são: produção em pequenos lotes, redução de estoques, minimização dos tempos de setup, foco na qualidade e não refugo de peças e componentes dentre outras (SHINGO, 1996; SHINGO, 2007).

Os princípios do pensamento enxuto foram propostos como um manual para identificar as ações necessárias para a conversão de organizações com um sistema de produção tradicional para a produção enxuta (LÉXICO, 2003).

O ponto essencial do pensamento enxuto é o valor atribuído pelo cliente. Na mentalidade enxuta deve-se oferecer ao cliente final um produto específico, que atenda às suas necessidades específicas, por um preço específico e no momento específico. A mentalidade enxuta é uma forma de identificar valor, parametrizar e alinhar a melhor sequência das ações que criam valor, realizando as atividades sem que ocorram interrupções no processo, buscando o aprimoramento contínuo e o desenvolvimento de processos cada vez mais eficientes (LÉXICO, 2003).

Henderson e Larco (1999) entendem que o pensamento enxuto visa fazer cada vez mais com cada vez menos – menos mão-de-obra, menos equipamentos, menos tempo, menos movimentações, menos espaço –, conciliando estes atributos com esforços para oferecer aos clientes o que eles desejam. O pensamento enxuto privilegia lotes de produção menores, com vistas a alcançar um melhor ni-

velamento produtivo, diminuindo o descompasso entre a produção e a demanda, gerando maior flexibilidade e também agilidade no atendimento às variações de mercado. Deve buscar definir precisamente o valor em termos de: produtos específicos, capacidades específicas, preços específicos e clientes específicos. (LÉXICO, 2003)

O conceito inicial evoluiu para Lean Enterprise ou Lean Business System, ou seja, aplicação em todas as dimensões dos negócios de uma organização. Mas se inicialmente era apenas aplicado às empresas industriais, a filosofia Lean Thinking rapidamente entrou em novas áreas como os serviços, o comércio e o setor público (HENDERSON; LARCO, 1999).

2.5 Balanceamento da produção

Uma linha produtiva consiste em uma série de estações ou postos de trabalho, cada qual com um intervalo de tempo uniforme chamado de tempo de ciclo, correspondendo ao tempo entre unidades sucessivas saindo no final da linha (LIKER, 2004).

As operações realizadas em cada estação ou posto de trabalho são compostas de uma ou mais tarefas, também conhecidas como elementos ou unidades de trabalho. Estas tarefas são agrupamentos que não poderão ser subdivididos em uma linha de produção sem que ocorra uma alta penalidade em movimentos extras (DAVIS; AQUILANO; CHASE, 2001).

Balancear uma linha produtiva é ajustá-la às necessidades específicas da demanda, maximizando a utilização dos postos ou estações de trabalho, e buscando a unificação do tempo unitário de execução do produto. Segundo Slack *et al.* (2002), o problema no balanceamento da linha de produção é distribuir todas as tarefas necessárias a uma série de estações de trabalho, de tal forma que o tempo necessário para realizar os processos em cada estação não exceda ao tempo de ciclo.

Assim, um balanceamento adequado da produção seria atingido por meio de tempos iguais em cada posto ou estação de trabalho (LIKER, 2004).

Entretanto, Davis, Aquilano e Chase (2001) argumentam que, na prática, tempos iguais dificilmente são alcançados, geralmente resultando em um ritmo de trabalho global determinado pela estação mais lenta de trabalho.

Dentre os diversos fatores que influenciam diretamente no balanceamento, como ergonomia, restrições de processos, disponibilidade de ferramental, locais de armazenamento e abastecimento, dentre outros, é o tempo, o fator fundamental na realização de qualquer balanceamento da produção (TUBINO, 2000).

2.6 Nivelamento da produção

O nivelamento da produção consiste em ajustar a taxa de produção ao mesmo nível da taxa de saída, reduzindo os estoques tanto de produtos acabados como de produtos em processo, resultando na redução dos custos produtivos (DAVIS; AQUILANO; CHASE, 2001).

Tubino (2000) acrescenta que nivelar a produção significa programar para a montagem final de pequenos lotes, e que estes estejam em sincronia com a variedade de produtos demandados pelos clientes, garantindo assim, respostas ágeis às variações de curto prazo nas necessidades dos clientes. O autor argumenta ainda que todo o sistema produtivo busca nivelar sua produção de acordo com a demanda, de forma a acionar seus recursos produtivos apenas à medida que os clientes solicitarem produtos.

Contudo, em sistemas convencionais com produção empurrada, torna-se bastante complexo estabelecer um nivelamento para um horizonte de tempo de médio prazo durante a execução do plano mestre de produção, tendo em vista a baixa flexibilidade (TUBINO, 2000).

Caso a previsão de demanda se confirme, não ocorrerão problemas. Porém, alterações na demanda implicarão na criação de estoques de produtos prontos ou intermediários, ou na impossibilidade de atender aos pedidos de novos clientes (DAVIS; AQUILANO; CHASE, 2001).

Para um nivelamento da produção onde o mix e o volume sejam constantes ao longo do tempo, Tubino (2000) sugere que lotes menores de materiais estejam em movimento entre cada estágio produtivo, o que em termos globais reduziria o nível de estoques em processo.

Shingo (1996) argumenta que em uma situação onde a capacidade produtiva for maior do que a demanda possa absorver, é preferível optar pela ociosidade da máquina à ociosidade do empregado, partindo do pressuposto de que o maquinário possui uma vida útil economicamente remanescente, que poderá ser aplicada no futuro. Entretanto, a força de trabalho ociosa é irreversível, pois não há como fazer uso dela no futuro, além de que, em processos repetitivos, o custo da mão-de-obra geralmente é muito maior que o custo da hora/máquina.

Pode-se acrescentar que conforme Tubino (2000) uma das melhores formas de compreender a lógica e o desafio do pensamento de produção puxada é começar com um cliente real, expressando a demanda de um produto real, e caminhar no sentido inverso, percorrendo todas as etapas necessárias para levar o produto ao cliente.

Paradoxalmente o processo de fluxo contínuo consiste em um estado ideal, em que os itens são processados e alocados diretamente de um processo anterior para o processo seguinte, uma peça de cada vez. Cada passo do processo opera somente na peça que é necessária para o próximo passo, pouco antes que o próximo passo necessite dela, e assim o tamanho do lote de transferência é igual a um (TUBINO, 2000).

2.7 Planejamento e controle da produção (PCP)

A eficiência de qualquer sistema produtivo depende da forma como os problemas administrativos são resolvidos, se referindo ao planejamento, programação e controle do sistema. Sendo assim, para se aperfeiçoar os processos e usufruir de todos os ganhos advindos, é necessário que haja coordenação entre as atividades produtivas (TUBINO, 2000; DAVIS; AQUILANO; CHASE, 2001).

O papel do PCP é de fazer a conexão da produção com os demais setores da empresa, com os fornecedores e clientes, além naturalmente, do objetivo de comandar o processo produtivo e os serviços correlatos entre si. Correa e Gianesi (1997), tratam também da existência de fases hierarquizadas no processo decisório. Acrescentam ainda que um dos papéis do PCP é garantir adequação entre as decisões operacionais e as decisões ou necessidades estratégicas da organização.

Sendo assim, o PCP pode ser definido como uma parte significativa da tecnologia de gerenciamento da produção, desempenhando a função de combinar os fluxos físicos e de informações para gerenciar o sistema de produção, relacionando-se com o ambiente externo e com o chão de fábrica. As funções principais são estabelecer metas e medir desvios na produção, ou seja, a essência é gerenciar desvios enquanto mantém os objetivos consistentes com os da organização como um todo (DAVIS; AQUILANO; CHASE, 2001).

As funções típicas de um sistema de PCP são planejamento das necessidades de materiais, gerenciamento da demanda, planejamento da capacidade, *scheduling* entre outros. Os propósitos-chaves destas funções são reduzir estoque em processo, minimizar os tempos de atravessamento (*throughput time*) e *lead times*, diminuir os custos de estoques, melhorar a receptividade a mudanças, melhorar a aderência das datas de entrega, dentre outros (DAVIS; AQUILANO; CHASE, 2001).

2.8 Gerenciamento visual (Kanban)

A gestão visual é uma forma de comunicação que pode ser observada rapidamente por qualquer pessoa. Um dos objetivos é ter uma comunicação simples, que proporcione uma melhor integração entre os funcionários e a empresa, direcionando produtos e serviços para uma maior qualidade. A principal proposta da gestão visual é a de criar ferramentas para que o sistema produtivo possa ser entendido por todos de forma rápida. Para tanto, trata da colocação de ferramentas, peças, atividades produtivas e indicadores de desempenho em local de fácil visualização (AGUIAR, 2007).

A comunicação visual provê instrumentos para que as equipes tenham foco nos propósitos comuns, fortalecendo práticas já existentes e contextualizando o ambiente em que as equipes trabalham. A gestão visual será uma ferramenta que potencializará a ampliação da capacidade no tratamento das informações em um sistema produtivo, contribuindo para a redução de feedback com vistas à tomada de ações de controle, de forma a reduzir a distância existente entre funcionários, informações, e soluções (CORREA; GIANESI, 1997).

Na língua japonesa a palavra *Kanban* significa um marcador (cartão, sinal, placa ou outro dispositivo) usado para controlar a ordem dos trabalhos em processo sequencial (TAYLOR, 2005).

O objetivo do sistema *Kanban* é apontar a necessidade de material, assegurando que tais itens sejam produzidos e entregues a tempo de garantir a fabricação e a montagem do processo subsequente. Para Correa e Gianesi (1997), as principais limitações do Just in Time (JIT) estão ligadas à flexibilidade de faixa do sistema produtivo, no que se refere à variedade de produtos oferecidos ao mercado e às variações de demanda de curto prazo.

A grande estratégia de se trabalhar com o sistema *Kanban* se baseia no conceito de eliminar os estoques (estoque zero), de modo que, os componentes e materiais agregados ao produto chegam no momento exato de sua utilização na produção (TAYLOR, 2005).

Tubino (2000, p. 194), afirma que "[...] no sistema *Kanban* de puxar a produção não se produz nada até que o cliente (interno ou externo) de seu processo solicite a produção de determinado item". O autor salienta ainda que, à medida que o cliente de um processo necessita de materiais, ele recorre diretamente aos *Kanbans* em estoque neste processo, acionando iniciando imediatamente a reposição dos itens consumidos.

3 Metodologia

O método utilizado será a pesquisa-ação, onde os pesquisadores colaboram no desenvolvimento da solução de um problema real da indústria, contexto no qual está inserido, para a apresentação de resultados, onde concomitantemente com a ação, deseja-se construir conhecimento científico e acadêmico aplicado. Busca-se aplicar da ferramenta *Kanban* ao modelo de gestão de estoques da empresa, visando estudar os aspectos, impactos e resultados que a ferramenta trará após sua implantação, como sistema de gestão de estoques consolidado.

Esta pesquisa compreendeu diversas etapas a começar pelos estudos bibliográficos a respeito do tema central *Kanban* e de seus correlatos temas fundamentais para o suporte da implantação. Foram abordadas as situações decorrentes, e, em dados momentos, serão traçados alguns paralelos de comparação, controle estatístico e apresentação das evoluções e resultados obtidos, que poderão ser expressos tanto de forma qualitativa quanto quantitativa.

4 Resultados

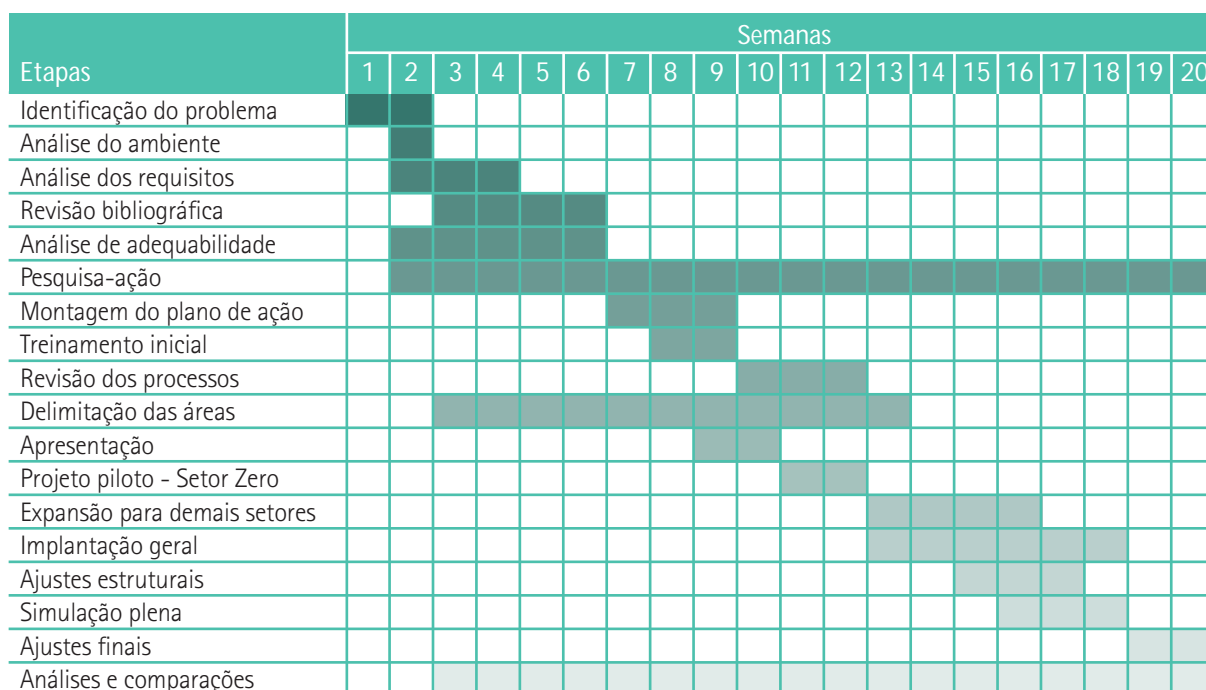
4.1 Planejamento

A necessidade de se ajustar o processo industrial a empresa do segmento têxtil, objeto deste estudo, traçou metas para cada área de forma a buscar o resultado de melhoria operacional, por meio de mudanças conjunturais e gerenciais.

Deste modo, foram mapeadas as principais etapas do processo que, conforme **figura 2**, se inicia em uma avaliação crítica do ambiente e identificação do problema, perpassa pela aplicação da ferramenta, culmina na implantação da metodologia, e, em instância final, se desfecha com uma análise, comparação e apreciação dos resultados.

Foi preciso traçar um planejamento de implantação que contemplasse e delimitasse cada etapa de forma suficientemente clara e exequível. Deste modo, o gráfico de Gantt (**figura 2**) mostra cada etapa do projeto foi planejada de acordo com sua alocação dentro do projeto. Sendo que as etapas interdependentes ficavam no aguardo da conclusão dos predecessores.

Figura 2 - Etapas da implementação do Kanban na empresa



Fonte: elaborado pelos autores

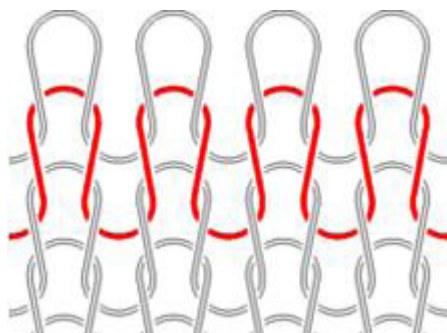
4.2 Caracterização da empresa

O objeto de estudo é uma das unidades de uma indústria do segmento têxtil, de médio porte, com aproximadamente 600 colaboradores, localizada na cidade de Guarulhos, no Estado de São Paulo. Seu portfólio de produtos conta com mais de 1.200 itens *Stock Keeping Unit (SKU)*. Sua carteira é composta por mais de 5.500 clientes ativos, incluindo grandes marcas do setor têxtil e de moda.

4.3 Processos

Dos produtos que advêm da indústria têxtil de transformação a malharia circular é um dos processos de maior incidência e abrangência. Sua tecnologia de transformação é o entrelaçamento dos fios (tricot) por meio de agulha (figura 3). A produção de malhas em malharia circular é, portanto, uma prática pela qual se manufatura o produto de base na cadeia têxtil. Para se alcançar diferentes produtos finais, deve-se ainda seguir por diferentes processos de tinturaria, estamparia e beneficiamento.

Figura 3 - Entrelaçamento de fios no processo de fabricação de malhas



Fonte: elaborado pelos autores

4.4 Indicadores

Indicadores são fundamentais para se analisar a aplicabilidade, eficácia e resultados de quaisquer projetos.

4.4.1 Redução do *lead time* de fornecedores

Trabalhar junto aos principais fornecedores de matéria prima e insumos, rumo à redução de *lead times* de entrega tem grande e direto impacto nos níveis de estoque. Longos *lead times* de 40, 50 e até 60 dias foram renegociados junto aos fornecedores. Considerada a média de 50 dias para o

recebimento de pedido, os níveis de estoques na fábrica se mantinham muito acima do esperado e, sobretudo do idealizado por este trabalho.

Observou-se uma redução de *lead time* de fornecedores, expressa na **figura 4**, na ordem de 40%, foi possível organizar os estoques de matéria prima e insumo.

Interpeladas pelo departamento de compras em conjunto com a Gerência de Logística, as negociações de redução de *lead time* de entrega transcorreram durante toda a vigência da pesquisa, e os dados históricos seguem:

Figura 4 - Tabela da Redução de *Lead Time* de Fornecedores

Evolução da Redução do Lead Time de Fornecedores						
Períodos	Antes	Semana 04	Semana 08	Semana 12	Semana 16	Semana 20
Lead Time (dias)	50	48	40	37	32	30

Fonte: elaborado pelos autores

4.4.2 Reorganização do estoque

Uma ação importante para à melhoria de resultados é a gestão do estoque. Níveis adequados de estoque têm impacto direto nos custos, na eficiência e nos resultados financeiros da empresa. Os níveis devem ser adequados para atender a uma demanda futura. Deve-se focar na melhoria dos sistemas de gestão de estoques, de previsão de demanda e na avaliação da qualidade dos mesmos, objetivando:

- a) reduzir espaço requerido para armazenagem, e por consequência melhor organização;
- b) diminuir a movimentação;
- c) redução de avarias;
- d) menos obsolescência e giro mais rápido;
- e) reduzir custo.

Além da redução dos níveis de estoque, tornou-se necessário também organizar, limpar, endereçar e tratar todo o inventário. A aplicação do Programa 5S ajudou a combater a desorganização e condições inseguras, e a organizar os materiais de maior giro que precisam estar mais rapidamente à disposição.

Estabelecer condições adequadas no ambiente de trabalho, que proporcionasse ao colaborador motivação de mantê-lo organizado e limpo, foi uma das principais premissas. Para tanto, precisou-se criar procedimentos para padronizar e simplificar os métodos de controle visual, como por exemplo: avisos de perigo, instruções de uso e procedimento operacional (**Fotografia 1**).

Fotografia 1 - Antes x Depois do almoxarifado de consumíveis



Fonte: elaborado pelos autores

Estabelecer a disciplina foi fundamental, sobretudo verificar se as atuais regras estão sendo cumpridas pelos clientes internos do almoxarifado, e, caso contrário, propor soluções; elaborar um manual de manutenção para uso dos colaboradores.

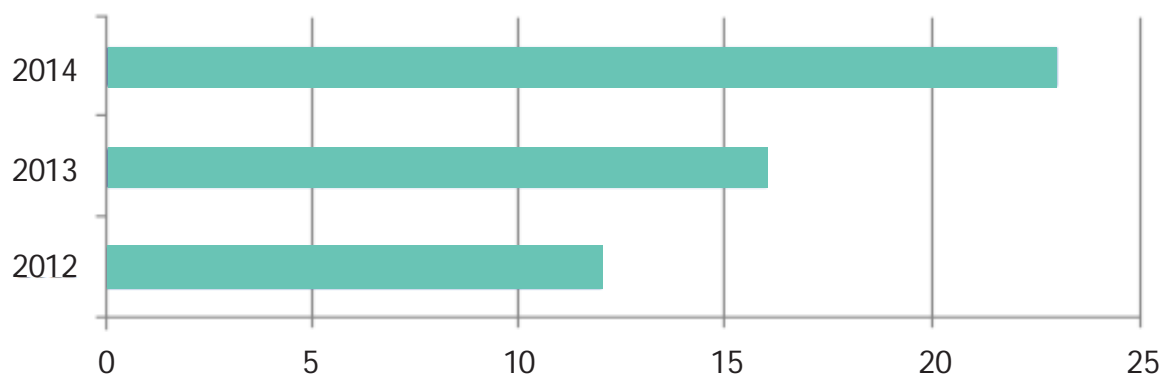
Efetuar balanços rotativos periódicos se converteu em uma prática cotidiana. A utilização da curva ABC ajudou a definir formas de armazenamento de materiais e propor mudanças no arranjo físico, o que permitiu o nivelamento da produção. Adicionalmente, a melhoria na gestão dos estoques permitiu a rápida identificação de peças e componentes obsoletos que ocupavam espaço no almoxarifado.

4.4.3 Capacitação da mão-de-obra

Devem-se despender algumas horas de treinamento ao efetivo que irá interagir com o painel de Kanban, a fim de que o manuseio incorreto não venha a impactar no resultado final. Sobretudo supervisores, líderes e multiplicadores devem receber instrução para planejar os recursos corretos que a produção necessita, obedecendo a sequência do painel. Tais treinamentos ajudam os supervisores a criar uma rotina básica e disciplina nos grupos de trabalho.

O aumento de números de horas anuais de treinamento por funcionário foi uma nova realidade, pois aliado ao projeto de implementação do *Kanban*, houve também diversas frentes de trabalho que potencializaram isso, frentes essas que em boa parte estiveram atreladas à implementação, tais como: programas de 5S, grupos de MASP e projetos de chão de fábrica que se contagiaram com a nova realidade, e com as filosofias trazidas pelo advento e pela utilização do *Kanban*. A **Figura 5** mostra a evolução do número de horas per capita anuais investidas em treinamentos e reuniões de conscientização. Uma das principais profilaxias adotadas para o sucesso e maturidade do projeto foi o aumento das horas de treinamento.

Figura 5 - Horas de treinamento de mão-de-obra



Fonte: elaborado pelos autores

4.4.4 Diminuição de horas-extras

A introdução da flexibilidade de mão-de-obra na organização virá para contribuir ainda mais, pois tem potencial para gerar resultados muito maiores de uma mão-de-obra flexível

do que de sistemas de produção totalmente automatizados. A organização por sistemas, como *Kanban*, Controle da Qualidade Total, *Just-in-Time* e Trabalho em Equipe, transforma o envolvimento do trabalhador manual na produção em fator determinante de mudanças técnicas.

O aumento do nível de habilidades, responsabilidades e participação espontânea dos trabalhadores, potencializado por esses sistemas de organização, também determina resultados operacionais e financeiros. A **figura 6** mostra um comparativo de horas extras gerados, em períodos equivalentes, antes e depois da implantação da polivalência.

Figura 6 - Redução da geração de horas extras

Evolução da Redução de Geração de Horas Extras							
Períodos	X antes	jan/15	fev/15	mar/15	abr/15	mai/15	Média
Média Mensal (HE)	12.139	10.786	8.594	6.345	5.122	4.365	7.042
redução:		-42,22%					

Fonte: elaborado pelos autores

Diferentes níveis de flexibilidade podem ser adotados, nesse caso a flexibilidade de mão-de-obra foi baseada em setores interdependentes, e os modelos de organização flexível adotados são uma combinação de uma série de características corporativas e dos diferentes níveis em que ocorre essa flexibilidade.

4.4.5 Tempo de manutenção

O Departamento de Manutenção é também parte importante do processo de implantação de melhorias contínuas, pois dele deriva diversas ações capazes de potencializar:

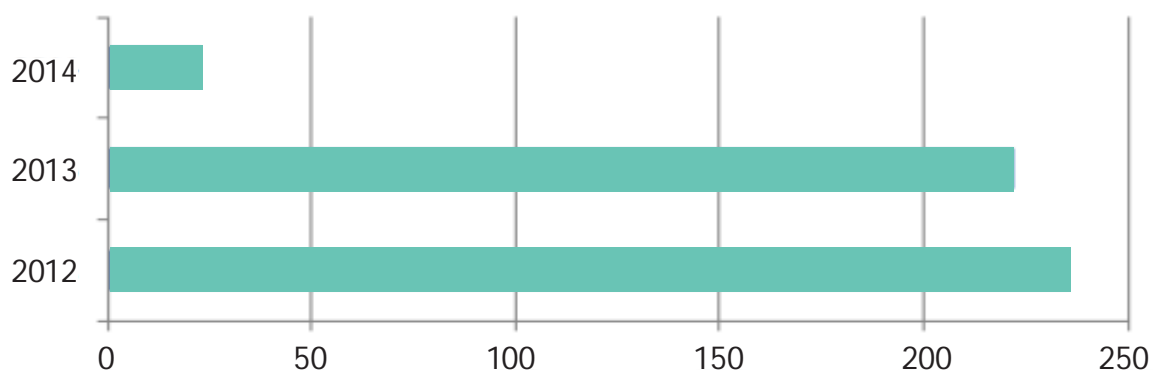
- redução de desperdícios com horas de máquina paradas,
- produzir muito, sem reduzir a qualidade do produto, sinônimo de eficiência,
- reduzir custos e estoques obsoletos e também no estoque de peças e componentes,
- possibilitar a produção de menores lotes, auxiliando os operadores no setup e trocas rápidas.

O objetivo do programa TPM é aumentar consideravelmente a produção e de se sincronizar à nova realidade de organização e métodos de trabalho implantados.

É preciso que o planejador e/ou operador de Kanban conheça suas disponibilidades e capacidade produtiva a fim de sincronizar a demanda dos clientes, a capacidade do processo e uma média real de produção.

Deve-se evitar as instabilidades relacionadas à falta de conhecimento das capacidades, e/ou do calendário de manutenções, que deverá sempre estar sincronizado ao Plano Mestre da Produção. Um dos pontos que merece bastante destaque foi a redução de horas de máquinas paradas (figura 7) que anteriormente eram geradas pelo desbalanceamento da produção e pelo desabastecimento dos processos predecessores.

Figura 7 - Horas de máquina parada

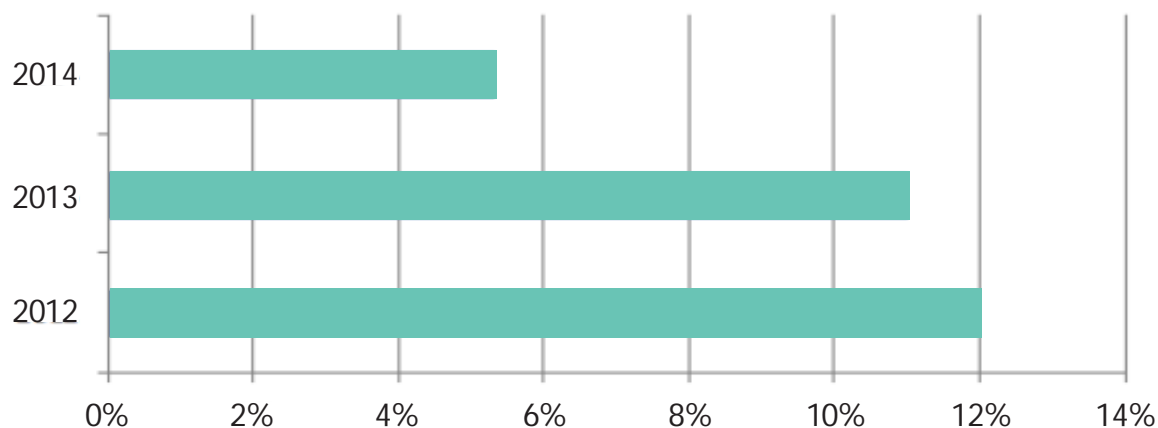


Fonte: elaborado pelos autores

4.4.6. Qualidade

Para entender o fluxo de material e informação de processos e produtos utilizou-se a ferramenta fluxo de valor, que é um mapeamento simples, que segue o fluxo de produção de um produto, desde o consumidor até o fornecedor e, detalhadamente representa visualmente o processo no fluxo de material e informação. O fluxo de valor busca eliminar desperdícios ao longo de toda a cadeia de valor, da matéria prima ao cliente final. A criação de fluxos contínuos pode ser sentido na redução dos tempos de concepção de produtos, de processamento de pedidos e em estoques. A melhoria dos índices de qualidade é traduzida graficamente na **figura 8**, cujo percentual de perdas no processo foi drasticamente reduzido.

Figura 8 - Percentual de segunda qualidade, desperdício e resíduos de processo.



Fonte: elaborado pelos autores

A gestão da qualidade pode ser entendida por um conjunto de ações adotadas pela empresa com o objetivo de melhorar de forma contínua seus produtos e processos. Neste sentido, o conjunto de ações descritas anteriormente levaram a melhoria da qualidade do produto final, que foi observada pela redução dos indicadores de perdas e pelo aumento da satisfação dos clientes.

5 Conclusão

Com foco em gestão, implantar o *Kanban* e ferramentas complementares, tais como o 5S, propôs-se uma profunda alteração na maneira de se estocar e, sobretudo a eliminação de estoques inoperantes e obsoletos. Deixar de manter altos volumes em estoque, como tentativa de se garantir abastecimento dos processos, culminou na desoneração dos custos de operação e redução das perdas em razão da obsolescência das mercadorias ao final das coleções, além do tratamento dos custos de estocagem e movimentação que impactam diretamente no resultado operacional da empresa.

A aplicação da ferramenta *Kanban* também contribuiu sensivelmente para a melhoria dos índices de qualidade setorial e do produto final, dadas as melhores condições de trabalho, de organização e de disciplina. Obviamente, deve-se levar em conta a melhoria da satisfação do cliente, que passou a receber seus pedidos em prazos menores.

A estratégia de se realizar a pesquisa também colaborou, além de resultados consolidados à indústria, em importante construção de conhecimento ao pesquisador, que em virtude do exposto, conseguiu absorver valiosa experiência e nobres conhecimentos na área de aplicação.

6 Referências

- AGUIAR, G. F. *Compreendendo o Kanban: um ensino interativo ilustrado*. Curitiba: Da Vinci, 2007.
- CORREA, H. L.; GIANESI, I. G. N. *Just in Time, MRP II e OPT um enfoque estratégico*. New York: McGraw-Hill, 1997.
- CORREA, H. L.; GIANESI, I. G. N.; CAON, M. *Planejamento, programação e controle da produção*. São Paulo: Atlas, 2001.
- DAVIS, M. M.; AQUILANO, N. J.; CHASE, R. B. *Fundamentos de administração da produção*. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- HENDERSON, B. A.; LARCO, J. L. *Lean transformation: how to change your business into a lean enterprise*. Virginia: The Oaklea Press, 1999.
- IMAI, M. *Kaizen: a estratégia para o sucesso competitivo*. 6. ed. São Paulo: IMAN, 2005.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. *Fundamentos de metodologia científica*. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2005.
- LÉXICO, L. *Glossário ilustrado para praticantes do pensamento lean*. São Paulo: Lean Institute Brasil, 2003.
- LIKER, J. *The Toyota Way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer*. McGraw-Hill, 2004.
- MOREIRA, D. *Administração da produção e operações*. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2001.
- OISHI, M. *TIPS -Técnicas Integradas na Produção e Serviços: como planejar, treinar, integrar e produzir para ser competitivo*. São Paulo: Pioneira, 1995.

PLATTS, K. W. et al. Testing manufacturing strategy formulation processes. *International Journal of Production Economics*, v. 56-57, n. 1, p. 517-523, 1998.

ROCHA, D. *Fundamentos técnicos da produção*. São Paulo: Makron Books do Brasil, 2005.

SHINGO, S. *O sistema Toyota de produção: do ponto de vista da engenharia de produção*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 1996.

SHINGO, S. *Sistema de produção com estoque zero: o sistema Shingo para melhorias contínuas*. Tradução: Lia Weber Mendes. Porto Alegre: Artes Médicas, 2007.

SLACK, N. et al. *Administração da produção*. São Paulo: Atlas, 2002.

TAYLOR, D. *Logística na cadeia de suprimentos: uma perspectiva gerencial*. São Paulo: Pearson Addison-Wesley, 2005.

TUBINO, D. F. *Manual de planejamento e controle da produção*. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

10.34033/2526-5830-v5n17-1



Marcel Joly^{a,b,c,d*}, Aline Heymi Morimoto^a, Kevin Akira Onoda^a,
Mario Yoshikazu Miyake^b, Galo Antonio Carrillo Le Roux^a.

a Process Control and Simulation
Laboratory, Department of
Chemical Engineering, University
of São Paulo, São Paulo SP, Brazil

b The State of São Paulo Institute
for Technological Research, São
Paulo SP, Brazil

c ARSESP- São Paulo State
Sanitation and Energy Regulatory
Agency

d Professor at industrial processes
professional master degree of IPT

*E-mail: mjoly@sp.gov.br.

Keywords:

*mixed-integer programming; oil
industry; optimization; refinery
production planning.*

Abstract

In this prospective paper, we sought to theoretically assess the magnitude order of the benefits related to an in-depth analysis of a high-profile decision-making problem of the oil industry. A simplified representation of the crude oil allocation planning problem in the State of São Paulo is focused on. The scope of the problem comprises 4 oil refineries, which are responsible for approximately one-half of the current Brazilian refining capacity, more than 260 crude oil types and 5 key properties of interest for primary processing in crude distillation units (CDUs). The optimization criterion was economic and considered the crude oil pricing, pumping costs through long crude oil pipelines, and the incomes from intermediary cuts in CDUs. Real-world data, whenever available, were used to run the computation experiments. The major finding of this study shows that, depending on the problem instance considered, the planning model based on monthly time discretization can overestimate the profitability of the entire system by less than 1%, on average, in relation to its weekly discretized representation, the so-called "plannuling" model.

1 Introduction

The increased efficiency of modern computer technologies allied to the development of powerful optimization algorithms (KARMAKAR, 1984; VISWANATHAN ; GROSSMANN, 1990; DRUD, 1996; IBM, 2012) for solving large-scale decision-making problems have amplified the possibilities of mathematical modeling approaches (KELLY , FORBES, 1998; KONDILI et al., 1993; PANTELIDES, 1994) in an unprecedented way. In this context, Operational Research (OR)¹ techniques (HILLIER; LIEBERMAN, 2005) and large-scale optimization (BIEGLER; GROSSMANN, 2004; GROSSMANN ; BIEGLER, 2004) have proven to be instrumental to achieve important progress in many fields of science and technology, with innovative solutions being successfully implemented on myriad real-world optimization problems (CUTHRELL and BIEGLER, 1987; NEIRO ;PINTO, 2004; JOLY; PINTO, 2006).

The application of OR techniques in the oil industry may be posed as an illustrative example. Right after the initial forays in linear programming, late in the 1940s, Dantzig (1949), Charnes; Cooper, and Mellon (1952) and Sysmonds (1955) were among the first in applying mathematical programming techniques to this business, thereby rendering the oil industry the first target of industrial applications of OR following its pioneer use in World War II. Since then, an enormous advancement of algorithms and modeling techniques to solve complex, real-world decision-making problems has unsurprisingly been produced in tight collaboration with or led by an illustrious set of chemical engineers (IGNÁCIO E. GROSSMANN; LORENTZ T. BIEGLER, among many others unintentionally left out).

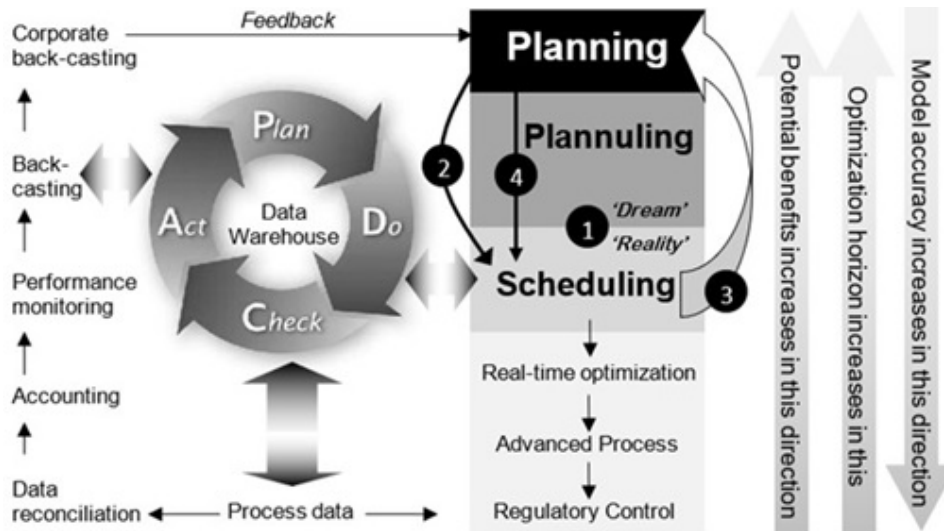
Besides the largest, the oil sector is indeed a conspicuous example of the most complex chemical industries, involving many different and complex processes with numerous logistic connections among their elements. Usually, the common objective of petroleum refineries is to minimize the plant operational cost in harmony with macroscopic (tactical) economic guidelines optimally determined at the refinery planning level. In this kind of business, acting under certainty is of paramount importance; product quality must be met through safe plant operation. In general, such eminent goals are achieved through the integrated, optimal management of available resources at both local (LEE et al., 1996; JOLY et al., 2001) and corporate levels (NEIRO ; PINTO, 2004).

Undoubtedly, intelligent production planning and scheduling are currently of supreme importance to ensure refinery profitability, logistic reliability and safety at the local and corporate levels (JOLY, 2012). In Brazil, such activities play a particularly critical role, since the Brazilian downstream model is moving towards a demand-driven model rather than a supply-driven one. Moreover, new and specialized non-linear constraints are continuously being incorporated into these large-scale problems. Here, one can mention increases in oil prices implying the need for processing poor quality crudes, increasing demand and new demand patterns for petroleum products, new stringent environmental regulations related to clean fuels and start-up of new production technologies embedded into more complex refining schemes based on novel business models (in-line certification units (FEITAL et al., 2013)).

¹ *Abbreviations used in this paper:* CDU, crude distillation unit; LP, linear programming; NLP, nonlinear programming; OR, Operations Research.

Historically, this has been successfully, but not always optimally, achieved by exploiting decomposition approaches (Figure 1), instead of tackling the comprehensive large-scale optimization problem at once (SHAH et al, 2010).

Figure 1 - Conceptual model of a hierarchical decision-making structure for solving complex supply-chain problems in the oil industry.



Source: elaborated by the authors.

Whereas production planning is the business layer in which one should 'dream' in order to make more money (1), money loss minimization is what should be pursued through an optimal (i.e., 'planning-adherent') production scheduling in real-world settings. Given that production scheduling not only translates strategic objectives into operational actions (2) but also provides a valuable bridge for model maintenance and sophistication (3), we argue that additional efforts must be devoted to qualitatively and quantitatively improve the planning guidelines. In particular, we argue that one should explore the gap between strategic planning and operational scheduling by proposing a new tactical business layer here named 'plannung', a term coined from the merge of words planning and scheduling.

By considering a more detailed representation of the planning model, this new intermediary layer is aimed to provide more guidelines which must be satisfied at the production scheduling level. In other words, the plannung model aims to improve the adherence between the strategic and the operational worlds. As the planning model, the plannung model should also consider a reasonable trade-off between complexity and computational expense, that is, it should ideally be tractable through optimization in order to provide marginal information. This information, which is the true link between two adjacent business layers in a hierarchical planning structure such as the one here proposed, should drive the search for a good solution at the production scheduling layer.

In many cases, prior solutions were also focused on the independent analyses of specific parts of the petroleum supply chain, often leading to a lack of integration of the whole problem (LEE et al., 1996; PINTO et al., 2000; JOLY ;PINTO, 2003).

In the past few decades, however, the full integration in the oil supply chain was in evidence. From a contextual perspective, one has the economy globalization which has established new competition patterns. Furthermore, globalization trends have significantly increased the scale and complexity of the modern enterprise. The enterprise has been transformed into a global network consisting of multiple business units and functions (VARMA et al., 2007). From a practical standpoint, the computational treatment (GAREY ; JOHNSON, 1979) of this challenging class of engineering problems in OR and management sciences has increasingly become feasible. In the light of advanced technologies developed over the past two decades, we have really witnessed a robust increase of published works addressing the intelligent management of supply-chain systems or subsystems (MAGALHÃES, 2004; LASSCHUIT ; THIJSSSEN, 2004; PINTO ; NEIRO, 2004). Whereas production planning has received major attention by the OR community since the 1950s up to the 1990s, the study of production scheduling became an important focus of investigation since then underscored by the facilities introduced by high-level languages, user-friendly modeling systems (GAMS, AIMMS, etc.). In this prolific context for novel applied developments, the short-term production scheduling of crude oil and oil products of real-world oil refineries has largely been investigated (LEE et al., 1996; JOLY ; PINTO, 2003; MONIZ et al., 2013; KELLY et al., 2006).

However, the search for efficient modeling frameworks able to minimize the gap between production planning and scheduling is an aspect to be further investigated. In this vein, Rocha et al. (2009) worked on the gap between the strategic and operational levels at Brazilian supply chain, a subject masterly reviewed by Iachan (2009) who summarized the major Brazilian in-house developments in the exciting field of OR over the past 40 years. In the Brazilian oil sector, there are many notorious corporate-wide OR projects aimed to improve the operation performance. Here are included optimization of fleet sizing and routing for off-shore operations, sophisticated LP-based models for solving the Brazilian oil industry supply-chain, advanced (and visionary) refinery scheduling systems (MAGALHÃES et al., 1998; JOLY, 2012), specialized applications for real-time optimization (COSTA et al., 2008), and advanced process control applications (MORO ; GROSSMANN, 2013).

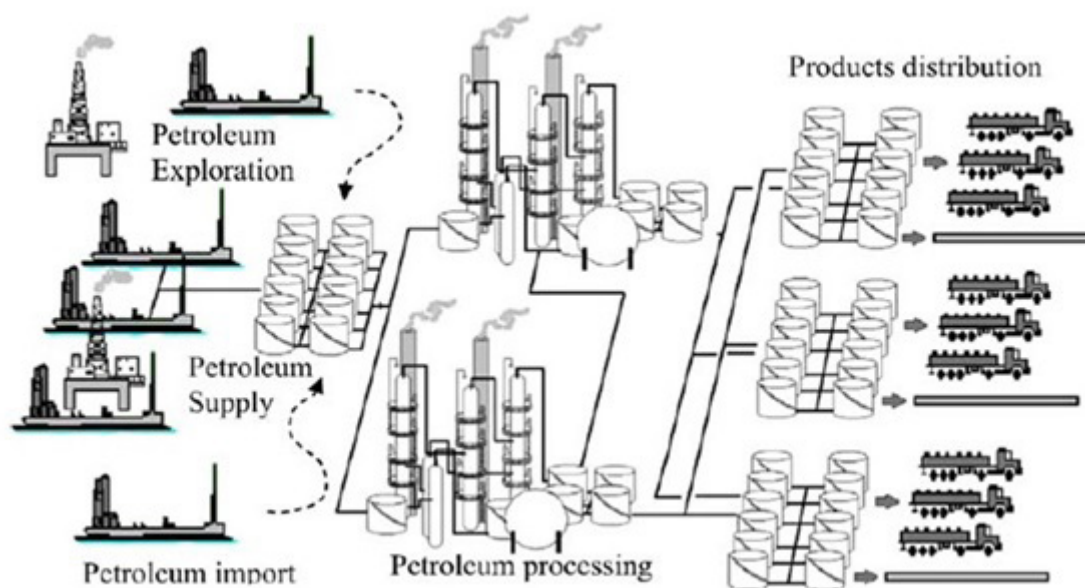
Despite undeniable recent advances, the petroleum allocation activity remains an extraordinary challenge. As illustrated in **Figure 2**, Petroleum exploration is at the highest level of the chain (left). At the strategic level, decisions regarding petroleum exploration include design and planning of oil field infrastructure. Operationally, petroleum may be also supplied from international sources. Oil vessels transport petroleum to maritime terminals, which are connected to other terminals or refineries through a pipeline network. Decisions at this level incorporate transportation modes and supply planning and scheduling, the subject addressed in this work. Crude oil is converted into products in refineries; the latter can be connected to each other in order to take advantage of each refinery design within the complex.

This is the case of the São Paulo area, which comprises 4 refineries logistically interconnected by a complex pipeline network. Oil products generated at the refineries are then sent to distribution centers. Crude oil and products up to this level are often transported through pipelines. From this level on, products can be transported through different modes (e.g., pipelines, vessels, trains or trucks) depending on distances, product type or consumer demands. In general, production planning includes decisions

such as individual production levels for each product as well as operating conditions for each refinery in the network, whereas product transportation focuses on scheduling and inventory management of the distribution network.

The complex organizational structures underlying horizontally and vertically integrated chemical process industries, such as the oil sector, challenge our understanding of cross-functional co-ordination and its business impact (VARMA et al., 2007). In this particular case, petroleum allocation may be considered a critical link for integrating the petroleum supply chain of many oil companies, such as Petrobras (discussed in ROCHA et al., 2009) or Shell (LASSCHUIT; THIJSSSEN, 2004). Representing a large-scale system with a high combinatorial aspect and important nonlinearities involved, the problem has continuously been a major focus of interest of bright chemical (or, more generally, process) engineers and OR analysts with open minds to test new tools and to find new solutions.

Figure 2 - A general schematic representation of the oil industry supply chain.



Source: Neiro and Pinto (2004).

Undeniably, we are dealing with a complex system (OTTINO, 2003). Consequently, since a large number of simplifications are unavoidably needed, this may lead to suboptimal operation due to differences between modeling approaches (planning vs. scheduling) and loss of information throughout the hierarchical structure (Figure 1). As the time horizon of interest is usually smaller when operational decisions must be scheduled, the number of details to be considered becomes higher and, therefore, a proper representation of the operational (scheduling) problem will have more variables and constraints than the planning model typically does.

As a consequence, the planning model normally provides different (i.e., not 'implementable') optimal solutions than ones that are effectively implemented. In particular, as some constraints (e.g., operational constraints) need to be disregarded at the highest levels, the top-down flow of information throughout the supply chain model may be not complete or accurate, thereby introducing additional degrees of freedom or inaccuracies to be resolved at the lowest levels.

In this sense, reducing the gap between strategic and operational decisions may represent a prolific way for achieving improvements in the integrated management of complex supply chains. Current advances in IT and algorithms enable (and motivate) modelers to sophisticate planning models thereby minimizing the aforementioned problems which are mostly due to distinct representations of the same problem. As discussed in Figure 1, one candidate approach is to propose a new, intermediary business layer between planning and scheduling, which we name *plannuling* (the merge between planning and scheduling). This new layer is devoted to address the planning problem but also regarding representative scheduling constraints, such as time-dependent resources (in this case, the dynamic availability of crude oil at its source).

At this point, a key question arises: how may such a sophisticated (i.e., detailed) modeling approach contribute to improving the operational decisions? To the best of our knowledge, there is no published information about the solution quality gap between a 'conventional' (i.e., time-aggregated) and a detailed (i.e., in which the planning horizon is discretized in accordance with master time events taken into account for scheduling decisions) planning model.

This paper aims to theoretically quantify this gap based on comparisons between planning and *plannuling* models, in which differences in the modeling approach are restricted to time representation. Specifically, we address the real-world problem of crude oil allocation in São Paulo State (Brazil), where 4 oil refineries respond to approximately one-half of the Brazilian refining capacity.

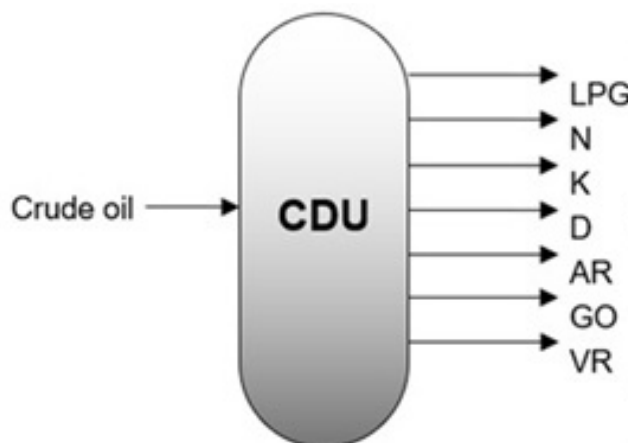
This article is structured as follows. Problem definition is stated in Section 2 whereas Section 3 is devoted to present the proposed modeling formulations and rationales. The solution method is described in Section 4. *In silico* results are summarized in Section 5 and discussed in Section 6. Lastly, Section 7 concludes the paper and outlines future research.

2 Problem definition

The crude oil supply chain in the State of São Paulo comprises one maritime terminal and four interconnected oil refineries (REFINERY A to REFINERY D). Given a monthly forecast related to the potential availability of 263 crude types in the maritime terminal, the problem we are concerned with is to determine the optimal allocation between the available quantity of each type of crude oil and each refinery.

In this study, we hypothesize that each refinery has a single petroleum distillation unit (CDU), which represents, in a simplified way, the actual hardware configuration of each refinery's distillation process. This simplified representation also admits a unified CDU model for the existing atmospheric and vacuum distillations in the refinery, as schematically represented in Figure 3.

Figure 3 - Simplified representation of the crude distillation process.



Source: elaborated by the authors.

According to this model, crude oils are fractionated into liquefied petroleum gas (LPG), naphtha (N), kerosene (K), diesel (D) and "bottom cuts". These can be either atmospheric residue (AR) or gasoil (GO) plus vacuum residue (VR).

The first case (the bottom cut is AR) corresponds to the case of REFINERY A, which is equipped with a residue fluid catalytic cracking (RFCC) unit. In this case, GO + VR yield is set to zero. The second situation (bottom cuts are GO and VR) is valid for REFINERY B, REFINERY C and REFINERY D, whose refining schemes are based on conventional fluid catalytic cracking (FCC) units. In this case, the AR yield is set to zero.

Here, we consider that each CDU can produce at most 6 intermediary streams (or cuts), namely: liquefied petroleum gas (LPG), naphtha (N), kerosene (K), diesel (D) and "bottom cuts" which can either be Atmospheric residue (AR) or Gasoil (GO) and vacuum residue (VR).

Four physical-chemical properties (or qualities) are managed in the model. They are crude API, crude acidity, carbon residue related to the heavier cut (RAT or AR and density. The latter is required in order to calculate blending rules on a mass basis.

At the beginning of the one-month planning horizon, the crude oil availability in the maritime terminal is known in terms of crude types and their corresponding initial volumes. Crudes are characterized by: a) a constant yield profile for processing in CDUs, and b) fixed qualities (crude API and crude acidity).

The crude quality set of interest is completed by the carbon residue in the CDU bottom cut. This process stream may correspond to an atmospheric residue (AR) for further processing into a residue fluid

catalytic cracking (RFCC) unit in REFINERY A refinery or a vacuum residue (VR) for further processing in delayed coker units in the remaining refineries (REFINERY C, REFINERY D ; REFINERY B).

Each refinery is characterized by a particular set of constraints. These constraints are categorized into two classes:

- mass balance constraints: the optimal allocation of crude oil must satisfy lower and upper bounds of processing loads in each refinery. Also, the volumetric yield of certain CDU cuts is bounded;
- quality constraints: the optimal allocation of crude oil must satisfy lower and/or upper bounds of the blend mix quality. The quality of certain CDU cuts is also subject to specification constraints.

The optimization criterion is economic. Operational costs are represented by raw material (crude oils in the maritime terminal) and pumping costs throughout the oil pipelines. Operational revenues are due to the production of intermediary cuts in CDUs.

3 Mathematical modeling

The following are the assumptions for the nonlinear programming (NLP) based models that are proposed herein:

(a1) the initial system conditions are known a priori;

(a2) the system is isothermal and at ambient temperature;

(a3) all intermediate and final products are incompressible fluids. In addition, due to the lack of chemical reactions, there is no volumetric expansion or reduction in CDUs or blending operations;

(a4) aggregated storage capacity at each site (i.e., at the maritime terminal and at each oil refinery). Moreover, we neglect the crude oil inventories inside oil pipelines by assuming instantaneous transportation;

(a5) transportation times and product mixing inside oil pipelines are neglected. In a similar way, since discrete operations (e.g., resource selection and sequencing) are not taken into account, changeover times are neglected.

Assumption (a1) defines the optimization model instance. Assumption (a2) is essential to simplify the model since there are large temperature differences between processing units and pipelines or storage tanks. Assumption (a3) guarantees that neither thermal contraction nor expansion of the molar volume occurs in blending operations or processing in CDUs, which is relevant since the model relies on volumetric calculations. Lastly, assumptions (a4) are stated in benefit of a simpler (i.e., continuous) mixed-integer formulation: whereas refineries are complex systems which need to be fed by proper amounts and types of crudes in order to supply their market with the required products, operational details of refinery operation modeling were omitted or simplified in this study.

Each optimization model presented herein yields an NLP which is composed of an objective function (Eq. 1) and constraints (Eq. 1-10) according to nomenclature defined in Table 1. In what follows, each model constraint is presented in both representations proposed. The planning model, which considers the whole month as a single time period, is identified by an additional letter 'a' in the equation number (e.g., 1a, 2a, and so on), whereas identifier 'b' (e.g., 1b, 2b, and so on) refers to the planning model in which the whole month is uniformly discretized in 4 weeks.

Table 1 - Model nomenclature.

Indices and Sets	Description
c	CDU cuts
p	Crude oil types
r	Refineries
w	Weeks
Parameters	Description
nd	Number of days considered in the time horizon
ACD_p	Acidity for crude oil p
ACD_r^{max}	Upper bound for acidity of the crude oil mix in refinery r
API_p	API for crude oil p
API_r^{max}	Upper bound for API of the crude oil mix in refinery r
API_r^{min}	Lower bound for API of the crude oil mix in refinery r
$Cost_p^{oil}$	Crude oil p price at maritime terminal
$Cost_{p,r}^{CorPump}$	Pumping cost of oil p to refinery r
$V_{c,r}^{maxcut}$	Maximum capacity of intermediary cut c in refinery r ($c =$ naphtha, kerosene, diesel, RAT)
$RES_{p,r}^{min}$	RCR/RCC content for RAT/RV from crude oil p in refinery r
RES_r^{min}	Lower bound for RCR/RCC in the RAT from crude oil mix in refinery r
RES_r^{max}	Upper bound for RCR/RCC in the RAT from crude oil mix in refinery r
$revcut_{c,r}$	Revenue price for each cut c in refinery r
P_p	Density for crude oil p
VD_r^{min}	Minimum volumetric demand of crude oil in refinery r per day
VD_r^{max}	Maximum volumetric demand of crude oil in refinery r per day
V_0	Initial volume of crude oil at maritime terminal (received) in the month under consideration
$V_{0,p,w}$	Initial volume of crude oil at maritime terminal (received) during the week w under consideration
$assay_{c,p}$	Volumetric yield for intermediary cut c with respect to crude p at refinery r
Variables	Description
ACD^{aloc}	Acidity of the allocated crude oil mix in refinery r during the month under consideration
$ACD_{r,w}^{aloc}$	Acidity of the allocated crude oil mix in refinery r during the week w under consideration
API_r^{aloc}	API of the allocated crude oil mix in refinery r during the month under consideration
$API_{r,w}^{aloc}$	API of the allocated crude oil mix in refinery r during the week w under consideration
$VD_{p,r}$	Overall quantity of crude oil p from maritime terminal to refinery r during the month under consideration
$VD_{p,r,w}^{aloc}$	Overall quantity of crude oil p from maritime terminal to refinery r during the week w under consideration
Variables	Description
$product_{c,r}$	Intermediary cuts c of crude oil p production in refinery r during the month under consideration
$product_{c,r,w}$	Cuts c of crude oil p production in refinery r during the week w under consideration
$profit$	Profit calculation
RES_r^{aloc}	RCR/RCC in the RAT from the allocated crude oil mix in refinery r during the month under consideration
$RES_{r,w}^{aloc}$	RCR/RCC in the RAT from the allocated crude oil mix in refinery r during the week w under consideration
$Stock\ level_{p,w}$	The amount of crude oil received in the week added to the amount that was not allocated from the week before

Source: elaborated by the authors.

The objective function.

Maximize profit, where:

Profit = Receipt from intermediary cuts – inventory cost – pumping cost.

Or, mathematically:

$$\begin{aligned} \text{profit} = & \sum_{c=1}^c \sum_{r=1}^r \text{product}_{c,r} \cdot \text{revcut}_{c,r} + \\ & - \sum_{p=1}^p \text{cost}^{\text{oil}}_p \cdot \text{VD}_{p,r}^{\text{aloc}} - \sum_{p=1}^p \sum_{r=1}^r \text{Cost}_{p,r}^{\text{CorPump}} \cdot \text{VD}_{p,r}^{\text{aloc}} \end{aligned} \quad (1a)$$

$$\begin{aligned} \text{profit} = & \sum_{c=1}^c \sum_{r=1}^r \sum_{w=1}^w \text{product}_{c,r,w} \cdot \text{revcut}_{c,r} + \\ & - \sum_{p=1}^p \sum_{w=1}^w \text{cost}^{\text{oil}}_p \cdot \text{VD}_{p,r,w}^{\text{aloc}} + \\ & - \sum_{p=1}^p \sum_{r=1}^r \sum_{w=1}^w \text{cost}_{p,r}^{\text{CorPump}} \cdot \text{VD}_{p,r,w}^{\text{aloc}} \end{aligned} \quad (1b)$$

The crude oil supply constraints

The total amount of crude oil received through oil-pipelines must meet the foreseen demand defined at the corporate planning.

$$\text{VD}_r^{\text{Min}} \leq \text{VD}_{p,r}^{\text{aloc}} \leq \text{VD}_r^{\text{Max}} \quad (2a)$$

$$\text{VD}_r^{\text{Min}} \leq \text{VD}_{p,r,w}^{\text{aloc}} \leq \text{VD}_r^{\text{Max}} \quad (2b)$$

The total amount of crude oil sent by oil-pipelines during the month must consider the availability of the crude oil in the maritime terminal. In the planning analysis, however, the availability of crude oil in the maritime terminal at the beginning of the second, third and fourth weeks will correspond to the remaining inventory from the previous week (i.e., the amount that was not allocated) plus the amount of crude oil received from crude oil vessels that week.

$$\text{VD}_{p,r}^{\text{aloc}} \leq V_0 \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} \text{VD}_{p,r,w}^{\text{aloc}} & \leq \text{Stock level}_{p,w} = \\ & = V_{0p,w} + (\text{Stock level}_{0p,w-1} - \text{VD}_{p,r,w-1}^{\text{aloc}}) \end{aligned} \quad (3b)$$

The production constraints

The production of intermediary cuts of atmospheric distillation must meet the processing in each refinery and its maximum supported capacity.

$$product_{c,r} = \sum_{p=1}^p c_{p,r} \cdot VD_{p,r}^{aloc} \leq V_{c,r}^{maxcut} \quad (4a)$$

$$product_{c,r,w} = \sum_{p=1}^p c_{p,r,w} \cdot VD_{p,r,w}^{aloc} \leq V_{c,r,w}^{maxcut} \quad (4b)$$

The API constraints

The API of the crude oil blend mix sent through oil-pipelines is calculated using mixing rules on a mass basis and it must obey processing constraints at each refinery.

$$API_r^{min} \leq API_r^{aloc} \leq API_r^{max} \quad (5a)$$

$$API_r^{min} \leq API_{r,w}^{aloc} \leq API_r^{max} \quad (5b)$$

$$API_r^{min} = \frac{\sum_{p=1}^p (VD_{p,r}^{aloc} \cdot \rho_p \cdot API_p)}{\sum_{p=1}^p (VD_{p,r}^{aloc} \cdot \rho_p)} \quad (6a)$$

$$API_r^{min} = \frac{\sum_{p=1}^p (VD_{p,r,w}^{aloc} \cdot \rho_p \cdot API_p)}{\sum_{p=1}^p (VD_{p,r,w}^{aloc} \cdot \rho_p)} \quad (6b)$$

The acidity constraints

Similarly, the acidity of the crude oil blend mix sent through oil-pipelines is calculated using mixing rules on a mass basis and it must obey processing constraints at each refinery.

$$ACD_r^{aloc} \leq ACD_r^{max} \quad (7a)$$

$$ACD_{r,w}^{aloc} \leq ACD_r^{max} \quad (7b)$$

$$API_r^{aloc} = \frac{\sum_{p=1}^p (VD_{p,r}^{aloc} \cdot \rho_p \cdot ACD_p)}{\sum_{p=1}^p (VD_{p,r}^{aloc} \cdot \rho_p)} \quad (8a)$$

$$ACD_{r,w}^{aloc} = \frac{\sum_{p=1}^p (VD_{p,r,w}^{aloc} \cdot \rho_p \cdot ACD_p)}{\sum_{p=1}^p (VD_{p,r,w}^{aloc} \cdot \rho_p)} \quad (8b)$$

The RCR constraints

The content of carbon residue in the CDU bottom cut is also determined using mixing rules on a mass basis and it must obey processing constraints at each refinery.

$$RES_r^{min} \leq RES_r^{aloc} \leq RES_r^{max} \quad (9a)$$

$$RES_r^{min} \leq RES_{r,w}^{aloc} \leq RES_r^{max} \quad (9b)$$

$$RES_r^{aloc} = \frac{\sum_{p=1}^p (VD_{p,r}^{aloc} \cdot p_p \cdot RES_{p,r})}{\sum_{p=1}^p (VD_{p,r}^{aloc} \cdot p_p)} \quad (10a)$$

$$RES_{r,w}^{aloc} = \frac{\sum_{p=1}^p (VD_{p,r,w}^{aloc} \cdot p_p \cdot RES_{p,r})}{\sum_{p=1}^p (VD_{p,r,w}^{aloc} \cdot p_p)} \quad (10b)$$

4 Solution algorithm

It is worth noting that the major difficulty of this problem is due to bilinear terms in the mathematical model, which arise from the product between two variables. As a result, the model is non-convex (LEE et al., 1996). Therefore, a global optimal solution cannot be ensured. Most importantly, when trying to solve the NLP model as is, we found severe numerical difficulties regarding model initialization.

In fact, this was not surprising since NLP-based optimization problems may require a good initial solution. To overcome this difficulty, we proposed a bi-level solution framework in which an initial point was determined through running a linear programming (LP) based model, which is derived from the NLP model and is composed only by the linear constraints of the NLP model. Once this initial guess was determined and considered as the starting point for the NLP optimization, the full model was successfully solved in acceptable CPU times.

5 Results and discussion

The model modeling system GAMS was used to implement the model and its solution method. Computational experiments were based on fictitious, nevertheless realistic data and performed on an IntelCore i7 2.0 GHz 2.0 GB RAM. When solving the LP and NLP models, we tested different solvers in order to assess the objective function value variation, which was around 0.35%. This reduced variation showed that the solution quality is not significantly affected by solver selection. Overall, at most

0.61 CPU seconds was required to solve an instance the optimization problem. Table 2 summarizes dimensional aspects of both models.

Table 2 - Model statistics for a one-month horizon.

	Planning		Plannuling	
	LP	NLP	LP	NLP
Blocks of equations	9	17	11	19
Single equations	86	112	2022	2126
Blocks of variables	3	6	4	7
Single variables	161	171	5293	5333
Non-zero elements	1308	1664	45520	55944

Source: elaborated by the authors.

Computational experiments considered 12 fictitious, nevertheless realistic instances of the problem for 6 months (M1 to M6). In particular, 06 instances were related to the aggregated analysis of the problem (the planning model) whereas the remaining 6 ones considered each month discretized into 4 periods (the plannuling model). Economic parameters, which include the raw-material cost as well as the internal revenue price for each cut at each refinery and pumping costs, are described in Tables 3 and 4 whereas major bounds on operational and processing variables are summarized in Table 5.

Table 3 - Internal revenue price (US\$/m³).

Cut	REFINERY			
	A	B	C	D
LGP	174	174	188	226
N	345	349	346	346
K	438	435	454	471
D	438	435	455	452
AR	263	0	0	0
GO	0	380	380	380
VR	0	260	240	252

Source: elaborated by the authors.

Table 4 - Pumping cost from the maritime terminal to refinery r (US\$/m³).

r	REFINERY			
	A	B	C	D
$Cost_{p,r}^{CorPump}$	0.10	0.01	0.15	0.15

Source: elaborated by the authors.

Table 5 - Model constraints.

	REFINERY			
	A	B	C	D
LGP	10,000	30,000	42,000	70,200
N	5,600	25,000	36,000	60,000
K	33	30	26.7	30
D	27	20	25.5	23
AR	0.8	1.3	1.3	1.0
GO	6.0	22,5	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
VR	4.0	0	0	0
D	1,300	10 ⁶	5,500	13,000
AR	10 ⁶	10 ⁶	17,000	10 ⁶
GO	10 ⁶	10 ⁶	24,000	10 ⁶
VR	4,300	10 ⁶	21,000	10 ⁶

Source: elaborated by the authors.

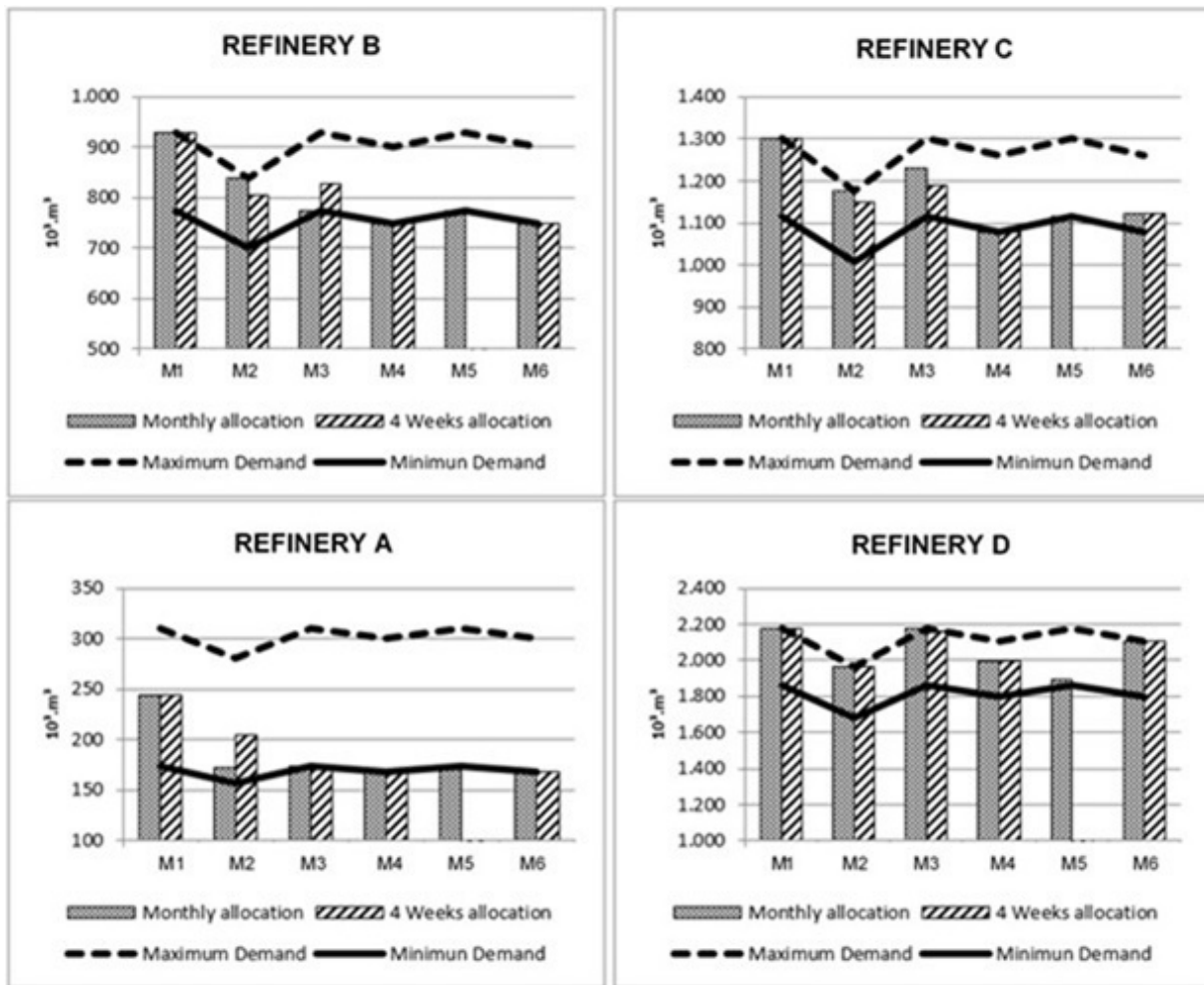
Figure 4 compares the resulting allocation for crude oils in each refinery in each month for the two cases under analysis: the whole month aggregated in a single time slot (planning) and its corresponding detailed version in which the entire month is weekly segmented into four time slots.

In this figure, dashed (full) lines indicate the upper (lower) bound for CDU volumetric processing charges in each refinery whereas checkered (hatched) bars denote the optimal solution found for this model variable with respect to the planning (plannuling) model. In principle, a feasible solution could not be determined for one instance of the plannuling model (month "M5"). This infeasibility was due to the impossibility of satisfying the minimum crude oil demand in REFINERY D in week 3 and in REFINERY B in weeks 1 and 2.

For this reason, M5 was not considered in the next evaluations. However, from this figure, the optimal analysis of the problem is noticed to result in high priority to maximize the processing charges in REFINERY D at the expense of lower processing rates in the remaining refineries, such as REFINERY A, even being the pumping cost between the maritime terminal and REFINERY D higher than that between the maritime terminal and REFINERY B or REFINERY A.

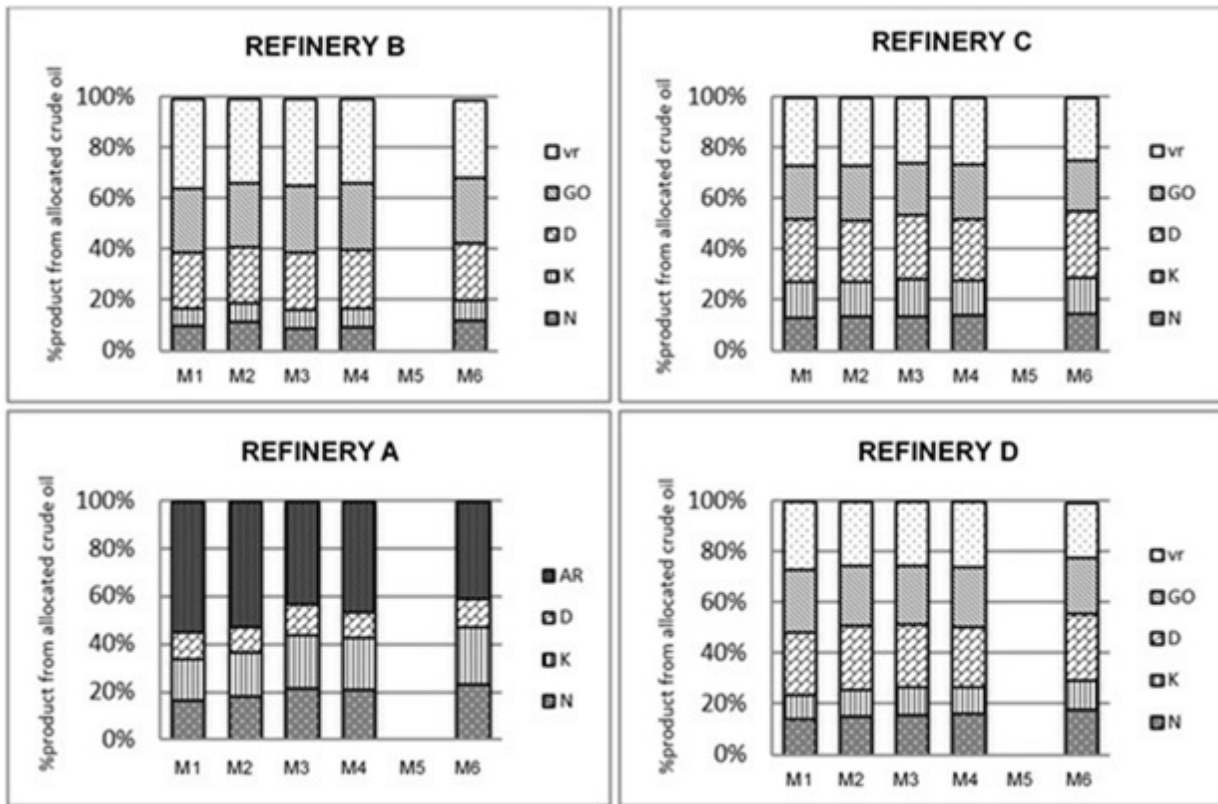
This is due to the significant economic trade-off between raw-material and products pricing, which surpasses the economic impact of crude oil transportation through oil pipelines. In fact, Figure 5 clearly shows that products with the lowest added-values (RAT or VR) have the highest participation in the REFINERY A production profile, while REFINERY D and REFINERY C (the refineries with the highest associated pumping costs) have a production profile characterized by larger amounts of products with higher added-value (naphtha, kerosene, diesel and gasoil). For this analysis, only the plannuling model was considered, once it gives the most realistic scenario between the two models studied. Therefore, the optimization model tried to saturate REFINERY D charge, even if the pumping costs are bigger there than in REFINERY A.

Figure 4 - Comparison of optimal refinery charging loads between the two modeling approaches



Source: elaborated by the authors.

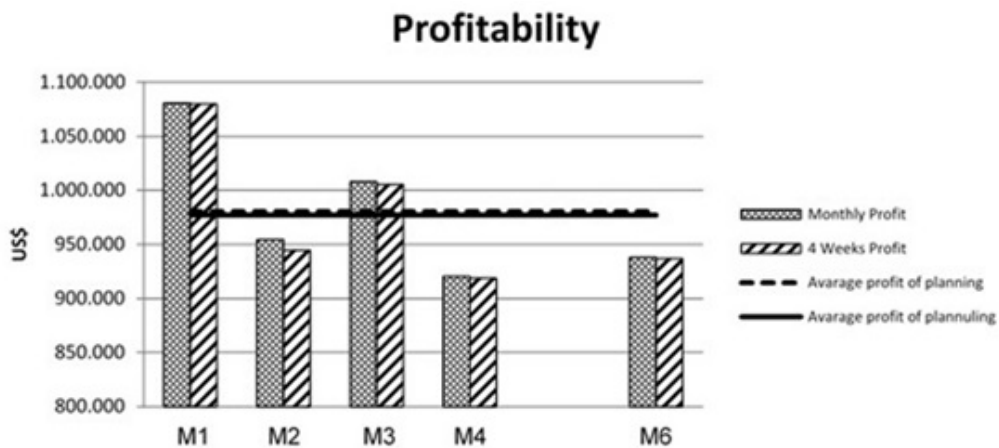
Figure 5 - Optimal production profiles according to the planning model (fictitious values).



Source: elaborated by the authors.

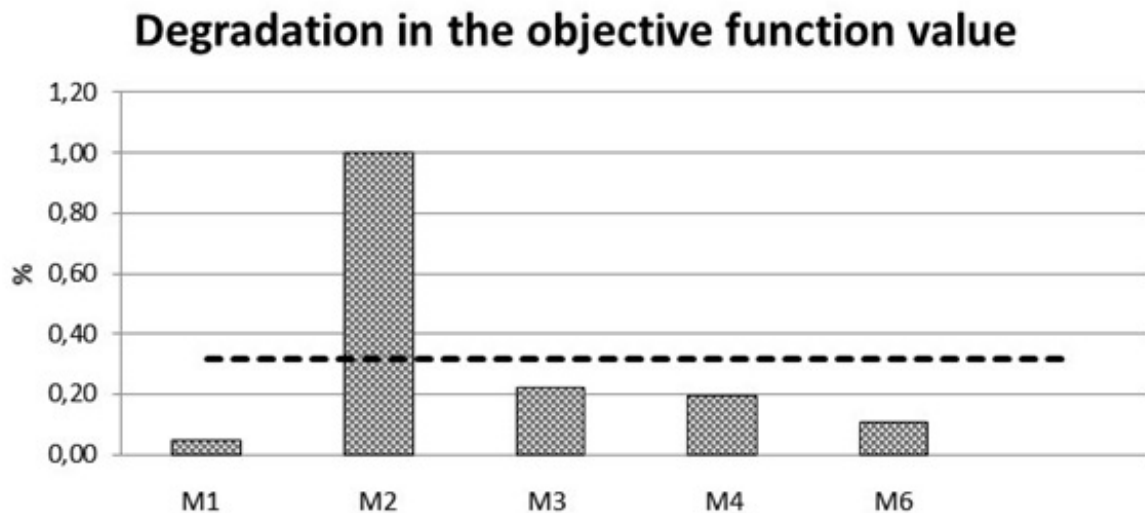
Figure 6 depicts the resulting monthly profitability associated with each modeling approach along the first semester of 2015 and their corresponding averages over this period. For each month, the corresponding gap in the objective function value (profit loss) between the planning and the planning models is depicted in Figure 7.

Figure 6 - System profitability related to both modeling approaches.



Source: elaborated by the authors.

Figure 7 - Degradation in the objective function value predicted by the one-month aggregated planning model when the system is solved regarding the weekly availability of crude oils. (-) denotes the average value.



Source: elaborated by the authors.

In terms of objective function value, the allocation suggested by the planning model was characterized by higher profits – around 0.32 % – as shown in Figure 7. As expected, the apparent degradation of the solution quality related to the planning model emerges as a primary consequence of the fact that this modeling approach is dimensionally larger (in terms of number of variables and constraints) and more constrained than the planning model. Specifically, the feasible space is reduced since we are introducing additional constraints on the crude oil availability along the month. Secondary factors that may contribute to such degradation are related to the fact that global optima are not warranted.

7 Conclusions

Here, we develop an NLP-based approach to efficiently solve an industrial-size optimization problem, the solution of which links strategic and operational decisions related to four highly integrated oil refineries. We demonstrate that the choice of the time aggregation level impacts the results of the optimization. However, depending on the problem instance considered, the planning model based on monthly time discretization can overestimate the profitability of the entire system by less than 1%, on average, in relation to its weekly discretized representation. Anyway, that efforts must be made to improve models and solution techniques to consider a lower level of time aggregation in the execution of tactical planning. This is because a finer discretization of the planning horizon helps to prevent optimization from producing an unfeasible production plan that cannot be executed at the production scheduling level.

Our work has several limitations, however. Firstly, the model proposed comprises important nonlinearities and, due to non-convexity issues, the solutions presented are potentially local optima. Secondly, since the model is a mere caricature of a complex system, the role of the human factor in interpreting the mathematical solution remains of paramount importance in this field. In particular, not all relevant oil qualities were considered in our modeling effort and some other important aspects were neglected. Here are included: the transportation times in long oil pipelines, the variations in pumping costs related to specific crude oil qualities (e.g., viscosity and density), the variations in the product yield profile in CDUs as a function of unity feed flowrate and alternative operation modes, and the physical constraints in the crude oil tank farm at each refinery and corresponding inventory costs.

Future work is planned to investigate more sophisticated solution strategies that explore the search for better local optimum points, such as the multiple-shooting strategy. With a set of more consistent results, a statistical basis can be created. Furthermore, the problem can be sophisticated and therefore be closer to the real problem, yielding an even more realistic solution.

8 References

BIEGLER, L.T.; GROSSMANN, I.E., **Retrospective on optimization**. Computers & Chemical Engineering Journal, v.28, n. 8, p.1169-1192, 2004.

CHARNES, A.; COOPER, W. W.; MELLON, B. **Blending aviation gasolines**. Econometrica, v. 22, p.135-159, 1952.

COSTA, F.L.P.; SOUSA, L.C.F.; JOLY, M.; TAKAHASHI, M.T.; MAGALHÃES, M.V.O.; MENDONÇA, P.N. **Sistema de otimização de misturas**. In: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE, 2008. Rio de Janeiro; IBP, 2008.

CUTHRELL, J.E. ; BIEGLER, L.T., **On the optimization of differential-algebraic process systems**. AIChE Journal, v.3, n.38, p.1257-1270, 1987.

DANTIZG G. B., **Programming in a linear structure**. Econometrica, v.17, p.7374, 1949.

DRUD, A.S., **A System for large scale nonlinear optimization: reference manual for conopt subroutine library**. Bagsvaerd, Denmark: ARKI Cons. & Develop. A/S, 1996.

FEITAL, T.; LIMA, P.; PINTO, J.C.; SOUZA JR. M.B.; XAVIER G.; LIMA, M.J.; JOLY, M. **Rethinking petroleum products certification**. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2013. V.2013. Article ID 594368. DOI:;<http://dx.doi.org/10.1155/2013/594368>.

GAREY, M.R. A; JOHNSON, D.S. Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness. New York, EUA: W.H. Freeman and Company, 1979.

GROSSMANN, I. E. ; BIEGLER L.T. Future perspective on optimization. Computers & Chemical Engineering Journal, v.28, p.1193-1218, 2004. Part II.

HILLIER, F.S. AND LIEBERMAN, G.J. Introduction to operations research. 8th ed., New York, EUA : The McGraw-Hill Inc., 2005.

IACHAN, R. A Brazilian experience: 40 years using operations research at Petrobras, 2009.

IBM; IBM®; ILOG®; CPLEX®. Optimization Studio, Version 12 Release 2: Information Center, IBM, 2012. Available on: <http://pic.dhe.ibm.com/infocenter/cosinfoc/v12r2/index.jsp>. Access on: 04 abr.2014.

JOLY, M. Refinery production planning and scheduling: the refining core business. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 29 n,2, p.371-384, 2012.

JOLY, M. ; PINTO, J.M. Mixed-integer programming techniques for the scheduling of fuel oil and asphalt production. Chemical Engineering Research and Design, v. 81, p. 427-447, 2003.

JOLY, M. ; PINTO, J.M., Role of mathematical modeling on the optimal control of HIV-1 pathogenesis. AIChE Journal, v.52, n.3, 856-884, 2006.

KARMAKAR, N. A new polynomial-time algorithm for linear programming, Combinatorica, v. 4, n.4, 373-395, 1984.

KELLY, J. D. Logistics: the missing link in blend scheduling optimization, 2006.

KELLY, J.D. ; FORBES, J.F. Structured approach to storage allocation for improved process Controllability. AIChE Journal, v.44, n.8, p.1832-1840, 1998.

KONDILI, E.; PANTELIDES, C.C.; SARGENT, R.W.H. A general algorithm for scheduling batch operations. Computers & Chemical Engineering Journal, v.17, n2, p. 211-227, 1993.

LASSCHUIT W. ; THIJSSSEN N. Supporting supply chain planning and scheduling decisions in the oil and chemical industry. Computers & Chemical Engineering Journal, v. 28, p. 863-870, 2004.

LEE, H.; PINTO, J.M.; GROSSMANN, I.E.; PARK, S. Mixed-integer linear programming model for refinery short-term scheduling of crude oil unloading with inventory management. Industrial & Engineering Chemistry Research, v.35, p.1630-1996, 1996.

MAGALHÃES M.V.O. Refinery scheduling. Thesis (Doctorate in Philosophy) - Department of Chemical Engineering and Chemical Technology. University of London, London, UK, 2004.

MAGALHÃES M.V.O.; MORO L.F.L.; SMANIA P.; HASSIMOTO M.K.; PINTO J.M.; ABADIA GJ. SIPP – A solution for refinery scheduling. In: NPRA COMPUTER CONFERENCE, San Antonio, Texas , 1998.

MONIZ, S.; PÓVOA, A. P. B.; SOUZA J. P. New General Discrete-Time Scheduling Model for Multipurpose Batch Plants , [S.l.:s.n.], 2013.

MORO, L.F.L.; GROSSMANN, I.E., A mixed-integer model predictive control formulation for linear systems. *Comp. Chem. Eng.* v.55, n.8, p. 1-18, 2013.

NEIRO, M.S.N.; PINTO, J.M. A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chains. *Computers & Chemical Engineering Journal*, v.28, p. 871-896, 2004.

OTTINO, J.M. Complex systems. *AIChE Journal*, v.49, n.2, p. 292-299, 2003.

PANTELIDES, C.C. Unified frameworks for optimal process planning and scheduling. In: FOUNDATIONS of computer aided process operations- FOCAPO II, Colorado, EUA, 1994.

PINTO J.M.; JOLY M.; MORO L.F.L. Planning and scheduling models for refinery operations. *Computers & Chemical Engineering Journal*, v.24, p.2259-2276, 2000.

PINTO, J. M. ; NEIRO, S. M. S. A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chains. *Computers & Chemical Engineering Journal*, v.28, p.871-896, 2004.

ROCHA, R.; GROSSMANN, I. E.; ARAGÃO M. V. S. P. Petroleum allocation at PETROBRAS: mathematical model and a solution algorithm. *Computers and Chemical Engineering Journal*, v.2, p.123-213, 2009.

SHAH, N. K.; LI Z.; IERAPETRITOU M. G. Petroleum refining operations: key Issues, advances, and opportunities, 2010.

SYMONDS, G. H. *Linear programming: the solution of refinery problems*. New York: Esso Standard Oil Company, 1955.

VARMA V.A.; REKLAITIS G.V.; BLAU G.E.; PEKNY J.F. Enterprise-wide modeling & optimization – An overview of emerging research challenges and opportunities. *Computers and Chemical Engineering Journal*, v.31, p. 692-711, 2007.

VISWANATHAN J. ; GROSSMANN I.E., A combined penalty function and outer approximation method for MINLP optimization, *Computers and Chemical Engineering Journal*, v.14, n.7, p. 769-782, 1990.

10.34033/2526-5830-v5n17-2



Artigo técnico

Avaliação de viabilidade técnica do reaproveitamento do mel residual do açúcar granulado via cristalização por resfriamento

Technical feasibility assessment of the reuse of granulated sugar molasses by cooling crystallization

Douglas Dias Barbosa^{a,b}, Silas Derenzo^{c*}

a Egresso do IPT – Mestrado Profissional em Processos Industriais

b Engenheiro Químico

c Laboratório de Processos Químicos e Tecnologia de Partículas, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

E-mail: derenzo@ipt.br

Palavras-chave:

açúcar; cristalização por resfriamento; cor ICUMSA; cristalização.

Keywords:

sugar; cooling crystallization; ICUMSA color; crystallization.

Resumo

O Brasil é um dos maiores produtores de açúcar do mundo, sendo que os tipos comercializados no mercado interno têm maior margem de lucro, apesar das limitações do reaproveitamento industrial devido aos elevados padrões de qualidade. O açúcar refinado granulado é produzido por cristalização por evaporação a vácuo, sendo que a solução saturada residual obtida durante a centrifugação do açúcar, industrialmente chamada de mel, é reutilizada em até seis processamentos. Ao final do sexto processamento o mel residual, embora de alta qualidade, é utilizado na produção de outros açúcares, pois a sua reutilização geraria um produto fora da especificação necessária para o fornecimento para a indústria farmacêutica. Este trabalho analisa a viabilidade técnica de um ciclo adicional de reaproveitamento do mel do açúcar granulado, utilizando cristalização por resfriamento com base em testes em escala de bancada, em quatro velocidades de resfriamento, buscando aumento do rendimento do processo. O açúcar obtido nos ensaios atendeu, na maioria dos casos, às especificações do açúcar granulado, não atingindo o parâmetro nos itens granulometria e, em alguns casos, a cor ICUMSA, o que pode ser atribuído às dificuldades operacionais encontradas no estudo em escala de laboratório. A granulometria e a cor são parâmetros controláveis industrialmente e podem ter sua correção com um processo de centrifugação eficiente, o que indica que a cristalização por resfriamento é viável para a obtenção do açúcar granulado. A implantação de um ciclo adicional de reaproveitamento do mel por resfriamento ao final do processo representa um aumento de 10,2% na recuperação de sacarose na produção de açúcar granulado.

Abstract

Brazil is one of the largest sugar producers in the world, and the sugars directed to domestic market are more profitable, despite the limits in industrial reuse due to the high quality standards. The granulated sugar is usually produced by vacuum evaporation crystallization, and residual molasses is reused in up to six processes. At the end of the sixth processing, despite its high quality, the residual molasses obtained after sugar centrifugation, is used in the production of other sugars because its reuse generates a product out of specification of sugar for the pharmaceutical industry. The present paper analyzes the technical feasibility of an additional reuse cycle of granulated sugar molasses by using cooling crystallization based on bench scale tests for granulated sugar production within the same specification as above, in four cooling speeds, thus seeking an increase in yield of the process. The sugar obtained in the tests met in most cases the specifications of granulated sugar. Only the particle size and, in some cases, the ICUMSA color appearance, did not meet the specifications. These facts can be attributed to the operational difficulties found in the bench scale study. Grain size and color are industrially controllable parameters and can be corrected by the application of an efficient centrifugation process, which indicates that cooling crystallization is feasible to obtain granulated sugar. The implementation of an additional cooling reuse cycle at the end of the process represents a 10.2% increase in sucrose recovery in granulated sugar production.

1 Introdução

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, sendo responsável por 28% da produção de cana-de-açúcar mundial (FAO, 2016). De acordo com a União da Indústria da Cana-de-Açúcar-UNICA (2018), na safra 2016/2017, o Brasil produziu 38,73 milhões de toneladas de açúcar e 27,25 milhões de metros cúbicos de etanol (anidro e hidratado). Hoje, o açúcar é vendido para diversos países, sendo que o Brasil domina em torno de 40% do mercado internacional e a exportação supera o consumo do mercado interno.

Considerando o baixo valor agregado do açúcar e a constante oscilação de preços no mercado internacional, faz-se necessário que as usinas sejam cada vez mais eficientes energeticamente. Além disso, o mercado interno brasileiro tem elevado seus parâmetros de qualidade. Neste cenário, a etapa de cristalização torna-se de importância chave, tanto para a eficiência energética quanto para a qualidade do açúcar.

A cristalização afeta diretamente a pureza (GIULIETTI et al, 2001; MYERSON et al, 2002), além de influir diretamente nas propriedades de empedramento, retenção demasiada de umidade e altas perdas devido à formação de pó (NYLVT et al, 2001).

Os principais tipos de açúcares comercializados no Brasil são o cristal, o cristal VHP, açúcar líquido, refinado amorfo e granulado. Estes últimos são utilizados tanto para consumo direto quanto para aplicações industriais. Esses dois produtos são os únicos do mercado que contam com a licença

específica para o uso em indústrias farmacêuticas. No caso do açúcar granulado para aplicação farmacêutica, seu valor comercial pode ser até três vezes o preço do açúcar VHP.

Nesta indústria o açúcar granulado é aplicado na produção de xaropes, remédios solúveis e efervescentes e em diversas outras aplicações. De acordo com a Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA (2012), a aplicação da sacarose na preparação de xaropes possibilita a correção de sabores desagradáveis de formulações. A sacarose também é aplicada na fabricação de comprimidos como substância auxiliar, seja no revestimento de comprimidos ou como agente diluente. (VAN DER POEL; SCHIWECK; SCHWARTZ, 1998).

Na produção de açúcar granulado, as especificações de qualidade do produto são bastante restritivas, tornando o processo de produção destes açúcares menos eficiente do que outras produções do mercado sucroalcooleiro.

Na instalação utilizada como referência neste trabalho, o mel proveniente da etapa de centrifugação do açúcar granulado obtido por evaporação a vácuo é reaproveitado por até seis recirculações em novas cristalizações de açúcar granulado, e, com base em análises dos parâmetros do açúcar produzido, sua recirculação é interrompida e o mel residual é destinado para outro processo industrial.

A aplicação deste mel atualmente é sua dosagem durante o tratamento de caldo da produção de açúcar cristal, que se mostra uma opção pouco rentável, visto que o mel possui propriedades que possibilitariam a obtenção de um açúcar de maior valor agregado, e retorna à produção de um açúcar de menor valor comercial e em uma etapa em que a concentração de sacarose é baixa, passando por um longo processo de tratamento para retornar aos mesmos níveis de pureza. O reaproveitamento deste mel para a fabricação de etanol não se mostra viável, pois se trata de um mel de alta concentração de sacarose e baixa quantidade de nutrientes, o que exigiria etapas adicionais de tratamento que inviabilizariam esta aplicação.

Tais limitações impedem a reutilização do mel proveniente da centrifugação da massa do processo de cristalização por evaporação a vácuo até o esgotamento máximo possível, da sacarose, restando deste processo um subproduto com características ainda nobres, de alto teor de sólidos dissolvidos (brix), alta pureza e cor ICUMSA relativamente baixa.

Desta maneira, uma avaliação da literatura mostrou que a cristalização por resfriamento poderia ser uma alternativa aplicável a estas condições de processo: A cristalização de açúcar por resfriamento pode gerar um açúcar próximo das condições comerciais, mesmo partindo de soluções impuras, sem passar por etapas de tratamento do refino do açúcar (VACCARI; MANTOVANI, 1996).

O processo de cristalização por resfriamento baseia-se na redução da solubilidade da sacarose em soluções aquosas com a queda da temperatura. Nos casos em que o resfriamento ocorre em pressão atmosférica, a quantidade total de sacarose presente no licor-mãe é transferida aos cristais ao longo do resfriamento. (VAN DER POEL; SCHIWECK; SCHWARTZ, 1998).

Vaccari e Mantovani (1993) demonstram que a cristalização por resfriamento, além de apresentar grande vantagem no aspecto da qualidade dos açúcares obtidos, pode ter vantagens em aspectos relacionados ao meio ambiente e economia de energia. Diferentes configurações do sistema de concentração e seguinte cristalização por resfriamento também foram avaliados por Grabowski et. al (2001), indicando caminhos para tornar o processo energeticamente viável.

Bons resultados também foram observados por Mantellato (2005), que obteve através da cristalização por resfriamento de soluções de diversas condições de processo, açúcar cristal de qualidade no nível de considerar-se a cristalização por resfriamento uma possível solução técnica de refino de açúcar.

Diante das condições do processo industrial avaliado neste estudo, em que o mel gerado está sendo subutilizado e a eficiência apontada em trabalhos anteriores quanto à cristalização por resfriamento, o presente trabalho aborda um estudo em escala de laboratório da cristalização do mel de açúcar granulado por resfriamento para avaliação da viabilidade técnica deste processo como caminho para um aproveitamento mais eficiente deste subproduto após a sexta recirculação, avaliando também as características do açúcar obtido para a verificação da possibilidade de sua comercialização.

2 Procedimento metodológico

Para a condução deste estudo, foram utilizadas amostras de mel proveniente do processo de produção de açúcar granulado tipo K. O mel gerado na etapa industrial de centrifugação nesta aplicação foi reutilizado por 6 vezes consecutivas antes de ser amostrado, condição em que as características do açúcar obtido de sua concentração e cristalização ficam fora da especificação comercial de cor ICUMSA e turbidez. Não houve qualquer tratamento dessas amostras, nem ajuste de concentração, pois o estudo tem como objetivo estudar a recuperação do açúcar do mel residual do processo anterior.

Estes méis, bem como os cristais obtidos nos ensaios de resfriamento foram caracterizados conforme recomendações das diretrizes disponíveis em CTC (2011) apud. Raizen (2016) e ICUMSA (2011) apud. Raizen (2016). A caracterização do mel do açúcar granulado realizada inicialmente contempla os parâmetros a seguir, com suas respectivas unidades de medida: Pol (°Z), Cor (UI), Açúcares Redutores (%) e Brix (%).

Os experimentos foram realizados utilizando-se de um sistema com agitação e temperatura controladas. O banho termostático com circulação do fabricante Tecnal, modelo TE-054 MAG, com capacidade de operação em temperatura ambiente + 7 °C a 100 °C equipado com controlador de temperatura com precisão de $\pm 0,1$ °C foi a fonte de aquecimento e resfriamento do sistema. O agitador Tecnal TE-139 utilizado pode operar com rotação de 200 a 2600 rpm, sendo utilizado neste caso uma hélice tipo naval com 25 mm de diâmetro com 4 pás a uma rotação padrão para os experimentos de 300 rpm.

A amostra de mel de açúcar granulado teve sua massa aferida em balança analítica em béquer de 2000 ml que foi inserido no banho termostático preenchido com água limpa.

Os ensaios foram semeados pela adição de 1,0 g uma solução alcoólica contendo 0,6 g de cristais de açúcar padronizados / g de solução, com tamanho médio de 5 μm .

Ao final do ensaio, a separação foi conduzida com a utilização de um sistema de filtração a vácuo. Foi montado um conjunto de filtração com um funil de Buchner de porcelana de 120 mm de diâmetro acoplado a um kitassato de 2000 ml. A filtração foi realizada com a utilização de papel filtro quantitativo da marca Nalgon, referência 3351, de filtração rápida, com porosidade de 7,5 μm . Utilizou-se este conjunto acoplado a uma bomba de vácuo Tecnal TE-0581 com capacidade de operação em vácuo de 0 a ± 700 mmHg em relação a pressão atmosférica, como indicado no sistema na **Figura 1**. O vácuo utilizado durante a filtração foi de cerca de 600 mmHg. Após a filtração foi realizada a lavagem dos cristais com cerca de 300 ml de etanol anidro 99,5 INPM no próprio no funil de Buchner.

Figura 1 - Sistema de filtração à vácuo utilizado para separação dos cristais



Fonte: elaborado pelo autor

Uma amostra de mel coletada diretamente da instalação industrial após o sexto ciclo de reaproveitamento, foi pesada na quantidade desejada, próxima de 1000 g para cada ensaio, e foi aquecida no banho termostático TE-054 até atingir a temperatura de 90 °C. Como a solução de mel apresenta alto teor de sacarose pode ocorrer a cristalização parcial do açúcar durante o transporte ao laboratório, gerando quantidade de sólidos relevante. Assim foi necessário manter-se a temperatura por tempo suficiente para garantir a dissolução dos cristais eventualmente formados devido à queda de temperatura. Todos os ensaios tiveram a temperatura inicial bem acima da saturação, ajustada para 90 °C e as amostras resfriadas até a temperatura final de 25 °C.

Foram utilizadas três amostras com concentrações adotadas para o estudo de 75,5; 76,7 e 77,4 °Brix, chamadas de amostras A, B e C, respectivamente, dentro da faixa normalmente encontrada nesta corrente, entre 75 e 78 °Brix. Os tempos de batelada adotados consideraram as velocidades lineares de resfriamento de 20, 15, 10 e 5 °C/h, até a temperatura final de cristalização de 25 °C. Foram realizados 12 ensaios de cristalização por resfriamento.

Após o início do resfriamento, acompanhou-se a temperatura da amostra de forma a identificar o ponto de adição de sementes, sendo realizada a adição em condições que a supersaturação da solução fosse de 1,1 a 1,2, equivalente a algo em torno de 10 °C abaixo da temperatura de saturação. As condições experimentais estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Condições experimentais dos ensaios de cristalização por resfriamento do mel de açúcar granulado.

Ensaio	Amostra	Brix solução (%)	Vel Linear de resfriamento (°C/h)	Tempo de batelada (min)	T. sat. (°C)	T. sementeira (°C)	T. final resfriamento (°C)	Massa de sol. Inicial (g)
1	A	77,4	5,0	780,0	74,1	65,0	25,0	1000,8
2	A	77,4	10,0	390,0	74,1	65,0	25,0	1002,1
3	A	77,4	15,0	260,0	74,1	65,0	25,0	1001,5
4	A	77,4	20,0	195,0	74,1	65,0	25,0	1003,2
5	B	75,5	5,0	780,0	65,6	57,0	25,0	1000,2
6	B	75,5	10,0	390,0	65,6	57,0	25,0	1008,4
7	B	75,5	15,0	260,0	65,6	57,0	25,0	1001,1
8	B	75,5	20,0	195,0	65,6	57,0	25,0	1003,2
9	C	76,7	5,0	780,0	71,0	62,0	25,0	1002,1
10	C	76,7	10,0	390,0	71,0	62,0	25,0	1004,0
11	C	76,7	15,0	260,0	71,0	62,0	25,0	1002,8
12	C	76,7	20,0	195,0	71,0	62,0	25,0	1000,6

Fonte: elaborado pelo autor

No processo industrial o açúcar é classificado em peneiras de abertura de 2,46 mm e 0,83mm para adequação da granulometria à especificação comercial. Para determinar a granulometria do açúcar cristalizado no presente trabalho e o granulado tipo K, foi utilizado um conjunto de peneiras de abertura padrão ABNT/ASTM números: 18, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 60, 70 e fundo, após uma separação prévia do material empedrado/aglomerado realizada em peneira ABNT/ASTM nº 16.

3 Resultados e discussão

Para avaliar o grau de recuperação de açúcar por resfriamento caracterizaram-se amostras dos méis residuais utilizados. Os produtos de cristalização foram caracterizados para verificar a sua qualidade.

3.1 Caracterização do mel residual de açúcar granulado

Foram retiradas em datas diferentes três amostras de méis de açúcar granulado de produção, utilizados nos ensaios de cristalização em diferentes condições. O resultado da caracterização das amostras retiradas da produção está apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Caracterização das amostras de mel do açúcar granulado após a sexta recirculação

Amostra	Brix (%)	Pol. (°Z)	Pureza (*) (%)	Cor (UI)	Açúcares Redutores (%)
1	77,40	76,85	99,29	227	0,68
2	75,50	75,50	99,58	258	0,44
3	76,50	75,76	99,77	270	0,51

Fonte: elaborado pelo autor

(*) A Pureza foi determinada pela determinada pela relação entre Pol e Brix.

3.2 Ensaios de cristalização por resfriamento

O rendimento dos ensaios de cristalização foi calculado pela Equação 1, considerando a massa inicial de sacarose existente no mel utilizado, e comparando com a massa de sacarose final obtida nos cristais secos.

$$n = \left(\frac{m_c \cdot Pol_a}{m_m \cdot Pol_m} \right) \quad (3)$$

Onde:

n = rendimento em %

m_c = massa inicial de sacarose em solução em g

Pol_a = Polarização do açúcar em °Z

m_m = massa inicial de mel em g

Pol_m = Polarização do mel em °Z

Os resultados obtidos para cada ensaio estão indicados na Tabela 3.

Tabela 3 – Massas obtidas nos ensaios de cristalização e rendimento

Ensaio	Amostra	Massa inicial de mel, m_m (g)	Pol do mel, Pol_m (°Z)	Massa inicial de sacarose em sol., m_s (g)	Massa de cristais secos, m_c (g)	Pol do açúcar, Pol_a (°Z)	Rendimento, n (%)
1	A	1000,8	76,8	769,1	361,1	99,9	46,9
2	A	1002,1	76,8	770,1	346,7	99,8	44,9
3	A	1001,5	76,8	769,6	378,7	99,8	49,1
4	A	1003,2	76,8	771,0	361,9	99,8	46,9
5	B	1000,2	75,2	752,0	271,2	99,9	36,0
6	B	1008,4	75,2	758,1	300,9	99,8	39,6
7	B	1001,1	75,2	752,6	294,6	99,9	39,1
8	B	1003,2	75,2	754,2	296,0	99,9	39,2
9	C	1002,1	75,8	759,2	328,1	99,8	43,2
10	C	1004,0	75,8	760,6	337,3	99,8	44,3
11	C	1002,8	75,8	759,7	348,4	99,7	45,7
12	C	1000,6	75,8	758,0	331,0	99,8	43,6
Média:							43,2
Desvio padrão:							3,9

Fonte: elaborado pelo autor

Por se tratar de um processo controlado em bancada, as perdas por degradação de sacarose não são consideradas significativas em função de o processo ser por resfriamento controlado. O rendimento obtido é próximo ao que se obtém industrialmente por evaporação na produção do açúcar granulado, da ordem de 40 %.

Comparando-se os rendimentos obtidos em função do Brix e do Pol, verifica-se que os resultados provenientes das amostras A e C são próximos, enquanto o rendimento das amostras B resultou em um rendimento menor do que os demais em todas as condições de ensaio. Teoricamente isso não deveria ser esperado, uma vez que, essa solução seria a mais pura. Esses ensaios foram semeados em uma temperatura muito inferior aos demais, ou seja, a viscosidade do mel era maior, reduzindo a mobilidade das espécies, o que pode ter interferido no processo de crescimento, e gerado uma quantidade de cristais muito finos que podem ter passado pelo filtro, ou aderido a ele.

3.3 Caracterização do açúcar

O açúcar obtido pelo processo de cristalização por resfriamento, após processo de secagem em temperatura ambiente, foi submetido às análises físico-químicas para comparação com os parâmetros de qualidade do açúcar granulado tipo K. Os resultados das análises e a comparação com o padrão estão na Tabela 4 e são discutidos a seguir.

Tabela 4 – Caracterização do açúcar obtido por resfriamento do mel de açúcar granulado

Parâmetro	Especific.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Polarização (Z°)	≥99,8	99,9	99,8	99,8	99,8	99,9	99,8	99,9	99,9	99,8	99,8	99,7	99,8
Umidade H ₂ O (%op/p)	≤0,04	0,03	0,04	0,02	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,02	0,02	0,04	99,92
Cinzas onduimétricas (%op/p)	≤0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Sulfito Residual SO ₂ (mg/kg)	≤2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Turbidez (NTU)	≤ 2	1,2	1,0	1,1	1,2	1,6	1,5	1,5	1,5	1,8	1,6	1,6	1,7
Cor ICUMSA 420 nm (UI)	≤ 20	22	25	14	16	15	19	18	12	18	23	31	19
Resíduo Insolúvel R.I. (Nível)	≤ 3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3
Açúcar Redutor (%op/p)	≤0,03	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,01
Pontos pretos (pontos/kg)	≤10	5	6	2	3	7	6	6	3	8	6	5	5
Partículas Magnetizáveis (mg/kg)	≤1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Granulometria T.M. (mm)	0,35	0,42	0,46	0,45	0,42	0,51	0,47	0,51	0,45	0,50	0,50	0,48	0,45
CV %	≤40	48,52	47,11	46,31	48,52	42,89	46,84	46,84	43,75	44,77	45,04	44,89	44,82

Fonte: elaborado pelo autor

Nota: Os valores fora de especificação estão destacados em negrito.

3.3.1 Pol

Das amostras obtidas nos experimentos realizados, apenas o ensaio 11 teve o parâmetro de polarização fora de especificação. Como no restante dos ensaios as amostras estavam dentro da especificação, considera-se que este desvio pode estar atrelado a um erro de diluição, uma vez que a análise de polarização para uma amostra de açúcar sólido em sacarímetro é necessário dissolvê-la.

3.3.2 Teor de umidade

O teor de umidade de todas as amostras encontra-se dentro da especificação, indicando que o procedimento utilizado para a secagem (em condições ambientes) foi eficiente para a remoção da água dos cristais. Em uma aplicação industrial, espera-se que com o processo de separação por centrifugação, lavagem com água quente e secagem em equipamento com ventilação forçada, os resultados tendam a ser mais constantes.

3.3.3 Turbidez

Produções que não atinjam a especificação de turbidez podem ainda ser comercializadas para clientes com menores exigências de qualidade, visto que esta característica do açúcar, desde que pouco acima da especificação, impacta somente na turbidez de caldas que venham a ser preparadas com este açúcar.

Os resultados para turbidez indicam a eficiência da técnica de cristalização por resfriamento para retirada de impurezas. O mel utilizado para estes ensaios geralmente deixa de ser aplicado após a sexta recirculação na produção de açúcar granulado, em função do parâmetro de turbidez do açúcar obtido, e, partindo da mesma situação, a cristalização por resfriamento mostrou-se mais eficiente para a retirada de impurezas que pudessem causar turbidez no açúcar.

3.3.4 Redução de cor

A produção de açúcar via cristalização por resfriamento teve sua eficiência na redução de cor comprovada pelos resultados obtidos nos ensaios apresentados. De maneira geral, apesar de alguns desvios em relação à especificação do açúcar granulado tipo K comercial, o percentual de redução de cor foi satisfatório em relação a outros estudos de cristalização por resfriamento conforme demonstrado por Vaccari e Mantovani (1996) e Mantellato (2005).

A avaliação de redução de cor do açúcar relativa à velocidade de resfriamento está apresentada Tabela 5. Nela pode-se observar que todas as velocidades de resfriamento utilizadas permitiram

eficiências de remoção elevadas e próximas, de modo que, este parâmetro não teve influência direta na eficiência do processo de remoção de cor.

Tabela 5 – Redução de cor x Velocidade de resfriamento

Vel. Resf. (°C/h)	Nº Amostra	Cor Mel (UI)	Cor Açúcar (UI)	Redução de cor (%)
5	1	227	22	90,3
5	5	258	15	94,2
5	9	270	18	93,3
Média p/ 5°C/h				92,6
10	2	227	25	89,0
10	5	258	19	92,6
10	10	270	23	91,5
Média p/ 10°C/h				91,0
15	3	227	14	93,8
15	7	258	18	93,0
15	11	270	31	88,5
Média p/ 15°C/h				91,8
29	4	227	16	92,9
20	8	258	12	95,3
20	12	270	19	93,0
Média p/ 20°C/h				93,7
Média geral dos ensaios				92,3
Desvio padrão geral				2,1

Fonte: elaborado pelo autor

Conforme mostrado na Tabela 6, também não foi encontrada uma relação direta entre a cor inicial do mel e a redução de cor do açúcar.

Tabela 6 – Redução média de cor x cor do mel de entrada

	Cor do mel (UI)	Média da cor do açúcar (UI)	Redução de cor (%)
A	227,0	19,3	91,5
B	258,0	16,0	93,8
C	270,0	22,7	91,6

Fonte: elaborado pelo autor

Como não foi encontrado nenhum indicador relevante sobre a relação entre a cor de entrada do processo ou da velocidade de resfriamento com a redução de cor do açúcar final, avalia-se a possibilidade de desvios somente nos casos específicos em que a cor ficou fora da especificação. Verifica-se que dos 12 ensaios apenas 4 ficaram fora da especificação, sendo que nenhum deles ocorreu com a maior velocidade de resfriamento, condição mais favorável à formação de inclusão fluida. Portanto, pode-se inferir que a cor, muito provavelmente deve estar na superfície dos cristais, em função de uma lavagem ineficiente. A separação por filtração pode também ser responsável pela formação de aglomerados de cristais, dado o tempo elevado necessário para o processamento.

Um fator importante para a redução de cor é o processo de lavagem dos cristais, que industrialmente é realizado com a injeção de vapor ou água quente em uma camada fina de açúcar durante o processo de centrifugação, que consegue reduzir em grande quantidade os resíduos de mel da superfície dos cristais, reduzindo a cor do açúcar final.

No caso deste estudo, a lavagem dos cristais foi realizada durante a filtração a vácuo, que é um processo muito lento, em função principalmente da viscosidade do mel residual que, embora tivesse um teor de sólidos reduzido, se encontrava frio. Além disso, a lavagem com álcool provavelmente não foi suficientemente eficiente para a remoção da cor. Isso pode ter ocorrido em diferentes ensaios, mas é bem conhecido o fato de que a presença de mel na superfície dos cristais impacta diretamente na cor do açúcar. Os resultados positivos nas análises do parâmetro de turbidez indicam que os componentes que agregam cor ao açúcar são solúveis em água, visto que o açúcar é diluído para esta análise, e todos os ensaios demonstraram turbidez dentro da especificação.

3.3.4 Granulometria

Os resultados de granulometria, seja para tamanho médio ou para coeficiente de variação, não atenderam aos padrões especificados para a comercialização de açúcar granulado. A dispersão de tamanho de cristais obtidos deve-se em grande parte à aglomeração deste açúcar, em função principalmente de duas questões principais. A primeira delas ocorreu por conta das condições operacionais, em que o açúcar foi separado por filtração a vácuo, e não por centrifugação, como é o comum na indústria. Nestas condições, tanto a filtração quanto a lavagem dos cristais é lenta e menos eficiente, fatores que colaboram para a formação aglomeração dos cristais de açúcar, causando seu empedramento.

A segunda questão é inerente ao tamanho dos cristais formados. Como se pode verificar nos resultados, que apesar do tamanho médio estar acima da especificação, há uma quantidade considerável de cristais de tamanho abaixo de 0,23 mm, que indicam a presença de finos de açúcar, o que permite levantar a hipótese da possibilidade de que as partículas grandes são consequência da aglomeração de cristais pequenos em partículas maiores. Este aspecto pode explicar também a variação dos tamanhos de partícula encontrados.

A distribuição de frequência para cada faixa de tamanho de cristais não é um parâmetro relevante para a comercialização de açúcar, e, portanto, não há uma especificação da curva de distribuição do tamanho dos cristais deste açúcar. Para fins de comparação, foram coletadas 5 amostras de períodos diferentes de produção com os parâmetros de AM e CV dentro da especificação e realizada a distribuição granulométrica detalhada. Os dados de distribuição de frequência de cada ensaio e do modelo preparado para este estudo encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 – Distribuição das frequências acumuladas dos ensaios com resfriamento do mel de açúcar granulado

Cód. ABNT	Tamanho da abertura (mm)	Mod.	Ensaio											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
18	1,000	0,01	0,32	0,37	0,31	0,12	0,50	0,12	0,40	0,25	0,29	0,22	0,35	0,42
20	0,840	0,31	7,14	6,49	6,53	3,05	9,44	8,44	9,41	4,73	8,74	7,31	7,39	5,57
25	0,710	3,49	18,38	16,18	15,26	12,72	22,79	17,66	23,72	11,85	22,65	22,75	18,78	13,30
30	0,600	8,64	24,82	23,06	21,30	20,16	32,46	25,17	35,02	21,88	31,32	31,99	25,20	21,72
35	0,500	33,17	38,46	34,07	34,72	29,47	42,78	36,63	44,27	34,42	43,30	42,03	38,65	33,82
40	0,425	60,86	54,77	51,87	51,12	42,69	60,33	51,84	60,54	55,86	61,39	59,03	57,37	51,30
45	0,350	77,20	66,77	61,04	61,14	50,71	70,87	62,05	71,82	63,52	68,51	68,40	69,11	63,73
60	0,250	95,66	80,79	77,73	79,47	72,81	55,30	81,70	84,25	79,64	81,94	81,65	80,73	80,17
70	0,210	97,65	92,36	87,18	88,60	84,75	94,43	88,76	88,47	88,89	90,37	87,89	87,74	89,14
Fundo	0,000	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: elaborado pelo autor

É relevante ainda neste aspecto que, nas condições deste trabalho, o resfriamento adotado foi lento, tendo todos os ciclos o mínimo de 3 horas, diferente do ciclo de produção do açúcar granulado K, em que as bateladas são conduzidas de maneira rápida para evitar o crescimento demasiado dos cristais. Assim, nas condições do experimento, houve mais tempo para o crescimento ou a aglomeração dos cristais nestes ensaios do que ocorre na produção industrial.

Alterar as condições de velocidade de resfriamento neste caso não foi uma opção viável, visto que com o resfriamento rápido, supersaturação seria muito alta, em um meio com alto grau de saturação e pureza de sacarose, cuja viscosidade elevada aumenta com o resfriamento. Com isso, poderia ocorrer a oclusão de mel ou sólidos em suspensão dentro do cristal ou nos aglomerados de cristais, prejudicando outro parâmetro relevante para este açúcar, que é a cor ICUMSA. (VAN HOOK, 1981 apud. MANTELATTO, 2005)

A avaliação dos parâmetros de granulometria obtidos neste estudo é relevante, pois indica que há certa proximidade do açúcar produzido via cristalização por resfriamento com o obtido industrialmente. Entretanto, a correlação entre a granulometria dos cristais de sacarose formados em testes de escala de laboratório não apresenta garantias quando comparada com a produção industrial.

A partir destes dados, verifica-se que, para todas as velocidades de resfriamento estudadas, o açúcar obtido apresentou maior quantidade de partículas acima de 0,600 mm do que o modelo desejado, e menor quantidade de partículas de pequena granulometria. O impacto destas diferenças ficou claro com os resultados de tamanho médio e principalmente com o coeficiente de variação, fora de especificação para todos os ensaios.

A diferença entre as velocidades de resfriamento não representou mudança significativa na curva de frequência, mas pode-se observar que os resultados para a velocidade de 20°C/h tem maior similaridade entre os resultados dos ensaios, e ainda apresentou resultados dentro da especificação de tamanho médio conforme apresentado na Tabela 5.

Avaliando ainda os dados de distribuição de frequência de tamanhos, pode-se observar que, reduzindo a quantidade de partículas grandes, a distribuição estaria próxima do modelo esperado para o açúcar granulado. Desta forma, uma aplicação industrial com um processo de centrifugação apropriado, evitaria a formação de aglomerados e pedras de açúcar conforme ocorrido no procedimento operacional adotado neste estudo, e o açúcar obtido por cristalização por resfriamento poderia atender a especificação de granulometria para a comercialização.

3.3.5 Impurezas

A partir dos resultados da caracterização do açúcar, observa-se que para as impurezas que são analisadas no açúcar, ou seja, cinzas condutimétricas, sulfito residual, resíduo insolúvel, pontos pretos e partículas magnéticas, não houve nenhuma análise fora de especificação. Isto ocorre por conta do pré-tratamento dado no caldo original a ser utilizado na produção do açúcar granuladorefinado, que garante que todas estas impurezas sejam removidas antes das etapas de concentração e cristalização.

3.4 Avaliação da recuperação de sacarose considerando um ciclo adicional por resfriamento

Com base nos dados obtidos nos ensaios de resfriamento, avaliou-se a eficiência do processo de fabricação do açúcar granulado com a inclusão de uma etapa adicional de recuperação do mel por resfriamento ao final do ciclo. Para esta estimativa, adotou-se como base uma batelada inicial de 1000 kg, com os rendimentos de cada etapa baseados nos resultados avaliados da operação industrial de cristalização por evaporação. Os resultados encontram-se na Tabela 8.

A etapa nº 07 foi adicionada considerando os resultados previamente apresentados neste trabalho. Na etapa nº 01 e para cada etapa da cristalização por evaporação é adicionada calda tratada para complementar o nível do cristizador, sendo que para esta estimativa, considera-se que já foi concentrada para 78,5 °Brix com pol 78,1 °Z. Para o cálculo, considerou-se a pol padrão para 99,9 °Brix.

Tabela 8 – Balanço de massa – Recuperação de sacarose adicionando um ciclo de recuperação por cristalização por resfriamento

	Alimentação, calda polida (kg)	Mel recirculado (kg)	Açúcar seco prod. (kg)	Mel centrifugado (kg)	Brix do mel (°Brix)	Pureza (% m/m)	Recuperação acumulada de sacarose (% m/m)
1	1000	0,0	328,3	568,4	79,1	99,6	42,3
2	350	568,4	295,7	542,34	78,6	99,4	59,6
3	350	542,4	286,5	530,2	77,9	99,0	69,0
4	350	530,2	290,6	509,9	77,4	98,8	75,5
5	350	510,0	263,3	525,3	76,9	98,6	78,6
6	350	525,3	262,6	541,6	76,5	98,3	80,9
7 (Resf)	0	541,6	176,0	312,3	75,5	98,1	89,2

Fonte: elaborado pelo autor

Como o objetivo desta simulação da recuperação de sacarose é avaliar o balanço da produção de açúcar granulado, e o impacto de um ciclo adicional via cristalização por resfriamento para todos os cenários, o mel de saída não foi considerado na recuperação, visto que, ao final da nova etapa de cristalização, a destinação do mel seria a mesma que no ciclo sem resfriamento.

O mel de saída após ciclo nº 07 foi adicionado considerando os resultados previamente apresentados neste trabalho. Na etapa nº 01 e para cada etapa da cristalização por evaporação é adicionada calda tratada para complementar o nível do cristizador e auxiliar no melhor controle dos parâmetros de operação.

De acordo com os dados obtidos, seria possível um incremento de 10,2% na recuperação de sacarose na aplicação da cristalização por resfriamento considerando a etapa adicional de cristalização por resfriamento, visto que, a maior recuperação relativa da sacarose ocorreria exatamente nessa etapa. Considerando que o mel resultante da etapa de cristalização por resfriamento ainda poderia ser destinado à diluição de xarope, como já é realizado hoje no último ciclo de reaproveitamento, este aumento na produção de açúcar granulado geraria em torno de 10,1% de aumento na receita desta operação.

4 Conclusões

Este artigo avaliou as condições operacionais de reaproveitamento do mel residual obtido na fabricação de açúcar granulado a partir da cristalização por resfriamento. Sob as condições testadas pode-se comprovar que a cristalização por resfriamento é efetiva na remoção de impurezas e redução de cor na produção de açúcar, atingindo sob esses aspectos os objetivos de obtenção de açúcar granulado dentro das condições comerciais.

Houve uma redução de cor entre 88 e 95% do açúcar utilizando a cristalização por resfriamento em comparação com a cor do mel utilizado, bem como a obtenção de açúcar dentro da especificação relativamente ao parâmetro de sua turbidez em todos os ensaios. A redução de cor, mesmo com algumas variações, ficou mais próxima de atender as especificações em todos os ensaios. Para uma aplicação industrial, recomenda-se a utilização de velocidades de resfriamento de 20°C/h.

Alguns dos desvios da especificação de cor ICUMSA podem ser creditados principalmente ao processo de lavagem dos cristais utilizado neste estudo, realizada com álcool anidro para facilitar a remoção de água. A lavagem com etanol não retira as impurezas hidrossolúveis presentes na superfície do cristal e, também, pelo empacotamento dos cristais na torta, o solvente de lavagem utilizado para auxiliar a secagem dos cristais pode não ter atingido a superfície de todos eles, deixando resíduo de mel sobre estes durante a secagem. Mesmo com estes desvios, as condições adotadas para este estudo permitiram o aproveitamento do mel já recirculado por até seis vezes na produção desse tipo de açúcar, com 260 UI como cor de entrada gerando, na maioria dos casos, um açúcar dentro da especificação, com cor abaixo de 20 UI.

Em um processo industrial, os cristais são separados por centrifugação e lavados com água quente, com maior eficiência na remoção de possíveis resíduos de mel na superfície dos cristais, fator que indica que uma aplicação industrial pode tolerar uma cor de entrada ainda mais alta que a definida para o processo em bancada.

As condições adotadas para este estudo não atenderam à especificação do produto em relação à granulometria do açúcar obtido. Isto deve-se principalmente ao processo de separação dos cristais formados por resfriamento da massa de açúcar, que foi realizado por filtração a vácuo e lavagem com etanol anidro. Este processo, por ser muito lento e ineficiente, devido à alta viscosidade do meio em baixa temperatura, levar à aglomeração de cristais e conseqüente tamanho de cristais maior do que a especificação, além de ter impacto também na cor do açúcar. Também a lavagem com etanol pode ter promovido a formação de pontes entre os cristais, aglomerando-os. Este desvio, entretanto, não compromete a aplicação da técnica de cristalização por resfriamento, visto que, a reprodutividade dos resultados de granulometria para escala industrial pode ter influência do dimensionamento de equipamentos, presença de impurezas sólidas e outras condições de processo, que não fazem parte do escopo deste estudo.

Para a granulometria, o tempo de batelada também se mostrou relevante, visto que todos os ensaios tiveram no mínimo 3 horas de duração, enquanto uma batelada de cristalização do açúcar granulado por evaporação dura no máximo 1,5 horas, o que indica que houve maior tempo disponível para

crescimento dos cristais na produção em escala laboratorial. Este parâmetro deveria ser avaliado numa possível unidade produtiva por resfriamento, onde poderiam ser testadas também velocidades de resfriamento maiores, levando em conta que possíveis prejuízos para a cor do açúcar seriam compensados por um processo de centrifugação eficiente.

Desta maneira, avalia-se que o maior impacto neste estudo foi o processo de separação utilizado no laboratório, que ocasionou maior parte dos desvios da especificação dos produtos. Este processo deve ser reavaliado para futuras aplicações desta técnica.

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que o reaproveitamento do mel de açúcar granulado via cristalização por resfriamento para produção de açúcar granulado tipo K é viável tecnicamente, desde que as condições de separação dos cristais e do mel sejam ajustadas para as condições listadas. A aplicação mostrou-se eficiente no aumento da recuperação de sacarose nesta etapa de produção.

Num futuro trabalho, poderia ser aplicada a técnica de afinação nos cristais obtidos, que consiste em adicionar os cristais de açúcar obtidos em uma solução de sacarose de alta pureza com concentração de 65 °Brix, com o objetivo de remover o mel externamente aderido à camada externa dos cristais, que acarretaria em melhor avaliação dos parâmetros de cor e granulometria. A variação no tamanho médio e quantidade de sementes utilizada poderiam ser avaliadas em outro estudo para verificar o impacto na padronização do tamanho de cristais obtido.

5 Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (Brasil). Formulário nacional da farmacopeia brasileira. Brasília-D.F.: ANVISA, 2012.225 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (United Nations) . *Crops Production - Sugarcane*: FAOSTAT, 2016. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/?#search/Sugar%20cane>. Acesso em: 27 maio 2018.

GRABOWSKI, M. et al. *Minimum energy consumption in sugar production by cooling crystallization of concentrated raw juice*. Applied Thermal Engineering, Warsaw, v. 21, p.1319-1329, 2001.

GIULIETTI, M.; SECKLER, M.M; DERENZO, S.; RÉ, M.I; CEKINSKI, E. *Industrial crystallization and precipitation from solutions: state of the technique*. Brazilian Journal Of Chemical Engineering, São Paulo, v. 18, n. 4, p.423-440, dez. 2001.

MANTELATTO, P. E. *Estudo do processo de cristalização de soluções impuras de sacarose de cana-de-açúcar por resfriamento*. 235 f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

MYERSON, A. S. *Handbook of industrial crystallization*. 2. ed. Illinois: Butterworth Heinemann, 2002. 313 p.

NÝLVT, J.; HOSTOMSKÝ, J.; GIULIETTI, M.; *Cristalização*. São Carlos: UFSCAR/IPT, 2001. 160 p.

RAÍZEN. LA.0011 - *análise de açúcar sólido*. Piracicaba, 2016. Documento interno.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR . *Moagem de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol - safra 2016/2017*. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=32&tipoHistorico=4&tacao=visualizar&idTabela=1984&safra=2016%2F2017&estado=RS%2CCS%20CPR%20CSP%20CRJ%20CMG%20CES%20CMS%20%20CDM%20CAC%20CRR>. Acesso em: 27 maio 2018.

VACCARI G. ; MANTOVANI, G., *An Innovative and environmentally compatible process for beet-sugar production: cooling crystallization of raw juice*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM RESEARCH AND DEVELOPMENT IN BEET-SUGAR INDUSTRY, 1993, Proceedings [...]. France: Association of Andrew Van Hook, 1993. p.57-64.

VACCARI, G.; MANTOVANI, G. *Potential application of cooling crystallization to cane sugar refining*. Sugar y Azucar, Italy, v. 91, n.1, p. 33-40, 1996.

VAN DER POEL, P.H., SCHIWECK, H., SCHWARTZ, T. *Sugar technology: beet and cane sugar manufacture*. Berlin, 1998.

10.34033/2526-5830-v5n17-3



Artigo técnico

Oxi-combustão - uma alternativa para a indústria

*Oxi-combustion - an alternative for the industry*Renato Vergnhanini Filho^{a,*}

^a Laboratório de Bioenergia e Eficiência Energética (LBE), Unidade de Negócios: Energia, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo-SP, Brasil.

E-mail: vergnhan@ipt.br

Palavras-chave:

oxi-combustão; oxi-combustível; combustão industrial.

Keywords:

oxy-combustion, oxy-fuel, industrial combustion.

Resumo

Denomina-se oxi-combustão ao processo que utiliza um comburente com teor de oxigênio superior aos 21 % encontrados no ar atmosférico. A prática traz uma série de benefícios, sobretudo relacionados a consumo de combustível e emissão de poluentes atmosféricos, porém implica em custos adicionais, fixos e operacionais. O Laboratório de Bioenergia e Eficiência Energética do IPT atua no tema desde 1991, realizando trabalhos teóricos e experimentais, muitos em parceria ou financiados pela empresa White Martins.

Abstract

Oxy-combustion is the process in which the combustion is realized using an oxidizer with oxygen content higher than 21 % found in atmospheric air. The practice brings a series of benefits, mainly related to fuel consumption and the emission of air pollutants, but it implies in additional, fixed and operational costs. The Laboratório de Bioenergia e Eficiência Energética of the IPT has been working on the theme since 1991, carrying out theoretical and experimental works, many in partnership or financed by the company White Martins.

1 Introdução

No uso eficiente do combustível na indústria, seja do ponto de vista energético, seja no aspecto emissão de poluentes atmosféricos, surgem frequentemente novas tecnologias. Algumas, nunca passam de "boas ideias", outras vão sendo aprimoradas e barateadas até se tornarem viáveis, entre elas está a oxi-combustão.

2 Combustão industrial

A combustão é uma reação exotérmica que ocorre entre duas substâncias, denominadas respectivamente de combustível e comburente, ocorrendo, em geral, a altas temperaturas e com ritmos intensos (JEN, 2006). A maior parte dos combustíveis empregados industrialmente é composta, basicamente, de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), enxofre (S) e inorgânicos em geral, as chamadas "cinzas" (Z). São utilizados combustíveis:

- gasosos: gás liquefeito de petróleo, gás natural, gases siderúrgicos (gás de alto-forno, gás de aciaria e gás de coqueria), gás gerado na biodigestão de compostos orgânicos (biogás), gases ácidos em geral (H_2S , NH_3), gás gerado na gaseificação da biomassa, carvão, xisto etc.;
- líquidos: derivados do petróleo (óleos combustíveis, óleo diesel), da biomassa (álcool, biodiesel, alcatrão vegetal - *biofuel*), do carvão mineral e do xisto (alcatrão mineral, óleo de xisto);
- sólidos: de origem fóssil (carvão mineral, xisto, turfa, coque), biomassas (madeira, bagaço e palha de cana, resíduos florestais etc.), carvão vegetal, resíduos urbanos (lixo, lodo gerado nas estações de tratamento de esgoto).

Utiliza-se oxigênio como comburente, geralmente aquele presente na atmosfera. O Quadro 1 mostra a composição simplificada do ar atmosférico. O teor de oxigênio do agente oxidante pode ser elevado pela adição de O_2 puro, chegando ao limite da eliminação completa do N_2 . Os processos que utilizam "ar enriquecido" ou mesmo o O_2 puro como comburente são denominados de oxi-combustão (*oxy-combustion, oxy-fuel combustion*) e os queimadores, oxi-combustíveis (*oxy-fuel burners*). As formas de adição de O_2 ao processo são mostradas na Figura 1.

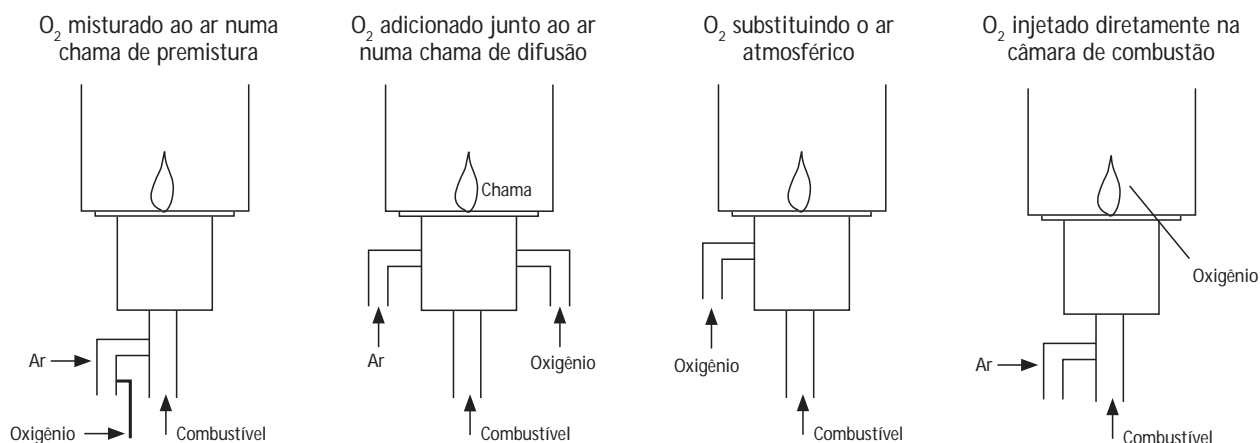
Quadro 1 - Composição do ar atmosférico

	Ar atmosférico*			
	seco		úmido*	
	volume	volume	volume	massa
Oxigênio (%)	20,9	23,2	20,6	23,0
Nitrogênio (%)	79,1	76,8	77,9	76,1

Fonte: elaborado pelo autor

* A umidade do ar depende das condições atmosféricas e pode ser determinada através de consulta à carta psicrométrica, tendo-se a pressão atmosférica e as temperaturas de bulbo seco e úmido locais; no Quadro 1 foi considerada a umidade de 0,01 kg de vapor de água por kg de ar seco, que representa o valor médio para a cidade de São Paulo.

Figura 1 - Formas de adição de oxigênio na oxi-combustão.



Fonte: Oliveira, 2012

3 Oxi-combustão

O emprego da oxi-combustão teve início nos anos cinquenta (GITMAN, 1986) e originalmente foi utilizado para se obter altas temperaturas para processo de soldagem e em propulsores de foguete. Atualmente, após muitos estudos e desenvolvimentos, e a diminuição dos custos de produção do oxigênio, em consequência do avanço das técnicas criogênicas de separação do ar, a oxi-combustão vem sendo utilizada em vários setores industriais - sobretudo nas indústrias de vidro e de materiais metálicos e não metálicos, com os benefícios apresentados a seguir.

3.1 Elevação das trocas de calor no equipamento de combustão

Na oxi-combustão, as maiores pressões parciais do oxigênio e do combustível (o nitrogênio age como diluente no processo de combustão) elevam as taxas de reação que, por sua vez, levam ao aumento significativo na temperatura da chama. Essa elevação da temperatura pode ser avaliada pelo aumento da temperatura de chama adiabática (Quadro 2).

Quadro 2 - Temperatura de chama adiabática

TEMPERATURA DE CHAMA ADIABÁTICA

A temperatura de chama adiabática (TCA) é aquela que seria atingida numa condição hipotética em que a combustão ocorresse num sistema termicamente isolado, onde toda a energia química do combustível fosse utilizada no aquecimento dos produtos de combustão.

Na realidade, as temperaturas efetivas da chama são inferiores à adiabática (que é um limite virtual), pois, a partir do momento em que a chama se estabelece, inicia-se um processo de troca de calor da chama com o meio onde ela se propaga, fazendo com que apenas parte do calor liberado seja utilizada no aquecimento dos produtos de combustão.

A TCA é calculada assumindo-se, então, que todo o calor gerado é transformado em entalpia dos produtos de combustão e será tanto maior quanto maiores forem o teor de O₂ do comburente e as temperaturas do combustível e do comburente, e menor for o excesso de ar de combustão.

Fonte: IPT, 2008

Na queima estequiométrica de metano com ar, por exemplo, a substituição do oxidante por oxigênio, mantido todos os demais parâmetros da combustão, eleva a temperatura de chama adiabática de 1950 para 2780 °C (BAUKAL, 2004), que é da ordem de grandeza do acréscimo esperado na temperatura real da chama.

O aumento da temperatura eleva as trocas de calor da chama com o seu invólucro (circuito água - vapor, no caso de uma caldeira), pois elas se dão basicamente por radiação, que é proporcional à quarta potência da temperatura (Lei de Stefan-Boltzmann).

Contribui, também, para o aumento das trocas, o aumento da emissividade dos gases na câmara de combustão - tipicamente, sobe de 0,18 para 0,34 (QI; SHAN; LI; BALETA, 2020), devido às maiores concentrações de CO₂ e H₂O dos gases. Também é um fator favorável, o maior tempo de residência dos gases nas regiões de troca de calor, devido à redução do volume de gases - fato que será comentado adiante.

3.2 Redução do consumo de combustível

Como consequência da elevação das trocas de calor, para a mesma necessidade energética, é preciso menos combustível ou, para o mesmo consumo de combustível, tem-se o aumento na potência útil e no rendimento térmico do processo, dado pela divisão da potência útil pela potência fornecida (VERGNHANINI, 2018). O aumento da eficiência energética se dá, também, pela redução da perda de energia pelos gases de combustão, ocasionada por sua redução de volume e pela menor formação de produtos da combustão incompleta do combustível - fatos que serão comentados adiante.

3.3 Melhora da ignição e da estabilidade da chama

O "enriquecimento" do ar de combustão facilita a ignição - o que é importante para combustíveis "pesados", tais como biomassas, carvões e óleos ultraviscosos, seja por reduzir a temperatura de autoignição (Quadro 3) - para o GN, por exemplo, de 630 a 750 oC para 555 a 700 oC (JENKIN, 1962), seja por aumentar a faixa de inflamabilidade (Quadro 4) da mistura. Na queima de metano com ar, por exemplo, a substituição do comburente por oxigênio pouco altera o limite inferior de inflamabilidade - passa de 5,0 para 5,1 %, porém o superior vai de 15,0 para 61,0 % (REED, 1986; COWARD AND JONES, 1952).

Como consequência do aumento de temperatura, comentado anteriormente, a velocidade da chama tende a aumentar substancialmente, tornado-a mais estável, curta e intensa. Na queima do metano, a substituição do ar por oxigênio aumenta a velocidade da chama em cerca de dez vezes (REED, 1986).

Quadro 3 - Temperatura de autoignição

TEMPERATURA DE AUTOIGNIÇÃO

A temperatura de autoignição é aquela a partir da qual uma mistura combustível - comburente, em proporções inflamáveis, entra em ignição sem a presença de chama ou faísca.

Fonte: Costa, 2008

Quadro 4 - Limites de flamabilidade

LIMITES DE FLAMABILIDADE

Existem dois valores do teor de combustível na mistura combustível-comburente que representam as concentrações limites para a propagação da chama. Esses valores extremos são chamados de limites de flamabilidade, ou limites de inflamabilidade, ou campos de flamabilidade, ou limites de explosividade, do combustível.

O limite inferior de flamabilidade caracteriza o mínimo teor de combustível na mistura para que ocorra a propagação da chama. A condição é dita super-estequiométrica ou combustão pobre ("lean combustion"). O limite superior de flamabilidade caracteriza o máximo teor de combustível na mistura em que ainda ocorre a propagação da chama. A condição é dita sub-estequiométrica ou combustão rica ("rich combustion").

Os limites de flamabilidade do combustível dependem da natureza do combustível e do comburente, do estado da mistura reagente (pressão e temperatura), além das condições de contorno e do escoamento. A presença de inertes também altera os limites.

Fonte: IPT, 2008

3.4 Redução das dimensões do equipamento de combustão e periféricos

A substituição do ar por oxigênio reduz substancialmente o volume de gases de combustão - no emprego do ar, cada volume de O₂ admitido no processo de combustão está acompanhado de 3,76 volumes de N₂ (Quadro 1). Por exemplo, utilizando o aplicativo "AComb" (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1995), verifica-se que, na queima estequiométrica de gás natural, são gerados 17,0 kg de gases de combustão por kg de GN, enquanto que, empregando-se O₂ puro, a geração de gases é de 4,7 kg por kg de GN. Na prática, emprega-se sempre uma

quantidade de comburente ligeiramente acima da estequiométrica e quando se utiliza O_2 puro é possível, geralmente, aproximar mais ainda essa quantidade da estequiométrica, ou seja, a diferença entre as vazões de gases tende a ser maior do que a apontada.

A redução do volume de gases possibilita o emprego de equipamentos de menor porte, desde o de combustão propriamente (forno, caldeira) até periféricos como equipamentos de limpeza de gases, ventiladores de exaustão e chaminés.

3.5 Redução da formação dos produtos da combustão incompleta do combustível

A formação de produtos da combustão incompleta - monóxido de carbono, material particulado orgânico e hidrocarbonetos voláteis, tende a diminuir como consequência das melhorias obtidas no processo de combustão, mencionadas anteriormente (VERGNHANINI, 1986 a).

3.6 Redução da formação do “NO_x térmico”

Na substituição do ar pelo oxigênio puro, a formação do “NO_x térmico” é eliminada devido à ausência do nitrogênio do ar. Já a formação do “NO_x combustível” tende a aumentar pelo acréscimo da pressão parcial do O_2 na zona de reação (Quadro 5). Dessa forma, a queima de combustíveis que não possuem nitrogênio quimicamente ligado (GN, GLP) a substituição leva à redução nas emissões de NO_x , porém, naqueles que o possuem, como carvão mineral e óleo combustível, a redução da formação do “NO_x térmico” poderá ser compensada pelo aumento da formação do “NO_x combustível”.

3.7 Redução do custo / viabilização de técnicas de limpeza dos gases de combustão.

Na oxi-combustão, além do volume de gases de combustão ser menor, conforme já comentado, os seus constituintes poluentes (NO_x , SO_x , CO, material particulado) estão mais concentrados, simplificando / viabilizando a aplicação de técnicas de limpeza dos gases.

Esse benefício é particularmente importante quando se está preocupado com a emissão do CO_2 , que é um dos gases responsáveis pelo efeito estufa. Por exemplo, na queima estequiométrica de GN, a concentração de CO_2 dos gases aumenta de cerca de 12,0 %, em volume e em base seca, para mais de 99 % com a substituição do comburente (foi utilizado nos cálculos o aplicativo “AComb”), tornando atraente várias tecnologias de redução dessas emissões.

Quadro 5 - Óxidos de nitrogênio

ÓXIDOS DE NITROGÊNIO

Os óxidos de nitrogênio (NO e NO₂ - NO_x) são conhecidos poluentes atmosféricos (poluente primário e um dos responsáveis pela acidez das chuvas, redução da camada de ozônio e formação de oxidantes fotoquímicos - smog), sendo suas emissões por processos industriais de combustão (caldeiras, fornos, incineradores) regulamentadas no Brasil por legislações nacionais e estaduais.

A formação do NO_x na combustão é devida a reações envolvendo, basicamente, oxigênio e nitrogênio do ar (formação do "NO_x térmico") ou oxigênio e nitrogênio do combustível (formação do "NO_x combustível") e pode ser reduzida atuando-se diretamente no processo, fazendo alterações operacionais (excesso de ar, potência dissipada, recirculação de gases de combustão) ou modificações substanciais, como estagiamento no fornecimento de ar ou combustível.

Fonte: Vergnhanini (1986b).

A Petrobras, por exemplo, vem estudando o emprego da oxi-combustão nas suas unidades de craqueamento catalítico fluido (FCC) com o objetivo de serem gerados gases com alta concentração de CO₂, facilitando a sua captura para venda a indústrias compradoras desse gás, injeção em poços para retirada do petróleo, ou injeção em reservatórios naturais no subsolo nos quais fica retido - "armazenamento geológico" (IBP, 2020).

4 Atuação do IPT

A oxidação vem sendo objeto de estudo e prestação de serviços do LBE desde 1991, quando foram desenvolvidos procedimentos operacionais de queimadores oxí-óleo fabricados pela empresa White Martins (WM), utilizando-se a fornalha cilíndrica de testes (Figura 2) e demais instalações do Laboratório.

No trabalho seguinte, apresentado num encontro nacional de ciências térmicas (SOUSA; MESSIAS; VERGNHANINI FILHO; KOBAYASHI, 1994), estudou-se as influências de parâmetros construtivos e operacionais de queimadores oxí-combustíveis nas taxas de formação de óxidos de nitrogênio. A esses trabalhos, seguiram-se muitos outros, financiados, em sua maioria, pela WM, com quem o IPT em 2011 firmou um termo de cooperação técnica para o desenvolvimento de tecnologias na área de combustão (o contrato firmado entre IPT e WM teve seu prazo encerrado recentemente e sua prorrogação está atualmente sendo discutida).

Figura 2 - Fornalha cilíndrica horizontal de testes do Laboratório.



Fonte: Acervo do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

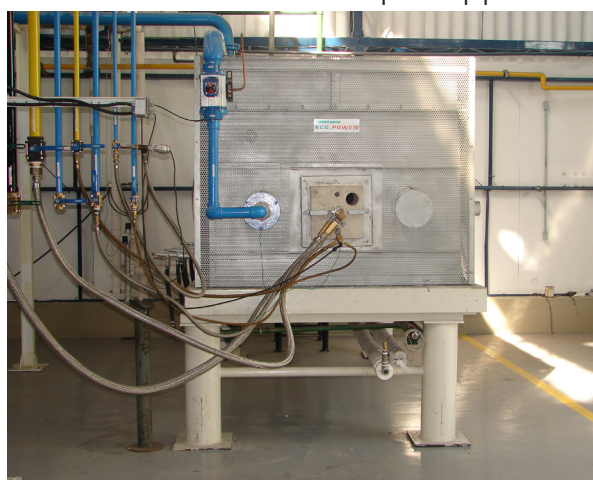
Como decorrência da parceria com a WM, as instalações do Laboratório foram aprimoradas para a realização de trabalhos envolvendo queimadores oxi-combustível. Às instalações já existentes foram incorporados, entre outros: um tanque criogênico de oxigênio de capacidade de 13.700 kg, acoplado a um sistema de vaporização; um conjunto de analisadores contínuos de gases; uma fornalha de testes horizontal de formato paralelepípedo, dotada de chaminé para a exaustão dos gases; um painel de controle das fornalhas, constituído de linhas de oxigênio e gás combustível, dotadas de válvulas, filtros, instrumentos etc., acoplado a um sistema de monitoramento e aquisição de dados (Figura 3).

Figura 3 - Instalações do Laboratório.

Tanque criogênico de oxigênio e vaporizador



Fornalha de testes de formato paralelepípedo



Analisadores contínuos de gases



Painel de controle das fornalhas



Fonte: Acervo do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Os trabalhos envolvendo oxi-combustão realizados pelo LBE exigiram, muitas vezes, a realização de montagens e medições, geralmente no galpão de ensaios do Laboratório, outras na própria indústria, junto ao seu equipamento de combustão. Como exemplo, um trabalho realizado em parceria com a empresa "ATS Aerothermal Solutions and Software Distributor" e tendo a Ultragas como Cliente, que envolveu o emprego da oxi-combustão em fornos de fusão de chumbo da empresa "Tamarana Tecnologia e Soluções Ambientais", exigiu a realização de testes tanto no IPT como nas dependências da Tamarana (IPT, 2013 a 2015) (Figura 4).

Figura 4 - Emprego da oxi-combustão em fornos de fusão de chumbo.



Fonte: Acervo do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

5 Conclusões

A oxi-combustão traz uma série de benefícios para a indústria, como a redução do consumo de combustível e da emissão de poluentes atmosféricos, entre outros, porém a sua implantação deve ser avaliada caso a caso, pois implica em custos fixos, de compra e modificação de equipamentos e periféricos, e operacionais, de aquisição do oxigênio - alternativamente à compra, caso o consumo seja elevado, pode-se instalar na empresa uma unidade de produção de oxigênio.

6 Referências

KOBAYASHI, H.; TSIAVA, R. Oxy-fuel burners..In: BAUKAL JR., C. E. Industrial burners handbook : CRC Press, 2004. Chap. 21

COWARD, H.F. ;JONES, G.W. Limits of flammability of gases and vapours., U. S. Bureau of Mines, 1952. (Bulletin 503).

COSTA, F. C. Perspectivas da incineração de resíduos de serviços de saúde com o uso de atmosferas ricas em oxigênio.2007.114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2007.

GITMAN, G. PYRETRON. Variable gas/oxygen/air combustion system. In: of INDUSTRIAL COMBUSTION TECHNOLOGY SYMPOSIUM, II., Chicago. Proceedings [...]. 1986. p. 171-178.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO, GÁS E BIOCMBUSTÍVEIS (IBP). Os desafios tecnológicos da captura de CO₂: captura de CO₂ de unidades de craqueamento catalítico fluidizado (FCC) em refinarias. [S.l.]: IBP, 27 out. 2020. Fórum Online de CO₂ [Webinar]. Disponível em: <http://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2020/11/gustavo-moure-webinar-2-forum-de-co2.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2021.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. AComb - análise de combustíveis industriais. Aplicativo de autoria de Clayton Dimas Ribeiro Fernandes com registro no INPI em 14.06.1995 sob no 01127, em nome do IPT.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. Relatório Técnico No 99339-205. São Paulo: IPT, 2008.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. Relatórios Técnicos No 131134-205, 136479-205, 139635-205, 145209-205. São Paulo: IPT, 2013- 2015.

JEN, L. C. Estequiometria das reações de combustão. São Paulo: IPT, 1986, 21 p. (Apostila do Curso Combustão Industrial).

JENKIN, D. B. The properties of liquefied petroleum gases. London, England: Shell, 1962, 73 p.

OLIVEIRA, F. A. Uso da oxi-combustão em equipamentos convencionais como alternativa a queima com ar. 2012. 136f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012,

REED, R. J. North american combustion handbook. 3rd ed. Cleveland : North American Mfg., 1986. 457 p.

SOUSA, F. D. A.; MESSIAS, L. S.; VERGNHANINI FILHO, R.; KOBAYASHI, W. T. Emissão de óxidos de nitrogênio em chamas oxi-combustíveis. In: ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIAS TÉRMICAS, 5.; SIMPÓSIO DE ENGENHARIA TÉRMICA, 2., 1994, São Paulo. Anais [...] Rio de Janeiro: ABCM, 1994.

VERGNHANINI FILHO, R. (a). Formação de poluentes em processos industriais de combustão: material particulado. São Paulo: IPT, 1986, 28 p. (Apostila do Curso Combustão Industrial).

VERGNHANINI FILHO, R. (b) Formação de poluentes em processos industriais de combustão: óxidos de nitrogênio. São Paulo: IPT, 1986, 28 p. (Apostila do Curso Combustão Industrial).

VERGNHANINI FILHO, R. Metodologia simplificada de cálculo do rendimento térmico de caldeiras. Revista IPT | Tecnologia e Inovação. São Paulo, v. 2, n. 7, abr., 2018.

QI, F.; SHAN, J.; LI, B.; BALETA, J. Numerical study on ladle baking process of oxy-fuel combustion. Thermal Science, v. 24, n., 6A, 2020, p. 3511 - 3520.

10.34033/2526-5830-v5n17-4



Artigo técnico

Análise da série de vendas do varejo restrito no Estado de São Paulo: uma aplicação do Método X12-ARIMA

Analysis of the restricted retail sales series in the State of São Paulo: an application of Method X12-ARIMA

Mario Antonio Margarido^{a,*}

^a Dr. Economia Aplicada.
Pesquisador Científico

E-mail: margaridoma@gmail.com

Resumo

Este artigo apresenta uma análise detalhada da série de vendas do varejo restrito para o Estado de São Paulo da Pesquisa Mensal do Comércio Restrito do IBGE para o período de janeiro de 2003 a março de 2019. O método utilizado foi o Método X12-ARIMA. Os resultados mostram que apesar da estabilidade dos coeficientes sazonais, os coeficientes de amplitude sazonal estão se alterando ao longo do tempo, refletindo, possivelmente, mudanças no comportamento do consumidor em razão do próprio ambiente econômico dos últimos anos.

Palavras-chave:

sazonalidade; método X12; série temporal; venda varejo.

Keywords:

Keywords: seasonality; X12 method; time serie; retail sale

Abstract

This article presents a detailed analysis of the retail sales series for the State of São Paulo from the IBGE Monthly Survey of Restricted Commerce for the period from January 2003 to March 2019. The method used was the X12-ARIMA Method. The results show that, despite the stability of the seasonal coefficients, seasonal amplitude coefficients are changing over time, possibly reflecting changes in consumer behavior due to the economic environment of recent years.

1 Introdução

A principal preocupação ao se trabalhar com modelos de séries temporais consiste em determinar o respectivo processo gerador de cada série.

Diversas séries econômicas se caracterizam por apresentarem padrões sazonais¹. A sazonalidade faz parte do processo gerador destas séries e não pode simplesmente ser ignorada pelo pesquisador, pois pode-se obter resultados viesados, seja no âmbito da análise do relacionamento estrutural entre variáveis, como, também, quanto na elaboração de modelos de previsões. Por outro lado, a presença da sazonalidade torna a modelagem do processo gerador destas séries mais complexas².

Entre as diversas séries econômicas que apresentam comportamento sazonal, destacam-se a produção industrial, vendas no varejo, consumo de energia elétrica, produção agrícola, Produto Interno Bruto (PIB), etc.

Sendo assim, torna-se de suma relevância conhecer aspectos relacionados à sazonalidade das séries econômicas, além de conhecer como trabalhar com séries sazonais.

Em decorrência do acentuado processo de industrialização, e, conseqüentemente, de urbanização do Brasil a partir da década de 50, verifica-se que o setor de comércio na economia brasileira passou a ter cada vez mais relevância.

Basicamente, o setor de comércio pode ser dividido em dois segmentos. O comércio atacadista e o varejista.

Mais especificamente, conforme Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018) as "empresas atacadistas funcionam como distribuidoras ou intermediárias no processo produtivo, revendendo a

¹ É necessário realçar que a presença de sazonalidade em séries temporais não é prerrogativa exclusiva de séries econômicas.

² Como exemplo, a necessidade de realização de teste de raiz unitária sazonal, conforme desenvolvido por Dickey, Hazsa e Fuller (1994) ao invés dos convencionais testes de raiz unitária do tipo Dickey-Fuller Aumentado (ADF), conforme Dickey e Fuller (1979,1981) e Phillips-Perron (PP). Segundo Phillips e Perron (1988), a determinação da ordem de integração de séries sazonais com a utilização de testes de raiz unitária convencionais produzem resultados viesados.

varejistas, estabelecimentos agropecuários, cooperativas e agentes produtores em geral (empresariais e institucionais). Este tipo de comércio caracteriza-se como empresas de grande porte, em relação à mão de obra e à geração de receita, pois contam com elevado volume de vendas, cujas operações podem influenciar a formação de preços na economia". Portanto, dadas estas características, poucas e grandes³ empresas, atuando neste segmento, sua estrutura se aproxima do modelo de oligopólio quando comparada a estrutura do varejo, sendo assim, na maioria das vezes, são formadoras de preços.

Em relação ao comércio varejista, observa-se grande número de pequenos estabelecimentos, intensivo em mão-de-obra, e, cuja finalidade, é atender a demanda das famílias. Sendo assim, o comércio varejista se aproxima da estrutura de concorrência perfeita, e, como tal, é tomadora de preço relativamente ao segmento atacadista. No entanto, é necessário realçar, especialmente no segmento de supermercados, onde ocorreu expressiva concentração nos últimos anos, resultando em redes de supermercados capazes de impor preços ao atacado (indústrias), ainda assim, predomina grande quantidade de pequenos estabelecimentos neste segmento.

Em termos macroeconômicos, conforme observado por Silva (2018), o "setor de comércio ganhou importância econômica nas últimas duas décadas, uma vez que sua participação no Produto Interno Bruto (PIB), que se manteve relativamente estável e em torno de 8% entre 1996 e 2002, subiu continuamente até atingir 13,6% em 2014, número em torno do qual permaneceu no triênio seguinte".

Dada a relevância do setor de comércio na econômica brasileira, torna-se de suma importância o desenvolvimento de estudos que analisem este segmento.

2 Objetivo

O objetivo deste estudo consiste em realizar uma análise detalhada do comportamento da série do varejo restrito do Estado de São Paulo, explorando toda potencialidade oferecida pelo Método X12-ARIMA.

3 Método

De acordo com Fredo e Margarido (2008, p.372), em relação ao campo das séries de tempo, a "tendência capta elementos de longo prazo relacionados com a série de tempo; pode ser determinística, ou seja, pode ser uma função matemática, ou então estocástica, isto é, resultado de um processo aleatório". Neste caso, a tendência estocástica, em economia, mostra alterações no nível da série de tempo, as quais podem ser resultados de mudanças sociais, tecnológicas, condições de mercado, meio ambiente, entre outros.

³ Quando comparado relativamente ao segmento do varejo

Por sua vez, o componente sazonal capta os padrões regulares da série de tempo, por exemplo: mudanças de temperatura, índice pluviométrico, safra ou entressafra de produtos agropecuários, vendas da indústria, vendas do varejo, entre outros.

Finalmente, os ciclos são caracterizados por longas ondas, regulares, em torno de uma linha de tendência. O interesse pelos ciclos está relacionado com seus pontos de mudanças, também denominados de pontos de inflexão⁴, duração, frequência, etc.

Conforme apresentado na literatura sobre séries temporais, uma série temporal pode ser decomposta em cinco componentes. Dois são os tipos de modelos, aditivo e multiplicativo.

Abaixo, são apresentados matematicamente os modelos aditivo e multiplicativo, respectivamente:

$$O_t = C_t + S_t + I_t + P_t + D_t$$

$$O_t = C_t * S_t * I_t * P_t * D_t$$

Onde: O_t corresponde a série original, C_t é o componente tendência-ciclo, S_t é o componente sazonal, I_t é o componente irregular (ou resíduo), P_t é o componente de fatores mensais anteriores e D_t é o componente denominado *trading-day*.

O componente *trading-day* pode ser dividido em:

$$D_t = D_{r,t} * D_{tr,t'}$$

Onde: $D_{tr,t}$ são os fatores de *trading-day* derivados de pesos diários anteriores e $D_{r,t}$ corresponde aos resíduos dos fatores *trading-day* estimados a partir da regressão de *trading-day*.

Resumidamente, o Procedimento X12 é uma adaptação do *U.S. Bureau of the Census X-12 ARIMA Seasonal Adjustment Program (U.S. Bureau of the Census 2010)*. O programa X-12 ARIMA foi desenvolvido pelo *Time Series Staff of the Statistical Research Division, U.S. Census Bureau*. O programa de ajuste sazonal X-12 ARIMA contém componentes desenvolvidos pelo Statistics Canada X-11 ARIMA. O X-12 ARIMA é um método automático de modelagem com base nos trabalhos de Gómez and Maravall (1997a b).

O programa X-12 ARIMA combina as capacidades do programa X-11 (SHISKIN, YOUNG and MUSGRAVE, 1967) e o programa X-11 ARIMA/88 (DAGUM, 1988), e, além disso, insere novos aspectos (FINDLEY et al. (1998). Um dos principais avanços envolve a utilização do modelo regARIMA, o qual, consiste em um modelo de regressão com erros ARIMA (Auto-Regressivo Integrado de Médias Móveis). O programa X-12 contém métodos desenvolvidos pelo *U.S. Census Bureau and Statistics Canada*.

⁴ Em economia, o interesse em conhecer adequadamente este componente da série de tempo está relacionado com os ciclos econômicos, visando determinar períodos de prosperidade, recessão, entre outros.

Além disso, a rotina para modelagem automática X-12, tem como base a rotina TRAMO (*Time Series Regression with ARIMA Noise, Missing Values and Outliers*), método este desenvolvido por Gómez and Maravall (1997 a b). Os quatro principais componentes do programa X-12 são: modelagem regARIMA, diagnóstico da modelagem, ajustamento sazonal, o qual, utiliza avanços no método X-11 e diagnósticos pós ajustes. O método X-11⁵ do Statistics Canada ajusta um modelo ARIMA com base na série original, e, então, utiliza modelos de previsão para estender a série original. Esta série estendida é então ajustada sazonalmente pelo método padrão de ajuste sazonal do X-11. A extensão das séries melhora as estimações de fatores sazonais e reduz a necessidade de revisões da série sazonalmente ajustada quando novas informações estão disponíveis.

4 Dados

Para exemplificar os resultados produzidos pelo método X12, foi utilizada a série da Pesquisa Mensal do Comércio (PMC) do Estado de São Paulo (PMCSPP), cuja periodicidade é mensal. Esta série é um índice com Base 2014=100 e representa o Volume de Vendas do Varejo Restrito. No cálculo do índice de varejo restrito não são incluídas as vendas de automóveis, motocicletas, peças para veículos e material de construção. O período abrangido se inicia em Janeiro de 2003 e termina em Março de 2019. A fonte destes dados é o Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), cujo endereço eletrônico é <https://sidra.ibge.gov.br/home/pmc/sao-paulo>.

5 Análise de resultados

A Tabela 1 apresenta os resultados da escolha automática pelo procedimento X12 para os cinco melhores modelos em ordem decrescente. É utilizado para ordenar os modelos o Critério de Informação Bayesiano de Schwartz (BIC). O menor valor do Critério de Informação indica qual o melhor modelo. O menor valor para o Critério BIC é igual a - 4,82271, o qual corresponde ao modelo ARIMA (1,1,0)(0,1,1)⁶. Este modelo contém uma diferença regular de ordem um, um parâmetro auto regressivo de ordem um, além da necessidade de uma diferença sazonal de ordem 1, com extensão da sazonalidade igual a 12 e um parâmetro de média móvel sazonal de ordem um com extensão 12.

⁵ Referências sobre detalhes do Método X11 – ARIMA podem ser encontrados em Dagum (1980, 1982a, 1982b, 1983, 1988); Laniel (1985), Lothian and Morry (1978); Huot, Chui, Higgson and Gait (1986).

⁶ Detalhes sobre como escrever os elementos regulares e sazonais do Modelo ARIMA podem ser encontrados em BOX; Jenkins and Reinsel (1994) e Margarido (1998).

Tabela 1 - Escolha Automática dos Cinco Melhores Modelos, Índice do Volume de Vendas do Varejo Restrito do Estado de São Paulo, Janeiro de 2003 a Dezembro de 2017.

Ordem de Escolha	Modelo Estimado (p,d,q) (P,D,Q)	BIC
1	(0,1,1) (0,1,1)	-4.74376*
2	(1,1,0) (0,1,1)	-4.74057
3	(1,1,1) (0,1,1)	-4.72432
4	(0,1,0) (0,1,1)	-4.59066
5	(0,1,1) (0,1,0)	-4.53864

*Menor valor do BIC.

Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados básicos do IBGE.

A seguir, o Método X12 compara o modelo escolhido automaticamente, o qual consta da Tabela 1, com o denominado Modelo padrão, o qual é representado pelo seguinte Modelo ARIMA (0,1,1)(0,1,1). Neste caso, após comparar os dois modelos, o Método X12 indica que o modelo mais adequado é o Modelo Padrão. Sendo assim, a análise a seguir terá como base os resultados dos parâmetros estimados para o Modelo Padrão.v

A Tabela 2 apresenta os parâmetros estimados para o melhor modelo Auto regressivo Integrado de Média Móvel (ARIMA). Os resultados mostram que tanto o parâmetro regular de Média Móvel de Ordem Um, quanto o parâmetro sazonal de Média Móvel de Ordem 1, com extensão sazonal igual a 12, são estatisticamente significativos, uma vez que os respectivos p-valores se encontram próximo de zero.

Tabela 2.- Estimativas dos Parâmetros do Modelo ARIMA, Índice do Volume de Vendas do Varejo Restrito do Estado de São Paulo, Janeiro de 2003 a Março de 2019

Parâmetro	Defasagem	Estimativa do Parâmetro	Erro Padrão da Estimativa	Valor do Teste t	Pr > t
Média Móvel (MA) de ordem 1	1	0.42205	0.06910	6.11	<.0001
Média Móvel Sazonal (SMA) de ordem um	12	0.55183	0.06612	8.35	<.0001

Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados básicos do IBGE.

Matematicamente, este modelo ARIMA pode ser escrito da seguinte forma:

$$\nabla^d \nabla_{s=12}^d \text{LPMCSPT}_t = 0,42205B * 0,55183B^{s=12} \alpha_t$$

Onde: ∇^d = diferença regular de ordem um; $\nabla_{s=12}^d$ = diferença sazonal com extensão da sazonalidade igual a 12; LPMCSPT representa o logaritmo³ do Índice de Vendas do Varejo Restrito do Estado de São Paulo no período t ; 0,42205 é a média móvel de ordem um; 0,55183 corresponde a média móvel sazonal e α_t é o resíduo. A média móvel de ordem um indica que, desequilíbrios nas Vendas do Varejo Restrito do Estado de São Paulo no período t , na média, são corrigidos em 42,20% a cada mês. O parâmetro de média móvel sazonal mostra que desequilíbrios na produção industrial no tempo t , na média, são corrigidos em 55,18% a cada 12 meses.

A Tabela 3 apresenta os resultados para testar a presença de Trading Day. Dado que é um teste conjunto, é utilizada a distribuição χ^2 . A hipótese nula afirma que todos os dias da semana tem o mesmo efeito sobre comportamento das vendas do varejo restrito. O resultado mostra que a probabilidade de se cometer o *Erro Tipo I*, ou seja, rejeitar a hipótese nula e ela ser verdadeira está abaixo do nível de significância de 1%, logo, pode-se rejeitar a hipótese nula e conclui-se que determinados dias da semana têm impactos mais relevantes sobre o comportamento das vendas do varejo do que outros. Estatisticamente, isto indica que o efeito calendário deve ser eliminado, dado que seu efeito não é estocástico, para posteriormente estimar o modelo ARIMA.

Tabela 3 - Teste χ^2 sobre o grupo de regressores, Índice do Volume de Vendas do Varejo Restrito do Estado de São Paulo, Janeiro de 2003 a Março de 2019

Efeito da Regressão	Graus de Liberdade	χ^2	P-Valor χ^2
<i>Trading Day</i>	6	35.4232	<.0001

Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados básicos do IBGE.

Dado que determinados dias da semana têm impactos relevantes sobre as vendas do varejo paulista, foi estimado um modelo de regressão para captar o efeito *trading day*. Os resultados mostram que, em termos estatísticos o melhor dia do varejo em termos de vendas ocorre aos sábados. Além deste parâmetro ter sinal positivo é estatisticamente significativo ao nível de significância de 5% (Tabela 3A). Aparentemente, este resultado é coerente, pois, uma parcela expressiva dos consumidores não trabalham aos sábados, e, utilizam este dia da semana para realizarem as compras que necessitam.

³ O operador logaritmo foi utilizado para comprimir a variância da série e facilitar sua estimação.

Tabela 3A – Estimativas do Modelo de Regressão, Variável PMCSPT, Janeiro de 2003 a Março de 2019

Tipo	Parâmetro	Estimativa	Erro-Padrão	Valor <i>t</i>	P-valor
<i>Trading Day</i>	Segunda	-0.00415	0.00264	-1.57	0.1180
	Terça	-0.00396	0.00273	-1.45	0.1484
	Quarta	-0.00048	0.00269	-0.18	0.8573
	Quinta	0.00287	0.00263	1.09	0.2767
	Sexta	0.00052	0.00266	0.19	0.8462
	Sábado	0.00618	0.00269	2.29	0.0230
	Domingo	-0.00097	0.00267	-0.37	0.7155

Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados básicos do IBGE.

O método X12 também identificou a necessidade da inclusão de uma variável de intervenção *dummy* do tipo *additive outlier* para o mês de março de 2017. Além de ser estatisticamente significativa, seu sinal é negativo, ou seja, houve uma redução de 7,91% no nível da série a partir de março de 2017. Possivelmente, este resultado esteja captando os efeitos da mudança metodológica realizada pelo IBGE na série da PMC, conforme apresentado em Indicadores IBGE (2017).

Tabela 4 - Estimativas do Modelo de Regressão *Trading Day*, Índice do Volume de Vendas do Varejo Restrito do Estado de São Paulo, Janeiro de 2003 a Dezembro de 2017

Tipo de variável	Parâmetro	Estimativa	Erro-Padrão da Estimativa	Valor do Teste	P-valor do Teste <i>t</i>
<i>Dummy</i>	AO MAR2017	-0.07913	0.01657	-4.78	<.0001

Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados básicos do IBGE.

Basicamente, o modelo ARIMA envolve quatro etapas, identificação, estimação, verificação e previsão.

Após a identificação e estimação do modelo ARIMA, é necessário verificar se os respectivos resíduos são ruído branco (*White Noise*), isto é, não apresentam autocorrelação ao longo do tempo. Dois são os métodos utilizados para tal tarefa, o primeiro utiliza o teste *Ljung-Box* sobre a Função de Autocorrelação dos Resíduos, enquanto que, a segunda técnica é visual e a análise recai sobre os correlogramas das Funções de Autocorrelação e Autocorrelação Parcial.

O teste *Ljung-Box* é um teste conjunto que utiliza a hipótese conjunta de que todas as defasagens da Função de Autocorrelação dos Resíduos estão isentas de autocorrelação, enquanto que, a hipótese alternativa afirma que há pelo menos uma defasagem que apresenta autocorrelação. Conforme pode ser visto na Tabela 5, todos os P-valores se encontram acima do nível de significância de 10%, logo, não se rejeita nenhuma das hipóteses nulas de cada defasagem, e, conseqüentemente, os resíduos são ruído branco.

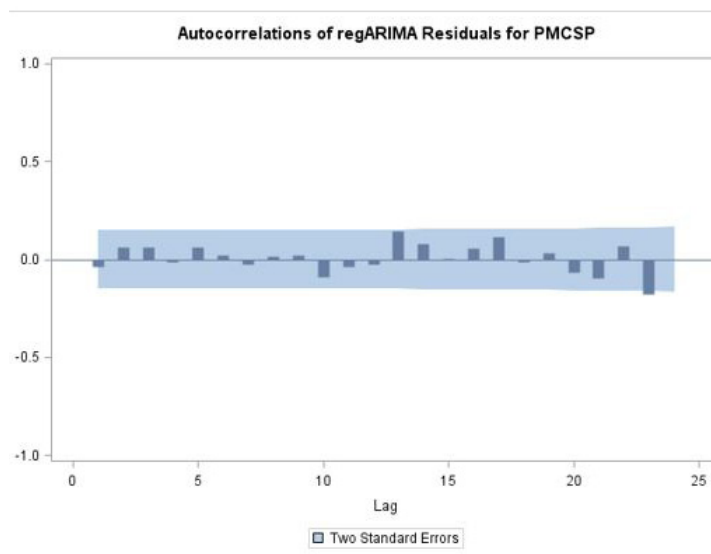
Tabela 5 - Correlograma da Função de Autocorrelação, Índice do Volume de Vendas do Varejo Restrito do Estado de São Paulo, Janeiro de 2003 a Março de 2019

Defasagem	Correlação	Erro-Padrão	χ^2	Graus de Liberdade	Pr > χ^2
1	-0.03836	0.07412	0.2722	0	-
2	0.05959	0.07423	0.9328	0	-
3	0.06169	0.07450	1.6447	1	0.1997
4	-0.01609	0.07478	1.6934	2	0.4288
5	0.06419	0.07480	2.4731	3	0.4802
6	0.01858	0.07510	2.5388	4	0.6377
7	-0.02663	0.07512	2.6744	5	0.7500
8	0.01558	0.07517	2.7211	6	0.8429
9	0.01927	0.07519	2.7930	7	0.9035
10	-0.08930	0.07522	4.3457	8	0.8247
11	-0.089305	0.07580	4.5945	9	0.8681
12	-0.02655	0.07589	4.7334	10	0.9083
13	0.14102	0.07594	8.6740	11	0.6520
14	0.08177	0.07737	10.0067	12	0.6154
15	0.00512	0.07784	10.0119	13	0.6930
16	0.05758	0.07784	10.6807	14	0.7109
17	0.11189	0.07808	13.2216	15	0.5852
18	-0.01247	0.07895	13.2534	16	0.6542
19	0.03064	0.07896	13.4463	17	0.7058
20	-0.06793	0.07903	14.4002	18	0.7027
21	-0.09673	0.07935	16.3462	19	0.6341
22	0.06617	0.07999	17.2626	20	0.6359
23	-0.17689	0.08029	23.8525	21	0.3003
24	-0.00476	0.08241	23.8573	22	0.3548

Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados básicos do IBGE.

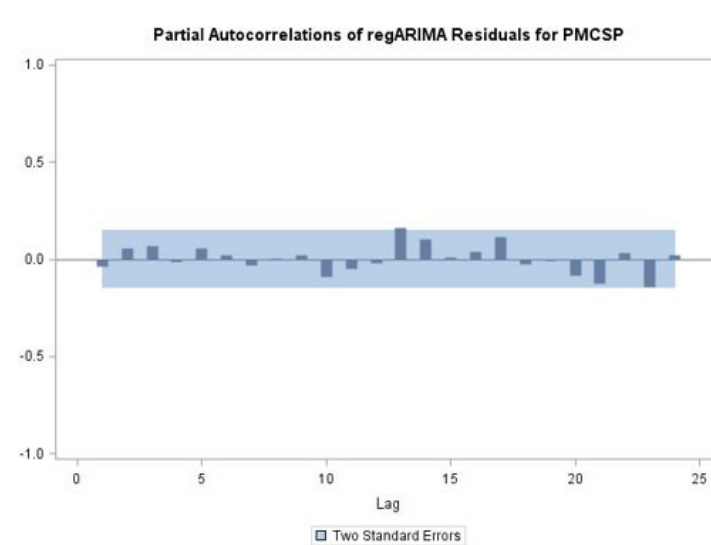
Abaixo, encontram-se os correlogramas da Função de Autocorrelação (Figura 1) e Autocorrelação Parcial (Figura 2). Conforme pode se conferido nos respectivos correlogramas, nenhuma das barras ultrapassa tanto o limite superior quanto o limite inferior. Isto é um indicativo de que os resíduos são ruído branco. Isto indica que o modelo está adequadamente ajustado.

Figura 1 - Correlograma da Função de Autocorrelação dos Resíduos do Modelo regARIMA, Índice do Volume de Vendas do Varejo Restrito do Estado de São Paulo, Janeiro de 2003 a Março de 2019.



Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados básicos do IBGE.

Figura 2 - Correlograma da Função de Autocorrelação Parcial dos Resíduos do Modelo regARIMA, Índice do Volume de Vendas do Varejo Restrito do Estado de São Paulo, Janeiro de 2003 a Março de 2019.



Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados básicos do IBGE.

Além da questão relacionada com a ausência ou não de autocorrelação ao longo do tempo nos resíduos reside no fato de que os resíduos apresentam ou não distribuição normal. A Tabela 6 mostra que a distribuição dos resíduos é simétrica, pois o Coeficiente de Assimetria Calculado se encontra dentro dos limites inferior e superior. Com relação à presença de curtose nos resíduos, os resultados também mostram que não há presença de curtose. Sendo assim, pode-se inferir que os resíduos têm distribuição Normal (Tabela 6).

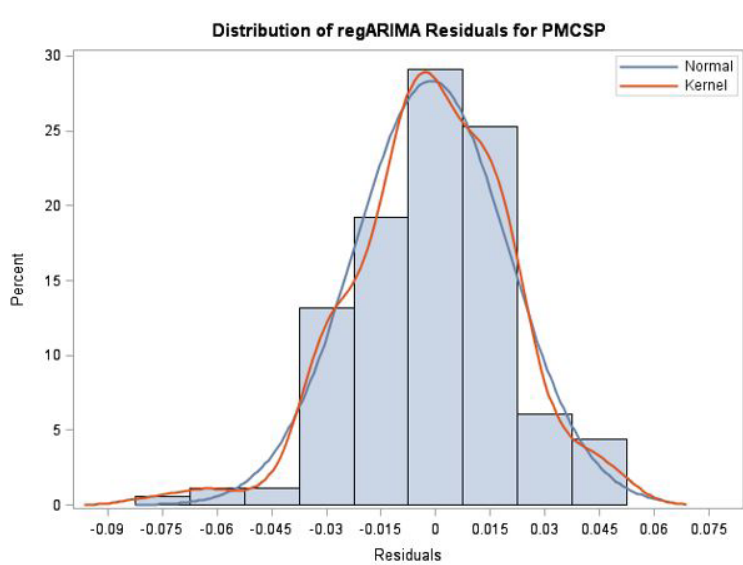
Tabela 6 - Estatísticas de Normalidade para o os Resíduos do Modelo RegARIMA, Índice do Volume de Vendas do Varejo Restrito do Estado de São Paulo, Janeiro de 2003 a Março de 2019

Estatística	Valor	Valor Crítico a 1% - Limite Inferior	Valor Crítico a 1% - Limite Superior	Significância
Número de Resíduos	182			
Coeficiente de Assimetria	-0.336	-0.422	0.422	Assimetria não Significativa
Curtose	3.800	2.345	4.029	Curtose Não Significativa
Resultados Combinados				Não indicação de Falta de Normalidade

Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados básicos do IBGE.

Apesar dos testes apresentados na Tabela 6, afirmarem que os resíduos têm distribuição Normal, a Figura 3, mostra que os resíduos não têm distribuição Normal⁸. Este resultado já era esperado, uma vez que, a distribuição de normalidade para determinada variável tem como base a teoria assintótica, ou seja, a amostra deve ser muito grande para que tenha distribuição Normal, e, neste acaso, há somente 195 observações amostrais.

Figura 3 - Distribuição dos Resíduos do Modelo RegARIMA, Índice do Volume de Vendas do Varejo Restrito do Estado de São Paulo, Janeiro de 2003 a Março de 2019.



Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados básicos do IBGE.

Visando detectar a presença de sazonalidade na série do índice de vendas do varejo restrito no Estado de São Paulo, foram obtidos os índices sazonais médios para o período analisado. A Tabela denominada D10, fornece Fatores Sazonais Finais. Além dos fatores sazonais mensais, a Tabela D10 apresenta em sua última linha os Índices Sazonais Médios para cada mês do período analisado, enquanto que, a última coluna apresenta os índices médios sazonais para cada ano (Tabela 7).

Em relação à Tabela 7, deve-se destacar que a coluna referente a fevereiro, a qual está marcada com a tonalidade de cinza mais clara, mostra que este mês apresenta o menor valor para o índice médio sazonal mensal para o período analisado, enquanto que, a coluna referente a dezembro apresenta os maiores índices, os quais estão marcados com uma tonalidade de cinza mais escura. Também, é necessário realçar que a identificação dos menores e maiores índices sazonais contribui para o cálculo dos respectivos coeficientes de amplitude sazonal, os quais serão apresentados mais abaixo.

Deve-se destacar que, além de dezembro apresentar os maiores índices sazonais, observa-se que estes índices estão diminuindo ao longo do tempo, enquanto que, verifica-se crescimento dos índices sazonais de novembro, no entanto, dezembro ainda se mantém como o mês com maiores vendas para o comércio varejista. De acordo com o Tobler e Junior Campello (2017), esta alteração está relacionada com a Black Friday, a qual ocorre em novembro. Ainda segundo estes autores, a Black Friday está transferindo vendas de dezembro para novembro, e, além disso, alguns consumidores estariam postergando as compras de outubro, pois os índices sazonais também estão diminuindo, para comprar em novembro, aproveitando as promoções proporcionadas pela Black Friday, sendo que, o mesmo pode ser observado na Tabela 7. No entanto, como será apresentado mais adiante, possivelmente, outros fatores mais relevantes do que a Black Friday podem estar contribuindo para as alterações dos índices sazonais.

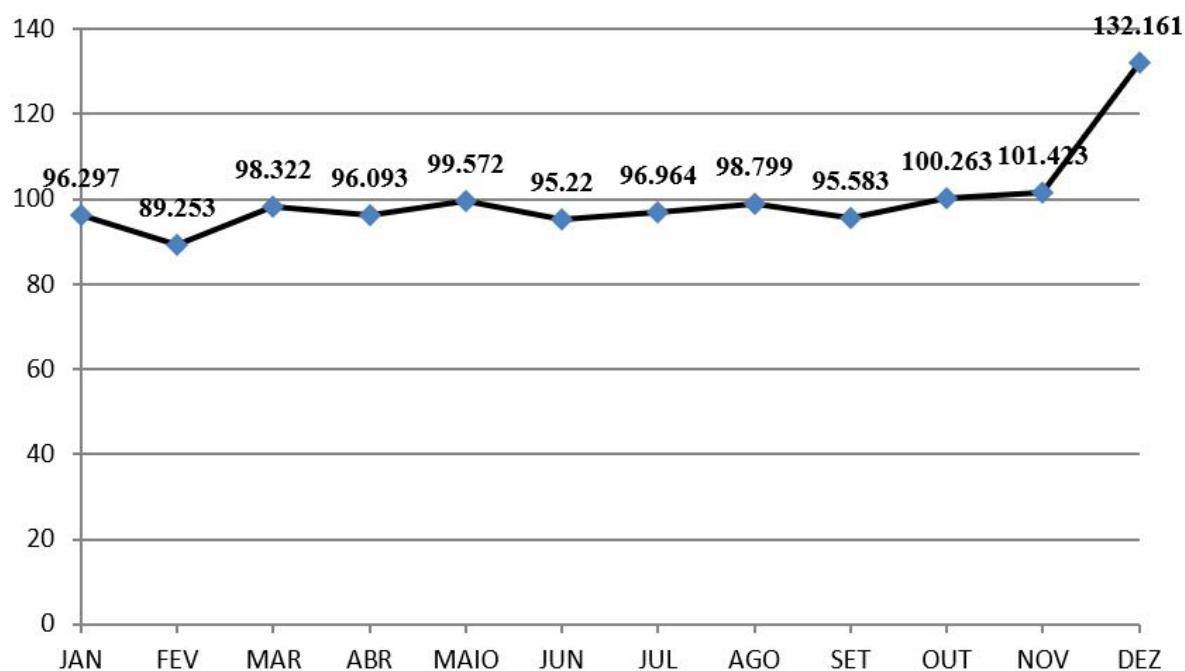
Tabela 7 - Fatores Sazonais Finais (Tabela D10), Índice do Volume de Vendas do Varejo Restrito do Estado de São Paulo, Janeiro de 2003 a Março de 2019

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAIO	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Média
2003	93.819	88.151	98.273	96.615	100.188	95.086	97.76	98.788	95.467	100.571	100.123	135.076	99.991
2004	93.921	88.137	98.248	96.707	100.283	95.071	97.611	98.733	95.557	100.493	100.096	134.97	99.984
2005	94.132	88.088	98.214	96.763	100.451	95.154	97.35	98.833	95.78	100.371	99.926	134.83	99.974
2006	94.404	88.082	98.202	96.818	100.598	95.304	97.064	98.806	95.973	100.22	99.74	134.554	99.964
2007	94.673	88.262	98.204	96.827	100.659	95.545	96.706	98.821	96.179	100.191	99.804	133.991	99.955
2008	94.934	88.541	98.223	96.841	100.576	95.848	96.522	98.874	96.192	100.132	99.88	133.213	99.948
2009	95.297	88.853	98.363	96.689	100.383	96.068	96.508	98.711	96.143	100.17	99.872	132.463	99.96
2010	95.755	89.022	98.529	96.458	100.014	96.094	96.785	98.796	95.948	100.172	100.169	131.879	99.968
2011	96.312	89.2	98.719	96.195	99.601	95.759	96.958	98.926	95.791	100.254	100.834	131.438	99.982
2012	96.886	89.341	98.819	95.99	99.257	95.27	97.02	98.933	95.616	100.346	101.304	131.038	99.985
2013	97.45	89.522	98.965	95.722	98.991	94.764	96.901	98.933	95.416	100.483	102.045	130.76	99.996
2014	97.864	89.741	98.931	95.503	98.71	94.514	96.806	98.871	95.242	100.54	102.763	130.476	99.997
2015	98.121	90.047	98.741	95.326	98.522	94.488	96.697	98.874	95.051	100.44	103.47	130.243	100.002
2016	98.279	90.335	98.385	95.146	98.395	94.66	96.726	98.832	95.013	100.208	104.07	129.991	100.003
2017	98.371	90.542	97.977	95	98.317	94.873	96.886	98.892	94.946	99.939	104.511	129.856	100.009
2018	98.421	90.677	97.538	94.885	98.225	95.05	97.12	98.962	95.02	99.681	104.759	129.797	100.011
2019	98.408	90.755	97.135										95.433
Média	96.297	89.253	98.322	96.093	99.572	95.22	96.964	98.799	95.583	100.263	101.423	132.161	

Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados básicos do IBGE.

O Gráfico 1 apresenta os Índices Sazonais Médios Mensais, sendo que, destacam-se os meses de dezembro, novembro, outubro e maio como sendo os meses mais relevantes para as vendas no varejo. O mês de maio é importante para o varejo, pois tem o dia das mães, uma data com forte apelo para vendas. No entanto, o melhor período de vendas para o segmento varejista é final do ano, não em decorrência do período de festas de final de ano, mas sim, em função do pagamento do décimo terceiro salário aos consumidores assalariados. Também, é necessário realçar que o menor índice sazonal médio ocorre em fevereiro, sendo que, este resultado se justifica pelo fato de que fevereiro é o mês que tem menos dias úteis, e as vendas do varejo são muito impactadas pelo número de dias úteis no mês. Também, na maioria das vezes, o carnaval acontece em fevereiro ampliando desta forma o impacto negativo sobre o comportamento das vendas no varejo no referido período.

Gráfico 1 - Índices Sazonais Médios Mensais, Índice do Volume de Vendas do Varejo Restrito do Estado de São Paulo, Janeiro de 2003 a Dezembro de 2018.

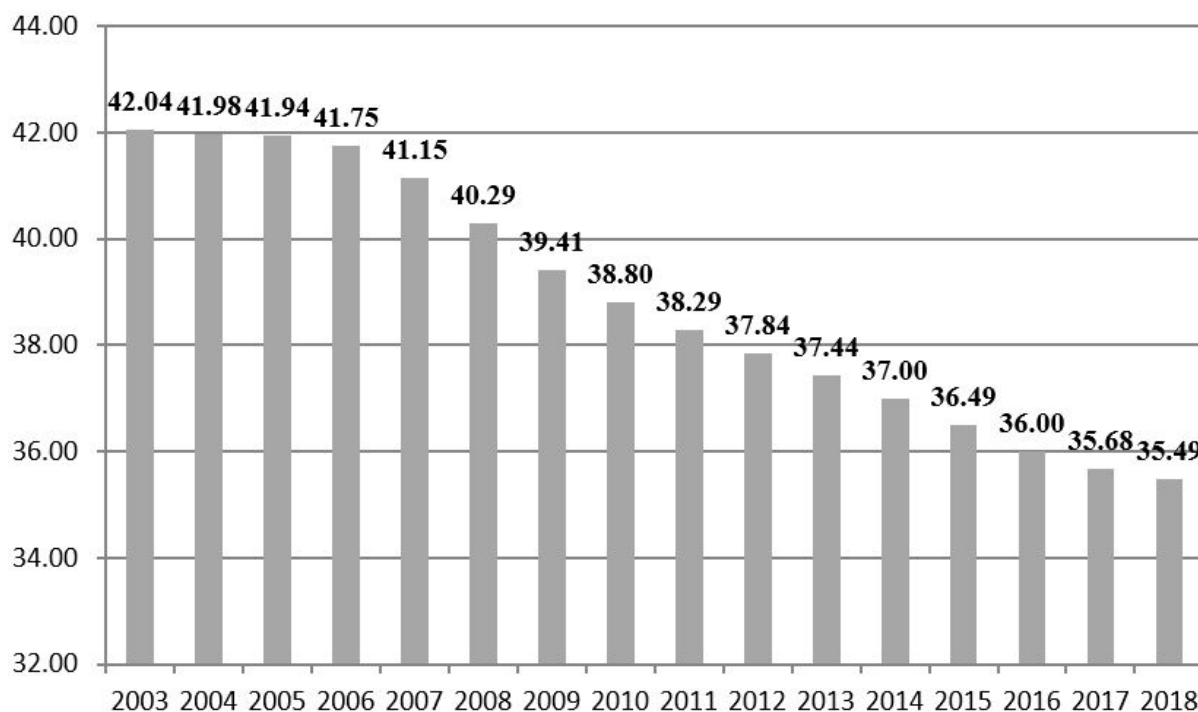


Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados básicos do IBGE.

Visando determinar a magnitude da sazonalidade na série das vendas do varejo restrito no Estado de São Paulo, foi calculado o Coeficiente de Amplitude Sazonal Médio, conforme apresentado em Freitas et al. (1998). O Coeficiente de Amplitude Sazonal é igual a 38,75%. Isto indica que há expressiva flutuação da série em relação a sua média em decorrência da sazonalidade presente na série.

O Gráfico 2 apresenta a evolução dos coeficientes de amplitude sazonal para cada ano. Com base no Gráfico 2, observa-se que para o período de 2003 até 2007, o coeficiente de amplitude sazonal para cada ano permanece praticamente estável. A partir de 2008, os respectivos coeficientes passam a apresentar trajetória descendente até 2018. Possivelmente, este comportamento está relacionado ao fato de que, o consumidor, o qual recebe a primeira parcela do décimo terceiro salário em novembro, passou a antecipar as compras de final de ano, visando dessa forma, obter descontos, ao invés de comprar em dezembro, onde a demanda é mais acentuada, e, conseqüentemente, os preços são mais elevados e a possibilidade de descontos é menor (Gráfico 2). Também, com base no Gráfico 2, outro possível fator para este comportamento do consumidor, seja em decorrência da menor taxa de crescimento da economia brasileira a partir de 2011, fenômeno esse acentuado em 2016 e 2017 em razão da crise política e econômica enfrentada pela economia brasileira nestes dois anos. Finalmente, deve-se destacar que a Black Friday tem como base o comércio on line, o qual, ainda, representa pequeno percentual em relação ao total de vendas do segmento varejista. Também, as vendas via internet se concentram em produtos eletrônicos, ou seja, sua participação no valor total de vendas do segmento de varejo é reduzida. Em função destes fatores, é pouco provável que somente a Black Friday consiga explicar as alterações nos valores dos coeficientes de amplitude sazonal para o período de 2008 a 2018.

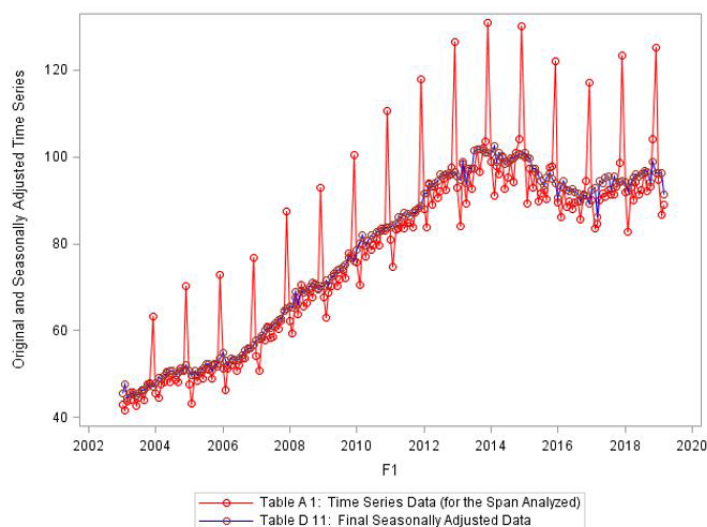
Gráfico 2 - Evolução dos Coeficientes de Amplitude Sazonal Anual, Índice do Volume de Vendas do Varejo Restrito do Estado de São Paulo, Janeiro de 2003 a Dezembro de 2018.



Fonte: Elaborada a partir de dados básicos do IBGE.

O Gráfico 3 apresenta a evolução temporal tanto da série do Índice do Volume de Vendas do Varejo Restrito do Estado de São Paulo original quanto da mesma série dessazonalizada pelo Método X12. A comparação entre as duas séries mostra que a sazonalidade das vendas do varejo restrito é muito acentuada, com destaque para as vendas em dezembro.

Gráfico 3 - Evolução das Séries Original e Dessazonalizada, do Índice do Volume de Vendas do Varejo Restrito do Estado de São Paulo, Janeiro de 2003 a Dezembro de 2017.



Fonte: Elaborada a partir de dados básicos do IBGE.

Uma vez determinada a presença da sazonalidade, o próximo passo é verificar se a sazonalidade é determinística, isto é, fixa ao longo do tempo, ou se é estocástica, ou seja, se está se alterando ao longo dos anos.

A seguir, foram realizados dois testes estatísticos, os quais objetivam detectar a presença ou não de sazonalidade estável. O primeiro corresponde ao Teste F, o qual pressupõe sazonalidade estável. Nesse caso, a hipótese nula de ausência de sazonalidade estável foi rejeitada, pois há 0,1% de probabilidade de se cometer o Erro Tipo I, isto é, rejeitar a hipótese nula e essa hipótese ser verdadeira, logo, a probabilidade de se rejeitar algo que é verdadeiro está abaixo de 1%. Portanto, se rejeita a hipótese nula, e conclui-se que a série apresenta sazonalidade estável, conforme pode ser visto na última linha da Tabela 8.

Tabela 8 – Teste F para presença de sazonalidade pressupondo estabilidade, Índice do Volume de Vendas do Varejo Restrito do Estado de São Paulo, Janeiro de 2003 a Março de 2019

	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Valor de F	P-Value
Entre Meses	19751.51	11	1795.592	636.4507	0.000
Resíduo	516.2904	183	2.821259		
Total	20267.8	194			

Seasonality present at the 0.1 percent level.

Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados básicos do IBGE

A seguir, foi realizado um teste não paramétrico, também objetivando detectar a presença de sazonalidade estável na mesma série temporal. Nesse caso, a hipótese nula também consiste na ausência de sazonalidade estável. Mais uma vez, a probabilidade de se cometer o Erro Tipo I, ou seja, rejeitar a hipótese nula e essa hipótese ser verdadeira está abaixo 1%, logo, se rejeita a hipótese nula de ausência de sazonalidade estável, conforme apresentado na última linha da Tabela 9.

Tabela 9 – Teste Não Paramétrico para Presença de Sazonalidade Pressupondo Estabilidade, Índice do Volume de Vendas do Varejo Restrito do Estado de São Paulo, Janeiro de 2003 a Março de 2019

Estatística Kruskal-Wallis	Graus de Liberdade	<i>P-Value</i>
161.8475	11	.00%
Seasonality present at the one percent level.		

Fonte: Elaborada a partir de dados básicos do IBGE.

O terceiro teste estatístico consistiu no Teste de Sazonalidade Móvel. Nesse teste, a hipótese nula é que não existem diferenças entre as médias anuais. O resultado do teste mostra que a hipótese nula não pode ser rejeitada, pois a probabilidade de se cometer o Erro Tipo I está acima do nível de significância de 10% (Tabela 10). Em função desse resultado, pode-se inferir que não há presença de sazonalidade móvel. Isso quer dizer a sazonalidade ao longo dos anos não está se alterando, apesar de ter sido detectada mudança nos coeficientes de amplitude sazonal. No entanto, ainda assim, o mês de dezembro continua a ser o mais representativo em relação às vendas do varejo.

Tabela 10 – Teste de Sazonalidade Móvel, Índice do Volume de Vendas do Varejo Restrito do Estado de São Paulo, Janeiro de 2003 a Dezembro de 2017

	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Valor de F	<i>P-Value</i>
Entre Anos	27.39366	15	1.826244	0.789613	0.688
Erro	381.6174	165	2.312833		
No evidence of moving seasonality at the five percent level.					

Fonte: Elaborada a partir de dados básicos do IBGE.

Portanto, com base nos resultados dos três testes acima, verifica-se a série das vendas do varejo restrito tem sazonalidade e que esta sazonalidade não está se alterando ao longo do tempo.

6 Considerações finais

Os resultados mostram que a série de vendas do varejo apresenta sazonalidade, e, além disso, apesar dos coeficientes de amplitude sazonal estar se alterando desde 2007, possivelmente, em função de mudança de hábitos dos consumidores, e, também pelo quadro de baixo crescimento e recessão econômica nos últimos anos, verifica-se que sazonalidade desta série ainda não está se alterando ao longo tempo. Tanto é assim, que dezembro continua a ser o melhor mês para as vendas do segmento varejista.

Outro aspecto relevante, é que o processo de mudança do consumidor vem ocorrendo desde 2007, ou seja, muito antes do surgimento do fenômeno Black Friday, sendo assim, não se pode atribuir unicamente esta mudança de comportamento a Black Friday, como sugerem diversos autores e especialistas de mercado, mas sim, provavelmente, as próprias condições conjunturais da economia brasileira.

7 Referências

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M.; REINSEL, G. C. *Time series analysis: forecasting and control*. 3rd. ed., Englewood Cliffs: Prentice Hall. 1994.

CHOLETTE, P. A. *A Comparison and assessment of various adjustment methods of sub-annual series to yearly benchmarks*. StatCan Staff, Seasonal Adjustment and Time Series Staff, Ottawa: Statistics Canada, 1979. Paper STC2119.

DAGUM, E. B. *The X-11-ARIMA Seasonal Adjustment Method*. Ottawa: Statistics Canada, 1983. Technical Report 12-564E.

DAGUM, E. B. *The X-11-ARIMA/88 Seasonal Adjustment Method: Foundations and User's Manual*, Ottawa: Statistics Canada. 1988.

DICKEY, D. A.; HASZA, D.P.; FULLER, W.A. Testing for unit roots in seasonal time series. *Journal of the American Statistical Association*, Washington, v.79, p.355-67, 1984.

DICKEY, David A; FULLER, Wayne A. Likelihood ratio statistics for autoregressive time series with a unit root. *Econometrica*, Chicago, v.49, p 1057-72, Jul. 1981.

DICKEY, D. A; FULLER, W. A. Distribution of the estimators for autoregressive time series with units root. *Journal of the American Statistical Association*, Washington, v.74, n.366, p.427-31, Jun. 1979.

FINDLEY, D. F.; MONSELL, B. C.; BELL, W. R., OTTO, M. C.; CHEN, B. C. **New capabilities and methods of the X-12-ARIMA Seasonal Adjustment Program.** Journal of Business and Economic Statistics, v.16, p.127-176, 1998.

FREDO, C.E.; MARGARIDO, M. A. **Modelando a sazonalidade e o processo gerador da série de tempo do emprego rural no Estado de São Paulo.** Revista de Economia e Agronegócio, v. 6, p. 367-394, 2008.

FREITAS, S.M. de; FERREIRA, C.R.R.P.T.; BARBOSA, M.Z. **Oportunidades e entraves à expansão de dendeicultura brasileira.** Agricultura em São Paulo, São Paulo, v. 45, t.2, p.1-16, abr. 1998.

GOMEZ, V.; MARAVALL, A. **Guide for using the programs TRAMO and SEATS.** Beta Version, Banco de España, 1997a.

GOMEZ, V. ; MARAVALL, A. **Program TRAMO and SEATS: instructions for the user.** Beta Version, Banco de España, 1997b.

HUOT, G. **Quadratic minimization adjustment of monthly or quarterly series to annual totals,** Ottawa: StatCan Staff, Statistics Canada, Seasonal Adjustment and Time Series Staff, 1975. (Paper STC2104).

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Brasil em síntese.** 2018. Disponível em: <https://brasilemsintese.ibge.gov.br/comercio.html>. Acesso em: 11 jul. 2018.

INDICADORES IBGE. **Pesquisa mensal do comércio.** Mar. 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/comercio/9227-pesquisa-mensal-de-comercio.html?=&t=notas-tecnicas>. Acesso em: 27 abr. 2018.

LADIRAY, D. ; QUENNVILLE, B. **Seasonal Adjustment with the X-11 Method.**New York: Springer-Verlag, 2001.

LJUNG, G. M. **On Outlier Detection in Time Series.** Journal of the Royal Statistical Society, London, v. 55, p.559-567. 1993.(Serie B – Metodológica)

LOTHIAN, J.; MORRY, M. **A Set of quality control statistics for the X-11-ARIMA Seasonal Adjustment Method.** StatCan Staff, Seasonal Adjustment and Time Series Analysis Staff, Ottawa: Statistics Canada, 1978a.(Paper STC1788E).

LOTHIAN, J. ; MORRY, M. **A Test for the presence of identifiable seasonality when using the X-11-ARIMA Program,** StatCan Staff, Seasonal Adjustment and Time Series Analysis Staff, Ottawa: Statistics Canada, 1978b. (Paper STC2118).

MARGARIDO, M. A.. Transmissão de preços internacionais de suco de laranja para preços ao nível de produtor de laranja no Estado de São Paulo. 1. ed. São Paulo: Instituto de Economia Agrícola, 1998. v.1. 126p.

PHILLIPS, P.; PERRON, P. Testing for unit root in time series regression. *Biometrika*. Great Britain, v.75, n.2. p.335-346. 1988.

SHISKIN, J.; YOUNG, A. H.; MUSGRAVE, J. C. The X-11 Variant of the census method II. Seasonal Adjustment Program, U.S., Department of Commerce, Bureau of the Census, 1967. (Technical Report 15).

SILVA, C. A. Breve panorama sobre o setor de serviços no Brasil. 2018. Disponível em: <https://economiadeservicos.com/2018/06/12/breve-panorama-sobre-o-setor-de-comercio-no-brasil/>. Acesso em: 03 set. 2018.

SISTEMA IBGE DE RECUPERAÇÃO AUTOMÁTICA-SIDRA- Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/pmc/sao-paulo> . Acesso em: 05 abr. 2018.

TOBLER, R; JUNIOR CAMPELLO, A. O efeito da Black Friday na sazonalidade das vendas do comércio, 2017. Disponível em: <http://blogdoibre.fgv.br/posts/o-efeito-da-black-friday-na-sazonalidade-das-vendas-do-comercio>. Acesso em: 12 ago. 2018.

U.S. BUREAU OF THE CENSUS. X-12-ARIMA quick reference for UNIX, Version 0.2.8, Washington, DC. 2001a.

U.S. BUREAU OF THE CENSUS. X-12-ARIMA reference manual, Version 0.2.8, Washington, DC. 2001b.

U.S. BUREAU OF THE CENSUS. X-12-ARIMA Seasonal Adjustment Program, Version 0.2.8, Washington, DC. 2001c.

10.34033/2526-5830-v5n17-5



IPT

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Av. Prof. Almeida Prado, 532

Cidade Universitária - Butantã - São Paulo - SP

CEP 05508-901

Central de Relacionamento com o Cliente

(11) 3767-4102/ 4456 / 4091

ipt@ipt.br

www.ipt.br

Redes Sociais

twitter.com/@ipt

youtube.com/IPTbr

facebook.com/iptsp

instagram.com/ipt_oficial



| Secretaria de Desenvolvimento Econômico