



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

LUCAS CAVALCANTE SOARES

**PLANEJAMENTO E SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO UTILIZANDO
PROGRAMAÇÃO INTEIRA MISTA: Um estudo de caso em uma metalúrgica de
reciclagem de baterias de chumbo-ácido**

Caruaru
2019

LUCAS CAVALCANTE SOARES

**PLANEJAMENTO E SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO UTILIZANDO
PROGRAMAÇÃO INTEIRA MISTA: Um estudo de caso em uma metalúrgica de
reciclagem de baterias de chumbo-ácido**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Thárcylla Rebecca Negreiros Clemente.

Caruaru

2019

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Simone Xavier - CRB/4 - 1242

S676p Soares, Lucas Cavalcante.
Planejamento e sequenciamento de produção utilizando programação inteira mista: um estudo de caso em uma metalúrgica de reciclagem de baterias de chumbo-ácido. / Lucas Cavalcante Soares. – 2019.
60 f. il. : 30 cm.

Orientadora: Thárcylla Rebecca Negreiros Clemente.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia de Produção, 2019.
Inclui Referências.

1. Controle de produção. 2. Controle de estoque. 3. Planejamento da produção. 4. Indústrias metalúrgicas. I. Clemente, Thárcylla Rebecca Negreiros (Orientadora). II. Título.

CDD 658.5 (23. ed.)

UFPE (CAA 2019-106)

LUCAS CAVALCANTE SOARES

**PLANEJAMENTO E SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO UTILIZANDO
PROGRAMAÇÃO INTEIRA MISTA: um estudo de caso em uma metalúrgica de
reciclagem de baterias de chumbo-ácido**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Produção do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Aprovada em: 05/07/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Thárcylla Rebecca Negreiros Clemente (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Máisa Mendonça Silva (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Rodrigo Sampaio Lopes (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esse trabalho ao único que é
digno de receber toda honra, toda glória e
todo o louvor.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao Senhor, por ter concedido a oportunidade de chegar até aqui e porque dEle, por Ele e para Ele são todas as coisas.

Aos meus pais, Jailson e Edilza, e irmã, Milena, pelo amor, carinho, incentivo, compreensão, esforço e dedicação ao longo de toda minha vida. Sem esse apoio incondicional, essa jornada seria quase impossível, pois nunca foram medidos custos, distâncias, tempo, para que me fosse fornecido todo o necessário. Agradeço também a Deus por os ter usado para me abençoar.

À minha noiva, Karen, por toda a compreensão e preocupação, por sempre me ouvir com todo o carinho e atenção, pelo incentivo nos momentos difíceis e euforia nas conquistas. Tê-la em minha vida torna tudo mais alegre.

À minha orientadora, Thárcylla, pela paciência e suporte neste e em outros trabalhos, e por ter se tornado uma amiga durante esses anos. Levarei seus ensinamentos e exemplo profissional por toda minha vida.

Aos meus tios, tias e avós, George e Joelma, por todo o cuidado desde criança, Jairo e Cristiane, por todo o carinho e apoio, Janeide e Jailma, por se fazerem presentes dando todo o suporte, e Zuza e Iraci, pelo incentivo nesses anos.

Ao GPSID, por proporcionar um ambiente de aprendizado e amizade. Aos colegas e professores, que, ao longo dessa jornada contribuíram de alguma forma para minha formação.

E a todos que, direta ou indiretamente fizeram parte do meu desenvolvimento, o meu muito obrigado.

Ideias, e somente ideias, podem iluminar a escuridão (MISES, 2009, p. 101).

RESUMO

O Planejamento e Controle da Produção nas organizações tem papel fundamental na alavancagem competitiva frente aos concorrentes. Esse fato, aliado a crescente aplicação da tecnologia e de soluções computacionais no dia-a-dia, oferece margem para um amplo campo de estudo sobre o tema. Por meio deste trabalho, foi proposto um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista com Horizonte de Tempo Discretizado para resolução do problema de sequenciamento da produção em uma máquina com uma batelada fixa de fabricação, em uma metalúrgica de chumbo inserida na cadeia de suprimentos de fabricação de baterias de chumbo-ácido. A motivação do estudo está fundamentada no registro histórico de altos níveis de estoque de ligas de chumbo na metalúrgica em questão, o que vem impactando em altos custos de manutenção de estoques. Foi verificado um modelo de ressuprimento que melhor representasse o perfil de demanda do produto. O modelo desenvolvido tem como objetivo a minimização dos estoques no final do período de planejamento, atendendo as restrições de estoques de segurança e do processo de produção. A implementação do modelo foi feita no *software* IBM ILOG CPLEX com dados de um período passado, e como resultado da aplicação, foi obtido um *saving* de aproximadamente R\$ 3,2 milhões em manutenção de estoques.

Palavras-chave: Planejamento e Controle da Produção. Sequenciamento da Produção. Programação Inteira. Gestão de Estoques. Metalúrgica de Chumbo.

ABSTRACT

Production Planning and Control in organizations plays a fundamental role in competitive leverage against competitors. This fact, allied with the increasing application of technology and computational solutions in everyday life, offers scope for a broad field of study on the subject. In this work, a mathematical model of Mixed Integer Linear Programming with Discrete Time Horizons was proposed to solve the problem of production scheduling in a machine with fixed lots, in a lead metallurgy inserted in the supply chain of manufacture of lead-acid batteries. The motivation of the study is based on the historical record of high levels of lead alloy inventory in the metallurgical industry in question, which has impacted on high inventory costs. It was verified a resupply model that best represented the demand profile of the product. The model developed has the objective of minimizing inventories at the end of the planning period, taking into account the constraints of safety stocks and the production process. The implementation of the model was done in IBM ILOG CPLEX software with data from a past period, and as a result of the application, a saving about R\$ 3.2 million in inventory costs was obtained.

Keywords: Production Planning and Control. Production Scheduling. Integer Programming. Inventory Management. Lead Metallurgy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Etapas da produção primária de chumbo	19
Figura 2 –	Etapas da produção secundária	21
Figura 3 –	Entradas e saídas do processo de fusão	22
Figura 4 –	Fluxo de informações na cadeia hierárquica de três níveis de decisão	24
Figura 5 –	Classificação ABC-VF	28
Figura 6 –	Metodologia de pesquisa	34
Figura 7 –	Representação das linhas de produção de Refino	37
Gráfico 1 –	Curva ABC das ligas de chumbo	39
Gráfico 2 –	Metas de manutenção de estoques sob a classificação ABC	40
Gráfico 3 –	Níveis de estoque ao longo do tempo gerado pelo modelo	47
Figura 8 –	Sequenciamento da produção de ligas de chumbo gerado pelo modelo	48
Figura 9 –	Sequenciamento realizado no período de planejamento	50
Gráfico 4 –	Níveis de estoque ao longo do tempo realizado no período de planejamento	50
Gráfico 5 –	Níveis de estoque ao longo do tempo com demanda real utilizando sequenciamento gerado pelo modelo	51
Quadro 1 –	Análise comparativa de cenários	52
Gráfico 6 –	Níveis de estoque ao longo do tempo com demanda subestimada em 10% utilizando sequenciamento gerado pelo modelo	52
Gráfico 7 –	Níveis de estoque ao longo do tempo com demanda superestimada em 10% utilizando sequenciamento gerado pelo modelo	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Classificação ABC das ligas de chumbo	38
Tabela 2 –	Demanda mensal das ligas de chumbo de Classe C	40
Tabela 3 –	Parâmetros de entrada para o modelo em estudo	46
Tabela 4 –	Comparação de custos de manutenção de estoques inicial e final	48
Tabela 5 –	Comparativo de demanda informada vs. realizada	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMPL	<i>A Mathematical Programming Language</i>
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
APS	<i>Advanced Planning and Scheduling</i>
BIN	Bateria Inservível
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPM	<i>Critical Path Method</i>
EOQ	<i>Economic Order Quantity</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
et al.	e outro
FCA	<i>Financial Conduct Authority</i>
JIT	<i>Just in Time</i>
LEC	Lote Econômico de Compra
LME	<i>London Metal Exchange</i>
MES	<i>Manufacturing Execution Systems</i>
MPLIM-HD	Modelo de Programação Linear Inteira Mista com Horizonte de tempo Discretizado
MRP	<i>Material Requirement Planning</i>
NSC	Nível de Serviço de Ciclo
OPL	<i>Optimization Programming Language</i>
Pb-A	Chumbo-ácido
PbSb	Chumbo com alto teor de Antimônio
PCP	Planejamento e Controle da Produção
PERT	<i>Program Evaluation and Review Technique</i>
PMP	Plano Mestre de Produção
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PP	Polipropileno
RIE	<i>Recognised Investment Exchange</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	O MERCADO DE FABRICAÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO DE CHUMBO PARA BATERIAS AUTOMOTIVAS	18
2.2	O PROCESSO DE TRANSFORMAÇÃO DO CHUMBO	19
2.3	PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO	22
2.4	GESTÃO DE ESTOQUES	25
2.4.1	Curva ABC	27
2.4	SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO.....	29
2.5.1	Ferramentas de apoio a gestão do sequenciamento da produção	31
3	METODOLOGIA	33
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	33
3.2	COLETA DE DADOS	34
3.3	ETAPAS DA PESQUISA	34
4	MODELO PARA O PLANEJAMENTO E SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO DE CHUMBO	36
4.1	DESCRIÇÃO DA EMPRESA	36
4.2	O PROCESSO DE TRANSFORMAÇÃO DO CHUMBO	36
4.3	ESTOQUES DE SEGURANÇA E CURVA ABC	38
4.4	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	41
4.5	CONSTRUÇÃO DO MODELO PARA PLANEJAMENTO E SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO DE CHUMBO	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.1	SOLUÇÃO DO MODELO	46

5.2	VALIDAÇÃO DA SOLUÇÃO	49
5.2.1	Análise de sensibilidade	52
5.3	IMPLEMENTAÇÃO DA SOLUÇÃO	53
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
6.1	CONCLUSÕES	56
6.2	LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS	56
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

O mercado de veículos automotivos tem crescido ao longo dos últimos anos, como apresentado no Anuário da Indústria Automobilística Brasileira (2019), onde é evidenciado um crescimento contínuo na frota nacional. A Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores (Anfavea, 2019) estima que, em 2034, a taxa de motorização, isto é, a quantidade de habitantes por veículos, será de 2,4 no Brasil. Com isso, as vendas do mercado automotivo tenderão a crescer, movimentando a indústria nacional de montadoras, e conseqüentemente, toda a indústria que fornece componentes para este mercado, incluindo os acumuladores elétricos.

Tem sido amplamente difundido o conceito de carros elétricos como uma alternativa “limpa” aos veículos movidos a combustão interna por não emitirem gases de efeito estufa na sua utilização (GALLOWAY, 2019; ORTIZ, 2018). Entretanto, ainda há discussão acerca do impacto ambiental gerado na produção de veículos elétricos, conforme Qiao et al. (2017), que em um estudo comparativo na China, foi constatado que a produção de veículos elétricos produz, em média, 60% mais CO₂ que a produção de veículos movidos a combustão interna. Entretanto, há um potencial de redução de emissões em até 66% aperfeiçoando as técnicas de fabricação. De qualquer forma, segundo Ellsmoor (2019), apenas pelo fato de que os veículos elétricos produzem menos emissões ao longo do ciclo de vida, independentemente da fonte de energia, confirma-se que o veículo elétrico é de fato o veículo do futuro.

Os fabricantes de automóveis também estão aceitando o fato de que os carros elétricos são menos poluentes e produzi-los ajudará a reduzir as emissões totais de carbono. Além disso, as economias de escala beneficiarão a fabricação de veículos elétricos, fornecendo melhor infraestrutura, técnicas de fabricação mais eficientes, opções de reciclagem e redução da necessidade de mineração de novos materiais. Apesar de toda a tecnologia associada ao mecanismo de tração dos carros elétricos, ainda se faz necessário uma bateria, geralmente Pb-A (chumbo-ácido) de 12V, para alimentação do sistema de bordo, faróis, vidros elétricos e outros instrumentos. Portanto, mesmo com o avanço da tecnologia dos veículos, há uma perspectiva de que o mercado de baterias se manterá como elo da cadeia de suprimentos da indústria automotiva.

Uma das principais matérias-primas para a fabricação de baterias automotivas é o chumbo, minério não-ferroso que admite dois tipos de processamento: (i) o primário, quando o chumbo é processado em sua forma *in natura*, e (ii) o secundário, quando o chumbo é obtido pelo processo de reciclagem. No Brasil, o processamento secundário do chumbo é o mais comumente vivenciado pelas indústrias, pois o país não possui jazidas de extração, tendo que importar os itens para serem processados.

Esse processo de compras por importação, requer diversas atenções, pois há grandes desafios relacionados à gestão desse material, por conta do seu alto custo, complexidade de aquisição, variações de índices de mercado, espaço físico, e outros, além de toda a rede de logística reversa das baterias. Este cenário torna favorável a alavancagem de empresas que investem em ferramentas que auxiliem no planejamento, controle e gestão desse material.

Uma das dificuldades apresentadas nas indústrias de fabricação de baterias é o processo de decisão sobre o sequenciamento da matéria prima a ser processada, pois dessa decisão depende o nível de estoque do produto. O nível de estoque requer cuidados para que haja disponibilidade de matéria prima para impulsionar a fabricação de baterias, mas que não comprometa o investimento com custos elevados de manutenção do estoque.

Para isso, são utilizados conceitos relevantes sobre gestão de estoques e planejamento e controle da produção (PCP) para apresentar um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista com Horizonte de Tempo Discretizado para resolução do problema de sequenciamento da produção em uma máquina com batelada fixa de fabricação, em uma metalúrgica de chumbo inserida na cadeia de suprimentos de fabricação de baterias de chumbo-ácido. O foco do modelo é direcionado ao sequenciamento da produção e transformação do chumbo, que é uma das etapas do processo de produção considerada como o gargalo crítico para a disponibilização do estoque do material para a fabricação de baterias.

1.1 JUSTIFICATIVA

O Planejamento e Controle da Produção (PCP) tem um papel importante na gestão dos materiais de uma forma geral. De acordo com Tubino (2007), o PCP é um setor de apoio dentro do sistema produtivo, tomando decisões em todos os horizontes de planejamento acerca de quando, quanto, onde e como produzir. Estas decisões

impactam diretamente na disponibilidade de material, programação de aquisições, estoques de produtos acabados, custos operacionais e outros, por isso, têm grande importância em uma organização.

Dentro do PCP, a função de sequenciamento de produção tem uma importância estratégica quanto a utilização de recursos produtivos, que, de acordo com Tubino (2007), tem grandes diferenças a depender do sistema produtivo que se está programando. Com o avanço do poder de processamento dos computadores, foi possível um aumento no nível de detalhe da programação das sequências de produção, em especial com a expansão das ferramentas *Manufacturing Execution Systems* (MES) e *Advanced Planning and Scheduling* (APS).

Essa aplicabilidade pode ser percebida em indústrias de diversos setores. Em uma indústria metalúrgica de fabricação de baterias automotivas, foi possível verificar os níveis excessivos de estoque de produtos acabados, bem como a falta de sinergia entre os objetivos de gestão de estoques e PCP, falta de um sistema de ressuprimento bem definido e incerteza sobre a demanda. Diante desse cenário, ficou evidente a oportunidade de realização de um estudo detalhado, com a finalidade de identificar as possíveis causas e propor ações corretivas para auxiliar a gestão quanto às decisões sobre a produção.

O propósito do estudo tem grande potencial de redução de custos de manutenção de estoques, no entanto, também há grandes desafios de acesso às informações e implementação. Por tal, com a aplicação do modelo matemático para a programação e sequenciamento da produção, espera-se reduzir os níveis de estoque desse produto a níveis seguros, isto é, que não exponham a empresa a um risco de ruptura, reduzindo os custos de manutenção, atendendo a demanda dos clientes e auxiliando no processo de decisão.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um modelo matemático para apoiar o processo de decisão sobre o sequenciamento da produção de chumbo da metalúrgica, para alinhar a produção com a política de estoques da empresa, reduzindo os custos de manutenção e evitando rupturas de estoques.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar a causa dos níveis excessivos de estoque de ligas de chumbo da metalúrgica;
- Classificar os variados tipos de ligas de chumbo para destacar os de maior impacto na formação do estoque;
- Construir um modelo de planejamento e sequenciamento de produção para auxiliar na tomada de decisão sobre o plano de produção e gestão de estoques;
- Verificar aplicabilidade do plano de produção gerado a partir do modelo desenvolvido;
- Levantar requisitos para implementação do método estabelecido.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho tem a seguinte estrutura:

- No primeiro capítulo é apresentada a problemática do estudo, a principal motivação e os objetivos, geral e específicos;
- No segundo capítulo é realizada uma revisão da literatura e estabelecida a fundamentação teórica do trabalho;
- No terceiro capítulo é exposta a metodologia de pesquisa, onde são definidas as etapas do trabalho e os métodos utilizados;
- No quarto capítulo é feito um diagnóstico do modelo de ressuprimento atual e detalhada a construção do modelo, a descrição da empresa e a definição do problema;
- No quinto capítulo são demonstrados os resultados da aplicação do modelo, sua validação e análise de sensibilidade, bem como comentários acerca de sua implementação;
- Finalmente, no sexto capítulo são feitas as considerações finais sobre o trabalho, são expostas suas limitações e sugestões de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção, serão apresentados conceitos referentes ao mercado de fabricação e comercialização de chumbo para baterias automotivas, ao processo de transformação do chumbo.

2.1 O MERCADO DE FABRICAÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO DE CHUMBO PARA BATERIAS AUTOMOTIVAS

O chumbo é a principal matéria-prima para a fabricação de baterias Pb-A. No Brasil, como no restante do mundo, o uso predominante do chumbo se deve à fabricação de baterias automobilísticas, com uma representatividade de 80% (INSTITUTO DE METAIS NÃO FERROSOS, 2010; ELLIS; MIRZA, 2010). Pelo mundo, evidencia-se não apenas o constante uso do metal, mas acompanha-se um crescimento histórico no consumo, de 3% a 5% ao ano no final de 1990 e primeira década dos anos 2000 (INSTITUTO DE METAIS NÃO FERROSOS, 2010). O Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico (2018) expõe dados sobre produção, importação, exportação que evidenciam que o mercado nacional desse metal não-ferroso também vem crescendo nos últimos anos.

Assim como outras *commodities*, o chumbo tem seus preços indexados na *London Metal Exchange* (LME), que se estrutura como uma *holding*, cujo objetivo é fornecer instalações, juntamente com a estrutura gerencial e regulatória, para negociação de contratos na LME, que é uma Bolsa de Investimento Reconhecida (RIE), regulada diretamente pela *Financial Conduct Authority* (FCA) (*LONDON METAL EXCHANGE*, 2019). Por sua credibilidade, a grande maioria das transações comerciais envolvendo chumbo utiliza a LME como parâmetro de precificação.

Existem dois principais processos de transformação do chumbo: (i) a produção primária, em que é utilizado o minério de chumbo; e (ii) a produção secundária, em que o metal é processado pelo sistema de reciclagem de produtos que contém chumbo. De acordo com Ellis e Mirza (2010), o chumbo oriundo da produção secundária, tornou-se a principal fonte do material em grande parte do mundo. Isso aconteceu sob imensa pressão social para mitigar os riscos ambientais e à saúde do uso de chumbo, bem como fornece o material necessário para apoiar o crescimento econômico nas economias industrial e emergente. No Brasil, a produção do chumbo

é quase que exclusivamente secundária, visto que as condições geológicas do país não favorecem a formação de jazidas de chumbo (BRAZ, 2009).

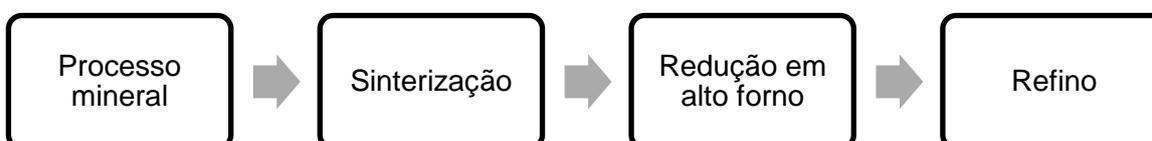
No Brasil foram tomadas medidas para mitigar riscos ambientais provenientes do uso desse material, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que define que a bateria é um dos produtos que devem participar do sistema de Logística Reversa, onde o resíduo perigoso retorna ao fabricante a fim de ser destinado corretamente. Além disso, de acordo com a resolução CONAMA nº 401/08, as empresas que comercializam baterias de chumbo-ácido precisam receber dos seus clientes os produtos usados e encaminhar aos recicladores. Também, não é permitida a disposição final desses produtos em aterros sanitários, incineração a céu aberto ou em instalações e equipamentos não licenciados, bem como lançamento em corpos d'água, praias, manguezais, pântanos, terrenos baldios, poços, cacimbas, cavidades subterrâneas, redes de drenagem de águas pluviais, esgotos, ou redes de eletricidade ou telefone. O transporte das baterias Pb-A também deve estar de acordo com a resolução ANTT nº 5.232/16, que dispõe de exigências detalhadas aplicáveis ao transporte terrestre de produtos perigosos.

Com as regulamentações brasileiras, as indústrias do setor precisam adequar seu processo produtivo e logística reversa. Sendo assim, é fundamental entender as etapas do processo de transformação do chumbo e implementar estratégias de controle sobre a produção.

2.2 O PROCESSO DE TRANSFORMAÇÃO DO CHUMBO

Em geral, a produção de chumbo ocorre por meio de duas vias, (i) a produção primária e (ii) a produção secundária, que se diferenciam pela matéria prima utilizada na entrada do processo. Na produção primária, na entrada do processo é utilizado o minério de chumbo *in natura* e, de acordo com Sobral et al. (2012), as principais etapas do processo podem ser resumidas pela Figura 1.

Figura 1 – Etapas da produção primária de chumbo



Fonte: Autoria própria, 2019

Como visto pela Figura 1, as etapas do processo de produção primária do chumbo correspondem a:

- Processamento mineral, cuja principal função é elevar o teor de chumbo do produto para uma faixa de 65% a 80%;
- Sinterização, para remoção do excesso de enxofre contido (PbS) e aglomeração das partículas finas (PbO);
- Redução em alto forno, a fim de formar os óxidos metálicos e, posteriormente, serem reduzidos aos respectivos metais;
- e por fim, o Refino, objetivando remover os elementos contaminantes do produto, deixando-o dentro da especificação pré-estabelecida para ele.

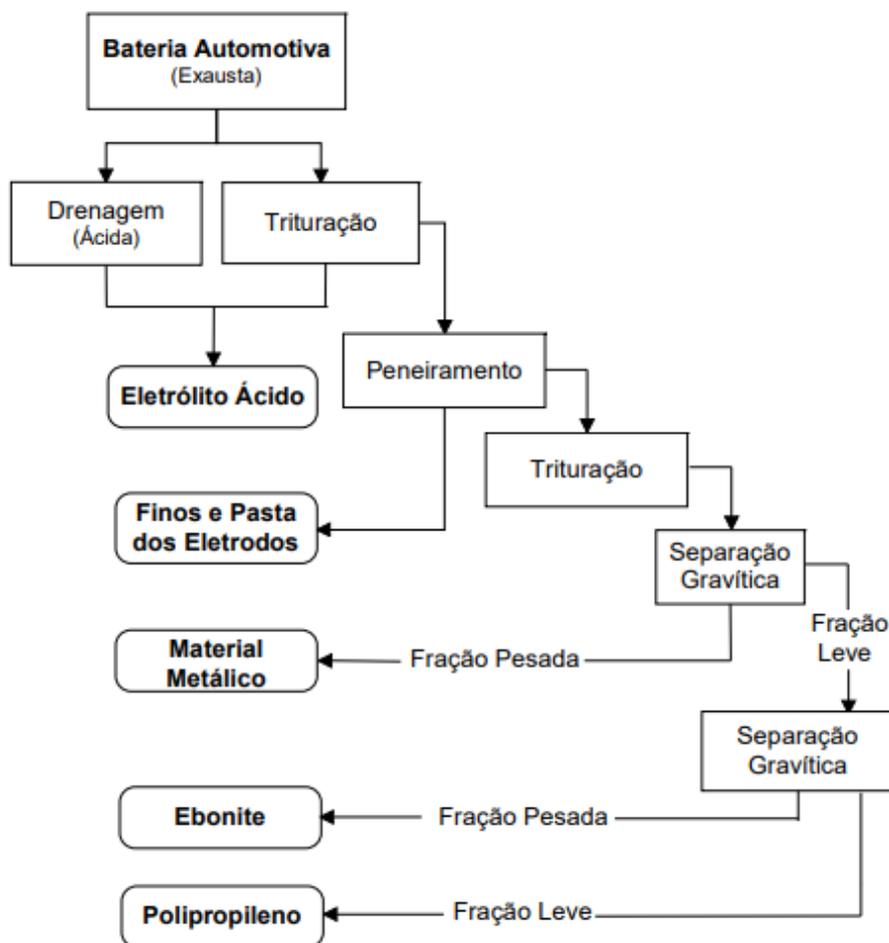
Por outro lado, a produção secundária de chumbo diz respeito ao processo de reciclagem de produtos que contém chumbo, como exemplo, sucata de bateria de chumbo-ácido, escória de chumbo, entre outros.

Para as sucatas de baterias ou baterias inservíveis (BIN), deve haver um processo de separação de seus componentes, que de acordo com Sobral et al. (2012), ocorrem por processos mecânicos de rompimento e separação. De acordo com Ellis e Mirza (2010) neste processo são utilizados moinhos de martelos, onde segue para um processo de separação hidrodinâmico baseado na lei de Stoke, que afirma que a separação pode ser realizada em virtude da diferença de densidade entre os materiais usando um fluido de densidade intermediária entre as fases sólidas. Como a densidade do polipropileno (PP) é menor que a da água, enquanto a densidade do metal (composto de chumbo) é muito maior que a da água, a operação de afundamento e flutuação é uma metodologia eficaz para alcançar uma segregação quantitativa quase completa. A Figura 2 ilustra o processo em que são separados solução de ácido sulfúrico, chumbo solúvel e PP.

Segundo a *Battery Council International* (2016), a solução de ácido pode ser neutralizada, passando por um tratamento de limpeza e em seguida, descartada no sistema de esgoto ou utilizada nas atividades da fábrica, como jardinagem ou descarga de banheiros. Outra forma é tratar o ácido convertendo-o em sulfato de sódio, que é útil na fabricação de detergentes, vidros e produtos têxteis. Já o polipropileno é lavado, seco e direcionado à reciclagem, onde é fundido e extrusado

em pequenas esferas uniformes, prontas para serem utilizadas na produção de novas caixas de baterias.

Figura 2 – Etapas da produção secundária



Fonte: Sobral et al. (2012)

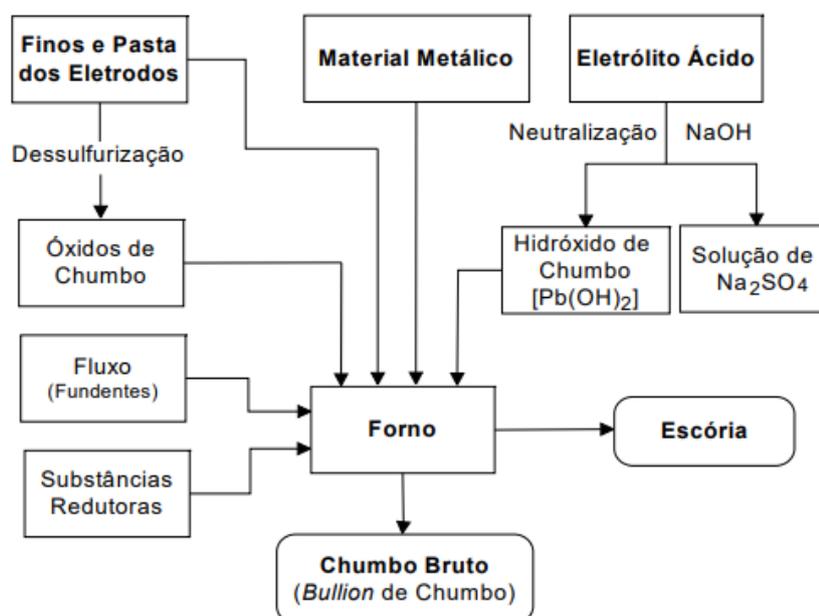
Sobral et al. (2012) explicam que, em seguida, o chumbo solúvel passa por um processo de fusão, onde são formadas e posteriormente removidas, quantidades consideráveis de escória. A Figura 3 apresenta esse processo em que é obtido o chumbo bruto, ou *bullion*. Esse material ainda contém substâncias impuras, tais como prata, ouro, cobre, zinco, antimônio, estanho, arsênio e bismuto.

Todo o processo é finalizado no refino e lingotamento do chumbo remanescente, que por sua vez, remove todos os elementos contaminantes do material, deixando-o na especificação desejada. Alguns dos processos de refino são:

- Processo *Harris*, para a remoção de arsênio, estanho e antimônio;

- Processo *Parke*, para remover a prata;
- Processo *Betterton-Kroll* para a remoção do bismuto

Figura 3 – Entradas e saídas do processo de fusão



Fonte: Sobral et al. (2012)

A complexidade dos processos de produção secundária de chumbo requer atenções variadas sobre o planejamento e controle da produção, em especial por essa ser a principal fonte de fornecimento de matéria prima para a produção de produtos acabados na indústria de baterias. Por tal evidência, é essencial a apresentação das implicações desse conceito para o entendimento do estudo.

2.3 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO

O processo de Planejamento e Controle da Produção (PCP) é responsável pela coordenação e aplicação dos recursos produtivos de forma a atender da melhor maneira possível aos planos estabelecidos nos níveis estratégico, tático e operacional das organizações (TUBINO, 2007). Corrêa et al. (2009) explicam que, independente da lógica que se utilize, os sistemas de administração da produção devem ser capazes de apoiar o tomador de decisões a:

- Planejar as necessidades de capacidade produtiva;
- Planejar os materiais comprados;
- Planejar os níveis adequados de estoques de matérias primas, semiacabados e produtos finais;
- Programar atividades de produção para garantir que os recursos produtivos estejam sendo utilizados, em cada momento, nas coisas certas e prioritárias;
- Saber corretamente a respeito da situação corrente dos recursos e das ordens;
- Ser capaz de prometer os menores prazos possíveis aos clientes e depois fazer cumpri-los.

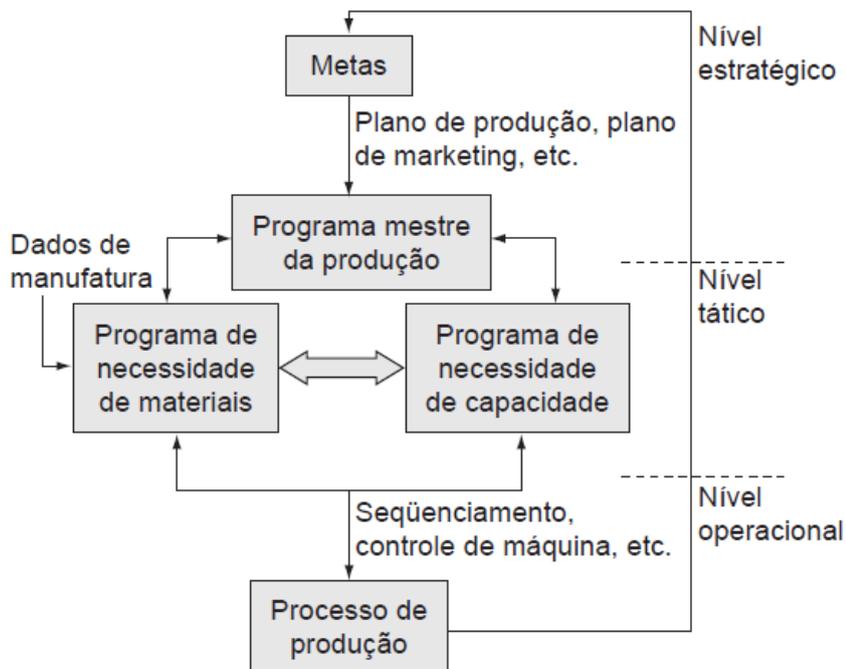
Segundo Tubino (2007), dentro do planejamento estratégico da produção, o PCP estabelece um plano de produção a longo prazo, de acordo com as estimativas de vendas, que, de acordo com Corrêa et al. (2009), é uma informação enviada pelos setores de Marketing e Vendas, além disso, são aliadas informações de disponibilidade de recursos financeiros e produtivos. A capacidade de produção é o fator limitante do processo e pode ser incrementada ou reduzida, desde que seja planejada a tempo. Neste nível de planejamento, o plano de produção não possui detalhes, pois geralmente é trabalhado por famílias de produtos, e visa adequar os recursos produtivos à demanda esperada.

A um nível tático, há o Plano-Mestre de Produção (PMP), que Tubino (2007) define como o plano pelo qual os produtos serão produzidos a médio prazo. Este plano é baseado nas previsões de vendas de médio prazo ou nos pedidos em carteira já confirmados. Corrêa et al. (2009) explicam que o PMP é uma declaração de quantidades planejadas que dirigem os sistemas de gestão detalhada de materiais e capacidade.

A programação da produção, para Tubino (2007), é um plano de nível operacional baseado no PMP, registros de controle de estoques e nas informações da Engenharia. Sua função é estabelecer, a curto prazo, quanto e quando comprar, fabricar ou montar cada item necessário à composição dos produtos finais. Para Corrêa et al. (2009), é, com base na visão de futuro das necessidades de disponibilidade dos produtos, calcular os momentos e as quantidades que devem ser obtidas, de cada um dos componentes para que não haja falta nem sobra no suprimento das necessidades dadas pela produção. A Figura 4 ilustra a interação

entre as responsabilidades do PCP nos três níveis hierárquicos de decisão, que devem estar em comunicação constante. A comunicação das decisões e disseminação das informações são facilitadas por meio do auxílio da tecnologia.

Figura 4 – Fluxo de Informações na cadeia hierárquica de três níveis de decisão



Fonte: Filho e Cezarino (2007)

Em um estudo realizado por Fernandes e Santoro (2005), foi percebido que a importância que as organizações dão ao PCP está em função de alguns fatores, como o nível competição do mercado de atuação, a forma de atender à demanda (produção para estoque ou sob encomenda), complexidade da estrutura de produtos, complexidade das restrições tecnológicas ou organizacionais e a variedade de produtos finais. Também foi constatada correlação positiva entre o grau de importância atribuído ao PCP e o volume de recursos humanos e computacionais alocados à função. Além disso, quanto maior o grau de prioridade dado ao PCP, mais as decisões são baseadas em soluções computacionais, evidenciando a importância dessas ferramentas para a alavancagem competitiva.

Pode-se, então, perceber que o funcionamento eficiente do PCP é de grande importância, visto que se pode ganhar tempo significativo a partir da programação confiável e com o sequenciamento correto da produção, e assim controlar para que tudo aconteça como planejado (BEKER; GUTIERREZ, 2009).

Por sua grande interface, a Gestão de Estoques é diretamente impactada por uma possível falta de coordenação do PCP, acarretando altos custos de manutenção de estoques, como comentado por Corrêa et al. (2009), que pontuam também sobre o impacto da incerteza dentro da cadeia de suprimentos no planejamento da produção e na gestão de estoques, sobretudo na disponibilização para a produção de baterias de chumbo.

2.4 GESTÃO DE ESTOQUES

De acordo com Corrêa et al. (2009), os estoques podem ser úteis para proteger o sistema produtivo de problemas que podem causar parada do fluxo de produção, como falta de peças ou atrasos de fornecedores. Além disso, dão independência a cada fase produtiva, fazendo com que os problemas de uma fase não atinjam as fases subsequentes do processo produtivo. Do ponto de vista de Santos e Rodrigues (2006), os estoques são de extrema importância, pois incrementam a possibilidade de um melhor nível de atendimento ao cliente, melhorando a competitividade frente aos concorrentes.

Ballou (2006) explica que os estoques se formam por quatro razões: (i) para reduzir custos de transporte e de produção, (ii) para coordenar oferta e demanda, (iii) para auxiliar no processo de produção e (iv) para auxiliar no processo de marketing. Ainda, os estoques podem ser formados através da exploração de economias de escala, com a finalidade de redução de custos de produção ou compra (CHOPRA; MEINDL, 2016).

Napierala (2009) afirma que tanto pelo custo dos itens estocados quanto pela associação direta com o ciclo operacional da empresa, a gestão de estoques tem significativa importância para as organizações. Fazel et al. (1998) afirmam que uma importante decisão em empresas de manufatura é a escolha do sistema de gestão e controle de estoques. Duas das técnicas mais utilizadas são *Just In Time* (JIT) e *Economic Order Quantity* (EOQ).

De acordo com Taha (2008), no EOQ, ou Lote Econômico de Compra (LEC), o ressuprimento pode ser baseado em revisão periódica, onde novos pedidos são emitidos no início de cada período pré-estabelecido, ou por revisão contínua, onde os pedidos são emitidos apenas quando o estoque atinge para um determinado nível, denominado ponto de ressuprimento ou de reposição. Corrêa et al. (2009) explicam

que no modelo do LEC, ao passo que são retiradas determinadas quantidades de algum item do estoque, a quantidade restante é verificada. Se a quantidade restante for menor que o ponto de reposição, é realizada a compra ou produção de um lote de ressuprimento, que leva determinado tempo, chamado tempo de ressuprimento ou *lead time*.

Tubino (2007) esclarece que o modelo do ponto de ressuprimento não está necessariamente vinculado ao uso do lote econômico, porém, já que há a necessidade de reposição, esta quantidade pode ser o lote econômico, pois há uma otimização nos custos. Além disso, o tempo de ressuprimento, em geral, resulta da soma de quatro tempos parciais: o tempo de preparação da ordem de reposição, o tempo de preparação da operação de compra ou fabricação, o prazo de entrega da fabricação interna ou externa, e o tempo gasto com o transporte e recepção do lote. No caso do chumbo ou produção em bateladas em geral, existe um lote econômico de fabricação que otimiza os custos de produção. Isso requer maior atenção da parte do planejador ao emitir ordens de produção ou compra.

O JIT é mais que um sistema de gestão de estoques. De acordo com Ballou (2006), a programação JIT pode ser definida como uma filosofia de planejamento em que todo o canal de suprimentos é sincronizado para reagir às necessidades das operações dos clientes. Fazel et al. (1998) explicam que se trata de um sistema que foi projetado para eliminar a necessidade de manter itens em estoque, por isso requer uma revisão geral do sistema de produção e fornecimento. Seus benefícios incluem redução de custos de manutenção de estoques, de custos de fabricação, custos de pedidos, eliminação de desperdícios, simplificação do processo de produção e eliminação de gargalos no processo.

Todos os modelos de reposição possuem o mesmo objetivo, que é o de garantir a disponibilidade do produto na quantidade certa e no momento certo, o que pode ser traduzido em garantir o Nível de Serviço de Ciclo (NSC). De acordo com Chopra e Meindl (2016), o NSC é uma métrica utilizada para verificar a probabilidade de não haver falta de estoque em um ciclo de reposição, isto é, no intervalo entre duas remessas de reposição sucessivas.

No trabalho desenvolvido por Fazel et al. (1998), foram comparados os custos de compra e manutenção de estoques associados ao JIT e ao EOQ, a fim de determinar em quais cenários um se sobrepõe ao outro. Como resultado, foi percebido que o modelo EOQ traz maiores vantagens em um cenário de altas demandas e

baixos custos de pedido. Já o modelo JIT se torna mais competitivo à medida que o custo de manutenção aumenta ou quando a demanda pelo item é relativamente baixa.

Uma prática comum no controle agregado de estoques é diferenciar produtos em um número limitado de categorias e depois aplicar uma política de controle de estoques separada a cada uma dessas categorias (BALLOU, 2006). A Curva ABC é uma forma de classificação muito utilizada que usa o critério valor de uso anual (SANTOS; RODRIGUES, 2006). Também chamado de Curva 80-20 (BALLOU, 2006), é baseada na lei de Pareto, cujo conceito foi replicado para a área de negócios. A partir dela é possível concluir que a maior parte das vendas é gerada por um conjunto de poucos produtos. Este conceito é útil no planejamento da distribuição quando os produtos são classificados por meio de suas atividades de venda, como no caso da gestão do chumbo na metalúrgica.

2.4.1 Curva ABC

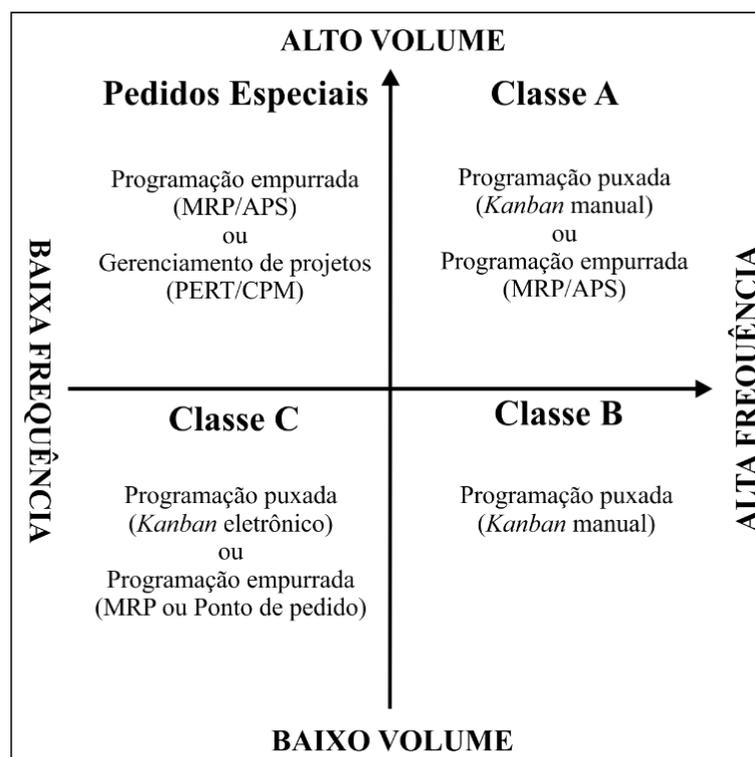
De forma genérica, a aplicação da curva ABC indica que os 20% dos produtos mais bem classificados são alocados na categoria de itens A, os 30% seguintes, itens B, e os restantes, são classificados como itens C. Por meio da Curva ABC, pode-se dedicar mais atenção aos itens A por representarem alta participação nos valores movimentados de estoque (SANTOS; RODRIGUES, 2006).

Esta ferramenta é amplamente utilizada para tomada de decisão acerca de políticas de ressuprimento, níveis de estoques e priorização para a programação da produção (DIAS, 2010). Santos e Rodrigues (2006) propõem um método de classificação dos materiais em famílias afins com a adoção de políticas distintas de ressuprimento e estoques de segurança. Vago et al. (2013) identificam como a utilização da Curva ABC pode contribuir com a gestão de um almoxarifado de um Centro de Pesquisa Federal, que desenvolve estudos na área de saúde, para o gerenciamento das necessidades de estoque.

Tubino (2007) comenta que apenas a análise sob a ótica da demanda do item não é suficiente para a definição de qual deve ser o modelo de controle de estoque a ser empregado, sendo também necessário avaliar a frequência com a qual essas demandas ocorrem. Por meio da Figura 5, é possível entender a classificação ABC-VF de Tubino (2007), onde há uma recomendação de política de ressuprimento para cada classificação.

No quadrante Classe A, com altos volumes de demanda e alta frequência de pedidos, recomenda-se o sistema de programação puxada manual ou MRP com um sequenciador de capacidade finita (APS). No quadrante de Pedidos Especiais há poucos itens que, apesar de gerarem altos volumes, possuem baixa frequência de pedidos, portanto, recomenda-se a utilização de um sistema empurrado via MRP com sequenciador de capacidade finita (APS). Nos casos de demanda unitária por grandes projetos, recomenda-se um controle de estoques baseado no PERT/CPM. Para o quadrante Classe B, um *Kanban* visual ou manual tem bom desempenho. Finalmente, para o quadrante Classe C, onde estão a maioria dos itens que possuem baixo volume e frequência, mas que representam pouco em termos econômicos. A recomendação para esses itens é um *Kanban* eletrônico, pela quantidade de itens a se controlar ou MRP com parâmetros folgados ou ponto de pedido via planilha eletrônica.

Figura 5 – Classificação ABC-VF



Fonte: Adaptado de Tubino (2007)

Para o controle de estoques de ligas de chumbo, também pode ser utilizada esta classificação, pois há diferentes ligas com perfis distintos de demanda, gerando uma necessidade de desenvolvimento de políticas de ressuprimento personalizadas para cada caso.

Na literatura também é possível encontrar trabalhos onde foram desenvolvidas ou aplicadas técnicas de resolução ou abordagens de problemas de sequenciamento de produção, fruto da maior motivação de pesquisadores, como comentam Henriques et al. (2010). Isso reforça a importância do tema e da aplicação da tecnologia como aliada no dia-a-dia das organizações.

2.5 SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO

A gestão de estoques, dentro do sistema produtivo, tem a função de planejar e controlar os estoques, definindo tamanhos de lotes, modelos de reposição e estoques de segurança para os itens (TUBINO, 2007). Em função dessa gestão, o PCP precisa cumprir o PMP da melhor forma, de modo a otimizar os recursos produtivos. Além disso, dentro de um sistema de produção em lotes, deve-se priorizar um conjunto de ordens de fabricação a serem produzidas no período baseado na aplicação de um modelo de controle de estoques. A decisão que permeia esse problema se dá em duas questões centrais: (i) a seleção de uma ordem dentro de uma lista de ordens planejadas; e (ii) a escolha do recurso dentre uma lista de recursos a serem utilizados.

Tubino (2007) pontua que a função de sequenciamento é crítica para o desempenho do sistema produtivo em lotes, pois a maior parcela do *lead time* de um produto fabricado em lotes compreende o tempo em que o lote desse produto espera para ser trabalhado em um recurso produtivo, e se essa função não for adequadamente estruturada, pode chegar a 80% do tempo total. A partir desse dado percebe-se que, caso o problema não receba a devida atenção, pode ser responsável por um alto percentual de perda dentro do processo produtivo, por isso, de acordo com Alves et al. (2016), os problemas de sequenciamento são amplamente estudados na literatura, bem como por seu alto nível de dificuldade e aplicabilidade.

Segundo Fernandes e Santoro (2005), a um curto prazo dentro do PCP, são tomadas decisões para execução de modo a regular o fluxo de materiais. Os problemas gerados a partir dessas decisões são trabalhados de três formas: (i) controlar a produção baseando-se na programação da produção; (ii) controlar a produção a partir do nível de estoque e regras simples de sequenciamento operacionalizadas pelos trabalhadores do chão de fábrica; (iii) ou considerando essas duas formas integradas, ou seja, o PCP integrado com sequenciamento. Esta forma une o planejamento de um horizonte de tempo maior ao de curto prazo.

Em seu trabalho, Toledo et al. (2011) apresentam um modelo cujo horizonte de planejamento se divide em macroperíodos e microperíodos e utiliza a taxa de produção para definição do tamanho do lote de produção. Também foi avaliado o impacto da mudança na configuração padrão no CPLEX, e foi constatado que pode haver um comprometimento da solução final.

Henriques et al. (2010) apresentam uma formulação de programação inteira para o problema integrado de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção em uma máquina, com tempos de preparação dependentes da sequência. No modelo, foi inserida a possibilidade de ruptura, a fim de possibilitar maior flexibilidade à solução. Ao passo que, Mustu e Eren (2018) abordam o problema de sequenciamento em uma máquina minimizando o tempo de atraso total com tempos de *setup* dependentes da sequência e introduzindo o efeito de aprendizado baseado em posição dos tempos de processamento.

Alves et al. (2016) abordam o problema do sequenciamento de produção integrado ao problema do dimensionamento de lotes em uma máquina em três formulações matemáticas, duas dessas com variáveis indexadas no tempo, e uma utilizando variáveis contínuas. No trabalho, foi constatado que, dentre os três modelos apresentados, o Modelo de Programação Linear Inteira Mista com Horizonte de tempo Discretizado (MPLIM-HD), que se trata de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), com a suposição de que o tempo é uma variável discreta. O MPLIM-DH possui uma quantidade maior de restrições e variáveis, necessitando de maior tempo computacional, porém sua utilização se justifica por possuir limites mais fortes, acarretando uma solução mais próxima do ótimo.

Os problemas de PLIM, de acordo com Goldberg et al. (2016) se diferenciam dos problemas de Programação Linear Inteira (PLI) por aceitarem, além de valores inteiros, que outras variáveis do modelo assumam valores contínuos. Essas abordagens são amplamente utilizadas na literatura para o problema de sequenciamento da produção, principalmente quando associado ao problema de dimensionamento de lotes. Molina et al. (2013) aplicam PLIM ao problema de dimensionamento de lotes e programação da produção em uma empresa logística e utilizam o CPLEX para geração de instâncias e solução do modelo. Toledo et al. (2007) também aplicam o PLIM ao problema de dimensionamento de lotes e programação da produção em uma linha de engarrafamento de bebidas, e utilizam o CPLEX na resolução.

A fabricação de ligas de chumbo possui características que se assemelham aos trabalhos comentados, como a necessidade de geração de um plano de produção. Os problemas de sequenciamento e programação de produção também são abordados como PLIM, onde as variáveis inteiras alocam os recursos produtivos e as variáveis contínuas controlam outros parâmetros.

O nível de complexidade dessas abordagens, a depender do problema, inviabiliza qualquer tentativa de solução manual, como pontua Taha (2008), por isso a importância das ferramentas computacionais na resolução dos problemas. São amplamente utilizadas as linguagens AMPL (*A Mathematical Programming Language*), OPL (*Optimization Programming Language*) ou mesmo o *MS Excel Solver*. Em casos onde é necessário integrar controles aos sistemas empresariais, também há aplicações que podem gerar maior rapidez e assertividade nas tomadas de decisão.

2.5.1 Ferramentas de apoio a gestão do sequenciamento da produção

No mercado existem soluções computacionais para os problemas de sequenciamento e controle de produção, como é o caso do MES (Sistema de Execução e Controle de Fábrica), que são sistemas de informação que coletam dados do chão de fábrica em tempo real (GIACON; MESQUITA, 2011). Esse sistema surge como complemento aos ERP's, pois, de acordo com Corrêa et al. (2009), estes não conseguem verificar erros de previsão, problemas de qualidade, gargalos de capacidade, quebras, falhas de comunicação e outras ineficiências que podem prejudicar os planos. Portanto, o MES (i) realiza a realimentação do realizado para fins de comparação com o planejado e definição de ações corretivas; (ii) rastreia e gerencia as ordens de produção; e (iii) libera ordens e alocação de recursos.

Além do MES, existe outro tipo de sistema, denominado *Advanced Planning and Scheduling* (APS). De acordo com Giacom e Mesquita (2011), esses sistemas também servem de complemento aos ERP's, e podendo simular diversos planos e programações com diversas restrições, permitindo a geração de planos otimizados, resolvem problemas complexos de planejamento utilizando métodos heurísticos, programação linear e outros, também são sistemas com grande velocidade de processamento, mas que requerem um *hardware* dedicado. Um dos objetivos principais dos sistemas APS é a determinação exata do programa de produção,

respeitando as principais restrições referentes à disponibilidade de materiais e máquinas. Os sistemas APS consideram restrições de matéria prima, planejam a entrega dessa somente quando ocorre a necessidade, e utilizam pesquisa operacional na realização do *scheduling*, minimizando o custo de *setup*, cumprindo prazos de entrega, minimizando o *work in process*, *lead time*, entre outros.

Portanto, é evidente a importância das soluções computacionais na resolução de problemas de planejamento, sequenciamento e controle da produção. Com isso, há cada vez mais espaço para implementação de modelos de decisão para utilizando ferramentas computacionais e a Pesquisa Operacional para gerar vantagem competitiva nas organizações.

3 METODOLOGIA

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa, de modo geral, é voltada à formulação de um modelo que auxilie na tomada de decisão acerca de produção, estoques e suprimentos. Por isso, de acordo com Miguel et al. (2012), é possível classificá-la como pesquisa quantitativa. Trata-se, ainda, de uma pesquisa empírica, pois não visa um problema idealizado, e sim problema real. Além disso, a busca por um auxílio na tomada de decisão a define como normativa, isso porque, por meio do modelo, objetiva-se o estabelecimento de valores que otimizarão determinada função objetivo. A pesquisa, portanto, pode ser classificada como empírica quantitativa.

Segundo Miguel et al. (2012), esse tipo de pesquisa visa ao desenvolvimento de políticas, estratégias e ações que venham a melhorar a situação corrente. Bertrand e Fransoo (2002 apud MIGUEL et al., 2012, p. 178) comentam que trabalhos em pesquisa empírica baseada em modelagem matemática devem envolver diversos passos, entre eles:

- a identificação das premissas do processo e do problema de decisão;
- definições operacionais do processo e do sistema de decisão, bem como derivações das hipóteses relativas ao comportamento do processo;
- desenvolvimento de medidas e resultados dessas medidas e observações;
- interpretação dos dados e observações com relação às hipóteses;
- e confirmação ou rejeição das premissas do modelo teórico.

Baseada nos passos descritos, foram definidas as etapas da pesquisa. O processo foi, também, adaptado ao descrito por Arenales (2011), que define as etapas para o processo de modelagem matemática, que são:

- i. definição do problema;
- ii. construção do modelo;
- iii. solução do modelo;
- iv. validação do modelo; e,
- v. implementação da solução.

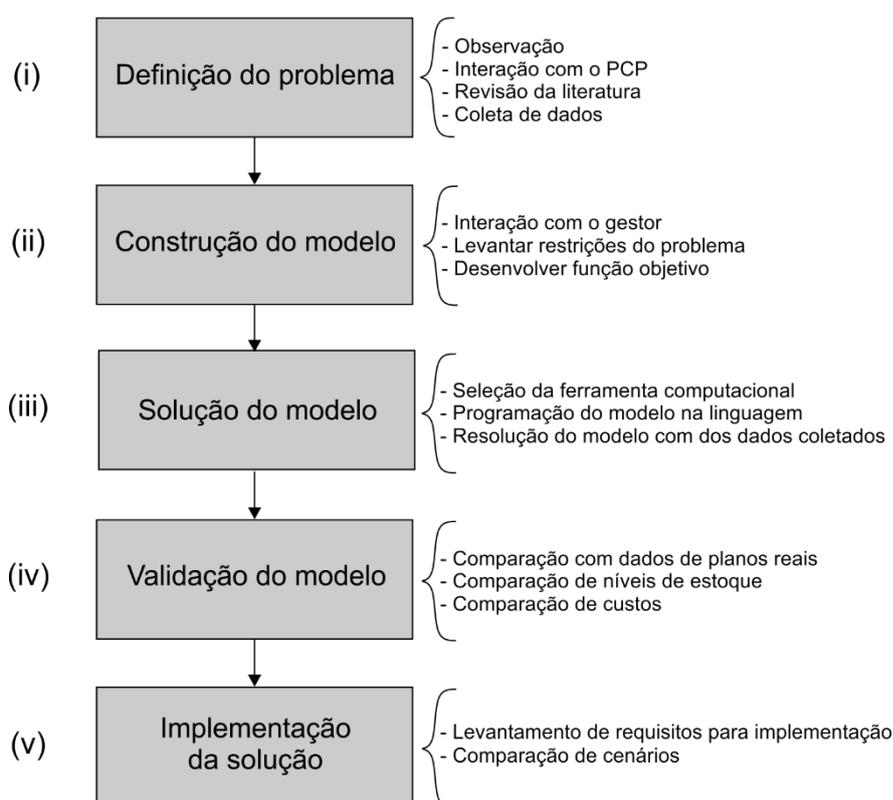
3.2 COLETA DE DADOS

Os dados utilizados no trabalho foram coletados a partir do ERP da empresa e de planilhas de controle. Todos os dados foram tratados, de forma a ficarem nas mesmas unidades de medida, para posterior utilização na elaboração, solução e validação do modelo.

3.3 ETAPAS DA PESQUISA

Com base nas considerações de Miguel et al. (2012) e Arenales (2011), a metodologia do presente trabalho pode ser representada pela Figura 6.

Figura 6 – Metodologia de pesquisa



Fonte: Autoria própria (2019)

As etapas desta metodologia, descritas na Figura 6, foram realizadas por meio de elaboração progressiva, ou seja, à medida que as etapas foram sendo concluídas, as etapas anteriores foram sendo mais explícitas e detalhadas. Este fator possibilitou um andamento mais rápido e claro de todo o trabalho.

- Etapa (i): esta etapa contou com constante observação do processo, suas variantes e inter-relações e consequências das decisões, também foi conversado com o PCP a fim de entender as restrições inerentes ao processo decisório. A primeira etapa convergiu na compreensão do problema e esboço do escopo do trabalho. Posteriormente, foi realizada uma revisão da literatura, a fim de encontrar trabalhos semelhantes e relacioná-los ao caso específico. Finalmente, ao analisar todo o escopo do trabalho e os trabalhos semelhantes, definiu-se os dados necessários para elaboração do modelo;
- Etapa (ii): a partir da etapa de definição do problema, foi possível verificar a melhor maneira de abordar e construir a modelagem matemática. Esta etapa ainda contou com a interação com o gestor responsável pela administração do produto acabado, a fim de levantar e discutir as nuances e restrições do problema, bem como definir o objetivo do modelo de forma mais concisa. Também foram utilizadas as informações passadas pelo PCP na Etapa (i);
- Etapa (iii): após a elaboração formal do modelo, foi selecionada uma ferramenta computacional para sua resolução. O software da IBM, CPLEX, foi selecionado e o modelo foi programado em sua linguagem. Os dados utilizados na solução foram coletados na Etapa (i);
- Etapa (iv): a validação do modelo foi feita a partir dos dados reais do período passado, coletado na Etapa (i).
 - Foram comparados os planos de produção gerado pelo modelo e o realizado pelo PCP;
 - além disso, foi comparada a curva histórica de estoque utilizando o plano de produção gerado e as demandas realizadas;
 - também foram encontrados e comentados problemas com compartilhamento de informações na cadeia de suprimentos.
- Etapa (v): ainda não foi possível realizar a implementação do modelo desenvolvido, entretanto foi feito um levantamento com base na literatura acerca dos requisitos qualitativos na cadeia de suprimentos para tal implementação em comparação com o cenário atual e suas perspectivas.

4 MODELO PARA O PLANEJAMENTO E SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO DE CHUMBO

4.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

A Empresa X, cuja sede é situada no interior de Pernambuco fabrica baterias Pb-A para atender diversos mercados. Com mais de 60 anos de atuação, conta com sete plantas industriais e com capacidade de mais de 7,5 milhões de baterias por ano. Em seu portfólio de produtos é possível encontrar baterias Pb-A para veículos *start-stop*, em sua linha automotiva, já na linha de veículos pesados, para máquinas agrícolas, empilhadeiras ou tratores, na linha tração, para peleteiras e rebocadores elétricos, na linha estacionária, para estações de telecomunicação, equipamentos médico-hospitalares, caixas eletrônicos, plataformas de petróleo, *nobreaks*, e outros, e ainda a linha náutica, com baterias para pequenas e médias embarcações e a linha para motocicletas.

Cada produto possui sua ficha técnica, a qual dispõe de informações acerca dos materiais que são necessários para sua fabricação. O chumbo é um dos itens comuns a todos os tipos de baterias Pb-A, o qual é produzido numa metalúrgica própria, que tem como principal matéria prima as baterias inservíveis (BIN) advindas da logística reversa da empresa.

4.2 O PROCESSO DE TRANSFORMAÇÃO DO CHUMBO

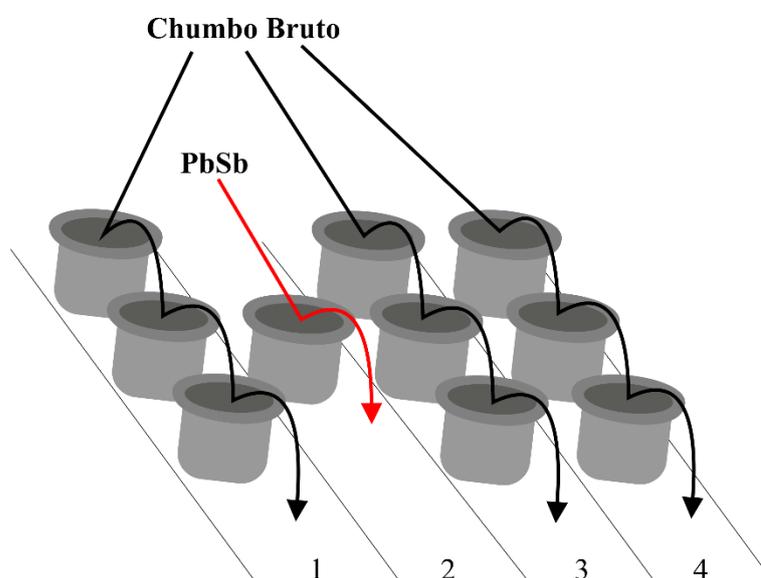
A rede de distribuição da empresa conta com depósitos em todo o país, que são parceiros do departamento comercial do mercado de reposição. Nestes depósitos ocorrem as vendas para os clientes finais, que são incentivados a entregarem sua bateria inservível no ato da compra. Dessa forma, o depósito tem como obrigação devolver a bateria inservível novamente à fábrica para reciclagem. Então, em suma, para uma bateria vendida, o depósito precisa entregar uma bateria inservível para a fábrica no mês seguinte.

Na metalúrgica, que opera durante os três turnos, de domingo a domingo, são produzidos 14 tipos de ligas com diferentes especificações e que são utilizadas em diferentes etapas do processo de fabricação de baterias. Para a manufatura das ligas de chumbo são necessários três processos: trituração, fundição e refino. O processo

de refino dispõe de quatro linhas de produção, onde os produtos são alocados estrategicamente, de forma a minimizar os riscos por contaminação das linhas pelos elementos químicos utilizados no processo.

A Figura 7 ilustra de forma conceitual as linhas de produção do Refino, que dispõe de painéis de refino de chumbo. Uma panela é um recipiente côncavo geralmente produzido em aço estrutural e refratários especiais em aço inoxidável, seu formato se assemelha a uma panela de cozinha e possui uma capacidade de 70 a 80 toneladas.

Figura 7 – Representação das linhas de produção do Refino



Fonte: Autoria própria (2019)

Nas linhas 1, 3 e 4 ilustradas na Figura 7, há três painéis disponíveis para operação, pois é necessário um maior tempo de ciclo e processos de correção de elementos diferentes para o chumbo advindo do processo de fundição. Isso ocorre por conta do formato do material, que demanda mais tempo para a fusão, bem como das impurezas advindas do material e do próprio processo.

Já na linha 2, com a panela única, é utilizado o PbSb para a fabricação de ligas de chumbo com alto teor de antimônio. O PbSb utilizado na empresa é comprado de outras metalúrgicas, além disso já é comprado em formatos de lingotes, o qual é utilizado somente na fabricação de sete ligas específicas, a saber: (i) Liga W, (ii) Liga F, (iii) Liga B, (iv) Liga U, (v) Liga R, (vi) Liga V e (vii) Liga T.

Essa estratégia foi definida dessa forma pelo fato de não haver produção suficiente de antimônio do processo de fundição para atender a demanda de ligas de antimônio. Diferentemente da produção com o chumbo oriundo de BIN, as ligas fabricadas com PbSb em lingotes têm um tempo de ciclo menor e mais padronizado e não possuem tempo de *setup* para a troca de uma liga para outra.

4.3 ESTOQUES DE SEGURANÇA E CURVA ABC

Para contextualizar os detalhes sobre o sistema de planejamento da Empresa X, faz-se necessário realizar uma análise de Curva ABC sobre os itens estocados com todos as ligas produzidas na metalúrgica, como pode ser visto na Tabela 1. Foram utilizados os dados de vendas de todo o ano de 2018 da metalúrgica para as unidades consumidoras das ligas.

Tabela 1 – Classificação ABC das ligas de chumbo

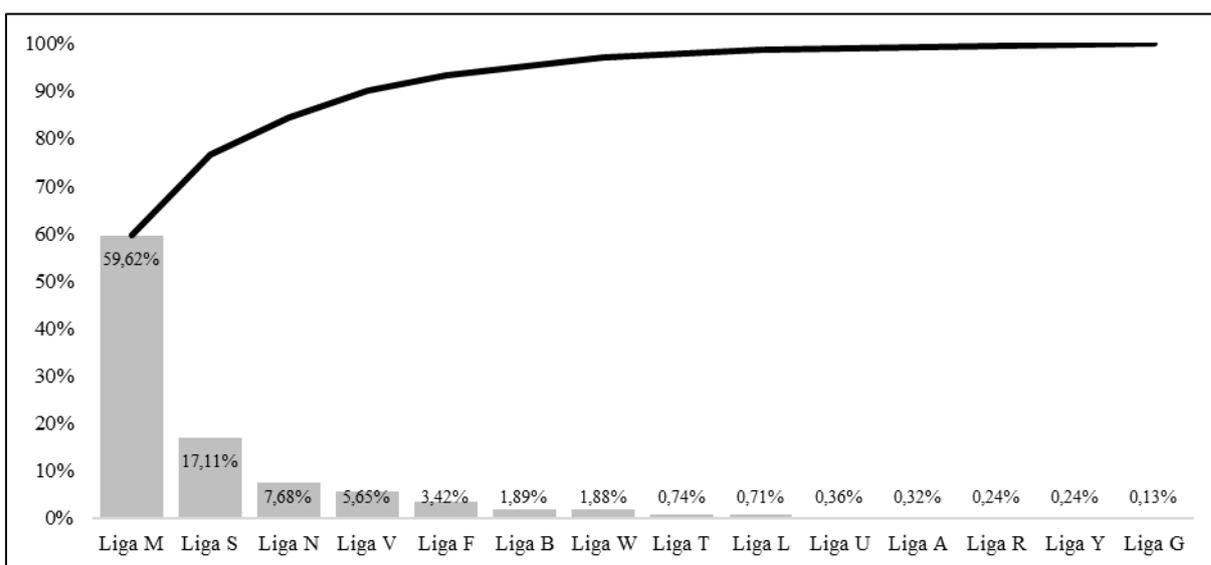
Liga	Volume de vendas	Percentual das vendas	Percentual acumulado	Classe
Liga M	57.337,91	59,62%	59,62%	A
Liga S	16.449,89	17,11%	76,73%	B
Liga N	7.382,83	7,68%	84,41%	B
Liga V	5.434,99	5,65%	90,06%	C
Liga F	3.292,53	3,42%	93,48%	C
Liga B	1.818,43	1,89%	95,37%	C
Liga W	1.807,15	1,88%	97,25%	C
Liga T	711,85	0,74%	97,99%	C
Liga L	679,71	0,71%	98,70%	C
Liga U	347,20	0,36%	99,06%	C
Liga A	307,41	0,32%	99,38%	C
Liga R	235,25	0,24%	99,63%	C
Liga Y	235,15	0,24%	99,87%	C
Liga G	123,96	0,13%	100,00%	C

Para os itens A, foi considerada uma participação de 60%, para itens B, 25% e C, 15%. Como pode ser notado pela Tabela 1, há um produto que se destaca dos demais, que está classificado como item A, com quase 60% das vendas, produzido nas linhas 1 e 4, além de ter uma parte de sua produção subcontratada. Em seguida, os itens B, que possuem uma participação considerável nas vendas, mas que não são subcontratados. Essas ligas têm produção exclusiva na linha 3 e juntas, representam

cerca de 25% das vendas. Por fim, os itens C, que possuem características de baixa demanda. Esta classe agrega todas as ligas com alto teor de antimônio, bem como algumas outras ligas com baixa rotatividade. A curva é representada no Gráfico 1, onde é nítida a discrepância da participação das classes.

O Gráfico 1, de fato, evidencia um perigo potencial relacionado às vendas e ao controle de estoque. A Liga M (item A), possui maior rotatividade, por isso deve ter uma atenção especial relacionada ao controle de estoques, gestão da qualidade, transporte e outros aspectos. Com relação à metodologia ABC-VF, onde também se analisa a frequência de pedidos, verificou-se que, pelo volume e frequência de pedidos serem proporcionais, não houve alteração na curva, permanecendo, portanto, a mesma classificação para os produtos.

Gráfico 1 – Curva ABC de ligas de chumbo

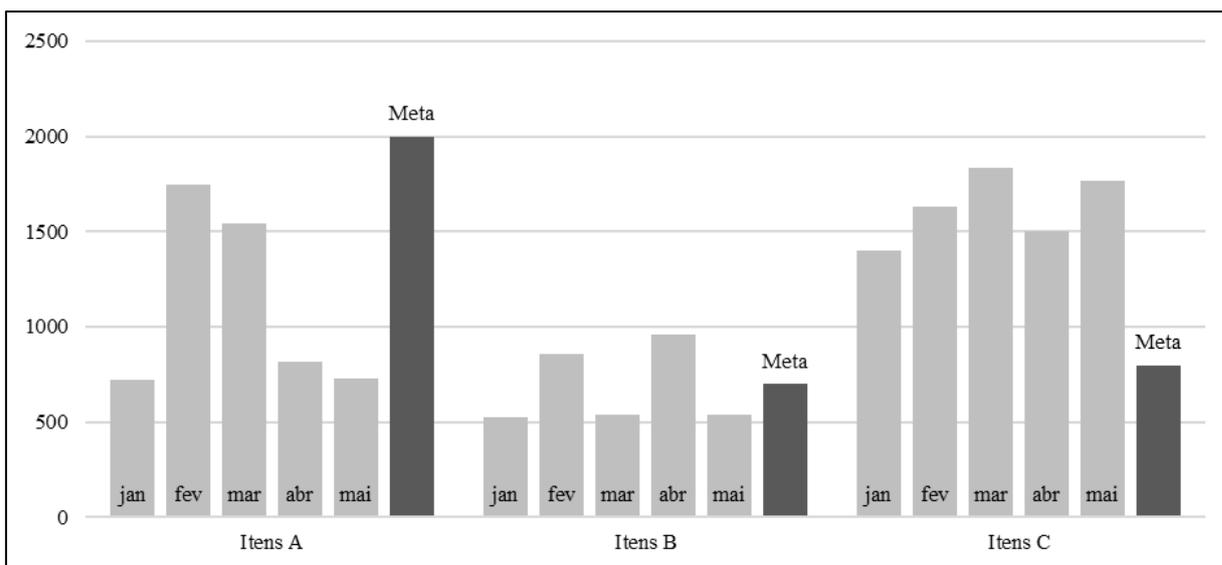


Fonte: Autoria própria (2019)

Entretanto, como pode ser visto pelo Gráfico 2, esse produto está sob controle, pois os estoques nos meses de Janeiro a Maio estão abaixo da meta, em níveis planejados. Isso porque foram definidas ações de redução de estoques gerais nesse período. Os estoques dos itens B oscilam dentro da meta pré-estabelecida. Já os itens C seguem descoordenados, fora da meta em todo o período de análise, pois o objetivo central do PCP não está sendo coerente com a estratégia mais enxuta da empresa. Um ponto agravante é que esses produtos, por conta dos seus insumos, possuem um custo de produção e manutenção mais altos que os dos itens A e B.

As metas de manutenção dos estoques foram definidas de forma empírica em função da quantidade em uma batelada de produção, do consumo médio diário, do tempo de ciclo de produção e do *lead time* de compra. Em resumo, é oportuno que os itens C recebam atenção especial através de uma abordagem analítica.

Gráfico 2 – Metas de manutenção dos estoques sob a classificação ABC



Fonte: Autoria própria (2019)

Sobre os itens C, foi realizado o cálculo dos estoques de segurança, onde se utilizou como base os mesmos dados de vendas de 2018. As demandas mensais (D) em toneladas estão descritas na Tabela 2, assim como os desvios padrões (σ) e o *lead time* de produção (L) expresso em horas. Como resultado, são definidos os estoques de segurança para cada liga com alto teor de antimônio (es) em toneladas.

Tabela 2 – Demanda mensal das ligas de chumbo de Classe C

Liga	Demanda D	Desvio Padrão σ	Lead Time L	Estoque de Segurança es
Liga V	452,92	94,57	37	155,55
Liga F	274,38	43,64	32	71,78
Liga B	151,54	24,13	37	39,69
Liga W	150,60	38,32	60	63,03
Liga T	59,32	23,92	52	39,34
Liga U	28,93	15,84	35	26,05
Liga R	19,60	10,83	32	17,81

O modelo de cálculo do estoque de segurança utilizado foi exposto por Chopra e Meindl (2016), onde o desvio padrão utilizado deve ser referente ao *lead time* de ressuprimento, entretanto, como todos os produtos compartilham do mesmo recurso produtivo, foi considerado um *lead time* de um mês, por ser um intervalo de tempo em que se pode ter a certeza de que o produto estará disponível para distribuição. Além disso, não há dados claros sobre consumo diário das ligas no processo produtivo.

$$es = F_s^{-1}(NSC) \times \sigma_L \quad (1)$$

A Equação 1 representa o modelo para *es* utilizado, onde o *NSC* (Nível de Serviço de Ciclo) escolhido foi de 95% para todas as ligas, e F_s^{-1} representa o inverso da distribuição cumulativa normal padrão. Como resultado, foi coerente com a realidade da empresa.

4.4 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

No dia-a-dia da operação da Empresa X, não há nenhum MRP que possa guiar a produção da metalúrgica, apesar de haver projetos de implementação em andamento, isso faz com que se trabalhe para repor estoques muitas vezes em um cenário de incerteza. Inclusive, a informação de demanda enviada pelo cliente é, muitas vezes, superestimada. Portanto, incerteza inerente à falta de informações acarreta o aumento dos níveis de estoques. Outro fator a se considerar é relativo à restrição do próprio processo, pois a panela possui um nível operacional, isto é, necessita de um volume mínimo para operar, o que impossibilita a fabricação de lotes de ligas com volumes flexíveis. As ligas com demandas mais baixas tornam-se custosas à empresa por estarem sempre com os estoques em níveis mais altos que o necessário.

Atualmente o PCP realiza o sequenciamento de forma pouco sistêmica e focado em volume de produção. Esta visão pode ser prejudicial para a organização, pois há um *trade-off* claro entre custos de produção e custos de manutenção de estoques. Isto acontece porque o volume de produção dilui os custos fixos do processo, portanto, quanto maior a produção, menor o custo. Por outro lado, caso haja produção que excede a demanda, haverá um acúmulo de estoque, que por sua vez, impactará no resultado da empresa. Além disso, esse comportamento tem gerado sequências de níveis de estoques fora da meta por meses, com desvios de cerca de

90%. As ligas com alto teor de antimônio compõem entre 50% e 60% dos excessos de estoque.

Apesar de ser alto, o custo do processo de fundição não é afetado por uma possível redução de volume de produção das ligas com alto teor de antimônio, pois, como o chumbo em *bullion* não é utilizado para esse produto, e sim um subproduto do processo, não é alterada a programação de produção no forno.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo a elaboração de um modelo que auxilie na elaboração de um plano de produção das ligas com alto teor de antimônio visando a redução de custos por excesso de estoque. Pelas características do problema, é possível classificá-lo como um problema de sequenciamento da produção em uma máquina.

4.5 CONSTRUÇÃO DO MODELO PARA PLANEJAMENTO E SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO DE CHUMBO

O problema estudado é compreendido como um problema de sequenciamento da produção em uma máquina, e foi abordado como um Modelo de Programação Linear Inteira Mista com Horizonte de Tempo Discretizado (MPLIM-HD), onde as variáveis de decisão podem assumir tanto valores inteiros quanto contínuos. Os conjuntos para o modelo são:

- I denota o conjunto de ligas a serem produzidos, $I = \{1, \dots, l\}$;
- H denota o conjunto de períodos do horizonte de planejamento, $H = \{1, \dots, R\}$;

Os índices utilizados são:

- i que se refere à liga que será produzida, onde $i \in I$;
- h que se refere ao período no horizonte de planejamento, $h \in H$;

Os parâmetros do modelo são:

- c_i : custo de manutenção de uma tonelada da Liga i ;
- cn_i : custo de falta/ruptura de estoque de uma tonelada da Liga i ;
- Q : quantidade em toneladas de uma batelada de produção;
- p_i : tempo de processamento da Liga i ;
- R : tempo total disponível para operação;

- v_i : taxa de produção da Liga i ;
- f_i : estoque de segurança da Liga i ;
- e_i^0 : estoque inicial da Liga i ;
- r_i : demanda da Liga i em cada instante h ;
- T_i : tempo de ruptura de estoque da Liga i ;

As variáveis de decisão são:

- x_i^h : quantidade a ser produzida da Liga i no instante h ;
- e_i^h : nível de estoque da Liga i no instante h ;
- en_i^h : quantidade de falta de estoque da Liga i no instante h ;
- z_i^h : define se a máquina está ocupada com a fabricação da Liga i no instante h , $z \in \{0, 1\}$;

O modelo matemático proposto tem por objetivo a minimização dos estoques no final do período (um mês), pois é nesse momento que são incorridos todos os custos de estoque. Além disso, visando dar mais flexibilidade ao modelo optou-se por introduzir variáveis de ruptura de estoques, os quais devem ser minimizados em cada período, conforme Henriques et al. (2010). Essa premissa possibilita que o modelo sempre encontre uma solução viável, além de o aproximar mais à realidade da operação, simulando a decisão entre produzir um lote de determinada liga e deixar que outra liga fique com os estoques abaixo do nível de segurança. O custo de ruptura cn_i utilizado foi 100 vezes o custo de manutenção de estoques c_i . Dessa forma, a função objetivo do modelo é:

$$\text{Min } C = \sum_{i \in I} \sum_{h \in H} c_i e_i^R + cn_i en_i^h \quad (2)$$

Na restrição (3) é realizado o cálculo de estoque futuro, incluindo a ruptura de estoque, para que se verifique qual liga é preciso produzir.

$$e_i^{h-1} - en_i^{h-1} + x_i^h = r_i + e_i^h - en_i^h, \quad \forall i \in I, h \in H \quad (3)$$

A restrição (4) impede que os estoques fiquem abaixo dos seus níveis de segurança, a menos que se arque com o custo de ruptura cn .

$$e_i^h \geq f_i - en_i^h, \quad \forall i \in I, h \in H \quad (4)$$

A restrição (5) limita a produção à capacidade em tempo de processamento, de modo que a soma total em que a panela ficou ocupada não ultrapasse o tempo total disponível para a operação no horizonte de planejamento.

$$\sum_{i \in I} \sum_{h \in H} z_i^h \leq R \quad (5)$$

Na restrição (6) se determina o volume produzido da Liga i no instante h em função da variável binária z .

$$x_i^h = v_i z_i^h, \quad \forall i \in I, h \in H \quad (6)$$

Através da restrição (7) se garante que ao se iniciar a produção de uma liga em um instante h , só será finalizada quando se passar todo o tempo de processamento, isto é, até que se consolide uma batelada de produção Q .

$$\sum_{h_1}^{h_2} z_i^h \leq p_i, \quad \forall i \in I, h_1 \in H, h_2 \in H, h_2 = h_1 + p_i \quad (7)$$

A restrição (8) limita o modelo a produzir uma liga por vez.

$$\sum_{i \in I} z_i^h \leq 1, \quad \forall h \in H \quad (8)$$

Na restrição (9), há a certificação de que haverá ao menos uma produção da Liga i antes do seu ponto de ruptura T_i , onde $T_i = e_i^0 / r_i$.

$$\sum_{h \leq T_i} z_i^h \geq 1, \quad \forall i \in I \quad (9)$$

A restrição (10) determina os domínios das variáveis de decisão.

$$x_i^h \geq 0, e_i^h \geq 0, en_i^h \geq 0, z_i^h \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, h \in H \quad (10)$$

Portanto, o MPLIM-HD proposto é:

$$\text{Min } C = \sum_{i \in I} \sum_{h \in H} c_i e_i^R + cn_i en_i^h \quad (2)$$

Sujeito a:

$$e_i^{h-1} - en_i^{h-1} + x_i^h = r_i + e_i^h - en_i^h \quad \forall i \in I, h \in H \quad (3)$$

$$e_i^h \geq f_i - en_i^h \quad \forall i \in I, h \in H \quad (4)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{h \in H} z_i^h \leq R \quad (5)$$

$$x_i^h = v_i z_i^h \quad \forall i \in I, h \in H \quad (6)$$

$$\sum_{h_1}^{h_2} z_i^h \leq p_i \quad \forall i \in I, h_1 \in H, h_2 \in H, h_2 = h_1 + p_i \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I} z_i^h \leq 1 \quad \forall h \in H \quad (8)$$

$$\sum_{h \leq T_i} z_i^h \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (9)$$

$$x_i^h \geq 0, e_i^h \geq 0, en_i^h \geq 0, z_i^h \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, h \in H \quad (10)$$

O modelo proposto é adequado às nuances específicas do problema, como exemplo a função objetivo, que minimiza apenas o estoque ao final do período, enquanto outros modelos vistos na literatura procuram minimizar a cada período do horizonte de planejamento, entretanto, a ruptura de estoque deve ser minimizada em cada período.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados da aplicação do modelo e a análise gerencial sobre os impactos da recomendação do modelo.

5.1 SOLUÇÃO DO MODELO

Para resolução do modelo foi selecionado, o IBM ILOG CPLEX *Optimization Studio*, na Versão 12.9.0.0, que utiliza a linguagem OPL, por ser uma ferramenta já difundida no mercado e adequada para o problema em questão. O modelo foi rodado em uma máquina Intel Core i7 2.00GHz, 8GB de RAM e sistema operacional Windows 10 64 bits.

Os parâmetros utilizados para aplicação do modelo são descritos na Tabela 3 e foram coletados *in loco*, assumindo-se valores aproximados para manter o contexto mais realístico possível.

Tabela 3 – Parâmetros de entrada para o modelo em estudo

i	Liga	c_i	p_i	f_i	r_i	e_i^0	T_i
1	Liga W	5.041,91	1	63,03	8,64	102,97	11
2	Liga F	4.987,38	1	71,78	20,61	180,08	8
3	Liga B	4.875,40	1	39,69	24,06	374,88	15
4	Liga U	6.281,31	2	26,05	1,70	99,68	58
5	Liga R	5.684,99	2	17,81	6,25	99,31	15
6	Liga V	5.022,21	1	155,55	34,88	332,22	9
7	Liga T	4.844,60	1	39,34	5,83	83,75	14

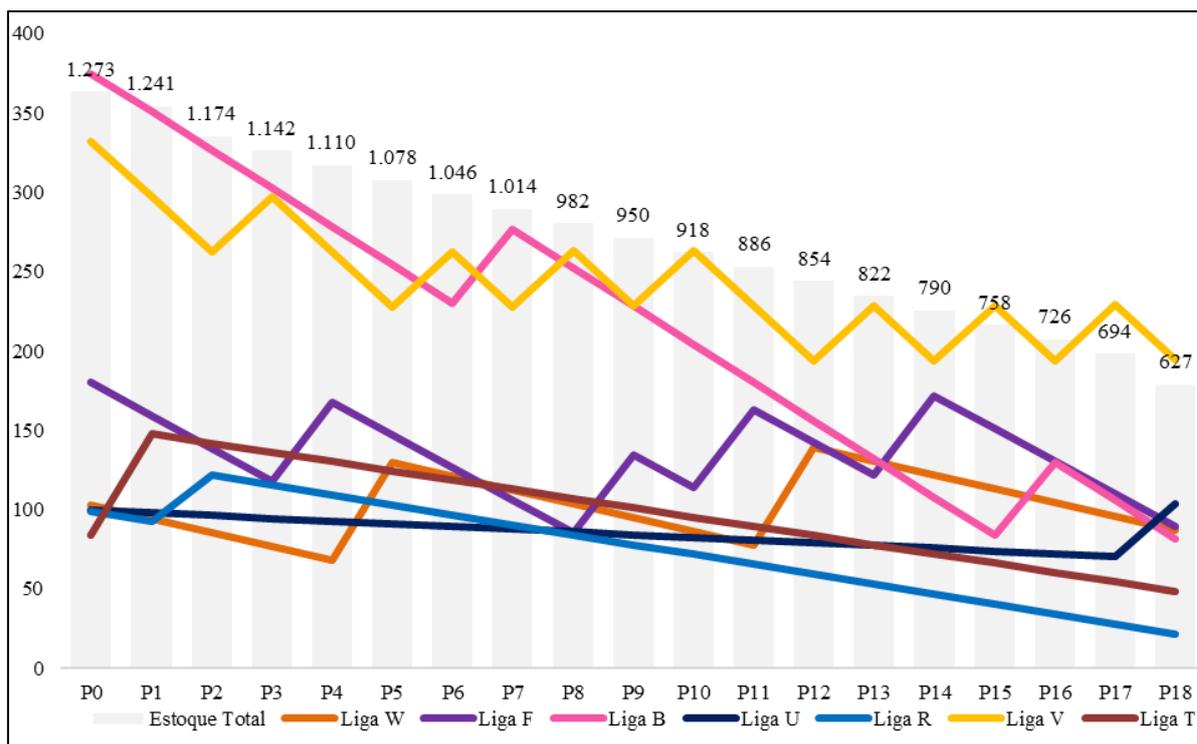
Na coluna c_i estão expostos os custos de manutenção utilizados, expressos em $R\$/tonelada$. Como estes valores são compostos de custos de insumos, índices de mercado e outros, optou-se por considerar uma média histórica dos custos de manutenção. Com a finalidade de reduzir o tempo de execução do modelo, foi considerado um intervalo de $40h$ por período, com um horizonte de planejamento de um mês. Essa decisão é válida, pois as ligas têm, em média um tempo de processamento de $41h$. Dessa forma, o modelo foi executado para um horizonte de

planejamento de 720h (um mês), com intervalos de 40h, portanto o modelo conta com $720h/40h = 18$ períodos.

Os estoques de segurança f_i foram definidos no presente trabalho, e a demanda por período r_i foi definido como uma constante, coletada a partir das informações de planejamento de produção de baterias e ficha técnica. Os estoques iniciais e_i^0 são dados reais do início de um mês recente. Já os tempos de ruptura T_i foram calculados a partir dos dados já informados, a saber, e_i^0/r_i .

O modelo foi implementado na ferramenta computacional da plataforma CPLEX. Os resultados foram satisfatórios para a proposta inicial. O Gráfico 3 mostra os níveis de estoque ao longo do tempo, onde se pode perceber uma considerável redução.

Gráfico 3 – Níveis de estoque ao longo do tempo gerado pelo modelo



Fonte: Autoria própria (2019)

O estoque inicial totalizou 1.273 toneladas e decresceu gradualmente para 627 toneladas, uma redução de 50,7% no estoque total de ligas de antimônio.

A regra de sequenciamento formulada fica em função das Equações (3) e (4), onde se utiliza os estoques de segurança como parâmetro. O modelo verifica quais

os estoques para cada período considerando sua demanda constante, compara com os estoques de segurança e formula um sequenciamento que não permita que os estoques fiquem abaixo nos níveis estabelecidos considerando o tempo de processamento. A lógica do modelo se assemelha ao de Ponto de Ressuprimento, com o adendo que o modelo se antecipa no planejamento, pois a decisão não aguarda os níveis de estoque chegarem ao ponto de ressuprimento.

Para tal resultado, o sequenciamento deve ser conforme descrito na Figura 8.

Figura 8 – Sequenciamento da produção de ligas de chumbo gerado pelo modelo

P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Liga	W	R	V	F	W	V	B	V	F	V	F	W	V	F	V	B	V	U

Fonte: Autoria própria (2019)

No sequenciamento da Figura 8, percebe-se que há uma alternância estratégica entre as Ligas V e F, que são os itens C com maior rotatividade, portanto um resultado coerente com o problema. As ligas R e U possuem um tempo de ciclo maior – vide Tabela 3, e essa nuance do problema não foi possível de implementar no modelo, portanto, na sua execução, foi considerada uma produção de 35 toneladas de Liga R no P2 e 35 toneladas de Liga U no P18. Isso aconteceu porque não foi possível modelar uma relação entre a taxa de produção e os tempos de ciclo de forma que não prejudicasse o tempo de resolução do modelo ou que gerasse conflito com outras restrições.

Uma análise oportuna sobre os resultados do sequenciamento é a comparação sobre os custos de manutenção dos estoques. A Tabela 4 apresenta o resultado dos cálculos sobre os custos de manutenção dos estoques para cada liga de chumbo.

Tabela 4 – Comparação de custos de manutenção de estoques inicial e final

Ligas	Estoque P0	Estoque P18	Custo P0	Custo P18	Saving
Liga W	102,97	87,39	519.165,89	440.612,87	78.553,02
Liga F	180,08	89,16	898.103,15	444.675,15	453.428,01
Liga B	374,88	81,86	1.827.666,52	399.100,45	1.428.566,07
Liga U	99,68	104,02	626.121,18	653.382,07	-27.260,89
Liga R	99,31	21,75	564.576,78	123.648,62	440.928,15
Liga V	332,22	194,32	1.668.478,03	975.915,51	692.562,52

Liga T	83,75	48,75	405.735,29	236.174,27	169.561,02
	Total		6.509.846,84	3.273.508,95	3.236.337,89

O resultado gerado através do modelo pode ser descrito como a combinação ótima para os parâmetros estabelecidos. Com ela, há um *saving* de R\$ 3,2 milhões de custos de manutenção de estoques apenas para as ligas de antimônio, vistos na Tabela 4. Para os parâmetros utilizados não houve ruptura nos estoques, entretanto, ela não inviabilizaria a utilização do modelo por conta das premissas utilizadas, como por exemplo demanda constante e tempo relativamente alto entre os períodos.

Como pode ser visto na Tabela 4, o *saving* da proposta de sequenciamento referente à Liga U é o único negativo, ou seja, houve aumento no custo de manutenção do estoque. Isso é consequência da fixação do volume da batelada de produção, onerando o custo de manutenção de estoques.

Como pontos positivos, os recursos de produção podem ser utilizados de forma mais eficiente, bem como o espaço para armazenagem dos produtos. De forma geral, a empresa passaria a trabalhar de forma mais enxuta, ou *just in time*. Em comparação com o modelo praticado na atualidade é uma mudança de grandes proporções, por isso a transição precisa acontecer de forma gradual e controlada, sempre avaliando os riscos. Além de que, com volumes mais baixos em estoque seria necessário um controle mais rígido, pois o risco seria maior para manter o nível de serviço ao cliente.

Um ponto de extrema importância a ser levado em consideração é que o estoque final do mês é o inicial do mês posterior. Dessa forma é importante verificar a operacionalidade com os níveis mais baixos, considerando sazonalidade de vendas, e conseqüentemente, de produção, bem como retrabalhos e possíveis falhas no processo.

5.2 VALIDAÇÃO DA SOLUÇÃO

Para verificar a aplicabilidade do modelo, foi realizada uma análise comparativa do sequenciamento no início do período com a programação do PCP, demonstrada na Figura 9. Os dados reais contam com 20 períodos, pois foi possível produzir duas bateladas a mais, devido à redução de tempo de ciclo oriundo da disponibilidade de matéria prima. Quando se compara a Figura 9 aos estoques da Figura 8 é possível

notar que, apesar de não haver tempo de *setup* de máquina, houve seqüências de produção de Liga V sem necessidade real.

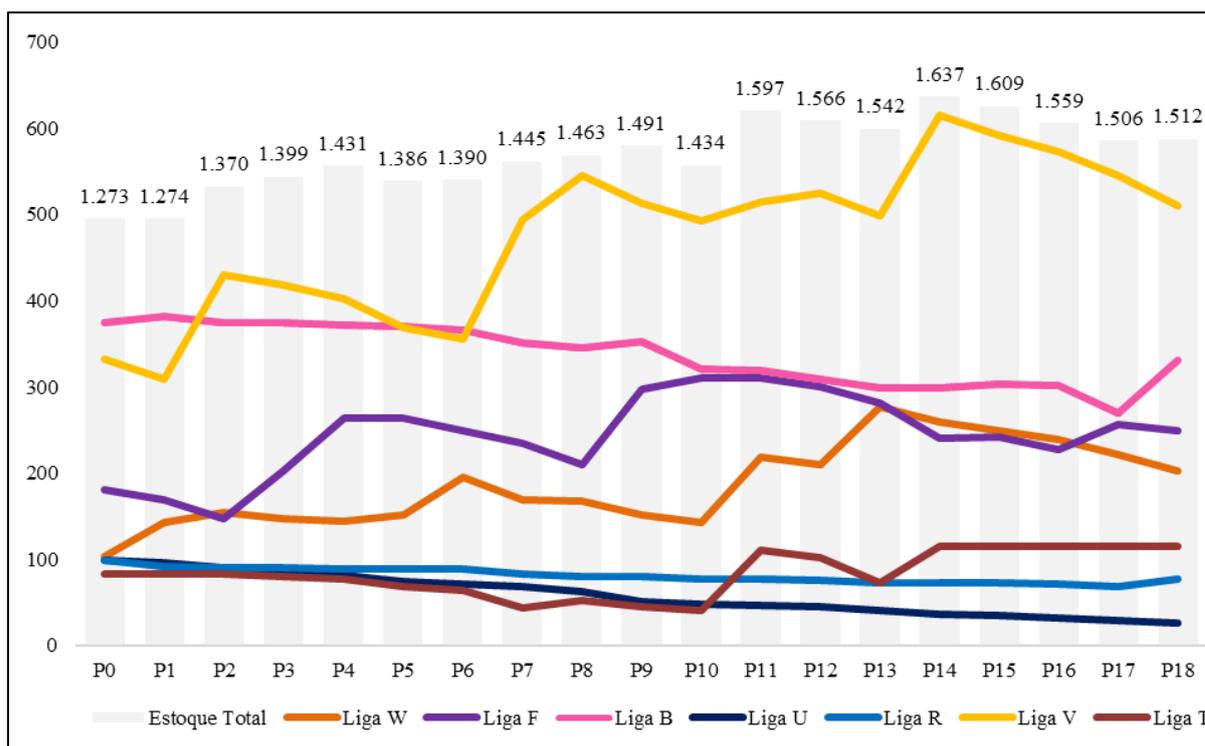
Figura 9 – Sequenciamento realizado no período de planejamento

P	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Liga	W	V	F	F	W	V	V	V	V	F	F	W	T	V	W	V	V	F	B	F

Fonte: Autoria própria (2019)

Os dados do Gráfico 4 foram retirados da contagem diária realizada, os períodos foram divididos considerando um intervalo de 40h. Observando o gráfico, constata-se que houve aumento no estoque total, de 1.273 toneladas para 1.512 toneladas, em um cenário de superestocagem de ligas com alto teor de antimônio.

Gráfico 4 – Níveis de estoque ao longo do tempo realizado no período de planejamento



Fonte: Autoria própria (2019)

É importante levar em consideração a qualidade da informação que é passada ao PCP. A Tabela 5 demonstra os valores médios de demanda por período que foram repassados comparados aos valores reais. A maior variação é referente a Liga B, o

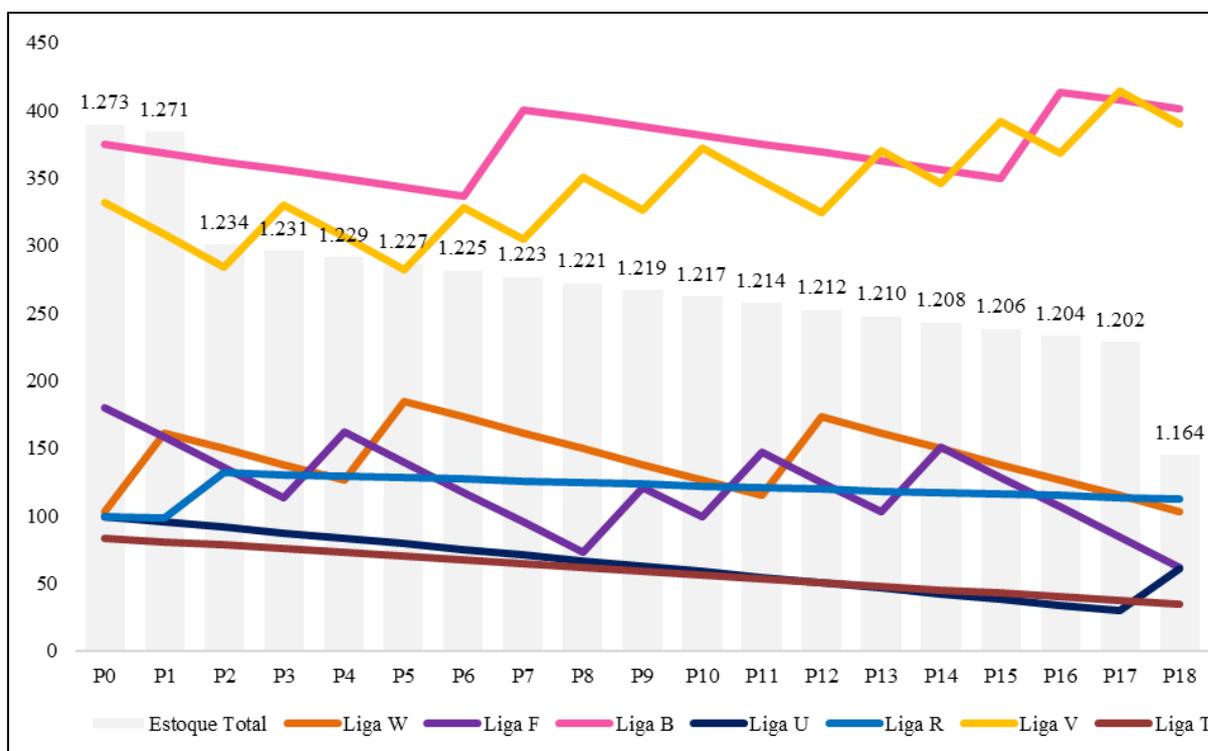
que pode justificar a insistência em na manutenção do estoque em níveis acima de 300 toneladas. O mesmo acontece com a Liga V.

Então, é evidente o problema com informações na empresa. Entretanto, o modelo se mostra robusto quando, mesmo com informações erradas de demanda, o estoque total final ainda é inferior à programação do PCP, como mostrado no Gráfico 5, apesar das Ligas F e T ficarem abaixo do estoque de segurança no P18 e no P17 e P18, respectivamente.

Tabela 5 – Comparativo de demanda informada vs. realizada

Produto	Demanda Informada	Demanda Real	Varição
Liga W	8,64	11,65	-3,01
Liga F	20,61	22,10	-1,50
Liga B	24,06	6,32	17,74
Liga U	1,70	4,10	-2,4
Liga R	6,25	1,22	-5,04
Liga V	34,88	24,00	10,88
Liga T	5,83	2,74	3,09

Gráfico 5 – Níveis de estoque ao longo do tempo com demanda real utilizando sequenciamento gerado pelo modelo



Fonte: Autoria própria (2019)

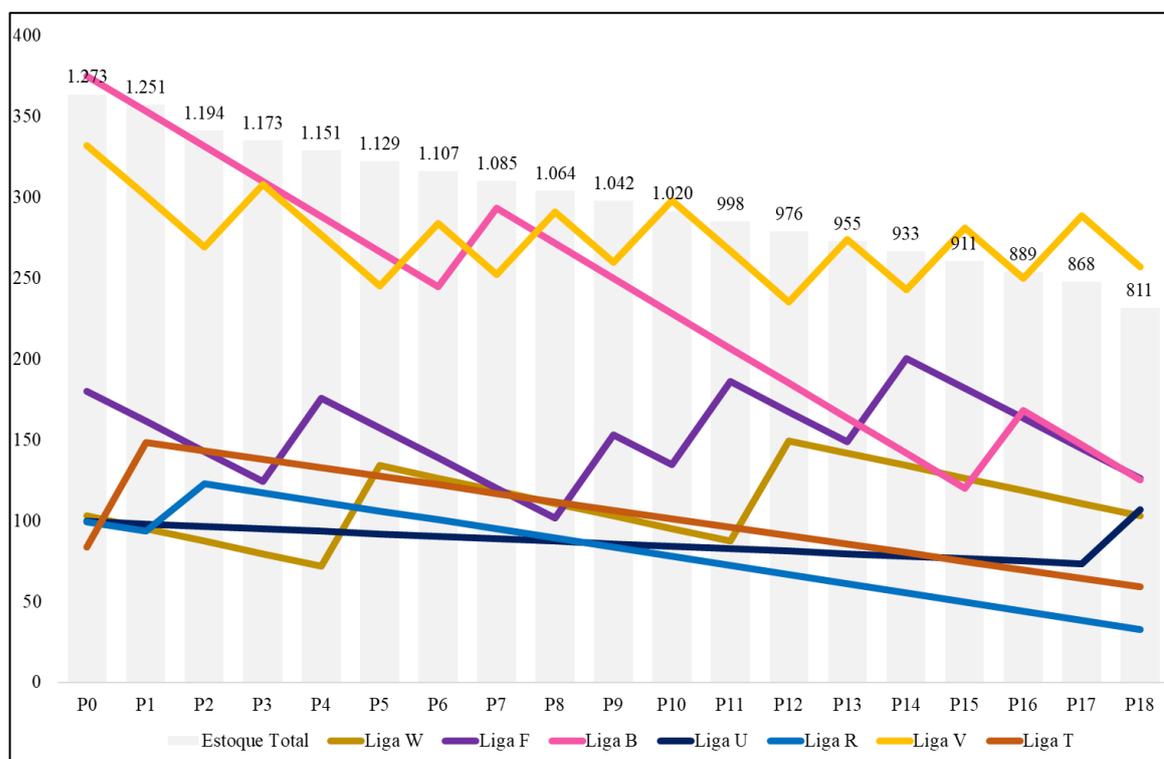
Portanto, o modelo proposto é aplicável em uma situação real. O mais indicado é que haja revisões periódicas para avaliar novas soluções à medida que os períodos se concretizam, pois, como na prática a demanda não é constante, é necessário reprogramar a produção para possíveis picos de demanda.

5.2.1 Análise de sensibilidade

Para fins de análise de sensibilidade foi comparado o comportamento dos estoques para os casos de aumento e redução da demanda frente ao previsto.

No Gráfico 6 são mostrados os estoques por período utilizando a programação gerada pelo modelo (Figura 8) com a demanda subestimada em 10% do que foi informado. É possível verificar um aumento de aproximadamente 29% do estoque no final do período, que representam um aumento de custo de manutenção de estoques de R\$ 924 mil.

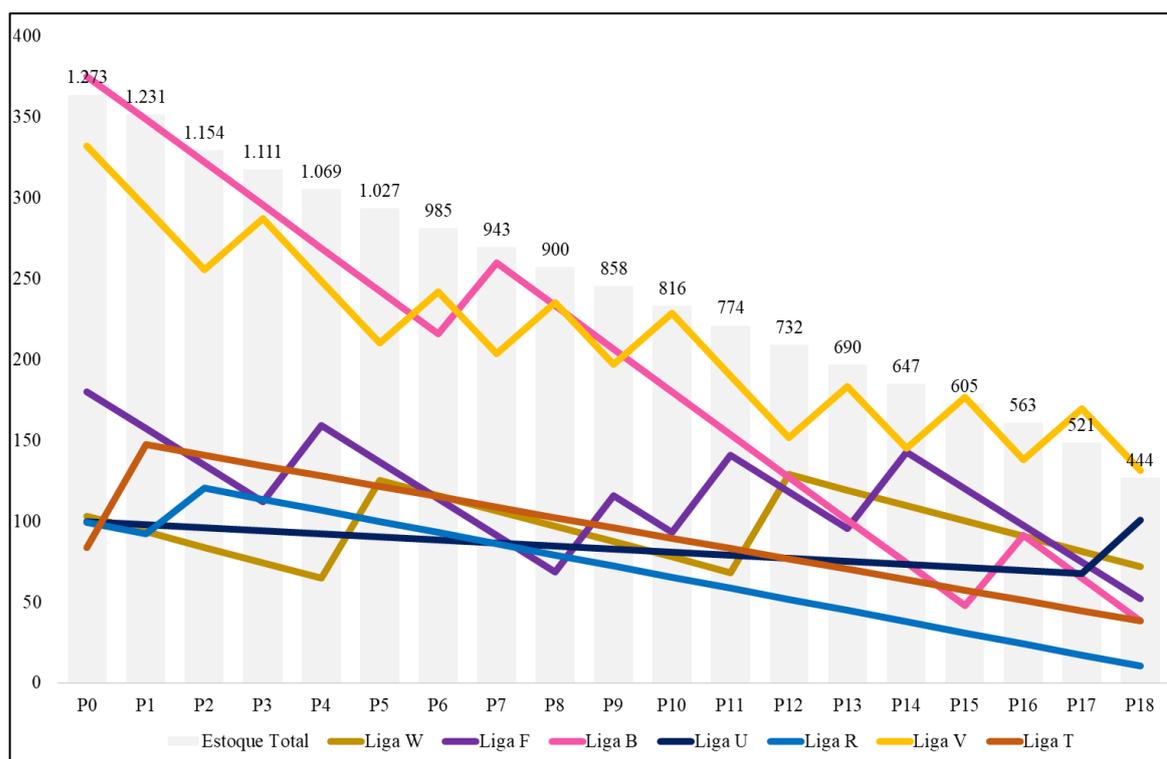
Gráfico 6 – Níveis de estoque ao longo do tempo com demanda subestimada em 10% utilizando sequenciamento gerado pelo modelo



Fonte: Autoria própria (2019)

A demanda também foi superestimada em 10% com a programação gerada pelo modelo, descrita na Figura 8. Como resultado, de forma inversa, houve uma redução de aproximadamente 30% do estoque total, o que representa uma redução de R\$ 924 mil em custo de manutenção de estoques. Entretanto, os estoques das Liga F, Liga B, Liga R, Liga V e Liga T ficam abaixo dos níveis de segurança.

Gráfico 7 – Níveis de estoque ao longo do tempo com demanda superestimada em 10% utilizando sequenciamento gerado pelo modelo



Fonte: Autoria própria (2019)

Portanto, é evidente a importância da qualidade das informações que são passadas ao longo da cadeia de suprimentos. Para o problema apresentado, considerando uma possível variação de 10%, é possível verificar um aumento de custo de mais de R\$ 900 mil ou estoques abaixo dos níveis de segurança, expondo a empresa a um risco de ruptura.

5.3 IMPLEMENTAÇÃO DA SOLUÇÃO

A implementação do modelo não foi realizada no contexto real, entretanto, há planos para tal. As expectativas são de alta resistência da parte da produção e PCP, por conflitarem com metas de custos de produção. Ainda assim, planeja-se apresentar

a solução e discutir as ações que serão tomadas. Além disso há outros entraves que serão encontrados, estes necessitam ser resolvidos antes da implementação do modelo na prática, pois, caso contrário, elevaria o nível de exposição da empresa ao risco de ruptura de estoques e comprometimento do nível de serviço.

Com relação às recomendações de Tubino (2007, p. 88) acerca dos sistemas de ressuprimento para os itens C, será utilizado o ponto de ressuprimento, que é uma das sugestões do autor, entretanto, será adicionado o sequenciamento de produção como apoio.

No trabalho desenvolvido por Fazel et al. (1998) foram estabelecidos os melhores cenários para utilização dos modelos de ressuprimento mais conhecidos (EOQ e JIT), e para o modelo JIT o melhor cenário é encontrado quando os produtos possuem baixas demandas ou altos custos de manutenção. Para os itens C do presente trabalho, os dois motivos se encaixam perfeitamente. Entretanto, para os pontos determinados por Ballou (2006) acerca das características essenciais para aplicação do modelo JIT, a Empresa X ainda precisa trabalhar mais, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Análise comparativa de cenários

Cenário atual	Cenário ideal
Poucos fornecedores e um único transportador.	Relações privilegiadas com poucos fornecedores e transportadores.
Informações compartilhadas apenas quando solicitado e de qualidade abaixo do ideal.	Informações compartilhadas ao longo da cadeia de suprimentos.
Produção em lotes fixos com transporte em quantidades relativamente pequenas e altos estoques.	Produção e transporte de mercadorias em pequenas quantidades com baixos níveis de estoque.
Sem garantias de eliminação de incerteza ao longo da cadeia de suprimentos.	Eliminação de incertezas sempre que possível ao longo da cadeia de suprimentos.
Metas de alta qualidade.	Metas de alta qualidade.

A empresa conta com poucos fornecedores de PbSb, apesar do longo *lead time* de entrega, causado pela distância física do fornecedor e da complexidade da operação. Entretanto, a empresa possui uma transportadora exclusiva para esse abastecimento. As informações de demanda nem sempre são compartilhadas, e quando são, geralmente são superestimadas, por receio de ruptura, ou arbitradas. A

produção não possui flexibilidade na quantidade da batelada de produção, por restrições do próprio processo, já o transporte possui uma maior flexibilidade, porém ainda possui altos estoques. A empresa possui poucos recursos para eliminação de incertezas na cadeia de suprimentos, apesar de ter metas de alta qualidade.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo é eficiente para o problema apresentado, no entanto devem ser consideradas suas limitações e premissas.

6.1 CONCLUSÕES

Por meio desse estudo, fica ainda mais nítida a contribuição dos modelos matemáticos no processo de tomada de decisão dentro das organizações, impulsionada pela Pesquisa Operacional.

A contribuição do trabalho é evidente ao se observar o *saving* de aproximadamente R\$ 3,2 milhões em custos de manutenção de estoque sem qualquer investimento financeiro adicional. As premissas utilizadas se mostraram válidas para o problema, pois representaram bem a realidade da operação.

Como o modelo é orientado à programação e sequenciamento das ligas com alto teor de antimônio, não se interfere no volume de produção do forno, que tem um alto custo. Conseqüentemente, não há um grande impacto no custo total da metalúrgica.

Observa-se também a importância da utilização de ferramentas computacionais como forma de gerar vantagem competitiva frente aos concorrentes, bem como apoiar a tomada de decisão com relação a alocação de recursos nas organizações. A implementação do modelo seria uma mudança de paradigma na metalúrgica, pois, com relação às ligas com alto teor de antimônio, passaria de uma visão empurrada para uma visão mais puxada. Entretanto, a qualidade da informação ao longo da cadeia de suprimentos da empresa ainda é um problema.

Dessa forma, de acordo com Beker e Gutierrez (2009), confirma-se que a gestão, a organização, a racionalização dos processos e a programação, são atividades vitais para a empresa obter vantagem competitiva no seu mercado de atuação.

6.2 LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

O modelo considera um consumo constante em todos os períodos, o que não é verdade para algumas ligas, tal consideração foi estabelecida devido à falta de informação de planejamento de necessidades. Essa limitação faz com que o modelo

precise ser implementado com uma maior periodicidade. Uma solução para esse problema seria considerar a programação de produção oriunda do futuro MRP, que também auxiliaria em um novo cálculo dos estoques de segurança, com informações de consumo diário. Além disso, a análise da Curva ABC e os estoques de segurança consideram que o cenário de vendas de 2018 representam o cenário atual.

Apesar de não haver grandes diferenças entre a solução do modelo e o sequenciamento praticado com relação ao volume de produção, de forma geral, o trabalho gera uma solução para o ponto de vista logístico, isto é, não considera o impacto sob os custos de produção totais do Refino.

Como trabalhos futuros, sugere-se a consideração do tempo de processamento no modelo, a fim de gerar uma solução ainda mais precisa. Além disso, como foi comentado anteriormente, as bateladas de produção são fixas devido a uma restrição do processo, portanto, seria válida uma análise de impacto de uma mudança no processo que possibilitasse a produção de bateladas menores de produção, visando uma produção ainda mais enxuta.

REFERÊNCIAS

ALVES, F. F. et al. Modelos integrados de dimensionamento e sequenciamento da produção: aplicação em uma fábrica de cimento para refratário. **Revista Gestão & Produção**. v. 23, n. 1, p. 204 – 218, 2016.

ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Anuário da Indústria Automobilística Brasileira. São Paulo, 2019.

ARENALES, M. et al. **Pesquisa Operacional**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2011.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos**: logística empresarial. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

Battery Council International (BCI). **Recycling Batteries**. Chicago, Illinois, 2016.

Disponível em:

<https://batteryCouncil.org/page/Battery_Recycling?&hhsearchterms=%22recycling%22>. Acesso em: 19 mar. 2019.

BEKER, J. C.; GUTIERREZ, R. H. Planejamento e Controle de Produção: Estratégia qualificadora para empresas de manufatura resistirem no mercado. In: Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 6., 2009, Resende. **Anais...** Resende: AEDB, 2009. 11p.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA Nº 401, de 04/11/2008. Estabelece os limites máximos de chumbo, cádmio e mercúrio para pilhas e baterias comercializadas no território nacional e os critérios e padrões para o seu gerenciamento ambientalmente adequado, e dá outras providências.

BRAZ, Eliezer. **Análise-síntese da mineração brasileira**. J Mendo Consultoria, 2009. Disponível em:

<http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256652/P53_RT78_Analise-sxntese_da_mineraxo_brasileira.pdf/8d5bddee-41a1-4c03-b1fe-31b453713ed5>.

Acesso em: 13 abr. 2019.

CHOPRA, S.; MEINDL, P. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos**: estratégia, planejamento e operações. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2016.

CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G. N.; CAON, M. **Planejamento, Programação e Controle da Produção**: MRP II/ERP – conceitos, uso, e implantação, base para SAP, Oracle applications e outros softwares integrados de gestão. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

DIAS, M. A. P. **Administração de materiais**: uma abordagem logística. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2010.

ELLIS, T. W.; MIRZA, A. H. The refining of secondary lead for use in advanced lead-acid batteries. **Journal of Power Sources**. v. 195, n. 14, p. 4525 – 4529, 2010.

ELLSMOOR, J. **Are Electric Vehicles Really Better For The Environment?**.

Forbes. 2019. Disponível em:

<<https://www.forbes.com/sites/jamesellsmoor/2019/05/20/are-electric-vehicles-really-better-for-the-environment/#5c8bc1ad76d2>>. Acesso em: 20 jun. 2019.

FAZEL, F.; FISCHER, K. P.; GILBERT, E. W. JIT purchasing vs. EOQ with a price discount: An analytical comparison of inventory costs. **International Journal of Production Economics**, v. 54, n. 1, p. 101 – 109, 1998.

FERNANDES, F. C. F.; SANTOTO, M. C. Avaliação do grau de prioridade e do foco do planejamento e controle da produção (PCP): modelo e estudos de caso. **Revista Gestão & Produção**. v. 12, n. 1, p. 25 – 38, 2005.

FILHO, O. S. S.; CEZARINO, W. Geração de planos de produção via otimização sequencial subótima. **Revista Gestão & Produção**. v. 14, n. 2, p. 239 – 252, 2007.

GALLOWAY, L. **Energia limpa, reciclagem e multas: como 5 países fazem a diferença contra o aquecimento global**. ÉPOCA NEGÓCIOS. 2019. Disponível em: <<https://epocanegocios.globo.com/Mundo/noticia/2019/05/como-5-paises-fazem-diferenca-contr-o-aquecimento-global.html>>. Acesso em: 26 jun. 2019.

GIACON, E.; MESQUITA, M. A. Levantamento das práticas de programação detalhada da produção: um survey na indústria paulista. **Revista Gestão & Produção**. v. 18, n. 3, p. 487 – 498, 2011.

GOLDBARG, M. C.; GOLDBARG, E. G.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e meta-heurísticas: algoritmos e aplicações**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

HENRIQUES, R. S.; CARVALHO, C. R. V.; CUNHA, A. S. Um modelo com variáveis indexadas no tempo para a integração do dimensionamento de lotes e sequenciamento em uma máquina com tempos de preparação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 42., 2010, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: SOBRAPO, 2010. 12 p.

Instituto de Metais Não Ferrosos (ICZ). Mercado de Chumbo. ICZ. [2010?]. Disponível em: <<http://www.icz.org.br/chumbo-mercado.php>>. Acesso em: 10 abr. 2019.

LONDON METAL EXCHANGE. **The Role of The London Metal Exchange**.

Disponível em: <<https://www.lme.com/en-GB/About/Corporate-information/London-Metal-Exchange>>. Acesso em: 13 abr. 2019.

MIGUEL, P. A. C. et al. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012.

MME – Ministério de Minas e Energia. Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico, 2018.

MOLINA, F.; MORABITO, R.; ARAUJO, S. A. Modelos matemáticos para problemas de dimensionamento de lotes com restrições de capacidade e custos de transporte. **Revista Gestão & Produção**. v. 20, n. 3, p. 573 – 586, 2013.

MUSTU, S.; EREN, T. The single machine scheduling problem with sequence-dependent setup times and a learning effect on processing times. **Applied Soft Computing**. v. 71, p. 291 – 306, 2018.

NAPIERALA, H. Planejamento da produção e gerenciamento de materiais através da programação dinâmica. **Revista Faz Ciência**, v.10, n. 11, p. 175 – 194, 2009.

ORTIZ, D. A. **Conheça 10 formas de colaborar com o combate ao aquecimento global**. BBC. 2018. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/vert-fut-46357597>>. Acesso em: 26 jun. 2019.

QIAO, Q. et al. Comparative Study on Life Cycle CO2 Emissions from the Production of Electric and Conventional Vehicles in China. **Energy Procedia**. v. 105, p. 3584 – 3595, 2017.

SANTOS, A. M.; RODRIGUES, I. A. Controle de estoques de materiais com diferentes padrões de demanda: estudo de caso em uma indústria química. **Revista Gestão & Produção**, v. 13, n. 2, p. 223 – 231, 2006.

SOBRAL, L. G. S. et al. Metalurgia do chumbo: processos de produção e refino. In: Projeto Santo Amaro - BA, **aglutinando ideias, construindo soluções: diagnósticos**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. Cap.12, p.150-173.

TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional: uma visão geral**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

TOLEDO, C. F. M. et al. Um modelo de otimização para o problema integrado de dimensionamento de lotes e programação da produção em fábricas de refrigerantes. **Pesquisa Operacional**. v. 27, n. 1, p. 155 – 186, 2007.

TOLEDO, C. F. M. et al. Impacto do ajuste de parâmetros do CPLEX na resolução do problema geral de dimensionamento de lotes e programação da produção. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 31., Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABEPRO, 2011. 12p.

TUBINO, D. F. **Planejamento e controle da produção: teoria e prática**. São Paulo: Atlas, 2007.

VAGO, F. R. M. et al. A IMPORTÂNCIA DO GERENCIAMENTO DE ESTOQUE POR MEIO DA FERRAMENTA CURVA ABC. **Revista Sociais e Humanas**. v. 6, n. 3, p. 638 – 655, 2013.

VON MISES, L. **As seis lições**. São Paulo: Instituto Ludwig von Mises Brasil, 2009.