

Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

FERNANDO FERREIRA MAZZINI

Otimização do Plano de Compra, Estoque e Consumo de Carvões

Belo Horizonte

2017

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do ICEx - UFMG

Mazzini, Fernando Ferreira.

M477o Otimização do plano de compra, estoque e consumo de carvões. / Fernando Ferreira Mazzini. Belo Horizonte, 2017.

x, 41 f.: il.; 29 cm.

Monografia (especialização) - Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Ciência da Computação.

Orientador: Martin Gomez Ravetti

1. Computação 2. Controle de estoque. 3 Carvão -Minas e mineração. 4. Siderurgia I. Orientador. II. Título.

CDU 519.6*61(043)



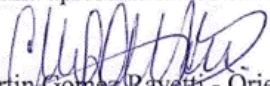
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

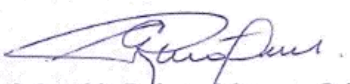
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
ESPECIALIZAÇÃO EM OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS: ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
GESTÃO INDUSTRIAL

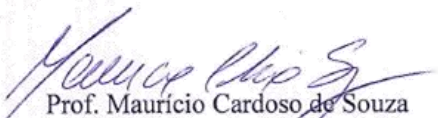
**OTIMIZAÇÃO DO PLANO DE COMPRA, ESTOQUE E
CONSUMO DE CARVÕES**

Fernando Ferreira Mazzini

Monografia apresentada aos Senhores:


Prof. Martin Gomez Ravetti - Orientador
Departamento de Engenharia de Produção - UFMG


Prof. Geraldo Robson Mateus - Orientador
Departamento de Ciência da Computação - UFMG


Prof. Mauricio Cardoso de Souza
Departamento de Engenharia de Produção - UFMG

Belo Horizonte, 17 de fevereiro de 2017

FERNANDO FERREIRA MAZZINI

Otimização do Plano de Compra, Estoque e Consumo de Carvões

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Otimização de Sistemas do Departamento de Ciência da Computação do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do grau de Especialista Otimização de Sistemas, área de concentração Gestão Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Martin Gomez Ravetti

Belo Horizonte

2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Usiminas pela oportunidade de participar do curso de pós-graduação, aos colegas da Usiminas pela contribuição no trabalho apresentado, à Universidade Federal de Minas Gerais pelo conhecimento transmitido e ao Prof. Dr. Martin Gomez Ravetti pela orientação.

RESUMO

Uma das etapas mais importantes para a competitividade de uma empresa siderúrgica é a definição de compra e consumo de suas matérias primas. Entre elas estão o carvão mineral e o coque verde de petróleo que correspondem a cerca de 30% do custo final da placa de aço. Na Usiminas, Usina de Ipatinga, o consumo potencial anual destes combustíveis é de 2,3 milhões de toneladas com orçamento de compra de cerca de R\$1,5 bi.

O processo de planejamento de compra e consumo de carvões na Usiminas é dividido em duas etapas, onde a primeira define a demanda agregada anual através de uma ferramenta computacional e a segunda define a compra trimestral de carvão e o consumo de carvões por mistura de forma independente. O planejamento fragmentado entre compra e consumo de carvões, sem considerar todas as premissas de forma integrada torna esse processo frágil e não garante a tomada de decisão do melhor cenário possível.

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo matemático que integra as decisões de compra e consumo de carvões considerando as premissas de ofertas e estoques, restrições operacionais e de qualidade do coque.

O modelo foi testado para instâncias artificiais em função das sensibilidades de demanda e ofertas de carvões e horizonte de análise. O melhor desempenho foi observado para os cenários com horizonte de 30 períodos que obteve MIPGAP médio de 2,37% e GAP LINEAR médio de 4,25% em relação aos de 90 períodos que obteve MIPGAP médio de 65,35% e GAP LINEAR médio de 93,68%. A variação de demanda e ofertas de carvões não teve impacto relevante no desempenho do modelo.

O modelo foi aplicado a um estudo de caso real e forneceu um planejamento de recebimento e consumo de carvões que corresponde a uma potencial economia de 5,8 MMR\$ frente ao obtido no trimestre analisado. A indicação do mix de consumo de carvões é factível e está em linha com o já praticado pela Usiminas historicamente.

A ferramenta desenvolvida mostra grande aplicabilidade no suporte a decisão tanto de compra quanto de consumo de carvões, reduzindo o tempo gasto no planejamento com potencial redução de custo já que possui visão global desses processos.

Palavras-chave: sequenciamento, planejamento de compra, carvão, siderurgia.

ABSTRACT

One of the most important steps for a steel company's competitiveness is the definition of purchasing and consuming its raw materials. Among them are mineral coal and pet coke which correspond to about 30% of the final cost of the slab. At Usiminas, Ipatinga Plant, the annual potential fuel consumption is 2.3 million tons with a purchase budget roughly R\$ 1.5 billion.

The coal purchasing and consumption planning process at Usiminas is divided into two stages, in which the first defines an aggregate annual demand by a computational tool and the second defines a quarterly purchase of coal and coal consumption by mix independently. The fragmented planning between coal purchase and consumption, without considering all the assumptions in an integrated way, makes this process fragile and does not guarantee a decision making of the best possible scenario.

In this work, was developed a mathematical model that integrates the purchase and consumption decisions of coal considering the assumptions of offers and stocks, operational restrictions and coke quality.

The model was tested for artificial instances due to demand and coal supply and horizon of analysis sensitivities. The greatest performance was observed for scenarios with a horizon of 30 periods that obtained a mean MIPGAP of 2.37% and mean LINEAR GAP of 4.25% compared to 90 periods that obtained mean MIPGAP of 65.35% and mean LINEAR GAP of 93.68%. A variation of coal demand and offerings had no relevant impact on model performance.

The model was applied to a real case study and provide a purchasing and consumption planning of coals that correspond to a potential economy of 5.8 MMR\$ when compared to the one done in the analyzed quarter. The indication of the coal mix consumption is feasible and is in line with that already practiced by Usiminas historically.

The developed tool shows great applicability as decision support of both purchase and consumption of coals, reducing the time spent on planning with reduction cost potential as it has global vision of the processes.

Keywords: Scheduling, purchase planning, coal, steel.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Fluxograma simplificado da produção de coque na Usina de Ipatinga. | 15 |
| Figura 2: Fluxograma simplificado do preparo do PCI na Usina de Ipatinga. | 16 |
| Figura 3: Fluxo de definições atual dos planos de compra e consumo de carvões. | 22 |
| Figura 4: Fluxo de definições proposto dos planos de compra e consumo de carvões. | 27 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Famílias de testes..... | 29 |
| Tabela 2 – Resultados computacionais para instâncias artificiais: oferta de 20 carvões. ... | 31 |
| Tabela 3 – Resultados computacionais para instâncias artificiais: oferta de 30 carvões. ... | 32 |
| Tabela 4 – Resultados computacionais para instâncias artificiais: oferta de 40 carvões. ... | 33 |
| Tabela 5 – Resultados de recebimento e consumo de carvões para as instâncias reais. | 34 |
| Tabela 6 – Mix de carvões por classe real vs modelo. | 35 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-------|--|
| AV | Alto Volátil |
| BV | Baixo Volátil |
| COG | Coke Oven Gas |
| CRI | Coke Reactivity Index |
| CSR | Coke Strength After Reaction |
| CVP | Coque Verde de Petróleo |
| DI | Drum Index |
| FOB | Free on Board |
| MA | Médio Alto Volátil |
| MB | Médio Baixo Volátil |
| PCI | Pulverized Coal Injection |
| PVO | Plano de Vendas e Operações |
| SCOOP | Steel Cost Optimization – Pacote Comercial |
| SO | Soft |

SUMÁRIO

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Introdução | 11 |
| 1.1 | Objetivos do Trabalho | 13 |
| 1.2 | Organização do Trabalho | 13 |
| 2 | Revisão bibliográfica | 14 |
| 2.1 | Fabricação do Coque | 14 |
| 2.2 | Injeção de Carvão para os Altos Fornos..... | 15 |
| 2.3 | Sequenciamento de Navios..... | 16 |
| 2.4 | Gestão de Estoque | 17 |
| 2.5 | Ferramenta Computacional SCOOP..... | 18 |
| 2.6 | Otimização de Mistura de Carvões..... | 18 |
| 3 | Estudo de Caso..... | 20 |
| 3.1 | Descrição do Problema..... | 20 |
| 3.2 | Método Atual Usiminas..... | 20 |
| 3.3 | Modelagem do Problema..... | 22 |
| 4 | Experimentos computacionais | 28 |
| 4.1 | Instâncias Artificiais | 28 |
| 4.2 | Instância Real | 29 |
| 4.3 | Resultados..... | 30 |
| 5 | Discussões e Conclusões | 36 |
| 5.1 | Instâncias Artificiais | 36 |
| 5.2 | Instância Real | 37 |
| 5.3 | Considerações Finais | 38 |
| 6 | Referências Bibliográficas | 40 |

1 INTRODUÇÃO

A Usiminas é uma empresa brasileira de capital aberto inaugurada em 1962 e tornou-se a primeira estatal privatizada em 1991. Seus principais acionistas são o Grupo Nippon Steel (29,45%) e Ternium (27,66%). Atua em toda a cadeia produtiva do aço por meio de 4 unidades de negócios: siderurgia (Usina de Ipatinga, Usina de Cubatão e Unigal Usiminas), mineração (Mineração Usiminas), transformação do aço (Soluções Usiminas) e bens de capital (Usiminas Mecânica).

Os principais produtos das unidades siderúrgicas são placa, bobina a quente e bobina a frio que pode ser galvanizada dependendo da aplicação. As usinas são integradas a coque e formadas pelas áreas de Sinterização, Coqueria, Alto Forno, Aciaria, Laminações e Galvanização (apenas Ipatinga). A Usina de Cubatão, São Paulo, possui capacidade nominal de 5,0 milhões de toneladas de aço por ano. Atualmente as áreas primárias estão desligadas em função da adequação da capacidade à demanda de mercado. A Usina de Ipatinga, Minas Gerais possui capacidade nominal de 4,5 milhões de toneladas de aço por ano.

Considerando a unidade siderúrgica de Ipatinga, o consumo potencial de carvão mineral e Coque Verde de Petróleo (CVP) é de 2,3 milhões de toneladas por ano, sendo 2,0 milhões como matéria prima para a produção de coque, principal combustível dos Altos Fornos e 0,3 milhões para consumo direto por injeção nos Altos Fornos. Os fornecedores de carvão estão distribuídos pelo mundo, sendo os principais países: Estados Unidos, Canadá, África do Sul, Ucrânia, Rússia e Austrália. Cerca de 30% do custo da placa de aço é devido ao dispêndio com carvão mineral, portanto o planejamento de compra, logística e consumo desta matéria prima são atividades estratégicas e influenciam diretamente na rentabilidade das indústrias siderúrgicas integradas (R. J. COELHO *et al.*, 2004). O orçamento anual para compra destes combustíveis é de cerca de R\$1,5 bi. O planejamento de demanda agregada anual dos carvões é feito com o auxílio de uma ferramenta computacional, SCOOP (desenvolvida por N-SIDE), a qual fornece a participação de cada classe de carvão com custo ótimo considerando preços e disponibilidade das matérias primas, restrições dos processos siderúrgicos e de qualidade do coque. A etapa seguinte, de planejamento trimestral, consiste em realização de pedidos, programação de embarque, recebimento, estocagem e projeção do consumo. Essas atividades são geridas pelas equipes

de Suprimentos, Logística, Engenharia Industrial e Operação tomando como base o mix indicado pelo planejamento macro e através da experiência do corpo técnico e utilização de tabelas em Excel. O planejamento fragmentado entre compra e consumo de carvões, sem considerar o estoque nos pátios e atualização do mix ótimo em função dos preços de mercado torna esse processo frágil e não garante a tomada de decisão do melhor cenário possível.

A proposta deste trabalho é desenvolver um modelo matemático que integre o planejamento de compra e consumo de carvões para o horizonte de curto, médio ou longo prazo. O modelo, além de atender as restrições requeridas de qualidade do coque com o menor custo de misturas de carvões, contribuiria para a redução do tempo gasto na programação de compra e consumo de carvões.

1.1 Objetivos do Trabalho

O objetivo geral deste trabalho é elaborar um modelo matemático capaz de otimizar o custo da mistura de carvão a ser consumida e o custo financeiro de estoque em função do planejamento de compra e sequenciamento de consumo de carvão na Usina de Ipatinga.

Como objetivos específicos citamos:

Integrar as atividades de realização dos pedidos, programação de embarque, recebimento, estocagem e consumo de carvões;

Reduzir o tempo gasto no planejamento de compra e consumo pelas equipes técnicas envolvidas;

Fornecer uma ferramenta matemática de apoio a Suprimentos capaz de responder prontamente às variações de oferta do mercado de carvão;

Fornecer uma ferramenta matemática de apoio a Operação capaz de indicar as misturas de carvões a serem consumidas em curto, médio e longo prazo.

1.2 Organização do Trabalho

O trabalho contempla a contextualização do tema, a exposição da fundamentação teórica, o desenvolvimento do modelo matemático de planejamento de compra e consumo de carvão, a metodologia para o cumprimento dos objetivos propostos, os resultados obtidos e a conclusão.

O Capítulo 2 aborda a fundamentação teórica para o desenvolvimento deste trabalho, os quais foram contemplados os conceitos de sequenciamento e gestão de estoque, uma explanação do processo de coqueria e injeção de carvão pelos Altos Fornos e, uma breve descrição da ferramenta SCOOP. O Capítulo 3 apresenta o desenvolvimento do modelo matemático de compra e consumo de carvão. O Capítulo 4 apresenta as análises sobre e a robustez do modelo para as diversas sensibilidades aplicadas e o ganho esperado com a sua utilização no planejamento de compra e consumo de carvão na Usiminas. No Capítulo 5 são feitas as discussões dos resultados e elaborada a conclusão do estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fabricação do Coque

O coque metalúrgico é o principal combustível dos Altos Fornos e tem como funções fornecer energia térmica, carbono para reação de redução da carga metálica e garantir a permeabilidade do leito de fusão.

A principal matéria prima para fabricação do coque é o carvão mineral e em alguns casos ele é substituído parcialmente por coque verde de petróleo (CVP), subproduto do refino de petróleo, com o intuito de redução de custo. A Usiminas utiliza, na atualidade, cerca de 75% de carvão mineral e 25% de CVP. A totalidade do carvão mineral consumido é importada de origens diversas, sendo as principais: Estados Unidos, Canadá, África do Sul, Ucrânia, Rússia e Austrália. Para o carvão chegar à Usiminas, ele é transportado via marítimo até o Porto de Praia Mole e segue via ferrovia Vitória-Minas até Ipatinga. O CVP utilizado é de origem nacional e sua logística é via transporte rodoviário.

Os variados tipos de carvões são estocados separadamente nos pátios internos, em sequência passam pelo processo de britagem para ajuste da granulometria, conforme especificação e seguem para casa de mistura. A mistura de carvões visa obter qualidade complementares dos carvões, reduzir custo e diminuir a dependência dos fornecedores (LH. SHIH, 1997). Após dosagem e mistura dos carvões, o material segue para a Coqueria. O processo de coqueificação consiste na destilação da mistura de carvão, onde há amolecimento desta com desprendimento da matéria volátil seguida de contração e resolidificação, formando o coque (L.C. COSTA, 2010). Ele deve apresentar as seguintes características requeridas pelo alto forno: máximo teor em carbono e mínimo teor em cinzas, enxofre e umidade; faixa granulométrica estrita e adequada; resistência mecânica e química (R. J. COELHO *et al.*, 2004). A matéria volátil segue para o Carboquímico, onde serão processados os subprodutos amônia, óleos leves e alcatrão que serão vendidos a terceiros e o gás tratado, COG, é utilizado em diversas áreas da usina.

Segue abaixo fluxograma da produção de coque na Usina de Ipatinga:

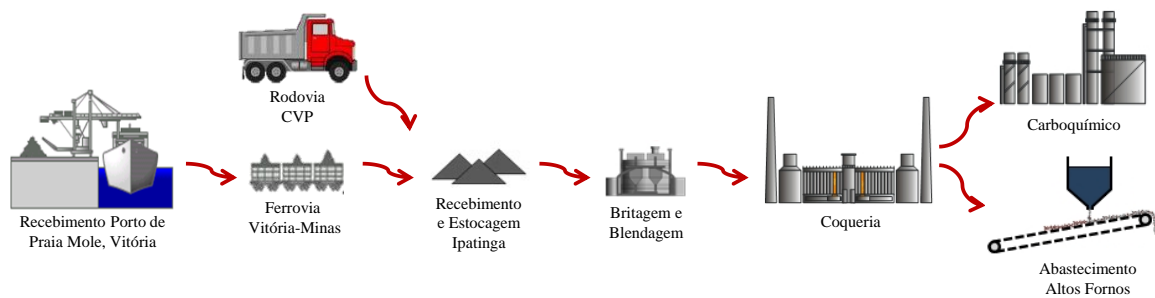


Figura 1: Fluxograma simplificado da produção de coque na Usina de Ipatinga.

Fonte: Usiminas

A qualidade do coque metalúrgico produzido deve respeitar as especificações do Alto Forno, sendo as principais características:

- I. Drum Index (DI): Indica a resistência mecânica do coque a frio;
- II. Coke Reactivity Index (CRI): Indica a reatividade do coque ao CO₂;
- III. Coke Strength After Reaction (CSR): Indica a resistência mecânica do coque após reação com CO₂.

2.2 Injeção de Carvão para os Altos Fornos

A injeção de carvão mineral nos Altos Fornos contribui com o aporte térmico e como gás redutor da carga metálica (M.V. FERNANDES, 2007).

A aplicação deste combustível em substituição parcial ao coque reduz o custo de produção do gusa, produto do Alto Forno. Os carvões utilizados para injeção não são coqueificáveis, ou seja, não se aplicam a fabricação de coque, portanto possuem custo mais atrativo.

A logística de aquisição de carvão para injeção é similar a de carvão para coqueria, contudo seu manuseio é distinto. A dosagem e mistura de carvões é feita no próprio pátio e, então, enviada para Planta de Moagem para ajuste de granulometria. O carvão de injeção pulverizado (PCI) exige cuidado devido sua alta combustibilidade, portanto seu transporte para o Alto Forno é feito de forma pneumática com o gás N₂, inerte.

Segue abaixo fluxograma do preparo do PCI na Usina de Ipatinga:



Figura 2: Fluxograma simplificado do preparo do PCI na Usina de Ipatinga.

Fonte: Usiminas

2.3 Sequenciamento de Navios

Os contratos realizados para as compras de carvão são FOB, portanto a programação de embarque, afretamento marítimo e programação do transporte ferroviário do Porto de Praia Mole à Ipatinga são de responsabilidade da Usiminas. Para tal utilizam-se navios de terceiros que possuem porões independentes e permitem carregar mais de um tipo de carvão, proporcionando maior flexibilidade em trazer um número maior de materiais em menor quantidade, aumentando a utilização dos navios e reduzindo os custos de transporte. O embarque pode ser simples com um único porto de origem ou pode ser múltiplo porto, trazendo pelo menos dois materiais no mesmo navio. Uma prática não muito comum, mas já utilizada pela Usiminas é o embarque parcialmente colaborativo, onde se compartilha a capacidade de carga de um navio entre duas ou mais empresas objetivando redução do frete pelo melhor aproveitamento do navio. Outra prática ainda menos comum é o embarque totalmente colaborativo, onde duas ou mais empresas negociam juntas as demandas com os fornecedores e compartilham o embarque objetivando redução do preço da matéria prima e frete.

A programação e definição de rotas no transporte rodoviário já foram largamente discutidas na literatura, por outro lado o transporte marítimo recebeu maior ênfase nas últimas décadas e, apesar de sua complexidade, obteve resultados significativos. Nos últimos dez anos o crescimento do volume transportado via marítimo cresceu em média 60% e o de graneis 65% enquanto a frota de navios cresceu apenas 40%, mostrando uma maior eficiência em função do dispêndio de energia em pesquisa operacional na área (M. CHRISTIANSEN *et al.*, 2012).

Os altos custos dos embarques fazem com que qualquer melhoria tenha impacto considerável na redução de custo (K. FAGERHOLT, M. CHRISTIANSEN, 2000). Portanto, é importante ter um planejamento otimizado de quais navios utilizar, quais portos e em qual sequência visitar e frequência de embarque para atendimento à demanda com menor custo (M. CHRISTIANSEN *et al.*, 2012).

Para desenvolvimento de um modelo de ship scheduling devem se considerar o planejamento estratégico, tático e operacional (F. HELDEN, 2010):

- Estratégico (longo prazo): Definição do número e tipos de navios que serão utilizados e quais contratos serão feitos. Planejamento anual elaborado em função do orçamento.
- Tático (médio prazo): Definição das rotas de transporte e sequência dos portos a serem visitados. Planejamento trimestral elaborado em função do PVO (plano de vendas e operações).
- Operacional (curto prazo): Definição por navio de sua rota, material a ser carregado por porto, datas de visitas aos portos e velocidade. Planejamento por embarque elaborado em função da demanda próxima.

Nesta primeira etapa de desenvolvimento do modelo focou-se na definição do carvão, volume e data de recebimento com o objetivo de simplificar o problema.

2.4 Gestão de Estoque

A Usina de Ipatinga possui cinco pátios de carvões com capacidade média total de armazenamento de 400 mil toneladas, podendo variar em função do número de carvões estocados. Os pátios contam com os seguintes equipamentos: dois Car Dumpers que descarregam os vagões e abastecem as correias transportadoras, duas Stackers para formação das pilhas, dois Jib Loaders para recuperação do material nas pilhas e duas Wheel Reclaimer que podem tanto abastecer quanto recuperar os carvões nos pátios.

Dentro do estoque de carvão é imprescindível que haja uma combinação disponível de carvões que quando misturados atendam em quantidade e qualidade a demanda das coquearias. Além disso, é necessário ter um estoque de segurança que permita absorver uma maior demanda pontual ou atrasos no abastecimento. Por outro lado, visa-se trabalhar com um número mínimo de materiais para facilitar a operação.

Uma forma de contribuir para a competitividade de uma empresa é reduzindo o capital de giro. Portanto, analisa-se o trade-off do nível de estoque: ao se aumentar o estoque minimiza-se o risco da falta de matéria prima, em contra partida ao se abaixar o estoque reduz o capital imobilizado.

Hoje, todo o planejamento de liberação de pedido, incluindo volume e prazo e o planejamento de consumo são feitos através de um processo manual. A utilização de um modelo computacional de suporte a decisão poderia indicar a melhor estratégia de estocagem e projeção de consumo de mistura. Adicionalmente, para administração eficaz dos estoques, é importante a definição dos níveis dos seguintes itens de controle: lote econômico, estoque de segurança e ponto do pedido.

2.5 Ferramenta Computacional SCOOP

A ferramenta SCOOP é utilizada na Usiminas para realização do prognóstico de demanda agregada de carvão e minério no horizonte de longo prazo, orçamento. Ela serve como base para o planejamento de médio prazo, trimestral, fornecendo uma indicação de quais carvões e em que quantidades utilizarem.

O modelo tem a possibilidade de contemplar de forma integrada os processos de Sinterização, Coqueria e Alto Forno ou trabalhar cada processo de forma independente. São consideradas as disponibilidades, preços e qualidades das matérias primas, as restrições termodinâmicas, rendimentos, produtividades e capacidades de cada processo. Através das simulações, temos o impacto de cada matéria prima no custo e qualidade do sinter, coque e gusa (L. D. CAMILLO, 2012).

2.6 Otimização de Mistura de Carvões

Devido ao elevado custo de carvões e seu impacto direto no custo dos produtos finais das siderúrgicas, muitos trabalhos foram desenvolvidos com o intuito de reduzir o desembolso de carvões sem prejudicar a qualidade do coque consumido pelos Altos Fornos. O escopo desses estudos consiste em definir uma macro mistura a partir da oferta de carvões disponíveis, equações de previsão da qualidade do coque e restrições

operacionais das coqueiras e de qualidade por parte dos altos fornos (G. L. R. SILVA *et al.*, 2012). A macro mistura é utilizada para suportar a compra de carvões e outras inúmeras misturas seriam calculadas ao longo do tempo para definição do consumo de carvão pela operação. O ponto negativo nessa prática é que não se tem a visão global do processo para minimização do custo, portanto os cenários para otimização são incompletos. Quando se considera como oferta de carvão apenas o estoque no pátio da usina para definição da mistura de consumo, perde-se a oportunidade de trabalhar um plano de mistura considerando os recebimentos de carvões. Por outro lado, ao se planejar a mistura macro, deve-se considerar o material em estoque para montar o plano de compra e consumo de carvões.

Ao se pesquisar por trabalhos de otimização de misturas não foi encontrado nenhum modelo que integra o cálculo de mistura com o sequenciamento de compra e consumo de carvões. Este trabalho propõe a elaboração de um modelo matemático capaz de sequenciar a compra e consumo de carvões considerando as restrições de processo e qualidade do coque visando à minimização do custo da mistura de carvão consumida, custo financeiro de estoque e ganho indireto com a redução do tempo gasto pelo corpo técnico em planejamento.

3 ESTUDO DE CASO

3.1 Descrição do Problema

A unidade siderúrgica da Usiminas em Ipatinga é integrada a coque e seu potencial consumo de carvão mineral é de 2,3 milhões de toneladas por ano, sendo 2,0 milhões como matéria prima para a produção de coque e 0,3 milhões para consumo direto por injeção nos Altos Fornos. O planejamento de consumo de carvão para PCI é mais simples do que para Coqueria, pois o número de materiais ofertados e utilizados para atender a qualidade visada da mistura pelos Altos Fornos é menor. Portanto o escopo deste trabalho limita-se a definição de consumo de carvão pela Coqueria.

O mercado de carvão é grande em comparação ao consumo da Usiminas e para a maioria das situações quando há oferta de carvão para o mercado, não há restrição de volume. A mistura de carvão a ser consumida pelas Coquerias é composta de carvão mineral em sua maior parte e, em menor quantidade, CVP que é utilizado como combustível alternativo para redução de custo. Cem por cento do carvão mineral consumido é importado de várias regiões do mundo, sendo os principais países: Estados Unidos, Canadá, África do Sul, Ucrânia, Rússia e Austrália.

A mistura de carvão que alimenta a coqueria tem de ter qualidade adequada para atender as restrições operacionais e produzir coque com qualidade física e química requerida pelo seu cliente, Alto Forno. Equações de previsão de qualidade do coque são utilizadas.

Visando o melhor cenário global, é preciso considerar as ofertas de carvões disponíveis, suas qualidades e preços, logística, demanda de coque, restrições operacionais e de qualidade para, então, definir quais carvões comprar e em quais volumes ao longo do tempo e o plano de consumo para as misturas. Para a elaboração do plano é necessária a presença das equipes de Suprimentos, Logística e Operação.

3.2 Método Atual Usiminas

O planejamento de compra e consumo de carvões da Usiminas inicia na elaboração do orçamento anual, onde se tem a previsão da demanda pela coqueria para produção de

coque e pelo alto forno para injeção de finos e a previsão de oferta projetada pela área de Suprimentos. Com base nessas informações e premissas de qualidade do coque e PCI requeridas pelo Alto Forno, utiliza-se a ferramenta SCOOP para definição de um mix de carvões (Alto Volátil, Médio Alto Volátil, Médio Baixo Volátil, Baixo Volátil e CVP) para se trabalhar ao longo do ano. A ferramenta indica uma mistura única como solução ótima, contudo devido esta etapa ser de planejamento macro, considera-se apenas o mix para o orçamento.

Trimestralmente, as áreas de Suprimentos, Logística e Operação elaboram, em conjunto, o plano de compra e embarque de carvões detalhando o fornecedor, material, volume, navio e estimativa das datas de carga e descargas nos portos. Esta etapa consiste em definir quais carvões e em quais volumes utilizar dentre as ofertas disponíveis no horizonte de 3 meses. Para tal, consideram-se as ofertas disponíveis, o material em estoque, os embarques com previsão de chegada no período, os volumes em contrato e o mix de carvão indicado no planejamento de demanda agregada via ferramenta SCOOP. Em sequência é feita a alocação dos pedidos de acordo com as janelas portuárias e afretamentos marítimos disponíveis.

Como as ofertas podem divergir em volume e preço de quando foi feito o planejamento inicial de mix, seria necessário realizar novo cenário no SCOOP com ofertas e estoques atualizados para obter nova indicação de quais carvões comprar. Contudo, devido à complexidade da ferramenta, a qual demanda tempo e envolvimento do corpo técnico de diferentes áreas, as atualizações não são feitas com a frequência adequada. A decisão de compra é tomada respeitando apenas o mix indicado pelo SCOOP durante a elaboração do orçamento, sem considerar os carvões que compõe esse mix.

A etapa seguinte é o planejamento de curto prazo de consumo de carvão, operacional, no qual se define qual carvão utilizar, em qual percentual e qual a duração da mistura. Contudo o plano não prevê quais misturas utilizar durante todo horizonte de 3 meses. Na prática define-se a mistura a entrar em operação apenas quando a mistura atual já está próxima do fim.

O processo descrito acima e apresentado na figura 3, possui algumas deficiências, como definir a compra de carvão com base em um mix que foi calculado com premissas diferentes do momento de compra, dificuldade de atualização das premissas em função das flutuações de mercado e condições operacionais, e não se ter um planejamento de consumo de carvão em médio e longo prazo. Além disso, a utilização de um software desenvolvido

por terceiros, exige a compra da licença, gasto com suporte e dependência da empresa fornecedora.

A utilização de uma ferramenta de suporte a decisão durante o planejamento de médio e curto prazo traria maior efetividade com a redução de custo e economia de tempo.

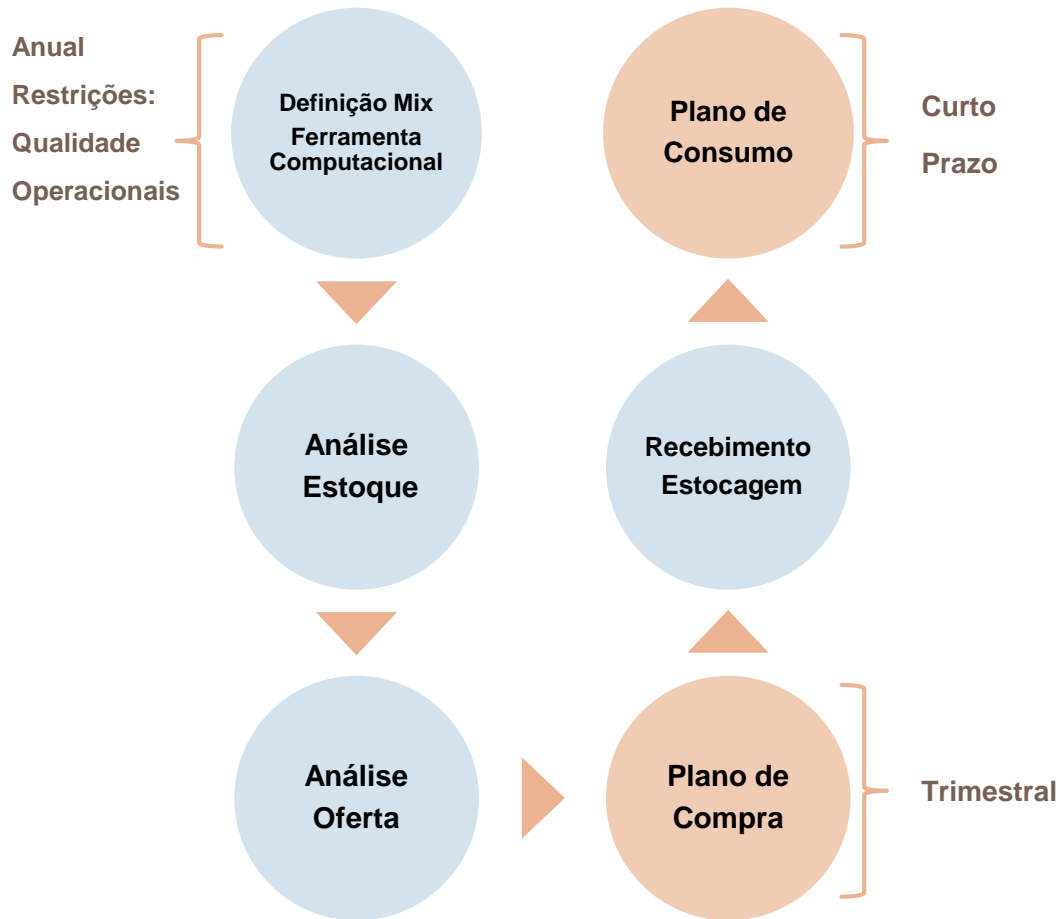


Figura 3: Fluxo de definições atual dos planos de compra e consumo de carvões.

3.3 Modelagem do Problema

A ferramenta matemática foi desenvolvida em programação inteira mista com a utilização do software AMPL e o solver CPLEX. Foi proposto um modelo no qual a função objetivo é reduzir o custo da mistura consumida pela coqueria e o custo financeiro do estoque de carvão. A ferramenta de sequenciamento visa definir o recebimento por carvão, i , e por período, t , na Usina, r_{it} , e a participação diária de cada carvão na mistura para consumo na Coqueria no período, x_{it} . Com a utilização da variável binária fl_{it}

restringe-se a participação do carvão na mistura por período, quando ele participa, a um mínimo de 5% devido à restrição de sensibilidade das balanças dosadoras da casa de mistura. O período de análise é diário, permitindo flexibilizar o modelo para análises: curto prazo, 30 dias, com a visão operacional; médio prazo, 90 dias, em função das programações de compras trimestrais; longo prazo, 360 dias, atendendo o orçamento anual. Para o balanço de massa, considera-se o estoque de carvão, s_{it} , disponível no pátio, o consumo pelas coqueiras, e o recebimento na Usina. O consumo de mistura de carvão, d , pelas coqueiras pode ser considerado constante, pois o índice de operação da coquearia não sofre grandes variações com o intuito de manter a qualidade do coque e preservar os refratários de sua estrutura. O embarque/recebimento de cada carvão é limitado a um mínimo de 10 mil toneladas, capacidade de um porão de navio, e um máximo de 70 mil toneladas, capacidade total dos navios normalmente utilizados. A variável f_{2it} é empregada para restringir os volumes recebidos de cada carvão por período. Os carvões são agrupados em classes, m_v , de acordo com o teor de matéria volátil, v : Alto Volátil (AV), Médio Alto (MA), Médio Baixo (MB), Baixo Volátil (BV); não coqueificáveis: SOFT (SO); Coque Verde de Petróleo (CP). Por medida de segurança, adota-se o estoque mínimo de segurança de carvão, s_{v_min} , para cada classe de carvão. Considera-se a possibilidade de restringir a participação na mistura de cada classe pelo limite inferior, m_{vl} , e limite superior, m_{vu} , visando complementar as equações de previsão da qualidade do coque. Utiliza-se a variável binária, σ_{iv} , para atribuir cada tipo de carvão a sua respectiva classe. O número de carvões na mistura, n , tem o limite superior, n_u , em função da quantidade de silos e balanças dosadoras existentes para operação na Casa de Mistura e o limite inferior, n_l , em função da estratégia de reduzir a dependência de poucos fornecedores. Para seu cálculo utiliza-se a variável binária ρ_{it} . Para garantir a estabilidade operacional das baterias de coque e um melhor controle entre a mistura de carvões consumida e a qualidade do coque produzido há um período mínimo de consumo de uma mistura, l , e seu apontamento é feito com a utilização das variáveis binárias y_{it} e φ_t .

Consideram-se os preços individuais de reposição dos carvões, c , constante para o horizonte de análise. A taxa w é aplicada ao inventário e obtém-se o custo financeiro de estoque.

As propriedades, j , por carvão, p_{ij} , consideradas para prever a qualidade do coque são: temperatura máxima de fluidez, teor de cinza, teor de inertes, stability index (SI), vitrinita, DI do carvão individual, índice de basicidade, reflectância, teor de enxofre,

matéria volátil. A qualidade da mistura por período é representada por α_{jt} e as propriedades do coque são obtidas através de equações elaboradas pelo Centro de Pesquisa da Usiminas que utilizam esses parâmetros como dado de entrada. As especificações da qualidade do coque por período, β_{kt} , são definidas pelo Alto Forno para os seguintes itens: DI, CRI, CSR e teor de enxofre. O rendimento de carvão em coque, R_t , é restringido em função do balanço energético da usina e consequente demanda de gás de coqueria (COG) pelo intervalo R_l e R_u .

Segue, abaixo, resumo das notações consideradas:

| | | | |
|---------------|---|------------|---------------------------|
| t | índice do período, | $t \in T,$ | $T = \{1, 2, \dots, 90\}$ |
| i | índice do carvão, | $i \in I,$ | $I = \{1, 2, \dots, i\}$ |
| j | índice de qualidade do carvão, | $j \in J,$ | $J = \{1, 2, \dots, 11\}$ |
| k | índice de qualidade do coque, | $k \in K,$ | $K = \{1, 2, \dots, 4\}$ |
| v | índice da classe do carvão, | $v \in V,$ | $V = \{1, 2, \dots, 5\}$ |
| x_{it} | participação do carvão i na mistura no período t | | |
| r_{it} | recebimento do carvão i na mistura no período t | | |
| s_{it} | estoque do carvão i na mistura no período t | | |
| s_{vt} | estoque da classe v no período t | | |
| s_{v_min} | estoque mínimo da classe v nos pátios | | |
| d | demanda diária da mistura de carvão | | |
| w | taxa de juros aplicada sobre o capital imobilizado | | |
| m_{vt} | participação das classes de carvão v na mistura no período t , $m_{vt} \in M$, $M = [m_{vb}, m_{vu}]$ | | |
| n_t | número de carvões na mistura no período t , | $n \in N,$ | $N = [n_l, n_u]$ |
| l | período mínimo de consumo de uma mistura pela coqueria | | |
| ρ_{it} | $= \begin{cases} 1, & \text{participação do carvão } i \text{ na mistura no período } t, = 0\% \\ 0, & \text{participação do carvão } i \text{ na mistura no período } t, \geq 5\% \end{cases}$ | | |
| f_{it} | $= \begin{cases} 1, & \text{recebimento do carvão } i \text{ no período } t, = 0 \text{ toneladas} \\ 0, & \text{recebimento do carvão } i \text{ no período } t, \geq 10 \text{ e } \leq 70 \text{ toneladas} \end{cases}$ | | |
| σ_{vi} | $= \begin{cases} 1, & \text{carvão } i \text{ pertence a classe de volatilidade } v \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$ | | |
| y_{it} | $= \begin{cases} 0, & \text{participação do carvão } i \text{ na mistura é igual nos períodos } t \text{ e } (t + 1) \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases}$ | | |

$$\varphi_t = \begin{cases} 0, & \text{se } y_{it} = 0 \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

c_i preço do carvão i

p_{ji} propriedade j do carvão i

o_{vi} classe v do carvão i

β_k restrição da propriedade k do coque

α_{jt} propriedade j da mistura no período t

R_t rendimento carvão/coque no período t , $R \in R'$, $R' = (R_l, R_u)$

G número grande

O modelo foi escrito como abaixo:

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} (x_{it} c_i d + s_{it} c_i w) \quad (1)$$

$$s_{i(t-1)} + r_{it} - x_{it} d = s_{it} \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} x_{it} = 1 \quad \forall t \in T \quad (3)$$

$$x_{it} \leq \rho_{it} \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in T \quad (4)$$

$$x_{it} \geq \rho_{it} * 0,05 \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in T \quad (5)$$

$$r_{it} \leq 70 - f_{it} * 70 \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in T \quad (6)$$

$$r_{it} \geq 10 * (1 - f_{it}) \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$s_{vt} = \sum_{i \in I} \sigma_{vi} * s_{it} \quad \forall v \in V, \quad \forall t \in T \quad (8)$$

$$s_{vt} \geq s_{v_min} \quad \forall v \in V, \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$n_t = \sum_{i \in I} \rho_{it} \quad \forall t \in T \quad (10)$$

$$n_l \leq n_t \leq n_u \quad \forall t \in T, \quad n \in N \quad (11)$$

$$m_{vt} = \sum_{i \in I} \sigma_{vi} x_{it} \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in T, \quad \forall v \in V \quad (12)$$

$$m_{vl} \leq m_{vt} \leq m_{vu} \quad \forall v \in V, \quad \forall t \in T \quad (13)$$

$$x_{it} - x_{i(t-1)} - y_{it} * G \leq 0 \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in T \quad (14)$$

$$-x_{it} + x_{i(t-1)} - (1 - y_{it}) * G \leq 0 \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in T \quad (15)$$

$$\sum_{i \in I} y_{it} \leq \varphi_t * G \quad \forall t \in T \quad (16)$$

$$\sum_t^{t+l-1} \varphi_t \leq 1 \quad \forall t \in T \quad (17)$$

$$\alpha_{jt} = \sum_{i \in I} x_{it} p_{ji} \quad \forall j \in J, \quad \forall t \in T \quad (18)$$

$$\beta_1 \leq 0,076\alpha_{1t} - 0,924\alpha_{2t} - 0,507\alpha_{3t} + 0,559\alpha_{4t} + 93,110 \quad \forall t \in T \quad (19)$$

$$\beta_2 \leq 0,452\alpha_{6t} + 7,555\alpha_{7t} + 0,142\alpha_{3t} - 31,586\alpha_{8t} + 6,838 \quad \forall t \in T \quad (20)$$

$$\beta_3 \leq -9,968\alpha_{7t} - 0,909\alpha_{3t} + 24,496\alpha_{8t} + 14,534\alpha_{9t} - 0,924\alpha_{5t} + 125,029 \quad \forall t \in T \quad (21)$$

$$\beta_4 \geq 0,643\alpha_{10t} + 0,190 \quad \forall t \in T \quad (22)$$

$$R_t = 0,99(99 - 5/6 \alpha_{11t}) \quad \forall t \in T \quad (23)$$

$$R_l \leq R_t \leq R_u \quad \forall t \in T \quad (24)$$

$$\rho_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in T \quad (25)$$

$$\theta_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in T \quad (26)$$

$$y_{i,1} = 1 \quad (27)$$

$$y_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in T \quad (28)$$

$$M = 1000 \quad (29)$$

$$\varphi_1 = 1 \quad \forall t \in T \quad (30)$$

$$\varphi_t \in \{0,1\} \quad \forall t \in T \quad (31)$$

$$s_{it}, x_{it}, r_{it} \geq 0 \quad \forall i \in I, \quad \forall t \in T \quad (32)$$

$$s_{i0} = s_{inicial} \quad \forall i \in I \quad (33)$$

A função objetivo (1) minimiza a soma do custo total das misturas de carvão utilizadas para atendimento da demanda da Coqueria no período em análise e o custo do capital imobilizado sobre o estoque. Pelo balanço de massa (2) - (3), temos como disponibilidade de carvão no período seguinte a diferença da soma do estoque inicial com o volume recebido pelo consumo do período atual. A restrição de participação mínima de 5%, quando o carvão participa da mistura é obtida por (4) - (5). O lote mínimo e máximo de recebimento de carvão é dado em (6) - (7). O estoque mínimo de cada classe de carvão é considerado (8) - (9). Restringe-se o número de carvões (10) - (11) e a participação de classe de volatilidade (12) - (13) que compõem a mistura. É considerado um período mínimo de consumo de uma mistura, (14) - (17). Primeiramente, verifica-se a mudança da participação de cada carvão entre períodos, e caso ocorra em um ou mais carvões, implica

em mudança de mistura entre períodos que é restringida por um intervalo mínimo definido. A qualidade mínima do coque é alcançada pelas equações (18) - (22). O rendimento carvão/coque é restringido por (23) - (24). O domínio das variáveis é definido pelas restrições (25) - (33).

De acordo com o modelo proposto, as premissas de oferta e estoque de carvões e as restrições de qualidade do coque e operacionais são consideradas e temos, como resposta, o plano integrado de compra, estoque e consumo de carvões em função da demanda e horizonte considerados com o custo ótimo. Segue abaixo ilustração do modelo proposto:

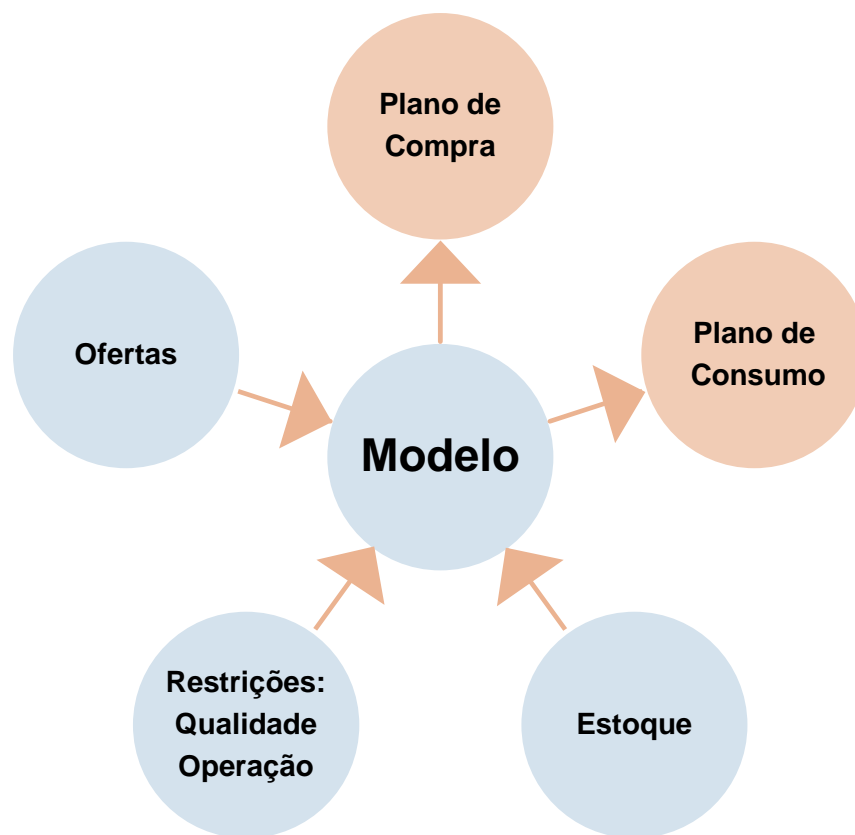


Figura 4: Fluxo de definições proposto dos planos de compra e consumo de carvões.

4 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Os experimentos apresentados neste capítulo são conduzidos utilizando um computador com Intel® Core™ 2 Duo CPU P9400 @ 2.40 GHz 1,95 GB de RAM, AMPL IDE Version: 3.1.1.201602042304 e solver CPLEX. Para todas as instâncias, o tempo limite computacional foi de 30 minutos por cenário em função da disponibilidade de tempo para realizar as simulações e analisá-las.

4.1 Instâncias Artificiais

Os efeitos de variações dos parâmetros do sistema foram analisados com o intuito de verificar a robustez do modelo. Foram adotadas três instâncias como sensibilidades. O primeiro grupo refere-se à oferta de carvões disponíveis e já aprovados para consumo pelo Centro de Pesquisa Usiminas: baixa oferta (20 tipos), média oferta (30 tipos) e alta oferta (40 tipos). O segundo grupo refere-se à demanda de carvão em função do ritmo dos Altos Fornos: baixa demanda (entre 3500 e 4000 toneladas/dia) e alta demanda (entre 4000 e 4500 toneladas/dia). Por último, o terceiro grupo refere-se ao horizonte de análise: curto prazo (30 dias) no qual contempla um cenário de planejamento operacional, e médio prazo (90 dias) no qual é a frequência de planejamento de compra. As famílias com as instâncias consideradas são representadas na tabela 1. Para cada família foram gerados 5 cenários aleatórios em função dos carvões considerados em um total de 46 ofertas e demanda. Foram assumidas as premissas onde o estoque inicial é equivalente a 1/3 da demanda de todo o período distribuído em 10 tipos de carvões entre os ofertados para o cenário e a desconsideração do estoque mínimo das classes de carvão por período em função da aleatoriedade da disponibilidade de tipos carvões. Segue abaixo, Tabela 1, com resumo das famílias consideradas no estudo de sensibilidade:

Tabela 1 – Famílias de testes.

| FAMÍLIA | Nº DE CARVÕES DISPONÍVEIS | DEMANDA DE CARVÃO | PERÍODO (dias) |
|----------------|----------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 1 | 20 | Baixa | 30 |
| 2 | 20 | Baixa | 90 |
| 3 | 20 | Alta | 30 |
| 4 | 20 | Alta | 90 |
| 5 | 30 | Baixa | 30 |
| 6 | 30 | Baixa | 90 |
| 7 | 30 | Alta | 30 |
| 8 | 30 | Alta | 90 |
| 9 | 40 | Baixa | 30 |
| 10 | 40 | Baixa | 90 |
| 11 | 40 | Alta | 30 |
| 12 | 40 | Alta | 90 |

4.2 Instância Real

Foi avaliada a performance e resultado do modelo frente a um cenário histórico vivido pela Usiminas, considerou-se um período de 3 meses para análise em função das negociações de compra de carvões ocorrerem trimestralmente. Para tornar a análise possível foi feito um esforço em conjunto com a equipe técnica da Operação e Suprimentos para buscar dados históricos para alimentar o modelo de forma que o cenário considerado pelo modelo fosse o mais fiel possível. Foram considerados as ofertas de carvões recebidas e os carvões disponíveis nos pátios da usina por tipo e preço no momento da compra e a demanda para o horizonte considerado. Como ainda não foi modelado o layday entre a data de recebimento de carvão com o momento de definição da compra, foram consideradas as ofertas de carvões com data de recebimento dentro do período de análise.

A partir das premissas de estoque e oferta foi elaborado um cenário utilizando o modelo, obtendo como resposta uma indicação de quais carvões comprar e quais misturas

consumir no horizonte analisado. Foi, então, analisado este resultado com o realizado no mesmo período. Pode-se, então, estimar o impacto potencial em custo com a implementação da utilização do modelo na rotina de atividades de planejamento de compra e consumo de carvão na Usiminas.

4.3 Resultados

A seguir são apresentadas as tabelas com os resultados das sensibilidades consideradas por meio das instâncias artificiais. A primeira e segunda colunas das Tabelas 2, 3 e 4 contêm o número e a instância considerada. Por exemplo, P30-DB corresponde a um horizonte de análise de 30 períodos de um dia e DB a uma demanda baixa e P90-DA corresponde a um horizonte de 90 períodos de um dia e DA a uma demanda alta. As colunas Z_0 e t_0 fornecem valor da função objetivo em mil US\$ e tempo de execução do solver para programação inteira mista em segundos. A coluna MIPGAP (%) indica a distância relativa entre a melhor solução inteira encontrada e o limitante inferior (36):

$$\text{MIPGAP (\%)} = \frac{\text{abs}((\text{best bound}) - (\text{best integer})) * 100}{(\text{best bound})} \quad (36)$$

As colunas Z_1 e t_1 fornecem valor da função objetivo em mil US\$ e tempo de execução do solver para relaxação linear em segundos. A coluna GAP LINEAR(%) fornece a distância relativa entre a melhor solução inteira obtida e a solução ótima da relaxação linear (37):

$$\text{GAP LINEAR (\%)} = \frac{\text{abs}((\text{optimal linear relaxation}) - (\text{best integer})) * 100}{(\text{best integer})} \quad (37)$$

O caractere (-) nas tabelas representa uma instância na qual o solver não encontrou uma solução inteira devido à insuficiente memória.

A Tabela 2 mostra os resultados para as instâncias que consideram uma oferta baixa de carvões, 20 tipos.

Tabela 2 – Resultados computacionais para instâncias artificiais: oferta de 20 carvões.

| Número | Instância | CPLEX | | | | | |
|--------------|-----------|----------------|----------------|------------|----------------|----------------|---------------|
| | | Z ₀ | t ₀ | MIPGAP (%) | Z ₁ | t ₁ | GAP LINEAR(%) |
| 1 | P30-DB | 15634 | 1800,17 | 1,74 | 15061 | 0,16 | 3,67 |
| 2 | P30-DB | 14735 | 1800,16 | 2,10 | 14119 | 0,14 | 4,18 |
| 3 | P30-DB | 14502 | 1800,17 | 2,23 | 13842 | 0,13 | 4,55 |
| 4 | P30-DB | 15330 | 1800,11 | 2,06 | 14737 | 0,17 | 3,87 |
| 5 | P30-DB | 15375 | 1800,08 | 1,77 | 14795 | 0,14 | 3,77 |
| Média P30-DB | | 15115 | 1800,14 | 1,98 | 14511 | 0,15 | 4,00 |
| 6 | P90-DB | 1135480 | 1800,16 | 96,08 | 43533 | 0,45 | 96,17 |
| 7 | P90-DB | 51128 | 1800,17 | 8,90 | 45579 | 0,36 | 10,85 |
| 8 | P90-DB | 1113030 | 1800,22 | 95,93 | 44436 | 0,38 | 96,01 |
| 9 | P90-DB | 50352 | 1800,16 | 6,08 | 46375 | 0,36 | 7,90 |
| 10 | P90-DB | 1188460 | 1800,12 | 95,94 | 47274 | 0,36 | 96,02 |
| Média P90-DB | | 707690 | 1800,17 | 60,59 | 45439 | 0,38 | 93,58 |
| 11 | P30-DA | 17451 | 1800,31 | 3,19 | 16543 | 0,20 | 5,20 |
| 12 | P30-DA | 15598 | 1800,11 | 2,15 | 14952 | 0,17 | 4,14 |
| 13 | P30-DA | 18295 | 1800,17 | 1,21 | 17896 | 0,13 | 2,19 |
| 14 | P30-DA | 17200 | 1800,11 | 2,89 | 16294 | 0,13 | 5,26 |
| 15 | P30-DA | 16339 | 1800,09 | 2,86 | 15501 | 0,14 | 5,13 |
| Média P30-DA | | 16977 | 1800,16 | 2,46 | 16237 | 0,15 | 4,35 |
| 16 | P90-DA | 58633 | 1800,16 | 16,09 | 48107 | 0,42 | 17,95 |
| 17 | P90-DA | 54369 | 1800,19 | 7,18 | 49536 | 0,39 | 8,89 |
| 18 | P90-DA | 1157780 | 1800,16 | 95,53 | 50752 | 0,36 | 95,62 |
| 19 | P90-DA | 64398 | 1800,19 | 23,22 | 48479 | 0,47 | 24,72 |
| 20 | P90-DA | 59181 | 1800,19 | 8,99 | 53390 | 0,39 | 9,78 |
| Média P90-DA | | 278872 | 1800,18 | 30,20 | 50053 | 0,41 | 82,05 |

A Tabela 3 mostra os resultados para as instâncias que consideram uma oferta média de carvões, 30 tipos.

Tabela 3 – Resultados computacionais para instâncias artificiais: oferta de 30 carvões.

| Número | Instância | CPLEX | | | | | |
|---------------|-----------|----------------|----------------|------------|----------------|----------------|---------------|
| | | Z ₀ | t ₀ | MIPGAP (%) | Z ₁ | t ₁ | GAP LINEAR(%) |
| 21 | P30-DB | 15413 | 1800,16 | 2,10 | 14783 | 0,19 | 4,09 |
| 22 | P30-DB | 13983 | 1800,09 | 2,20 | 13412 | 0,20 | 4,08 |
| 23 | P30-DB | 14487 | 1800,09 | 2,90 | 13777 | 0,20 | 4,90 |
| 24 | P30-DB | 14586 | 1800,09 | 1,68 | 14069 | 0,19 | 3,54 |
| 25 | P30-DB | 14643 | 1800,09 | 1,71 | 14084 | 0,22 | 3,81 |
| Média P30-DB | | 14622 | 1800,10 | 2,12 | 14025 | 0,20 | 4,08 |
| 26 | P90-DB | 1728540 | 1800,23 | 97,25 | 46654 | 0,52 | 97,30 |
| 27 | P90-DB | 1737700 | 1800,17 | 97,21 | 47652 | 0,59 | 97,26 |
| 28 | P90-DB | 49765 | 1800,16 | 5,45 | 46220 | 0,52 | 7,12 |
| 29 | P90-DB | 1755040 | 1800,16 | 97,35 | 45670 | 0,45 | 97,40 |
| 30 | P90-DB | 55935 | 1800,23 | 19,58 | 44062 | 0,55 | 21,23 |
| Média P90-C20 | | 1065396 | 1800,19 | 63,37 | 46052 | 0,53 | 95,68 |
| 31 | P30-DA | 16539 | 1800,11 | 1,41 | 15996 | 0,22 | 3,28 |
| 32 | P30-DA | 16029 | 1800,22 | 1,90 | 15454 | 0,19 | 3,58 |
| 33 | P30-DA | 16647 | 1800,17 | 2,61 | 15913 | 0,20 | 4,41 |
| 34 | P30-DA | 17887 | 1800,22 | 2,75 | 17059 | 0,16 | 4,63 |
| 35 | P30-DA | 16602 | 1800,73 | 2,63 | 15842 | 0,17 | 4,58 |
| Média P30-DA | | 16741 | 1800,29 | 2,26 | 16053 | 0,19 | 4,11 |
| 36 | P90-DA | 1671460 | 1800,23 | 97,16 | 46357 | 0,55 | 97,23 |
| 37 | P90-DA | (-) | 1800,19 | (-) | 47807 | 0,58 | (-) |
| 38 | P90-DA | 1747300 | 1800,2 | 97,18 | 48240 | 0,45 | 97,24 |
| 39 | P90-DA | 1641290 | 1800,17 | 96,76 | 52151 | 0,52 | 96,82 |
| 40 | P90-DA | 59597 | 1800,19 | 17,30 | 48388 | 0,52 | 18,81 |
| Média P90-DA | | 1279912 | 1800,20 | 77,10 | 48784 | 0,51 | 96,19 |

A Tabela 4 mostra os resultados para as instâncias que consideram uma oferta alta de carvões, 40 tipos.

Tabela 4 – Resultados computacionais para instâncias artificiais: oferta de 40 carvões.

| Número | Instância | CPLEX | | | | | |
|--------------|-----------|----------------|----------------|------------|----------------|----------------|---------------|
| | | Z ₀ | t ₀ | MIPGAP (%) | Z ₁ | t ₁ | GAP LINEAR(%) |
| 41 | P30-DB | 14233 | 1800,36 | 2,61 | 13609 | 0,36 | 4,38 |
| 42 | P30-DB | 14425 | 1802,47 | 2,54 | 13793 | 0,38 | 4,38 |
| 43 | P30-DB | 14229 | 1800,78 | 2,48 | 13648 | 0,23 | 4,08 |
| 44 | P30-DB | 14041 | 1800,14 | 2,76 | 13443 | 0,28 | 4,26 |
| 45 | P30-DB | 14772 | 1800,28 | 2,51 | 14122 | 0,25 | 4,40 |
| Média P30-DB | | 14340 | 1800,81 | 2,58 | 13723 | 0,30 | 4,30 |
| 46 | P90-DB | 50168 | 1800,2 | 13,12 | 42737 | 0,61 | 14,81 |
| 47 | P90-DB | 2280540 | 1800,23 | 98,16 | 41236 | 0,63 | 98,19 |
| 48 | P90-DB | 51553 | 1800,23 | 8,41 | 46357 | 0,66 | 10,08 |
| 49 | P90-DB | 2285440 | 1800,19 | 98,05 | 43632 | 0,63 | 98,09 |
| 50 | P90-DB | 2234500 | 1800,2 | 98,04 | 42923 | 0,64 | 98,08 |
| Média P90-DB | | 1380440 | 1800,21 | 63,15 | 43377 | 0,63 | 96,86 |
| 51 | P30-DA | 16265 | 1800,22 | 4,55 | 15195 | 0,28 | 6,58 |
| 52 | P30-DA | 16384 | 1800,38 | 2,62 | 15670 | 0,25 | 4,36 |
| 53 | P30-DA | 16647 | 1800,11 | 1,89 | 16064 | 0,27 | 3,50 |
| 54 | P30-DA | 17110 | 1800,23 | 2,43 | 16362 | 0,28 | 4,37 |
| 55 | P30-DA | 16873 | 1800,31 | 2,50 | 16118 | 0,23 | 4,47 |
| Média P30-DA | | 16656 | 1800,25 | 2,80 | 15882 | 0,26 | 4,65 |
| 56 | P90-DA | 2286600 | 1800,22 | 97,67 | 52280 | 0,72 | 97,71 |
| 57 | P90-DA | 2292680 | 1800,19 | 97,64 | 53138 | 0,66 | 97,68 |
| 58 | P90-DA | 2253130 | 1800,2 | 97,73 | 50208 | 0,66 | 97,77 |
| 59 | P90-DA | 2270050 | 1800,25 | 97,56 | 54194 | 0,69 | 97,61 |
| 60 | P90-DA | 2299190 | 1800,22 | 97,73 | 51276 | 0,61 | 97,77 |
| Média P90-DA | | 2277243 | 1800,22 | 97,67 | 51990 | 0,67 | 97,72 |

A seguir é apresentada a Tabela 5 com o comparativo dos consumos por carvão para um trimestre considerando os volumes conforme realizado e o resultado obtido pelo modelo. A primeira coluna indica a classe pertencente do carvão e a segunda coluna o carvão considerado em ordem numérica, respeitando as restrições de confidencialidade da Usiminas. A terceira coluna mostra o estoque inicial do horizonte considerado de 90 dias que foi considerado como base para a compra e planejamento de consumo tanto para a situação real quanto como informação de entrada do modelo. A quarta e quinta colunas

mostram, respectivamente, o recebimento e consumo de carvões acumulados conforme realizado no período considerado. A sexta e sétima colunas mostram, respectivamente, o recebimento e consumo de carvões acumulados indicados pelo modelo desenvolvido.

Tabela 5 – Resultados de recebimento e consumo de carvões para as instâncias reais.

| Classe | Carvão | Estoque Inicial [kt] | Realizado [kt] | | Proposto pelo Modelo [kt] | |
|--|--------|----------------------|----------------|---------|---------------------------|------------|
| | | | Recebimento | Consumo | Recebimento | Consumo |
| AV | 1 | 62 | - | 62 | - | - |
| AV | 2 | 4 | 113 | 51 | - | - |
| AV | 3 | - | 53 | 19 | - | - |
| AV | 4 | - | - | - | - | - |
| AV | 5 | - | - | - | 146 | 145 |
| MA | 6 | 50 | - | 27 | - | 11 |
| MB | 7 | 26 | - | 14 | 51 | 58 |
| MB | 8 | 34 | - | 34 | - | - |
| MB | 9 | 4 | - | 3 | - | - |
| MB | 10 | - | 33 | 17 | - | - |
| MB | 11 | - | - | - | - | - |
| MB | 12 | - | - | - | - | - |
| BV | 13 | 34 | 21 | 46 | - | 30 |
| BV | 14 | - | 45 | 7 | 41 | 27 |
| SO | 15 | 20 | - | 20 | - | - |
| SO | 16 | 5 | 18 | 10 | - | - |
| SO | 17 | - | - | - | - | - |
| SO | 18 | - | - | - | 32 | 20 |
| CP | 19 | 9 | 112 | 93 | 117 | 113 |
| Total [kt] | | 247 | 395 | 404 | 387 | 404 |
| Potencial Ganho no Custo de Consumo de Carvões com a Utilização do Modelo [MMR\$] | | | | | | 5,8 |

A Tabela 6 apresenta o mix médio de carvões por classe para consumo no horizonte considerado. A primeira coluna mostra a classe de carvão, a segunda e terceira colunas indicam a participação de cada classe na situação real e conforme indicação do modelo, respectivamente.

Tabela 6 – Mix de carvões por classe real vs modelo.

| Classe | Real [%] | Modelo [%] |
|---------------|-----------------|-------------------|
| AV | 33 | 36 |
| MA | 7 | 3 |
| MB | 17 | 14 |
| BV | 13 | 14 |
| SO | 7 | 5 |
| CP | 23 | 28 |

5 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

5.1 Instâncias Artificiais

Através das instâncias artificiais pode-se prever o comportamento do modelo frente às variações mais comuns que envolvem a programação de compra e consumo de carvões. Os experimentos descritos nas tabelas 2, 3 e 4 demonstram o impacto da variação da oferta de carvões, horizonte de análise e demanda de mistura na função objetivo e tempo gasto pelo solver tanto para programação inteira quanto para relaxação linear.

Em nenhuma das instâncias artificiais analisadas através da programação inteira foi possível encontrar a solução ótima no tempo limite estipulado de 30 minutos. Isso é um indício que o problema possui tal complexidade que seria indicado utilizar um computador com melhor desempenho para rodá-lo dentro do tempo limite ou realizar uma análise heurística. Quando permitido a relaxação linear a solução ótima foi encontrada em menos de 1 segundo para todos os cenários.

O modelo responde melhor quando se considera o horizonte de 30 períodos (dias), independente do nível de demanda e da oferta de carvões, em relação ao horizonte de 90 períodos. O MIPGAP médio para os cenários de 30 dias é 2,37% enquanto o GAP LINEAR médio é de 4,25%, resultados que demonstram o bom desempenho do modelo para esse horizonte de análise. Contudo, nos cenários de horizonte de 90 dias, temos o MIPGAP médio de 65,35% e GAP LINEAR médio de 93,68%, resultados que já demonstram certa incerteza quanto à solução encontrada pelo modelo.

Com o aumento das ofertas de carvões e demanda verificou-se a tendência de aumento do MIPGAP e GAP LINEAR médios, com exceção do aumento de demanda do cenário com 20 carvões. Esses aumentos foram consideravelmente menores do que o aumento em função do horizonte de análise.

Considerando apenas os cenários com horizonte de 30 dias é possível notar redução da função objetivo (Z_0) com o aumento da oferta de carvões, conforme esperado. Quanto maior a disponibilidade de diferentes tipos de carvões, maiores são as possibilidades de combinações para atender a qualidade requerida ao menor custo.

Com os resultados das instâncias artificiais percebe-se, portanto, que não há impacto considerável em função do nível de demanda e oferta de carvões, contudo o horizonte de análise é o fator crítico entre as sensibilidades analisadas.

5.2 Instância Real

Com a utilização de um cenário real no qual se tem o estoque inicial de carvão na Usina de Ipatinga, demanda projetada e ofertas disponíveis para o período é possível avaliar a resposta do modelo considerando essas premissas e compará-la com as decisões tomadas pelo corpo técnico a partir das ferramentas atuais disponíveis na Usiminas. Foram também respeitadas todas as restrições operacionais e de qualidade do coque. Através da otimização do plano de recebimento e consumo de carvões proposta pelo modelo desenvolvido foi possível uma potencial redução do custo total de consumo de carvões para o trimestre em análise de aproximadamente 5,8 MMR\$. Ao extrapolar para um consumo anual de carvão, temos um ganho de cerca de 20 MMR\$. Contudo se modelado o horizonte de 1 ano, o ganho tende a ser superior devido menor influência do estoque inicial. Foi elaborado um cenário considerando o período de 1 ano, porém o computador utilizado não possui memória suficiente para a análise.

Nota-se uma priorização no cenário real do consumo dos carvões mais antigos, praticamente a totalidade do estoque inicial é consumido ao longo do horizonte de 90 dias. Essa prática é motivada para evitar o envelhecimento dos carvões que é acompanhado pela piora de qualidade físico-química. Como o modelo não considera essa perda de qualidade, alguns carvões disponíveis em estoque não foram consumidos até o período final. O modelo apontou que é melhor manter esse estoque para satisfazer as restrições de estoque mínimo e consumir outros materiais com preços mais atrativos. O custo financeiro de estoque é maior com um inventário mais caro, porém a redução do custo de carvão consumido é mais significativa. Para contornar a questão de perda de qualidade dos carvões é necessário incluir no modelo, em uma próxima etapa, o tempo máximo de estocagem por tipo de carvão ou classe.

O recebimento total para o período considerado no cenário real foi de 395 kt distribuídos em 7 carvões, enquanto o proposto pelo modelo foi de 387 kt distribuídos em 5 carvões. O modelo foi capaz de otimizar os recebimentos reduzindo o volume total em 5 kt e concentrando em um número menor de carvões. Na prática a área de Suprimentos e Logística visa reduzir os custos de fretes através de carregamentos duplo porto e compartilhamento de navios. O modelo possibilita recebimentos com volumes múltiplos da capacidade de um porão de navio padrão utilizado, contudo não considera fretes variáveis de acordo com o tipo de carregamento utilizado. Como melhoria futura do modelo, pode se

considerar o frete variável por região, por embarque único ou duplo porto e por volume carregado no navio. De qualquer forma, o impacto do frete marítimo é considerado pequeno em relação aos custos do carvão e despesa portuária e logística ferroviária interna no Brasil.

O consumo total para o período considerado foi de 404 kt, no cenário real está distribuído em 13 carvões, enquanto pelo modelo em 7 carvões. O modelo foi capaz de atender as restrições operacionais e de qualidade utilizando 6 tipos de carvões a menos na mistura. Operacionalmente há um ganho intangível devido à facilidade de manuseio de um menor número de materiais. O mix por classe de carvão sugerido pelo modelo é factível e está em linha com o já praticado pela Usiminas historicamente. Em relação ao mix realizado, a participação de AV é 3 % maior, de MA é 4 % menor, de MB é 3% menor, de BV é 1% maior, de SO é 2% menor e de CP é 5% maior. Percebe-se uma maior atratividade de consumo de AV em função de MA e de CP em função de MB e SO. As participações indicadas para as classes AV, BV, SO e CP estão no limite máximo definidos pela área técnica. Apesar do limite visado para SO ser de 5%, no cenário real o consumo foi de 7% em função da redução da participação de CVP. Ambas as classes são de materiais não coqueificáveis e o aumento da participação de uma implica na redução da outra. Como melhoria futura do modelo, pode-se restringir a participação total dessas classes em detrimento das participações individuais.

As equações de previsão de qualidade de coque utilizadas no modelo são as mesmas utilizadas pela área técnica. Elas são equações de grande relevância e devem estar calibradas para que se tenha confiabilidade nos resultados propostos pelo modelo. Como trabalho futuro é indicado fazer uma validação dos parâmetros e calibração dos coeficientes das equações utilizadas atualmente.

5.3 Considerações Finais

Neste trabalho, um modelo matemático foi proposto para solucionar o problema de sequenciamento de embarque e consumo de carvões para a Usiminas, Usina de Ipatinga. O modelo considera o estoque inicial e as ofertas de carvões disponíveis, demanda de coque, restrições operacionais e de qualidade do coque e os impactos nos custos de consumo e financeiro do estoque de carvões.

Referente à robustez do modelo, foi avaliada em função das sensibilidades de número de carvões disponíveis, demanda de carvão e períodos considerados. Em nenhum dos casos a solução ótima para o modelo inteiro foi obtida dentro do tempo limite de 30 minutos de execução do solver. Por outro lado, para a relaxação linear a solução ótima foi encontrada em menos de 1 segundo para todos os cenários. Nos cenários de 30 períodos o MIPGAP médio é de 2,37% e o GAP LINEAR médio é de 4,25%, enquanto para os cenários de 90 períodos o MIPGAP médio é de 65,35% e o GAP LINEAR médio é de 93,68%. Não houve diferenças significativas para o MIPGAP e GAP LINEAR entre as sensibilidades de demanda e número de ofertas de carvões. Os resultados demonstram maior eficiência do modelo para projeções em curto prazo. Para planejamentos trimestrais e anuais é indicada a utilização de computadores mais robustos ou análise heurística do problema.

Referente à aplicação do modelo ao caso real, foi simulada uma programação de recebimento e consumo de carvão trimestral considerando as premissas reais de estoque inicial, ofertas disponíveis para o período, restrições de operacionais e de qualidade do coque. O modelo propôs um plano de recebimento e consumo de carvões que ao comparado ao resultado real obtido representa uma potencial redução do custo total de consumo de carvões para o trimestre em análise de aproximadamente 5,8 MMR\$. Adicionalmente, com a utilização de uma ferramenta única e completa, há um potencial ganho na redução do tempo gasto pelo corpo técnico na programação de embarque e projeção das misturas de carvões.

Como desenvolvimento futuro deste trabalho, propõe-se incluir no modelo: o tempo máximo de estocagem por tipo de carvão ou classe para contornar a perda de qualidade do material estocado; consideração do frete variável por região, por embarque único ou duplo porto e por volume carregado no navio visando maior sensibilidade na tomada de decisão de embarque; restrição da participação total das classes SO e CP em detrimento das participações individuais já que as classes podem ser substituídas uma pela outra.

Com o intuito de validar a operacionalização do modelo, propõe-se a utilização do modelo para os próximos planejamentos de compra e projeção de mistura de carvões de forma que possa ser identificada a possível necessidade de novos ajustes e melhorias.

Há grande interesse por parte do corpo técnico na utilização do modelo, contudo é necessário aquisição, por parte da Usiminas, da licença de um solver e o desenvolvimento de uma interface amigável aos usuários.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COELHO, Robson Jacinto. *Modelos de previsão da qualidade metalúrgica do coque a partir da qualidade dos carvões individuais e do coque obtido no forno-piloto de coqueificação*. 2004. Rev. Esc. Minas vol.57 no.1 Ouro Preto Jan./Mar. 2004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672004000100006> Acesso em: 25 nov. 2015.
- COSTA, Luiz Cláudio. *Carvão e Coque Aplicado à Siderurgia*. Curso Associação Brasileira de Metalurgia, 2010, São Paulo.
- FERNANDES, Mauro Vivaldino. *Efeito do Tipo de Carvão Injetado nas Ventaneiras do Alto-Forno no Consumo de Combustíveis (Fuel-Rate)*. Set. 2007. Disponível em: <http://www.ppgem.eng.ufmg.br/defesas/1036M.PDF> Acesso em: 25 nov. 2015.
- FAGERHOLT, K. and CHRISTIANSEN, M. *A Combined Ship Scheduling and Allocation Problem*. *The Journal of the Operational Research Society*. Vol. 51, No. 7 (Jul., 2000), pp. 834-84.
- HELDEN. Frans van. M. *Ship scheduling at Seatrade Reefer Chartering*. Dec. 2010. Disponível em: <https://www.math.leidenuniv.nl/scripties/VanHeldenMaster.pdf> Acesso em 26 nov. 2015.
- CAMILLO, Luciana Dimas. *Technical contribution to the 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking – ICSTI / 42nd ABM Ironmaking Seminar & 13th ABM Iron Ore Symposium, October 14-18th, Rio de Janeiro – RJ – Brazil*. Out. 2012.
- SILVA, Guilherme Liziero Ruggio. *Problema da otimização de mistura de carvão na produção de coque metalúrgico*. 2012. Disponível em: <http://www.portalsatc.com/site/adm/arquivos/10743/030520121658261.PDF> Acesso em 26 nov. 2016.
- LAI, Jeng-Wen and CHEN, Chia-Yon. *A cost minimization model for coal import strategy*. *Energy Policy*. Vol. 24, No. 12, pp. 1111 1117. 1996.
- CHRISTIANSEN, Marielle *et al.* *Ship routing and scheduling in the new millennium*. *European Journal of Operational Research*, 2013 Elsevier B.V.
- BOLAND, N. *et al.* *Improved stockyard management strategies for coal export terminals at Newcastle*. 19th International Congress on Modelling and Simulation, Perth, Australia, 12–16 December 2011. <http://mssanz.org.au/modsim2011>

- SHIH, Li-Hsing. *Planning of fuel coal imports using a mixed integer programming method*. International Journal of Production Economics 51 (1997) 243-249.
- FIORONI, Marcelo Moretti *et al.* *Matching production planning and ship arrival scheduling by simulation*. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference.
- WU, Tai-His *et al.* *Optimal scheduling plan for a coal shipment problem: an efficient approach*. 17th International Conference on Computers and Industrial Engineering. Computers ind. Engng Vol. 29, No. 1-4, pp. 489-493, 1995.
- SOUZA, Mauricio C. de *et al.* *Models for scheduling charges in continuous castin: application to a Brazilian steel plant*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, mai. 2015.