

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO / ESCOLA DE  
ENGENHARIA

**“Modelo de suporte à definição do portfólio de produtos de uma  
empresa mineradora sensível à variedade de produtos e condições de  
mercado”**

Keiner Duarte Alvarenga

Orientador: Professor Mauricio Cardoso de Souza

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO / ESCOLA DE  
ENGENHARIA

**“Modelo de suporte à definição do portfólio de produtos de uma  
empresa mineradora sensível à variedade de produtos e condições de  
mercado”**

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia de Produ-  
ção do Instituto de Ciências Exatas da Uni-  
versidade Federal de Minas Gerais como re-  
quisito parcial para a obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Professor Mauricio Cardoso de Souza

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

Agosto 2015

*Dedico esse trabalho a minha pequena Valente.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo caminho que tenho percorrido. Agradeço ao meu professor orientador, Maurício, pela paciência e dedicação. Agradeço à Vale S.A. pelo apoio na elaboração desse trabalho. Especialmente agradeço a Rafa, minha esposa, pelo apoio e compreensão.

## Índice

Resumo .....	xii
Abstract.....	xiii
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivo .....	4
1.2 Justificativa.....	5
2 Contexto industrial .....	6
2.1 Mercado de minério de ferro .....	6
2.2 Visão geral da siderurgia e aplicação dos produtos aglomerados e não aglomerados da mineração .....	9
2.3 Sinter feed.....	10
2.4 Fluxograma do processo de produção de sinter feed.....	12
2.5 Pelota de minério de ferro .....	15
2.6 Rotas de produção de aço e suas principais matérias primas .....	17
2.7 Características da demanda por sinter feed e pelota de minério de ferro.....	19
3 Revisão Bibliográfica .....	21
3.1 A origem de variedade de produtos, motivadores e consequências .....	21
3.2 Mass customization .....	22
3.3 Impactos da variedade de produtos .....	22
3.3.1 Gerenciamento da logística da variedade .....	23
3.3.2 Qualidade.....	23
3.3.3 Capacidade de produção .....	23
3.3.4 Controle de estoque de matérias primas .....	24
3.3.5 Controle de estoque de produtos acabados.....	24
3.3.6 Manuseio de material.....	24
3.3.7 Serviços de pós venda.....	24
3.4 Contabilidade dos custos de produção.....	29

3.4.1	Classificação dos custos em relação a quantidade produzida.....	31
3.5	Relação da variedade de produtos e condições de mercado.....	31
3.6	Planejamento para variedade.....	32
3.7	Diferentes abordagens para modelos.....	33
4	Detalhamento do problema específico.....	35
4.1	Descrição da empresa mineradora.....	35
4.2	Capacidade de produção.....	35
4.3	Previsão de demanda de minério de ferro.....	39
4.3.1	Demanda de sinter feed.....	40
4.3.2	Demanda de pelotas.....	41
4.4	Capacidade de produção dos produtos considerados.....	46
4.5	Custos de produção.....	46
4.5.1	Custos de desativação/ ativação da uma unidade de produção.....	46
4.5.2	Custos fixos.....	47
4.5.3	Custos Variáveis.....	47
4.5.4	Custos da variedade de produtos.....	48
4.5.4.1	Análise do impacto da variedade de produtos mineração.....	49
4.5.4.1.1	Lavra do minério de ferro.....	49
4.5.4.1.2	Britagem/Peneiramento/Classificação.....	50
4.5.4.2	Análise do impacto da variedade de produtos pelota de minério de ferro.....	52
4.5.4.2.1	Preparação de matérias primas.....	52
4.5.4.2.2	Estocagem da pelota em pátios.....	53
4.5.4.2.3	Custo de setup na pelletização.....	53
4.6	Modelo proposto.....	55
5	Aplicação do método proposto – Resultados e discussões.....	62
5.1	Minérios não aglomerados - Sinter feed.....	62
5.1.1	Iteração custo de variedade e variáveis de mercado.....	65

5.1 Pelota de minério de ferro .....	69
6 Conclusões.....	83
7 Trabalhos futuros.....	85
8 Referência Bibliográfica.....	86

## Índice de Figuras

Figura 1 Impacto da variedade de produtos no custo de produção de diferentes indústrias (J A Quelch [1994].) .....	1
Figura 2 Evolução produção de aço na China Fonte NBS .....	6
Figura 4 Mudança no perfil da variedade de produtos não aglomerados oferecidos pela empresa avaliada ao mercado após o crescimento da produção de aço na China. ....	8
Figura 5 Mudança no perfil da variedade de produtos pelota oferecidos pela empresa avaliada ao mercado após o crescimento da produção de aço na China. ....	8
Figura 6 Composição da carga metálica dos alto fornos nos principais mercados produtores de aço.....	10
Figura 9 Processos de redução de minério de ferro .....	18
Figura 10 Fluxo de custos e despesas fonte: Araujo Nélo [2008] .....	30
Figura 11 Custos variáveis, fixos e custo total fonte: Araujo Nélo [2008] .....	31
Figura 13 Detalhe da localização geográfica dos sistemas sul e sudeste (Material interno).....	36
Figura 15 Curva de substituição de pelota de minério de ferro por sinter nos alto-fornos. ....	42
Figura 16 Imagem de um caminhão fora de estrada (fonte <a href="http://www.cat.com">http://www.cat.com</a> ).....	49
Figura 18 Comportamento da curva de variedade de produtos vs. Custos indiretos.....	60
Figura 19 Comportamento do portfólio de produtos sinter feed ao longo de dez anos num cenário de preços decrescentes .....	66
Figura 20 Resultados do modelo indicando que a empresa deveria encerrar as operações em dois de seus sistemas produtivos de sinter feed no cenário de margens negativas... 68	
Figura 21 Resultados do modelo indicando que a empresa deveria encerrar as operações em dois de seus sistemas produtivos de <i>sinter feed</i> no cenário de margens negativas e retomada quando os preços reagissem.....	68
Figura 22 Gráfico ilustrativo esquemático de comparação do comportamento da demanda de sinter feed e pelota de minério de ferro vs. preço .....	72
Figura 23 Ilustração esquemática da demanda de pelotas original .....	73
Figura 24 Ilustração do efeito da entrada de um produto diferenciado na demanda de pelotas.....	73

Figura 25 Estratégia de precificação do produto no preço de indiferença entre novo produto e sínter .....	74
Figura 26 Estratégia de precificação do produto abaixo do preço de indiferença entre o novo produto e sínter. ....	75
Figura 27 Dinâmica do efeito do estímulo do consumo adicional de pelotas no preço da pelota. ....	76
Figura 28 Evolução do portfólio de produtos com a redução do preço da pelota ao longo do horizonte de dez anos .....	77
Figura 29 Evolução do portfólio de produtos a inclusão de um novo produto no portfólio para minimizar a redução do preço da pelota ao longo do horizonte de dez anos .....	78

## Índice de Tabelas

Tabela 1 Custos indiretos relacionados à diversidade de produtos. Fonte: Martin, M. et al[1999].....	25
Tabela 2 Relação entre os custos indiretos e os índices de quantificação do impacto da variedade de produtos.....	28
Tabela 3 Capacidade de produção das linhas de produção por sistema produtivo.....	37
Tabela 4 Capacidade de produção de pelotas por sistemas produtivos.....	38
Tabela 5 Cenários de produção de aço (milhões de tonelada por ano) .....	39
Tabela 6 Demanda de <i>sinter feed</i> considerados no trabalho .....	44
Tabela 7 Demanda de pelota de minério de <i>ferro</i> considerados no trabalho .....	45
Tabela 8 Resultados do modelo para avaliação do portfólio de <i>sinter feed</i> .....	63
Tabela 9 Resultados do modelo para avaliação do portfólio de pelotas de minério de ferro .....	71
Tabela 10 Tabela resultados sensibilidade da função objetivo ao método proposto preço base USD\$100/t.....	79
Tabela 11 Tabela resultados sensibilidade da função objetivo ao método proposto preço base USD\$55/t.....	79
Tabela 12 Resultados detalhados por período e comportamento do preços em função do descolamento do equilíbrio do preço de mercado. ....	81

## Lista de formulas

- (1) Índice de Diferenciação.....
- (2) Conjunto de valores possíveis para o Índice de Diferenciação.....
- (3) Índice de Uniformidade.....
- (4) Conjunto de valores possíveis para o Índice de Uniformidade.....
- (5) Índice de setup.....
- (6) Conjunto de valores possíveis para o Índice de setup.....
- (7) Função objetivo do modelo de suporte ao planejamento de longo prazo..
- (8) Equação que restringe a produção do produto ao  $\min(\text{demanda } n, \text{capac. } N)$ .....
- (9) Equação que restringe superiormente a produção da usina.....
- (10) Equação que associa o produto a usina de forma que a margem da empresa a máxima possível.....
- (11) Equação que garante que os produtos ativos serão associados à usinas ativas.....
- (12) Equação que associa a penalidade de variedade ao número de produtos ativos.....
- (13) Equação que garante que somente um custo de variedade será ativo.
- (14) Equação que penaliza a ativação de uma usina.....
- (15) Equação que penaliza a desativação de uma usina.....
- (16) Conjunto de valores possíveis para a variável  $h$ .....
- (17) Conjunto de valores possíveis para a variável  $v^+$ .....
- (18) Conjunto de valores possíveis para a variável  $v^-$ .....
- (19) Conjunto de valores possíveis para a variável  $x$ .....
- (20) Conjunto de valores possíveis para a variável  $y$ .....
- (21) Conjunto de valores possíveis para a variável  $z$ .....
- (22) Equação de cálculo da elasticidade da demanda de pelotas .....
- (23) Equação para cálculo da mínima oferta de produtos diferenciado .....

## **Resumo**

Para manter-se competitiva e presente nos em diferentes segmentos de mercado, a empresa deve identificar oportunidades a de fim de ampliar suas vendas. Por consequência desse movimento as empresas tendem a aumentar o número de produtos oferecidos para aproveitar essa oportunidade num determinado momento de mercado. Isso pode inicialmente incrementar as vendas, resultar em maior participação de mercado, mas não necessariamente incrementará os lucros da empresa.

Por outro lado, a redução do portfólio pode simplificar o processo produtivo e reduzir os custos de produção. Mas pode aumentar a exposição da empresa à oscilações do mercado, como demanda e/ou preço de produtos.

Esse trabalho propôs um método de otimização de portfólio que integra um modelo de suporte ao planejamento de longo prazo, baseado em programação inteira mista, e processos de inteligência de mercado.

A partir desse método foi possível mostrar que mesmo na indústria de base a variedade de produtos pode ser uma estratégia de sucesso, dependendo principalmente do processo de formação de preços do produto.

## **Abstract**

In order to remain competitive in different markets niches a company must identify opportunities to expand its sales. To reach new opportunities companies tend to increase the number of products in production line. As a result this movement may increase sales and market share, but not result in higher profits, due to indirect costs could show up in production line.

On the other hand, keeping a simpler portfolio can avoid complexity on the production process and reduce production costs. But to turn it into a successful strategy the company must pay attention on market variables like supply, demand, price forecasting and so on.

This work has proposed a portfolio optimization method, which includes a model to support long-term planning, based on mixed integer programming, and market intelligence processes.

From this method was possible to show that even in the basic industry product variety can be a successful strategy, especially depending on the product pricing dynamics.

## 1 Introdução

Para manter-se competitiva e presente em diferentes segmentos de mercado, a empresa deve identificar oportunidades a fim de ampliar suas vendas. Por consequência desse movimento as empresas tendem a aumentar o número de produtos oferecidos para aproveitar essa oportunidade num determinado momento de mercado. Isso pode inicialmente incrementar as vendas, resultar em maior participação de mercado, mas não necessariamente incrementará os lucros da empresa, como retratado num *survey* de Lancaster [1990]. Ou seja, o incremento no faturamento com o incremento das vendas será menor do que os gastos para viabilizar a inclusão de novos produtos na linha de produção. A Figura 1 ilustra como apenas um item a mais na linha de produção pode impactar o custo de produção em diferentes indústrias. Dependendo do tipo de indústria e condições de mercado o ganho de margem pode não ser suficiente para manter a lucratividade de empresa, como exposto por J A Quelch [1994].

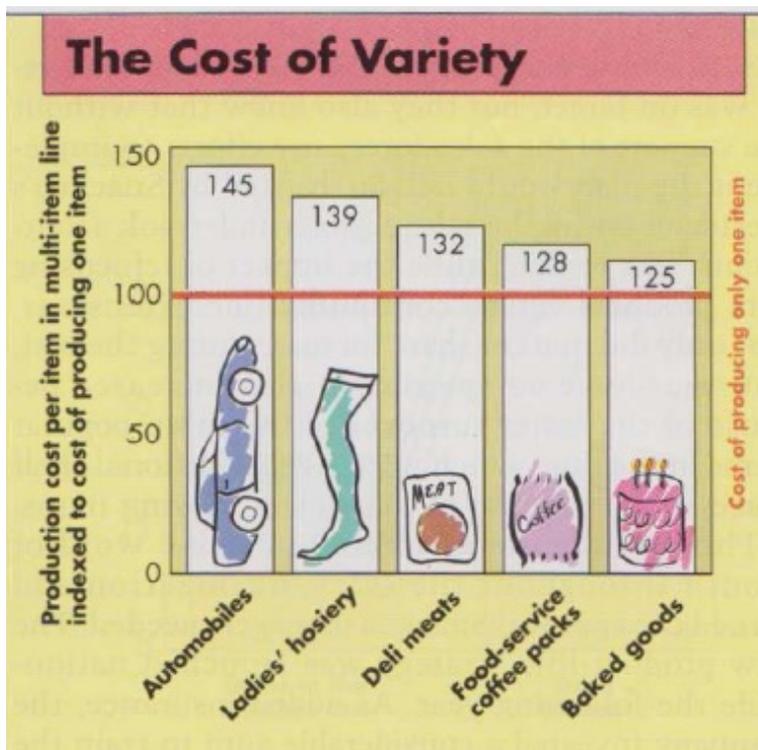


Figura 1 Impacto da variedade de produtos no custo de produção de diferentes indústrias (J A Quelch [1994].)

Como pode ser notado na Figura 1, o desafio da variedade está presente em vários tipos de indústria, seja na produção de aeronaves ou na produção de discos de armazenamento de dados para dispositivos de informática. Na indústria de aviação é possível citar a Boeing e seus esforços para controlar os custos de *desing*. Como o processo de produção de aeronaves é muito especializado, qualquer alteração de requisitos demanda grande esforço de engenharia para readequação da aeronave, o desafio é desenvolver métodos para modularizar os projetos de suas aeronaves e incentivar seus clientes a utilizar designs padrão.

Da mesma forma a Denso tem um grande desafio na gestão da variedade de produtos uma vez que é o maior fornecedor de componentes para a indústria automotiva, incluindo instrumentos eletrônicos, sistema de radiadores, e também sistema de aquecimento, ventilação de ar condicionados. Sendo esse um mercado altamente competitivo e diversificado e tendo como clientes gigantes da indústria automobilística como Toyota, GM e outros, ou seja clientes que demandam fortemente por novos componentes, controlar a variedade passa a ser um grande problema. Portanto, a Denso focou os esforços em otimização de processos e também buscou desenvolver um relacionamento de muita clareza com seus clientes abrindo sua matriz de custos e os impactos da variedade para os clientes como argumento na negociação de preços. Ambos exemplos foram levantados por M. Martin [1999] num estudo visando quantificar o impacto da variedade de produto na cadeia produtiva.

Para equilibrar os ganhos potenciais da maior diversidade de produtos ofertados faz-se necessário um mapeamento da complexidade do sistema produtivo da empresa, a fim de identificar os custos que serão incrementados com o aumento do número de produtos na linha produção, uma vez que estes podem comprometer a eficiência da economia de escala, conforme demonstrado por M Martin, et al[1999]. Por um lado, um portfólio com o número de produtos reduzido pode maximizar os rendimentos de escala num cenário aquecido, mas por outro lado, a redução do número de produtos na linha de produção deve considerar que clientes de produtos menos atrativos no curto prazo, menor margem, pode garantir vendas em cenários de demanda retraída evitando que seja necessário reduzir-se a produção e até mesmo parada de unidades operacionais. Isso indica que para este tipo de problema conhecer a demanda de seus produtos e a dependência de seus clientes por estes produtos é de grande importância de avaliação e definição do portfólio de produtos da empresa.

Como é possível notar este é um problema de lucro que deve ser equacionado. Ou seja, o problema variedade de produtos trata das variáveis quantidade produzida, preço de venda e custo de produção. A demanda do produto depende do preço que o produto será ofertado, a quantidade produzida pela empresa depende do lucro que ela irá obter na venda deste produtos. O custo de produção depende de quanto do produto será ofertado e se tratando de variedade de produtos quantos produtos serão produzidos.

A literatura de variedade de produtos é muito abrangente no que se refere à indústria de bens de consumo. Porém, esta é uma decisão na qual empresas da indústria de base, como mineração e siderurgia, também devem avaliar e estar preparadas para tomarem a decisão que maximize o lucro.

Este trabalho visa ilustrar o impacto da demanda e dos custos associados à variedade de produtos na composição do portfólio ótimo de uma empresa mineradora. Para tanto foi tomado como referência duas linhas de produtos de uma mineradora de minério de ferro: uma linha de produtos não aglomerados e uma outra de produtos aglomerados.

Este trabalho foi organizado em: Capítulo 1, introdução. O Capítulo 2 apresenta a indústria minero siderúrgica, base deste trabalho. Já o Capítulo 3 trás uma revisão bibliográfica sobre o tema, abrangendo o impacto da variedade de produtos nos custos de produção, a estratégia de customização em massa, o desafio do apontamento dos custos de produção associados a variedades de produtos e as abordagens e modelos encontrados.

O Capítulo 4 aborda o problema de forma mais específica apresentando a estrutura da empresa avaliada. No Capítulo 5 são apresentados os resultados da aplicação do método proposto além de uma discussão dos resultados. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

## 1.1 Objetivo

Atualmente empresas lançam mão da ferramenta portfólio de produtos como alavanca de valor. Isto quer dizer que seu portfólio de produtos pode ser alterado afim de maximizar seu lucro. Porém, o portfólio ótimo para uma empresa será diferente em função do momento de avaliação.

Esse trabalho tem por objetivo foi desenvolver um modelo de avaliação de número de produtos ótimo de uma empresa mineradora, para um determinado período em avaliação, considerando características de formação de preço dos produtos e efeito de diferentes posicionamentos da empresa no mercado, como por exemplo nível de produção e diversidade de produtos, a fim de aumentar a assertividade das ações e abordagens com clientes em tempo hábil principalmente no período de mudança do equilíbrio do mercado.

## 1.2 Justificativa

Este trabalho se justifica tanto pela sua importância empresarial quanto pela sua importância acadêmica.

Para justificar sua importância empresarial vale chamar atenção para o fato da discussão sobre portfólio de produtos normalmente ser uma discussão reativa sendo disparada em função de alguma mudança na condição de mercado. Portanto, este trabalho visa fornecer subsídios para que a empresa possa através do monitoramento dos indicadores de mercado se prevenir e quando for viável utilizar o portfólio de produtos, principalmente a quantidade de produtos ofertados em seu portfólio como alavanca de valor.

Já do ponto de vista acadêmico este trabalho visa cobrir uma lacuna na discussão de variedade de produtos com relação à indústria de base. Isto porque os esforços em análise de variedade de produtos no portfólio está focado na indústria de bens de consumo e este trabalho se propõe a propor um modelo de suporte a definição de portfólio de um mineradora para duas linhas de produto de minério de ferro: *sinter feed*, produtos não aglomerados; e pelotas de minério de ferro, produtos aglomerados.

## 2 Contexto industrial

Este trabalho foi realizado sob a ótica de uma empresa de mineração de minério de ferro com linhas de produção de minérios não aglomerados e aglomerados. Desta forma espera-se como resultado avaliar se a prática de orientar ambas as linhas de produção com diferentes nichos de mercado e especificidades sob a mesma política de portfólio de produtos é válida.

### 2.1 Mercado de minério de ferro

No início dos anos 2000, a China se destacou na indústria siderúrgica devido ao seu forte crescimento para suportar o plano de urbanização e industrialização do país conforme apresentado na Figura 2. A consequência foi crescimento sem precedentes na demanda de produtos de minério de ferro, ilustrado na Figura 3.

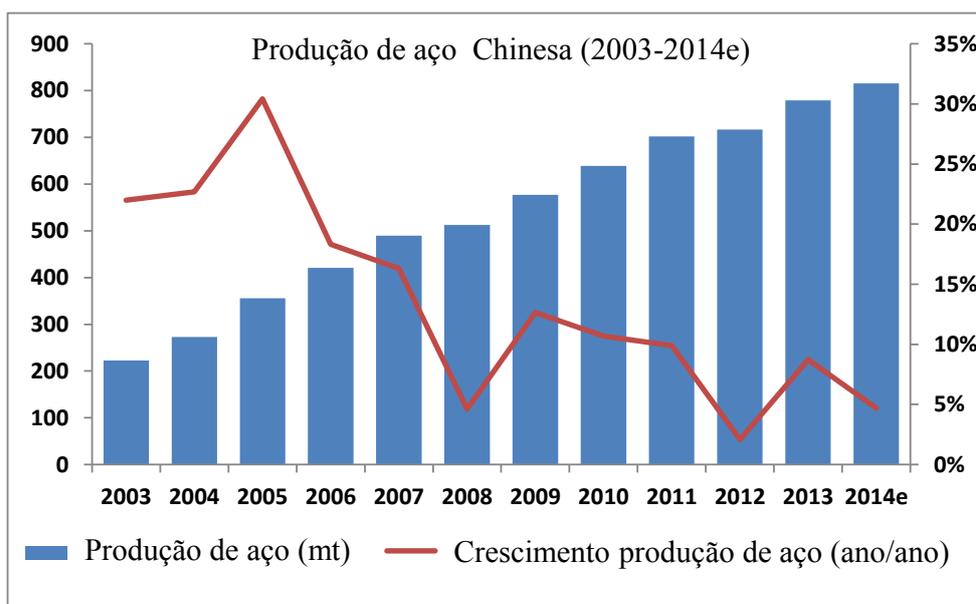


Figura 2 Evolução produção de aço na China Fonte NBS

Como observado na Figura 3, a forte demanda por aço implicou em crescimento das importações minério de ferro, principal matéria prima para a produção de aço, resultando em forte incremento dos preços dos produtos ferrosos.

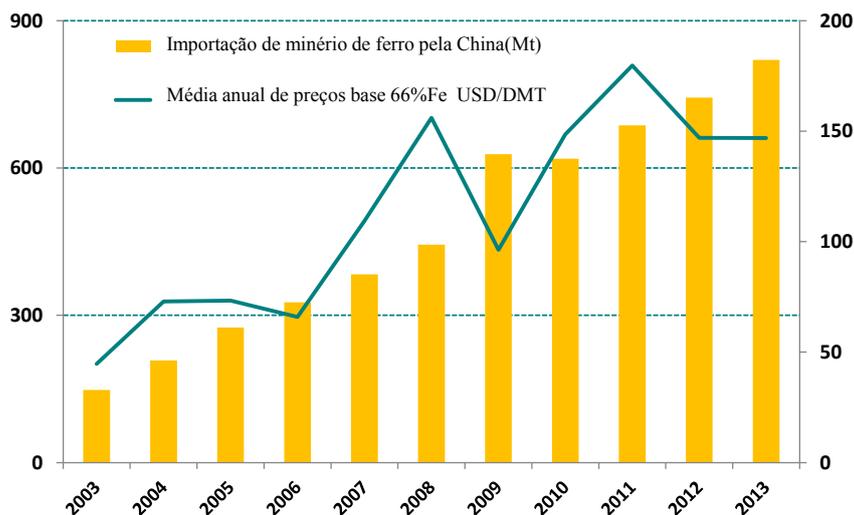


Figura 3 Evolução das importações e preços de minério de ferro 66% de ferro em Tangshan sem taxas de importação(fonte: China Customs e Mysteel)

Diante deste cenário de elevada demanda e elevados preços a indústria de mineração buscou aumentar tanto sua produção quanto produtividade de forma a maximizar seus lucros.

Uma das maneiras identificadas de elevar a produtividade foi a redução do número de produtos na linha de produção, ou seja, redução da variedade de produtos no portfólio tanto para a linha de produtos aglomerados quanto para a linha de produtos não aglomerados.

A Figura 4 e a Figura 5 apresentam a mudança no perfil do portfólio desta empresa a partir de 2003. É possível notar que o portfólio da empresa era composto por uma boa parte de produtos específicos para um determinado cliente ou mercado, enquanto que com o aumento da demanda esta parcela de produtos no portfólio foi substituída por produtos padronizados.

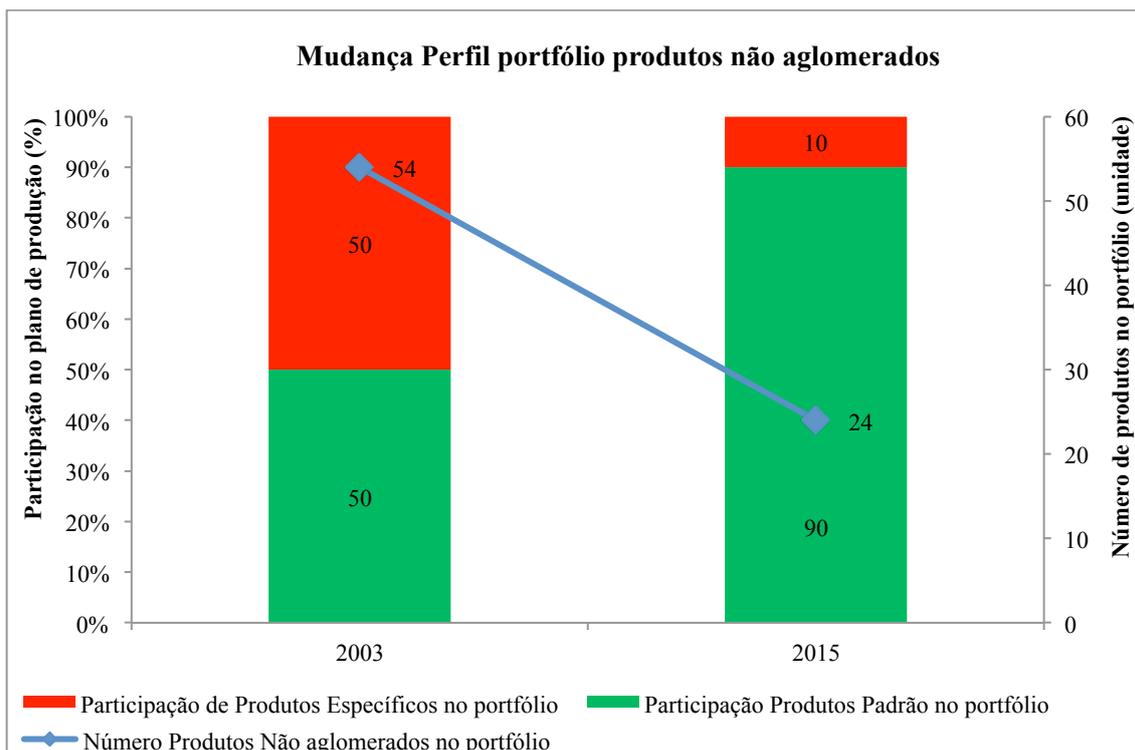


Figura 4 Mudança no perfil da variedade de produtos não aglomerados oferecidos pela empresa avaliada ao mercado após o crescimento da produção de aço na China.

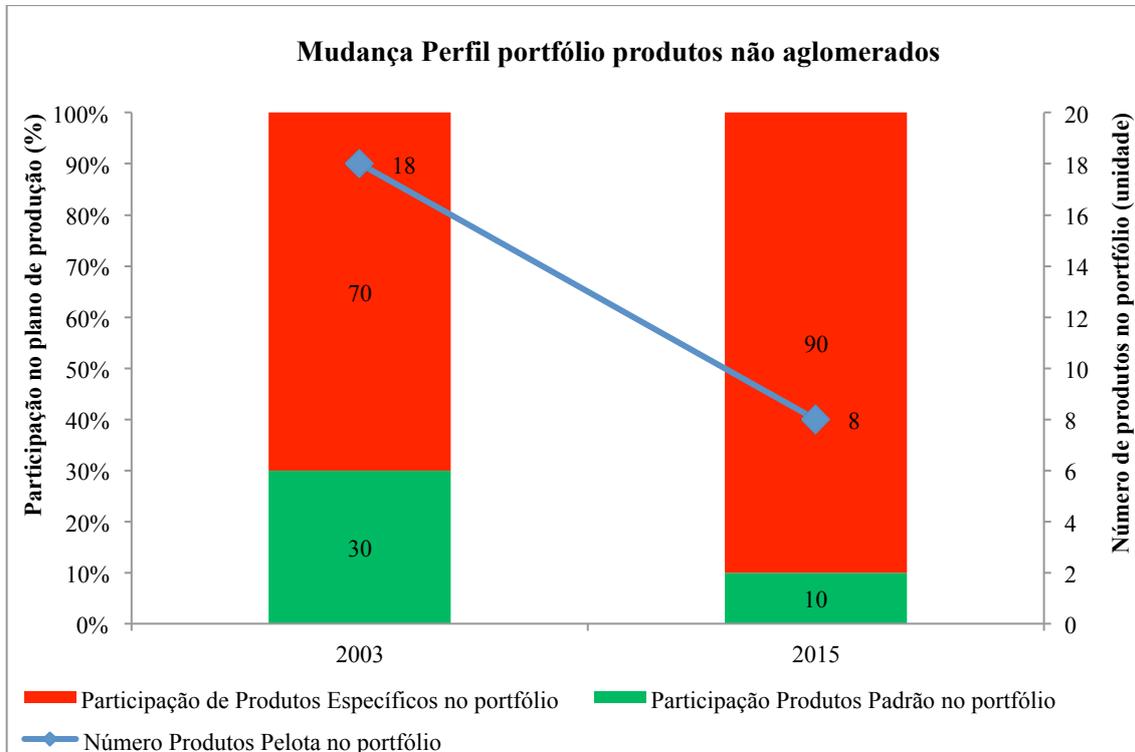


Figura 5 Mudança no perfil da variedade de produtos pelota oferecidos pela empresa avaliada ao mercado após o crescimento da produção de aço na China.

Espera-se com este trabalho chamar atenção para alguns critérios importantes para cada uma das linhas de produtos como forma de suportar futuras análises de portfólio de produtos nas empresas.

Não é escopo deste trabalho avaliar decisões tomadas em outras épocas, mas sim chamar atenção para a importância das variáveis de mercado e de custos importantes no processo de definição de portfólio.

## **2.2 Visão geral da siderurgia e aplicação dos produtos aglomerados e não aglomerados da mineração**

O maior aproveitamento dos recursos minerais passou a ser fundamental na busca por eficiência da indústria minero siderúrgica. No início a carga metálica dos alto-fornos era composta basicamente por materiais granulados e a maior parte do minério de ferro era depositada como rejeito. Isto ocorria porque a alimentação de minérios finos diretamente nos alto-fornos não é eficiente, uma vez que reduz a permeabilidade do leito de fusão. Porém, como são abundantes e possuem elevado teor de ferro foi desenvolvido um processo de aglomeração que transforma os *sinter feeds*, minério de ferro fino com granulometria entre 1mm e 6,3mm, em um produto intermediário da siderurgia chamado de sinter.

A fabricação de sinter se apresentou como uma maneira eficiente de utilizar finos de minério e reciclar os subprodutos da usina no alto-forno. O processo de sinterização consiste em fundir parcialmente e agregar os finos de minério de ferro, denominados sinter feed. A resistência mecânica do agregado dependerá da quantidade e tipo de material fundido entre as partículas.

Atualmente o sinter é o principal componente da carga metálica dos alto-fornos na maior parte do mundo, conforme é mostrado na Figura 6.

O aproveitamento dos minérios de ferro de granulometria adequada para o processo de sinterização não consumiu totalmente os finos gerados na exploração das minas de minério de ferro. Mesmo após o aproveitamento dos *sinter feeds* ainda eram geradas elevadas quantidades de resíduos de minério com elevado teor de ferro, uma vez que estes rejeitos eram mais finos que os minérios apropriados para a sinterização.

Para aproveitar esta fonte de ferro sem aplicação foi desenvolvido o processo de pelotização. Este processo produz um aglomerado de elevado teor de ferro capaz de elevar o desempenho do processo de redução de minério de ferro a aço.

A Figura 6 mostra a composição da carga metálica nos principais mercados produtores de aço via alto-forno e BOF.

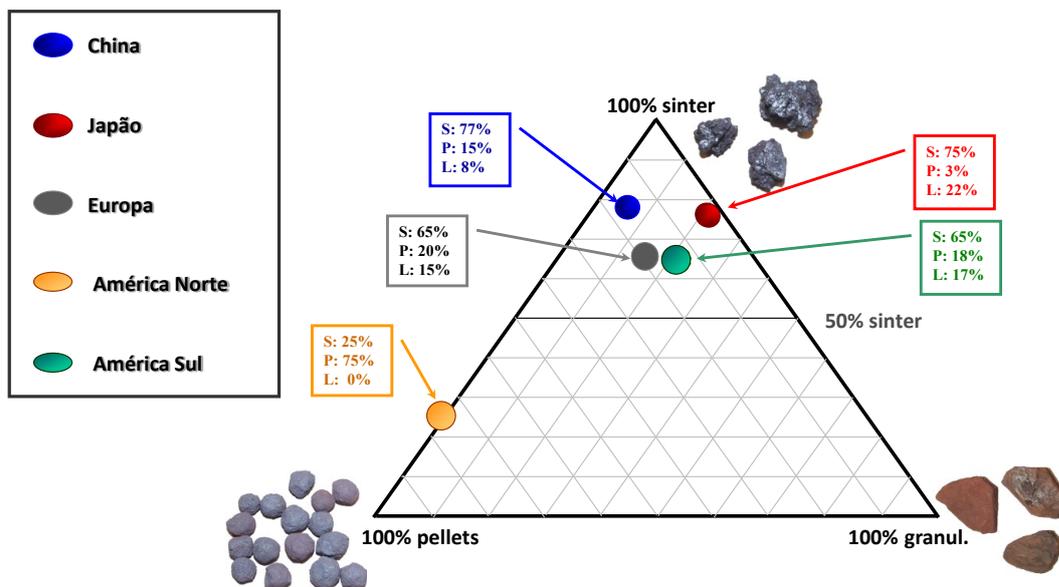


Figura 6 Composição da carga metálica dos alto fornos nos principais mercados produtores de aço.

### 2.3 Sinter feed

O *sinter feed* é o produto da mineração de minério de ferro mais abundante. Naturalmente, este produto da mineração é a base da principal componente da carga metálica da siderurgia, o sinter.

O processo de sinterização é caracterizado pela aglomeração de finos e a formação de sólidos porosos a partir de um processo de granulação seguido de tratamento térmico a pressão atmosférica dos finos.

Minérios que apresentam a distribuição granulométrica abaixo são classificados como *sinter feed*:

- Cerca de 0% de fração >10 mm

- De 45 a 60% de fração 1 a 10mm
- Menos de 15% de fração <200 mesh

A matriz de *sinter feeds* consumida por uma siderúrgica é geralmente composta por um conjunto de minérios cujas propriedades são bastante diferentes. Grandes variações químicas, físicas, metalúrgicas e mineralógicas ocorrem dentre os diversos *sinter feeds* ofertados no mercado siderúrgico. Além da distribuição granulométrica as principais propriedades físicas que caracterizam os *sinter feeds* são: o poder de aglomeração a frio, sua porosidade e densidade além do índice de crepitação.

O desempenho do processo de sinterização é fortemente influenciado pelas propriedades dos *sinter feeds* que compõem a mistura de minérios. Diferentes tipos de *sinter feeds* apresentam diferentes sinterabilidades/reatividade impactando variáveis operacionais da sinterização importantes como: produtividade, consumo de combustível, comportamento metalúrgico e resistência mecânica do produto.

De acordo com COSTA. E et al, 1995 os principais fatores que determinam a performance da sinterização são atribuídos a qualidade dos componentes da mistura de sinterização e conseqüentemente da qualidade final da mistura. Abaixo são citadas algumas destas variáveis:

- % ferro total;
- % alumina ;
- Umidade;
- % de combustível;
- Basicidade;
- Distribuição granulométrica;
- Participação de hematita na composição.

Devido tanto a fatores de oferta de minério no mercado quanto devido às diferentes características física e química dentre os minérios, as sinterizações industriais adotam como prática a composição de matrizes de sinterização com vários *sinter feeds*. Esta prática é bastante favorável ao processo, pois muitas vezes diferentes *sinter feeds*

apresentam composições complementares e benéficas ao processo. A Figura 7 mostra fotos de amostras de minérios de ferros comercializados no mundo.

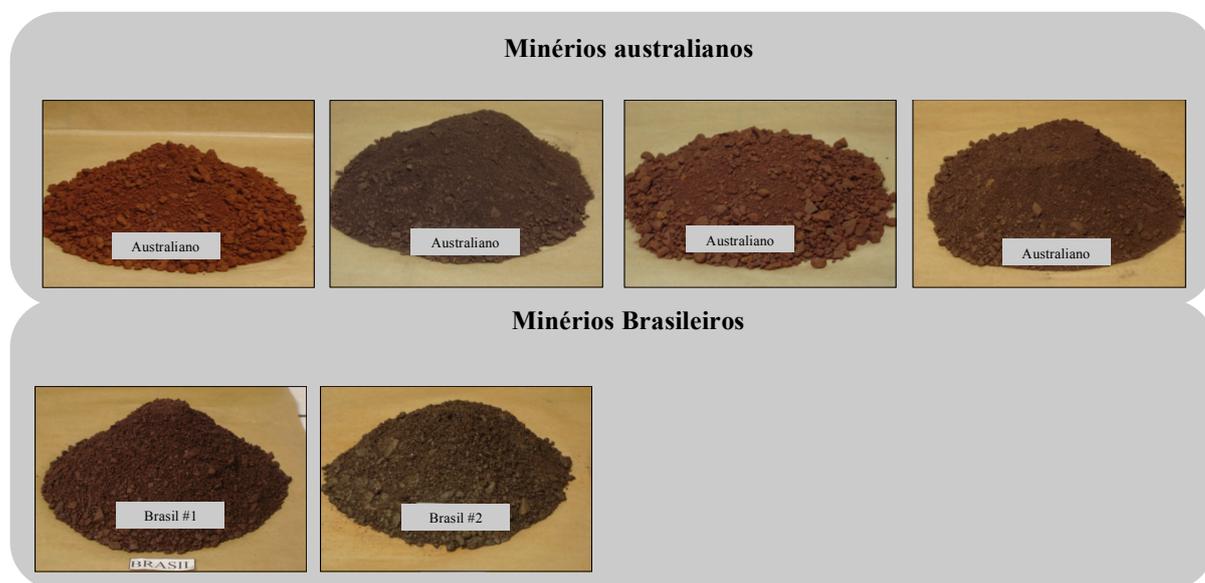


Figura 7 Principais minérios de ferro ofertados para o mercado (Starling [2012])

## 2.4 Fluxograma do processo de produção de sinter feed

Apesar de ser um processo de extração mineral, o fluxo de produção do *sinter feed* é complexo, afinal o minério não pode ser utilizado tal como é lavrado e portanto deve ser beneficiado

No contexto deste trabalho, que é a avaliação do impacto da variedade de produtos, será tratado um fluxograma simplificado como ilustrado na Figura 8.

A seguir serão descritas brevemente as operações unitárias avaliadas neste trabalho:

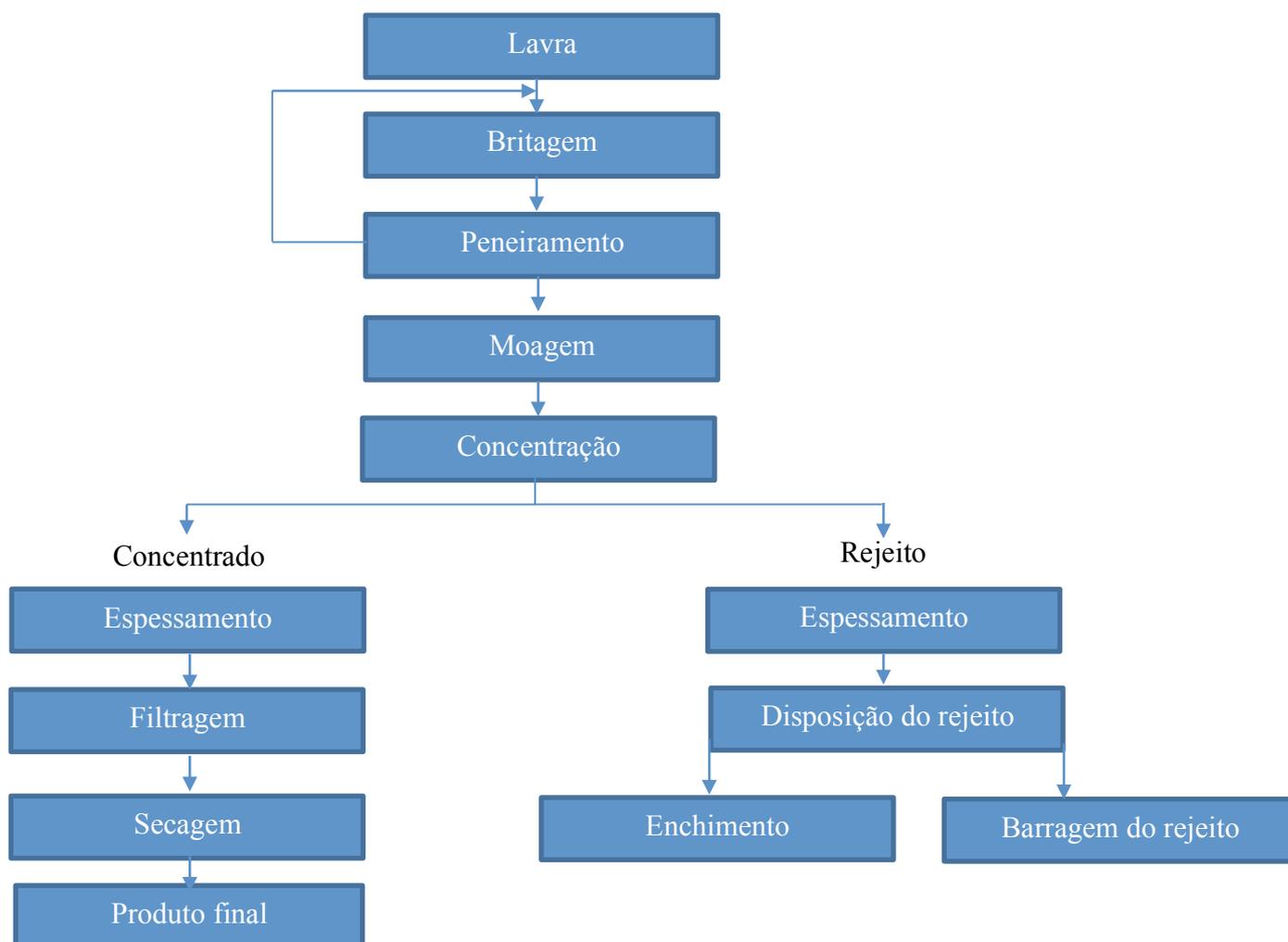


Figura 8 Fluxograma simplificado do processo produtivo de sinter feed

A etapa de lavra do minério consiste no desmonte mecânico, carregamento e transporte, tanto de minério quanto de estéril e recomposição/reabilitação das áreas mineradas.

Uma etapa eficiente a lavra dos minérios de ferro segue um rigoroso controle que envolve tanto o conhecimento de teores tanto de ferro quanto de contaminantes do mineral, uma vez que uma unidade de beneficiamento pode receber minérios de várias minas simultaneamente.

O plano de produção de uma mina, que conhecido como plano de lavra, que é direcionado pela qualidade esperada para os produtos contidos no portfólio de produtos.

Portanto a alocação do maquinário envolvido no processo é definido de acordo com o plano de lavra a fim de atender a especificação dos minérios que serão produzidos e minimizar o custo de movimentação das máquinas envolvidas no processo.

A britagem é uma das etapas do processo de fragmentação, ela consiste em desagregar as partículas principalmente pela ação de esforços compressivos ou de impacto, sendo que esses esforços são resultantes da projeção de partículas contra elemento do britador ou do revestimento. Os mecanismos envolvidos na britagem consistem em compressão, impacto e cisalhamento, sendo que ela se desenvolve em estágios denominados de britagem primária, secundária, terciária e eventualmente quaternária, sendo que o número de estágios é definido pela granulometria da entrada e pela qualidade do produto final. Posteriormente a cada etapa de britagem o material segue para o peneiramento.

Entende-se por peneiramento, a separação de um material em duas ou mais classes, estando estas limitadas uma superior e outra inferiormente. No peneiramento a separação ocorre segundo o tamanho geométrico das partículas. Durante esta etapas os produtos separados segundo a classificação granulométrica, ou seja, granulado, sínter feed e pellet feed.

As operações de concentração separação seletiva de minerais baseiam-se nas diferenças de propriedades entre o mineral-minério e os minerais de ganga. Em muitos casos, também se requer a separação seletiva entre dois ou mais minerais de interesse. Para um minério ser concentrado, é necessário que os minerais estejam fisicamente liberados. Para se obter a liberação do mineral, o minério é submetido a uma operação de redução de tamanho, isto é, britagem e/ou moagem, que pode variar de centímetros até micrometros. Para evitar uma cominuição excessiva, faz-se uso de operações de separação por tamanho ou classificação (peneiramento, ciclonagem etc.), nos circuitos de cominuição.

Uma vez que o minério foi submetido à redução de tamanho, promovendo a liberação adequada dos seus minerais, estes podem ser submetidos à operação de separação das espécies minerais, obtendo-se, nos procedimentos mais simples, um concentrado e um rejeito.

O termo concentração significa, geralmente, remover a maior parte da ganga, presente em grande proporção no minério.

Antes de se ter um produto para ser transportado, ou mesmo adequado para a indústria química ou para a obtenção do metal por métodos hidro-pirometalúrgicos (áreas da Metalurgia Extrativa), é necessário eliminar parte da água do concentrado. Estas operações compreendem desaguamento (espessamento e filtração) e secagem e, geralmente, na ordem citada.

Posteriormente será detalhado o impacto da variedade de produtos na complexidade do processo de beneficiamento mineral e suas fontes de custos.

## **2.5 Pelota de minério de ferro**

Os processos de aglomeração surgiram da necessidade de recuperar a fração fina de minério de ferro não utilizada diretamente no alto-forno, devido ao distúrbio causado na operação pela alteração da permeabilidade do equipamento. O objetivo era agregar em tamanho adequado um grande número de partículas minúsculas de maneira que o produto formado fosse apropriado para o uso nos reatores de redução.

A sinterização se mostrou mais eficiente para o processamento dos minérios com granulometria entre 1 e 6,3 mm. Porém, no processo de extração do minério uma grande quantidade de minérios ultrafinos também é gerada. Para o aproveitamento deste minérios ultrafinos foi desenvolvido o processo de pelletização.

A pelletização consiste em produzir esferas a partir da fração ultrafina de minério de ferro, de maneira que o produto final possua as seguintes características:

- Distribuição granulométrica entre 8 e 16mm de diâmetro;
- Alta porosidade e redutibilidade;
- Alto teor de ferro;
- Alta resistência à abrasão e compressão.

O processo de pelletização pode ser dividido em três etapas, em que cada estágio exerce grande influência da etapa seguinte.

- Preparação das matérias-primas;
- Formação das pelotas verdes;
- Tratamento térmico das pelotas cruas.

Assim como o sinter, a pelota pode ser consumida no alto forno. Uma grande diferença entre estes produtos é que o sinter é produzido pela própria siderurgia, enquanto que as pelotas ficou a cargo da indústria de mineração (exceto na China).

#### Preparação das matérias-primas

As matérias-primas utilizadas na pelletização podem ser divididas em quatro classes:

- Minério de ferro- Fornece o mineral que constitui a matriz da pelota;
- Aglomerantes- Facilitam a aglomeração das partículas;
- Aditivos- Alteram as propriedades metalúrgicas da pelota, atuando especialmente na composição da escória formada. Alguns deles também possuem propriedades ligantes;
- Carvão- Permite a redução do consumo de gás ou óleo combustível.

Os aditivos e aglomerantes são responsáveis pelo aumento da qualidade física e mecânica das pelotas.

O minério de ferro pode ser oriundo da lavra e passar por operações de britagem, moagem, classificação e concentração, sendo, então, chamado de Pellet Feed, ou de concentrados derivados do beneficiamento de outros produtos.

Uma vez que os insumos possuam qualidade química e a granulometria adequados ao pelletamento, as matérias-primas são misturadas, formando um bolo homogêneo, que é armazenado em um silo. A eficiência da mistura é extremamente importante para garantir a composição química uniforme das pelotas cruas, que serão formadas a seguir, além de reduzir a adição de aglomerantes.

## 2.6 Rotas de produção de aço e suas principais matérias primas

Existem duas rotas industrialmente viáveis para a redução do minério de ferro: Redução via alto-forno e via redução direta.

Ambas as rotas são consumidoras de pelotas. Porém, na rota Redução Direta-EAF a pelota é a principal componente da carga metálica, enquanto que na rota de produção de aço via alto-forno-BOF a principal componente da carga metálica é o sinter. A diferença na elaboração da carga metálica é justificada pelos fenômenos envolvidos nos processo produtivo de aço pelas duas rotas.

Em amarelo na Figura 9, está ilustrada a rota de produção de aço via alto-forno e BOF. Nessa rota a maior parte do minério de ferro é processado na sinterização, que aglomera as partículas de minério de ferro entre 1mm e 6,3mm, denominados *sinter feeds*, num produto granulometria adequada para ser alimentado no alto-forno. No alto-forno o minério é reduzido, ou seja, os compostos químicos  $Fe_2O_3$  são reduzidos a Fe e FeO e juntamente com carbono formam o ferro gusa. Durante esse fenômeno os minérios são fundidos e tanto o produto quanto os subprodutos (escória formada pelos contaminantes do minério de ferro) desse processo estão no estado líquido. Posteriormente o produto do alto-forno, ferro gusa, segue para ser beneficiado no convertedor, que possui a função de retirar as impurezas como o fósforo para que o aço possa ser processado nos processos de conformação mecânica.

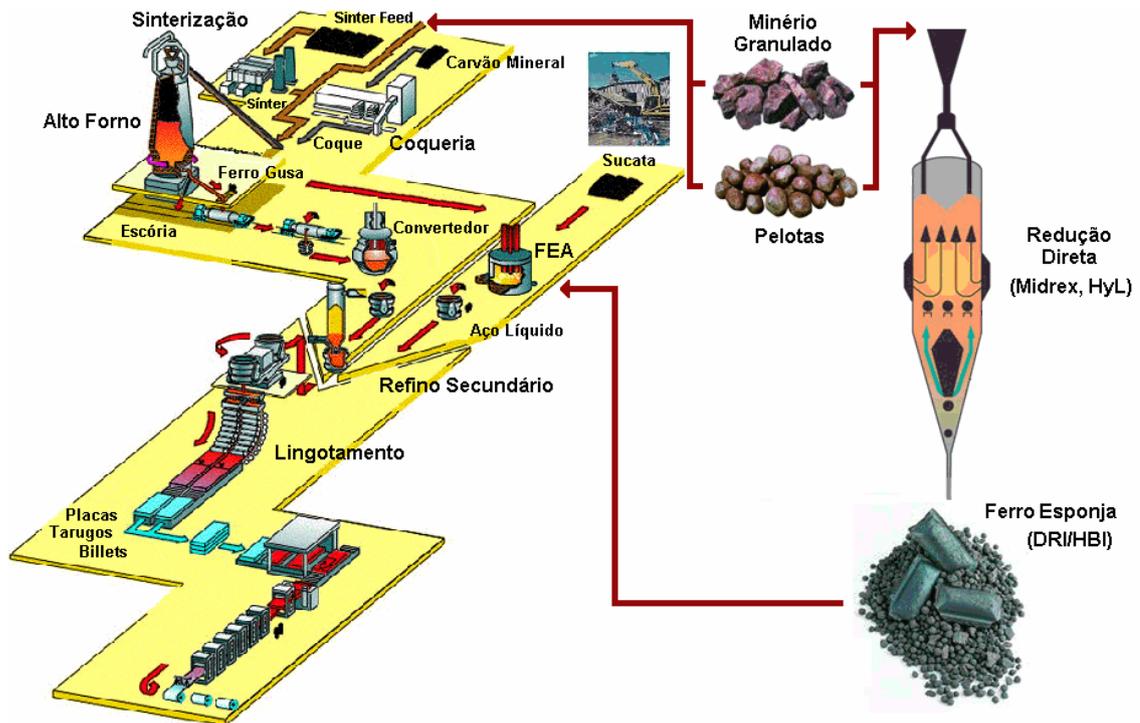


Figura 9 Processos de redução de minério de ferro

Na rota de produção de aço via redução direta os processos de sinterização, alto-forno são substituídos pela pelletização e pelo reator de redução direta. No reator de redução direta a pelota e os minérios granulados consumidos são reduzidos sem a necessidade de fusão do material. Ou seja, o produto é sólido e, portanto não ocorre a separação do ferro das impurezas. Já o Forno elétrico a arco pode substituir ou não o convertedor dependendo das necessidades da siderúrgica.

Devido a essas diferenças as características das pelotas produzidas para esses processos são distintas principalmente no que tange suas composições químicas.

A pelota adequada para o processo de redução direta possui maior teor de ferro e baixa participação de contaminantes, enquanto que para o processo de redução via alto-forno a pelota precisa conter alto teor de ferro combinado com agentes químicos para agilizar o processo de amolecimento e fusão da pelota resultando em ganho de eficiência do processo.

Como a pelota de redução direta possui maior teor de ferro e demanda menor adição de outros minerais para adequação de suas propriedades químicas, e como os produtos

ferrosos são precificados pelo teor de ferro, essa pelota possui maior preço e menor custo de produção que a pelota de alto-forno.

Porém, alto-forno é a rota dominante para a produção de ferro primário, apesar do crescente aumento na produção mundial de DRI e do desenvolvimento de processos de redução por fusão redutora. A produção estimada de gusa pela rota alto-forno no ano de 2014 foi da ordem de 1150 Mt e a de DRI foi da ordem de 60 Mt .

No processo de alto-forno a pelota compõe juntamente com o sinter a carga elaborada, que tem por objetivo aumentar a eficiência do processo aumentando a velocidade da fusão do *burden*.

Como cada cliente possui sua filosofia operacional, que é representada pela química do sinter e escória do alto-forno, a seleção a pelota adequada varia de cliente para cliente.

Diante da especificidade de cada cliente somado a existência de mais de uma rota de processamento da pelota de minério de ferro para a produção de aço a diversidade de produtos no portfólio é uma variável a ser equacionada pela empresa produtora.

## **2.7 Características da demanda por sinter feed e pelota de minério de ferro**

Partindo da informação que o modo de vida é sustentado no aço e que o sinter feed é a maior fonte de matéria prima para a produção de aço, é possível inferir que a demanda por produtos com características de sinter feed é dependente da produção de aço que é função do nível de desenvolvimento/industrialização da população mundial. Ou seja, enquanto houver demanda por aço haverá demanda por sinter feeds.

Por outro lado a demanda por pelotas de minério de ferro para atender a rota alto-forno está associada com a necessidade de eficiência no alto-forno. Ou seja, o produtor de aço irá avaliar o *trade off* entre sinter e pelota considerando o impacto na produtividade e no consumo de combustíveis no reator. Desta forma é possível inferir que a demanda de pelotas para a rota alto-forno é fortemente dependente do preço deste produto. Em outras palavras existe uma forte elasticidade da demanda de pelotas ao preço deste produto.

Considerando a demanda de pelota na rota de redução direta, teremos um comportamento similar ao sinter feed, afinal nesta rota a pelota é a principal fonte de ferro. Ou seja, não existe elasticidade da demanda ao preço do produto.

### **3 Revisão Bibliográfica**

#### **3.1 A origem de variedade de produtos, motivadores e consequências**

A busca por um portfólio de produtos adequado como alavanca de resultados é um tópico dos mais discutidos nas empresas e, segundo Lancaster [1990] esta é a via vem sendo adotada principalmente nas indústrias de varejo. Esse posicionamento é justificado pelo desejo das empresas de se fazerem presentes em vários nichos a fim de aumentar sua participação de mercado. Para tanto, produtos são projetados e fabricados para atender às necessidades de cada um dos segmentos de mercado identificados. Estas necessidades variam por causa das diferenças entre os usuários, cenários de uso, restrições, valores sociais, e outros.

Já na indústria de base o movimento tem sido o oposto, uma vez que as empresas deste segmento da indústria concentraram esforços no aumento da produtividade de suas operações. Tomando como exemplo uma importante empresa brasileira para atender a crescente demanda por minério de ferro ela tomou a decisão de reduzir significativamente o número de produtos maximizando sua produção e aproveitando o ciclo de preços elevados.

A fim de solucionar estas diferenças, a linha de estudos em variedade de produtos foi criada para atender às necessidades diversificadas. Neste contexto, variedade é definida como um número ou uma coleção de coisas diferentes de uma classe particular do mesmo tipo geral, conforme conceito proposto por ElMaraghy et al. [2013].

Mas o desafio variedade é maior do que apenas a variedade de produtos. Variedade ocorre em todo o ciclo de vida do produto, e também está relacionada com a logística e serviços de pré e pós-venda. Variantes do produto podem ser obtidas através da inovação ou da adequação de produtos existentes às novas exigências. A fim de satisfazer as necessidades do usuário, mas também permitir que as empresas sejam rentáveis e sustentáveis são necessários modelos, métodos e ferramentas para suportar as empresas no gerenciamento da variedade de produtos, ainda por ElMaraghy et al. [2013].

### **3.2 Mass customization**

Mass customization (MC) é a habilidade de se produzir crescente quantidade de variedade de produtos a baixo custo. Esse conceito surgiu no final da década de 1980 como alternativa para diferenciação de empresas em um ambiente competitivo. Davis [1989] o definiu como a capacidade de fornecer produtos e serviços projetados para cada cliente individualmente através de grande agilidade do processo, flexibilidade e integração. Ou seja, é a capacidade de equilibrar a necessidade de ser fabricar grandes quantidades de produtos com a demanda crescente do mercado por produtos individualizados sem prejudicar ou ampliar a economia de escala da empresa. Este conceito foi adotado em vários outros estudos com Da Silveira et al. [2001], Eastwood [1996] e Jiao et al. [2007].

O conceito baseia-se na noção de "economia de escopo", onde os avanços na fabricação e tecnologia da informação, bem como novos métodos de gestão, permitem as empresas fornecer a variedade de produtos e personalização através da flexibilidade e capacidade de resposta rápida em muitas indústrias (Kotha [1996])

Porém, a estratégia de MC é complexa e depende tanto do cenário de mercado, quanto da flexibilidade das instalações da fábrica para ser implementada com sucesso, conforme foi observado por Da Silveira et al. [2001], e, portanto deve ser bem avaliada antes de ser implementada. Isso porque existem incrementos nos custos indiretos de produção que são associados ao aumento da complexidade do sistema produtivo devido ao aumento do número de produtos na linha de produção [1,2,3,4,5].

### **3.3 Impactos da variedade de produtos**

A variedade de produtos cria oportunidades, mas também desafios para as empresas.

Os clientes preferem as linhas de produtos amplas e, portanto, os gerentes de marketing são recompensados com maior receita quando aumentam a variedade de produtos. No entanto, isso também pode aumentar os custos e reduzir os lucros, como foi enfatizado por ElMaraghy et al. [2013]. Esta é a linha de raciocínio que os gestores da cadeia de suprimentos geralmente seguem buscando uma menor variedade de produtos para

reduzir a complexidade de sua área de atuação, que por sua vez, pode reduzir as receitas e lucros.

Infelizmente, as empresas enfrentam este conflito entre os gestores da cadeia de suprimentos e os a área de marketing com capacidade preditiva limitada, pois os custos reais incorporados pela variedade de produtos nem sempre são entendidos ou mapeados. A razão é que estimar os custos indiretos associados com o aumento da variedade de produto não é uma tarefa fácil, uma vez que diversas áreas do processo produtivo são impactadas, incluindo:

### **3.3.1 Gerenciamento da logística da variedade**

Uma linha de produção diversificada demanda esforço para gestão dos materiais consumíveis e também dos produtos acabados. Além do esforço de pessoal, este esforço pode estar associados ao investimento em espaço físico para armazenamento. Outro ponto a ser observado é a complexidade da cesta de serviços de logística necessários tanto para o abastecimento das linhas de produção quanto para a distribuição dos produtos.

### **3.3.2 Qualidade**

A gestão da qualidade dos produtos pode ser um grande fator de complexidade operacional, afinal uma gestão adequada da qualidade dos produtos demanda processos e procedimentos bem definidos para que seja garantida a qualidade do produto durante o processo produtivo, no processo de venda e também no pós venda.

A geração de produtos não conformes gerados devem ser contabilizados para avaliação do impacto da variedade de produtos neste quesito.

### **3.3.3 Capacidade de produção**

O impacto na capacidade de produção é um ponto que deve sempre ser muito bem avaliado quando se está avaliando variedade de produtos no portfólio, afinal o tempo de ajuste do processo pode significar perda de produção ou mesmo resultar em produtos fora da especificação. Dedicar muito tempo a ajuste da máquina ou gerar grandes

quantidades de produtos de transição na produção impactam diretamente a lucratividade de empresa.

### **3.3.4 Controle de estoque de matérias primas**

Naturalmente um número elevado de produtos na linha de produção implicará na necessidade de controle de estoque de matérias primas ou componentes necessários no processo de produção. A gestão de estoque inadequada pode implicar em perdas financeiras uma vez que recursos podem ficar empenhados em estoque por longo período.

### **3.3.5 Controle de estoque de produtos acabados**

Seguindo a mesma linha do controle de matérias primas o aumento do número de produtos no portfólio demandará um eficiente controle do estoque de produtos acabados. Para processos modulares, nos quais sub produtos fazem parte de mais de um produto final, o mesmo esforço deve ser dispendido para os componentes montados na fábrica.

Necessidade de instalações adequadas também deve ser considerada.

### **3.3.6 Manuseio de material**

O processo de disponibilização do material para a produção pode ser impactada pela variedade de produtos uma vez que o fluxo interno da fábrica pode ser alterado dependendo da disposição deste material no estoque. Hoje é muito comum na rotina das empresas verificarmos esforços na otimização da disposição dos materiais no estoque visando minimizar o tempo de traslado das máquinas e pessoas envolvidas no processo de armazenagem uma vez que esta é uma importante fonte de custos.

### **3.3.7 Serviços de pós venda**

A demanda por serviços de assistência técnica ou mesmo relacionamento com os clientes pode ser acrescida em função do número de produtos na linha de produção. O dispêndio com este tipo de atividade deve ser monitorada tanto por conta dos custos diretos quanto por conta dos custos ou perdas geradas pela insatisfação dos clientes.

Portanto, as atividades de pós venda devem ser muito bem mapeadas e seu esforço quantificado para que seja possível entender qual o seu comportamento em função da variedade de produtos.

Diante dos pontos acima descritos, faz-se necessário uma avaliação do processo produtivo completo da empresa para que sejam identificados os gargalos de produção e as fontes de custos ou despesas da implementação do MC e assim ser possível se identificar o ponto em que a variedades de produtos impacta a economia de escala da empresa.

No artigo Design for Variety, Martin, M. et al[1999] buscaram avaliar e tornar mais claros os custos provenientes da variedade em cada uma das etapas do processo produtivo. Para tanto, cada uma das etapas do processo produtivo de uma empresa foi avaliado e as fontes de custo foram mapeadas, conforme ilustradas na Tabela 1.

Tabela 1 Custos indiretos relacionados à diversidade de produtos. Fonte: Martin, M. et al[1999]

Logística
Planejamento de manutenção
Suprimentos de manutenção
Documentação de produção
Complexidade da tecnologia de informação
Gerenciamento da complexidade
Materiais
Descontos por volume
Manuseio de material
Expedição
Mão de obra
Treinamento
Perdas associadas a curva de aprendizado
Setups
Qualidade
Produtos fora da especificação
Falhas no processo produtivo
Falhas na inspeção dos produtos
Controle de estoque
Matérias primas
FGI
Serviço de inventário
End of life buy

Bens de capital
Redução da capacidade de produção
Obsolescência
Matéria prima e processo
FGI
Controle de estoque
Fim de ciclo de vida

Cada uma dessas fontes terá maior ou menor relevância para a análise de diversidade de produtos dependendo tipo de indústria e da natureza do processo produtivo, ou seja, em processos modulares ou em processos contínuos cada um das fontes de custos será mais ou menos relevante. Para quantificar o impacto das características do processo/produtos foram propostos índices sensíveis a modularidade do processo e do produto conforme apresentados abaixo:

- Índice de Diferenciação (DI): está relacionado com o fluxo do processo produtivo, ou seja, é capaz de mensurar o impacto da diferenciação que ocorre no fluxo do processo produtivo no custo de produção. Diferenciando o processo de fabricação numa etapa mais adiante no processo produtivo é possível reduzir a complexidade do processo de fabricação. Esse índice também contempla quanto valor é agregado ao produto durante as etapas de fabricação.

$$DI = \frac{\sum_{i=1}^n d_i v_i a_i}{n d_1 v_n \sum_{i=1}^n a_i} \quad (1)$$

$$0 < DI \leq 1 \quad (2)$$

$d_i$  = tempo estimado entre o processo  $i$  de produção e a venda

$v_i$  = tempo estimado entre o processo de produção e a venda

$a_i$  = valor adicionado no processo  $i$

$n$  = # de processos

$d_1$  = tempo estimado entre o processo 1 de produção e a venda

$v$  = # final de variedades ofertadas

- Índice de Uniformidade (CI): É a medida de como estão sendo utilizadas as etapas/ partes de produtos comuns ao processo produtivo total. Pode ser representada pela equação abaixo:

$$CI = 1 - \frac{u}{\sum_{j=1}^v p_j} \quad (3)$$

$$0 < CI \leq 1 \quad (4)$$

$u$  = # componente de fabricação do produto ou família de produto;

$p_j$  = # componente no modelo  $j$ ;

$v$  = # final de variedades consideradas.

Os índices de uniformidade e de diferenciação são muito evidentes em processos modulares, ou seja, em processos discretos. Nesse tipo de processo a comunalidade é fator relevante para gestão dos custos.

Helo et al. [2013] tomaram como referência um exemplo clássico de comunalidade para reduzir período de ramp up: O Ford modelo T. Todo o modelo T era construído sobre uma plataforma comum e especificado com base em diversos produtos diferentes no final do processo produtivo. Isto significa que a plataforma do automóvel era composto por peças (o motor, pedais, suspensões, rodas, transmissão, tanque de gasolina, volante, luzes) comuns compartilhadas entre a família do modelo T.

No entanto, a cor e alguns acessórios estavam disponíveis para atender a preferência dos clientes. Isso significa maior uniformização do processo e componentes que resultava num aumento da flexibilidade do processo de montagem automotivo.

- Índice de setup: é uma medida indireta da necessidade do impacto do ajuste necessário no processo de fabricação entre os produtos ofertados pela fábrica.

$$SI = \frac{\sum_{i=1}^n v_i c_i}{\sum_{j=1}^v C_j} \quad (5)$$

$$0 < SI \leq 1 \quad (6)$$

$v_i$  = # de diferentes produtos existem no processo I;

$c_i$  = custo de ajuste no processo i;

$C_j$  = Custo total (insumos, mão de obra, overhead) do produto j.

O setup é uma fonte de complexidade comum a processos modulares (discretos) e processos contínuos, uma vez que no processo de troca de produtos ocorre redução de produtividade, demanda de mão de obra para ajuste de equipamentos, produção de produtos fora da especificação desejada e até mesmo custo de estoque tanto de produtos, quanto de matérias primas.

Para orientar os trabalhos de quantificação dos impactos de custo da variedade de produtos nos processos produtivos, M. Martin [1999] ainda relacionaram as fontes de custos com os índices apresentados anteriormente, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 Relação entre os custos indiretos e os índices de quantificação do impacto da variedade de produtos.

Custos indiretos provenientes da variedade	CI	DI	SI
<b>Logística</b>			
Planejamento de manutenção	x	x	
Suprimentos de manutenção	x		
Documentação de produção	x	x	x
Complexidade da tecnologia de informação	x	x	
Gerenciamento da complexidade	x	x	x
<b>Materiais</b>			
Descontos por volume	x		
Manuseio de material	x	x	
Expedição	x		
<b>Mão de obra</b>			

Treinamento	x		
Perdas associadas a curva de aprendizado	x	x	
Setups	x	x	x
<b>Qualidade</b>			
Produtos fora da especificação	x	x	
Falhas no processo produtivo	x	x	x
Falhas na inspeção dos produtos	x	x	x
<b>Controle de estoque</b>			
Matérias primas	x	x	
FGI		x	
Serviço de inventário	x		
End of life buy	x		
<b>Bens de capital</b>			
Redução da capacidade de produção	x		x
<b>Obsolescência</b>			
Matéria prima e processo	x	x	
FGI		x	
Controle de estoque	x		
Fim de ciclo de vida	x		

### 3.4 Contabilidade dos custos de produção

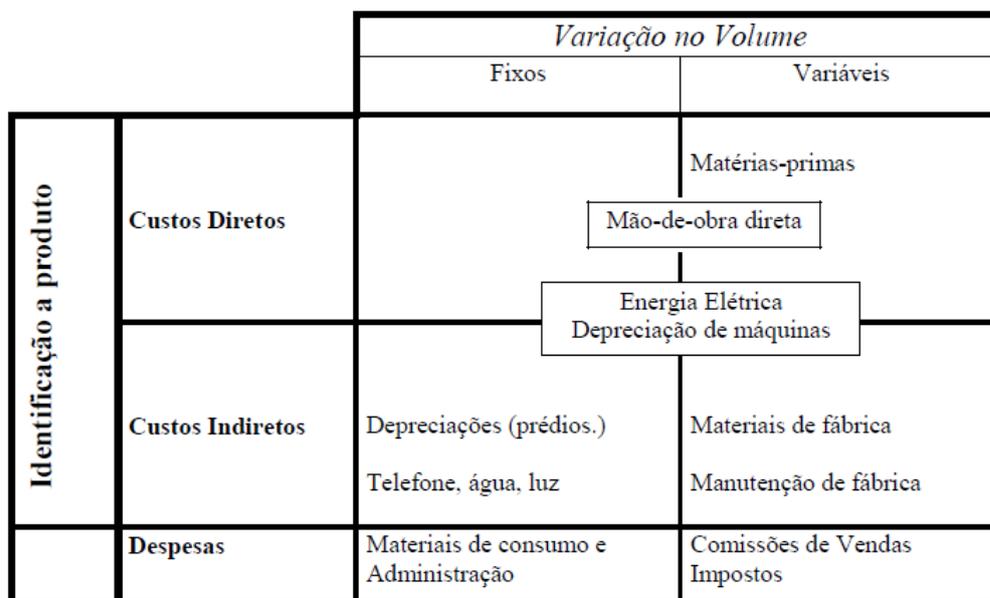
Um dos desafios da variedade de produtos é uma apropriação correta dos custos de produção. Para suportar a classificação adequada dos custos de produção uma breve revisão dos critérios de classificação de custos foi realizada e é apresentada nas seções a seguir.

Para fins contábeis os custos e despesas representam o sacrifício do ativo para obtenção da receita. A fim de classifica-los foi definido que os custos são os desembolsos realizados em função da produção, já as despesas se caracterizam por suportarem a administração e também a área de vendas dos produtos.

Como apontado por Araujo Nélo [2008] a importância de se classificar os custos e despesas para que seja possível traduzir estas informações de forma que possam ter uso

gerencial. Para tanto, faz-se necessário avalia-las em função da variação de volume produzido e posteriormente realizar uma análise de Custo x Volume x Lucro.

Figura 10 Fluxo de custos e despesas fonte: Araujo Nélo [2008]



A Figura 10 mostra como os custos e despesas se comportam frente ao volume produzido. Como dito anteriormente os custos variam em função do volume produzido, principalmente as matérias primas e mão de obra direta. Os custos diretos são variáveis. Já os custos indiretos podem ser fixos, somente variam em condições específicas, por exemplo, expansão de capacidade, e também variáveis. Podemos citar como exemplo materiais de manutenção dos equipamentos da linha de produção. Além destas existem os custos de natureza mista: por exemplo água, luz, telefone, dentre outros.

As despesas operacionais possuem o mesmo comportamento dos custos, ou seja, podem ser classificadas em fixas, variáveis e mistas.

Este trabalho visa avaliar o comportamento do *mix* de produtos ótimos frente à variação de produção de cada um dos produtos. Para tanto é importante relacionar as fontes de custos em função da variedade de produtos com sua relação com a produção de cada um dos produtos possíveis.

### 3.4.1 Classificação dos custos em relação a quantidade produzida

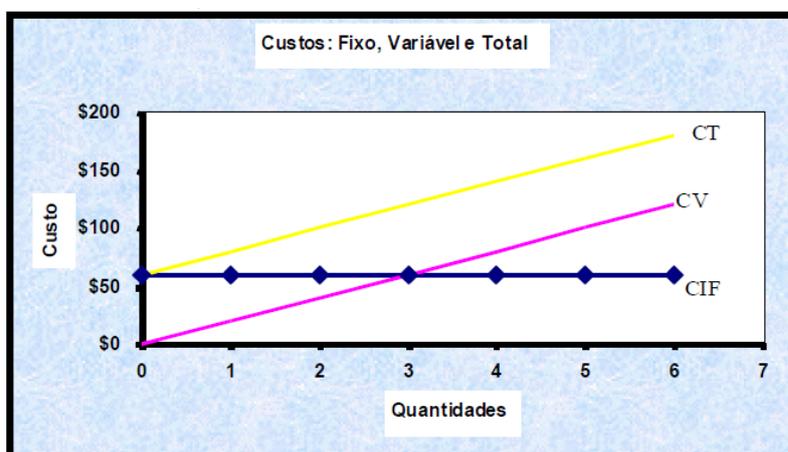
Em relação as quantidades produzidas os custos podem ser classificados como fixos e variáveis.

Os custos variáveis (CV) estão relacionados com a quantidade do produto produzida, uma vez que há uma correlação direta entre a quantidade de matéria consumida para uma determinada quantidade de produto.

Por sua vez, os custos fixos (CF) não são alterados caso não ocorra expansão da linha de produção. Este tipo de custo são constantes independentes da empresa produzir ou não seus bens ou serviços. Não existe uma correlação direta entre os custos fixos com o produto acabado ou em elaboração.

O custo total (CT) corresponde ao somatório dos custos variáveis e fixos conforme ilustrado na Figura 11.

Figura 11 Custos variáveis, fixos e custo total fonte: Araujo Nélo [2008]



### 3.5 Relação da variedade de produtos e condições de mercado

Conforme mencionado por Da Silveira et al. [2001], a estratégia de MC é complexa e depende tanto do cenário de mercado, quanto da flexibilidade das instalações da fábrica para ser implementada com sucesso.

Como representação das condições de mercado uma previsão de demanda consistente se destaca como variável de fundamental importância no processo decisório de implementação da MC.

Na literatura de marketing, alta variedade de produtos pode permitir que uma empresa satisfaça os desejos e necessidades dos consumidores heterogêneos e, assim, aumente a probabilidade de concluir uma venda. Portanto, a alta variedade de produtos pode estimular as vendas através da segmentação clientes. Por outro lado, existem estudos que indicam que o "excesso" de variantes de produtos pode levar confusão na seleção dos produtos, reduzindo assim o benefício marginal variedade (Thompson et al. , 2005).

Outro ponto importante na interface com o mercado é que a maior variedade de produtos pode dificultar a previsão da demanda e a manutenção do fornecimento contínuo, o que pode resultar em desequilíbrios entre oferta e demanda e ocasionar descontinuidade no fornecimento dos produtos, o que pode implicar em perda de venda, principalmente nas indústrias onde existem substitutos perfeitos, como indústria alimentícia ou mesmo mineração. Nas indústrias onde produtos substitutos são imperfeitos, como nas indústrias automobilística e de armas, o risco de perda de venda é menor, uma vez que os pedidos podem ser postergados, em caso de ruptura no fornecimento devido ao erro na previsão de demanda e consequente falha no planejamento.

### **3.6 Planejamento para variedade**

Outra fonte de dispêndio que pode ser considerada na definição da estratégia da empresa é o investimento necessário para aumentar a flexibilidade da linha de produção capacitando a processar produtos variados.

Nesta linha Rui Fernandes et al[2012], investigaram o *trade off* entre o investimento necessário para operar com um portfólio de produtos amplo e o valor gerado por esse portfólio. Ou seja, buscaram responder a seguinte pergunta: O valor gerado pela variante do produto é superior à necessidade de investimento na linha de produção? Dessa forma utilizaram de uma abordagem diferente das costumeiras substituindo o

valor presente líquido ou mesmo fluxo de caixa descontado pela avaliação do escopo de escala.

Já Berry & Cooper [1999] chamaram atenção para a importância do alinhamento entre a estratégia definida para o marketing e para a operação da empresa. Um ponto importante levantado foi o impacto na rentabilidade causado pela introdução de uma maior variedade de produtos sem alterações apropriadas na estratégia de produção e investimento. Nesse caso específico, Plastech obteve um aumento de 20% na receita de vendas através da implementação de uma estratégia de marketing para aumentar a variedade de produtos que implicou na redução do tamanho dos lotes em aproximadamente 50%, elevando fortemente os custos e reduzindo os lucros em torno de 80%. Sem novos investimentos, o processo de redução de tamanho de lotes, com elevadas ocorrências de troca de produtos, não podia suportar a flexibilidade do mix de produtos necessário para lidar com o aumento da variedade de produtos demandados pelos novos mercados visados pela empresa. O efeito do tamanho do lote também foi um dos pontos destacados por On the effect of Benjaafar et al. [2004] numa avaliação sobre o custo de variedade de produtos sobre os custos de estocagem.

### **3.7 Diferentes abordagens para modelos**

Yano & Dobson [1998] revisaram a literatura sobre os modelos de seleção de variedade de produtos e apontaram que o custo de produção, com restrições de projeto de engenharia, deve ser acomodado durante a seleção do mix de produtos a ser ofertado pela empresa.

Já Morgan et al. [2001] partiram de uma abordagem mais voltada para o planejamento da linha de produtos visando maximizar o lucro da empresa a partir da identificação dos principais *trade offs* entre variáveis de mercado e custos de manufatura. Essa abordagem evidencia que com adequada seleção do portfólio de produtos pode-se evitar a ineficiência do processo produtivo causado pelo excesso de variedade de produtos ofertado pela empresa.

O modelo proposto visa especificamente explorar todas as sinergias entre os produtos disponíveis minimizando então os custos variáveis, os custos de exploração, e dois

elementos de custo *set up*, que são incrementados em função do número de ciclos de produção.

Via de regra, as discussões a respeito de quanto customizado deve ser o portfólio de uma empresa está associado ao conceito de rendimento de escala, que é relação entre o ganho obtido com a produção de um novo produto (incremento nas vendas) e o custo inerente a esse aumento de produção/vendas inerentes aos custos ou investimentos necessários para se ofertar esse novo produto, é possível destacar as seguintes publicações sobre o tema Lancaster [1990] , Banker [1984] , Banker et al. [1996] e Jahanshahloo & Soleimani-Damaneh [2004] .

## **4 Detalhamento do problema específico**

### **4.1 Descrição da empresa mineradora**

Para aplicação do presente trabalho será tomado como exemplo de empresa um simplificação do sistema produtivo da empresa de mineração Vale S.A.. Neste trabalho serão considerados três grandes unidades de produção de minério de ferro que a empresa possui concessão. Cada uma destas unidades é composta por um conjunto de minas, nas quais são extraídos os minerais de ferro e por um conjunto de operação de beneficiamento do minério de ferro como, britagem, moagem, peneiramento e concentração. Estas operações são responsáveis pela extração e separação do minério de ferro em granulados, *sinter feed* e *pellet feed*. Ou seja, são responsáveis pela produção da linha de produtos não aglomerados.

Cada um dos sistemas produtivos ainda conta com unidades de pelletização responsáveis pela produção de pelotas de minério de ferro (produto aglomerado).

No escopo deste trabalho estão incluídas as avaliações do portfólio dos produtos *sinter feed* e pelotas de minério de ferro. Estes produtos não concorrem na linha de produção da empresa. Ou seja, não faz parte da complexidade da empresa avaliar se deve ou produzir *sinter feed* em detrimento à produção de pelota, ou vice e versa. Portanto, neste trabalho serão avaliadas instancias para a linha de produtos *sinter feed* e pelotas separadamente.

### **4.2 Capacidade de produção**

A capacidade de produção de cada linha de produção em cada um dos sistema são apresentados na Tabela 3 e Tabela 4, sendo que a Tabela 3 apresenta os sistemas produtivos de *sinter feed* e a Tabela 4 apresenta a capacidade de produção de pelotas de minério de ferro.

A sequencia de figuras a seguir busca ilustrar a complexidade do sistema produtivo da empresa. Na Figura 12 estão apresentadas as localizações geográficas dos sistemas e busca evidenciar a dispersão geográfica dos sistemas. Já na Figura 13 são ilustrados a dispersão entre as minas localizadas no quadrilátero ferrífero a fim caracterizar a

complexidade de cada um dos sistemas produtivos. Cada um dos sistemas possui seu próprio sistema de portos, ferrovias, minas independentes e usinas de pelotização independentes, isto mesmo para os sistemas localizados no mesmo estado.

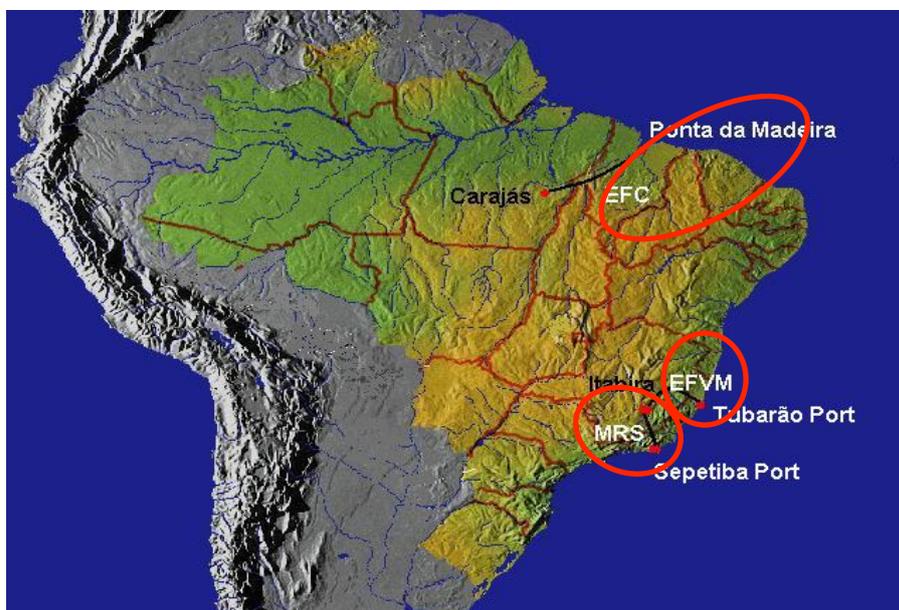


Figura 12 Visão geral dos sistemas produtivos (Material interno)

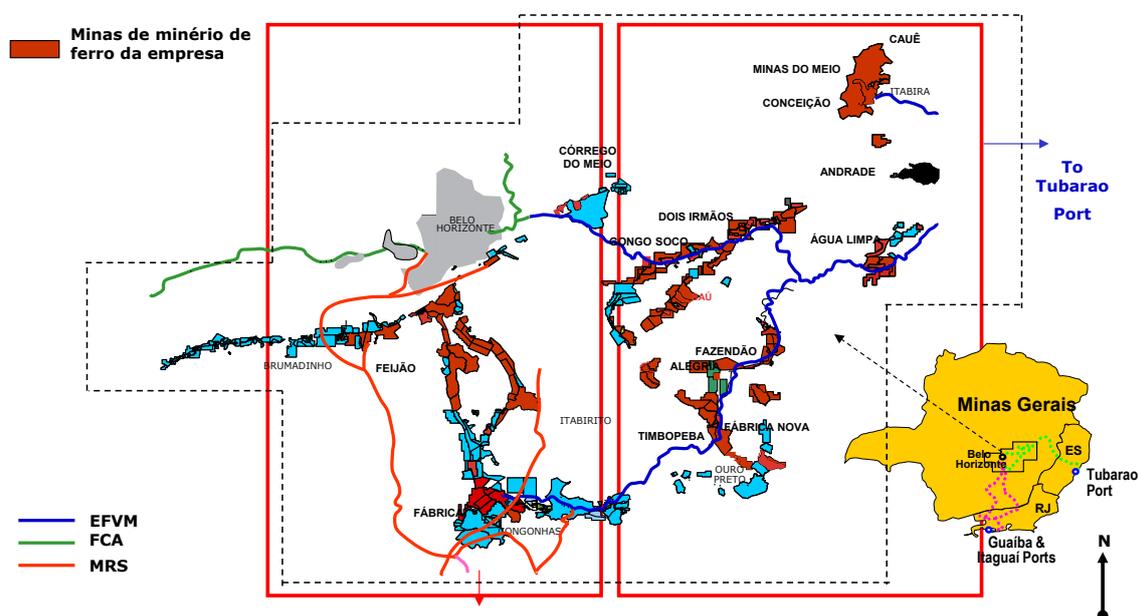


Figura 13 Detalhe da localização geográfica dos sistemas sul e sudeste (Material interno)

Esta dispersão geográfica é um dos complicadores para elaboração do portfólio, afinal o produto de cada um dos sistemas pode gerar vários produtos por mina, considerando

que cada sistema possui um grande número de minas que compõe um complexo de produção, conforme apresentado na Tabela 3. Caso o modelo adotado fosse um no qual cada mina teria seu próprio produto implicaria em demanda de uma área de estocagem e dedicação na gestão de estoque inviáveis para empresa.

Tabela 3 Capacidade de produção das linhas de produção por sistema produtivo.

Sistemas produtivos	Capacidade de produção de Sinter feed (Milhão de tonelada por ano)
Sistema norte	100
Complexo de Minas Sistema norte	100
Sistema Sul	60
Complexo Minas Sul 1	5
Complexo Minas Sul 2	6
Complexo Minas Sul 3	9
Complexo Minas Sul 4	10
Complexo Minas Sul 5	10
Complexo Minas Sul 6	15
Complexo Minas Sul 7	5
Sistema Sudeste	60
1 Complexo Minas Sudeste	15
2 Complexo Minas Sudeste	15
3 Complexo Minas Sudeste	5
4 Complexo Minas Sudeste	5
5 Complexo Minas Sudeste	10
6 Complexo Minas Sudeste	5
7 Complexo Minas Sudeste	5

A Tabela 4 apresenta a capacidade de produção de pelotas em cada um dos sistemas produtivos da empresa avaliada.

Tabela 4 Capacidade de produção de pelotas por sistemas produtivos

Usinas de pelotização	Produção de Pelotas no Sistema Norte (Milhões de toneladas por ano)	Produção de Pelotas no Sistema Sul (Milhões de toneladas por ano)	Produção de Pelotas no Sistema Sudeste (Milhões de toneladas por ano)
1	8	5	3
2	-	8	5
3	-	-	5
4	-	-	5
5	-	-	5,5
6	-	-	5,5
7	-	-	7
8	-	-	8
Total de produção por sistema produtivo de pelotas (Milhões de toneladas por ano)	8	13	44

Neste trabalho cada um dos portfólios, produtos não aglomerados e pelotas de minério de ferro, foram avaliadas individualmente. O objetivo é avaliar se a política de definição de portfólio deve ser o mesmo para ambos os tipos de produto. Desta forma espera-se que seja possível quantificar o efeito das variáveis de mercado e de impacto no custo de produção em duas linhas de produtos diferentes que atendem o mesmo mercado consumidor.

### 4.3 Previsão de demanda de minério de ferro

Conforme comentado na literatura a etapa de previsão de demanda por produtos é fundamental para a definição do portfólio, bem como da estratégia de produtos da empresa.

A previsão da demanda de minério de ferro é função da atividade industrial prevista para uma determinada região, uma vez que este é a principal matéria prima da fabricação do aço que por sua vez é a base industrialização mundial.

A metodologia de previsão da produção de aço mundial, estratificada por país, não será detalhada neste trabalho. Apenas foram consideradas curvas de demanda de aço hipotéticas com crescimento hipotético a fim de definir cenários de demanda de minério de ferro base para a avaliação que este trabalho se propõe.

Em função da natureza da indústria siderúrgica e de mineração que são de capital intensivo com longo processo de implantação, foi definido que o horizonte de avaliação considerado é de 10 anos. Espera-se com isto capturar reflexos da variação do ritmo de crescimento na definição de portfólio.

O cenário base avaliado é apresentado na Tabela 5. Estes números foram alterados na avaliação do modelo a fim de demonstrar o impacto desta variável no portfólio indicado pelo modelo.

Tabela 5 Cenários de produção de aço (milhões de tonelada por ano)

	Ano									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cenário Otimista	1118	1138	1159	1180	1202	1224	1246	1269	1292	1316

Naturalmente para se falar da demanda de um determinado produto faz-se necessário avaliar se existe variação na demanda em função do preço praticado, ou seja, verificar a elasticidade da demanda deste produto em função do preço do produto.

### 4.3.1 Demanda de sinter feed

Conforme falamos anteriormente, o *sinter feed* atualmente é o minério de maior abundancia no mercado mundial e este é a base da matriz de matérias primas que alimentam a indústria siderúrgica.

Diante da condição de principal fonte de ferro para a indústria siderúrgica é possível verificar não existe elasticidade da demanda de *sinter feed* ao preço deste produto. Partindo do principio que a demanda de minério será independente do preço do sinter feed a principal componente de preço no balanço oferta vs. demanda de minério de ferro, será o custo de produção e a produção absoluta dos players do mercado de minério de ferro. Ou seja, o preço é reflexo da curva de custo dos produtores de minério de ferro, onde o produtor de maior custo define o preço referencia da produção total de *sinter feed* que irá suprir uma determinada demanda de minério no mercado Figura 14. Neste gráfico o volume de produção de cada um dos *players* do mercado são apresentados no eixo x. Já o custo médio da produção respectivo ao player em questão é apresentado no eixo y. inserindo um linha vertical indicando a demanda de minério mundial é possível prever o custo de produção para se atender a demanda por minério no período. Este custo somando de uma margem do produtor de maior custo indicará o preço a ser praticado para o produto *sinter feed* ano avaliado.

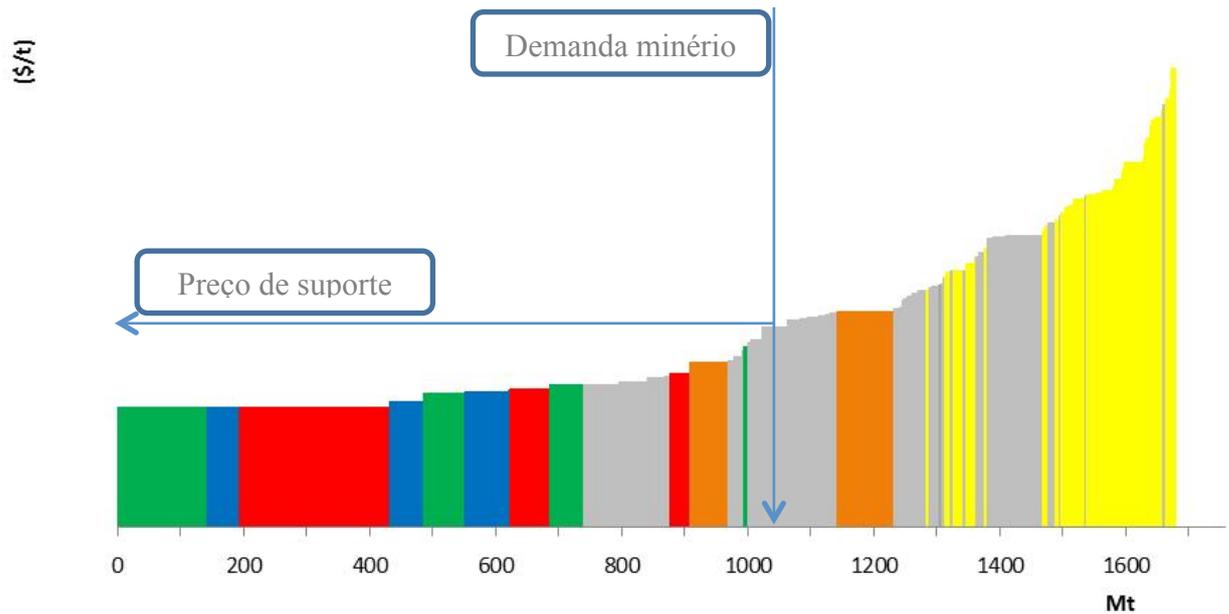


Figura 14 Dinâmica preço de suporte do minério de ferro

Portanto, a formação do preço do minério de ferro é função principalmente do custo de produção do fornecedor pior posicionado na curva de custo para atender a demanda de minério daquele produto.

### 4.3.2 Demanda de pelotas

Conforme comentamos o consumo de pelotas nos alto fornos é uma forma de aumentar a eficiência energética deste equipamento. Ou seja, de maneira geral o siderurgista pode fazer opção de consumir mais ou menos pelota em detrimento ao sinter dependendo do benefício potencial da pelota. Para realizar esta avaliação o siderurgista toma como referência qual será o seu custo de produção e/ou margem incrementando a participação de pelotas vis a vis o custo e/ou margem de produção incrementando o consumo de sinter na carga metálica. Portanto, a demanda total de pelotas é maior para um patamar de preços atrativos e reduzida quando o preço médio é incrementado, conforme ilustrado na Figura 15. Logo, o preço da pelota projetado é resultante do cruzamento entre curva de demanda e a oferta de pelotas projetada para cada cenário.

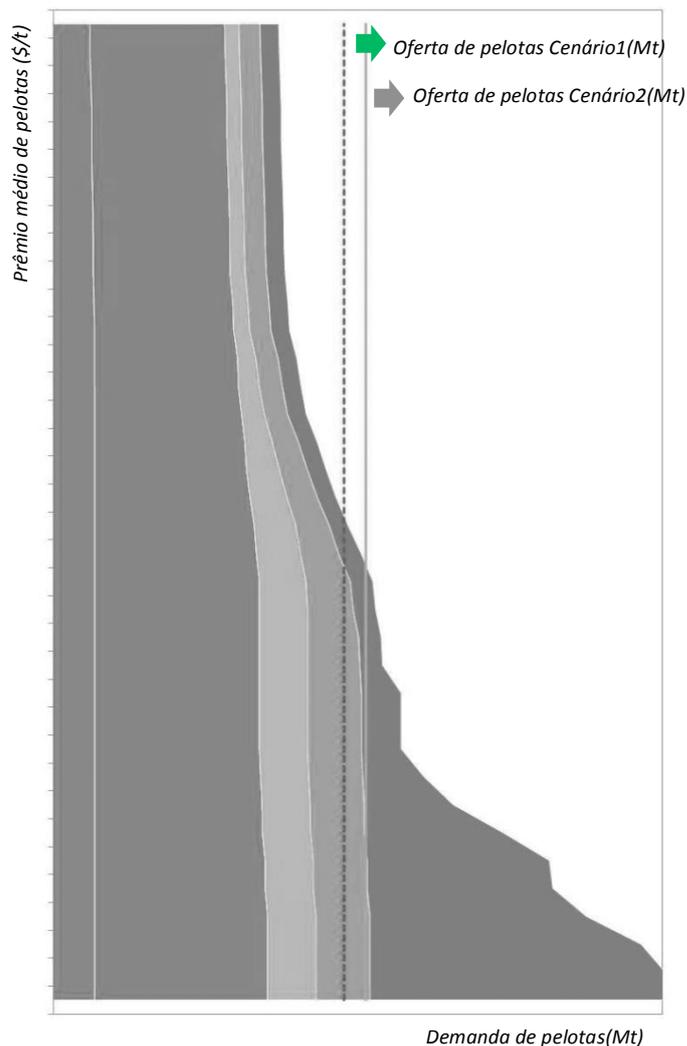


Figura 15 Curva de substituição de pelota de minério de ferro por sinter nos alto-fornos.

A principal diferença no processo de formação de preços do sinter feed e da pelota de minério de ferro está associada a elasticidade da demanda do produto em relação ao preço praticado, uma vez que para o sinter feed o preço do produto será dado pelo maior custo de produção para atender demanda do mercado, enquanto o preço da pelota será resultado do balanço entre oferta e demanda, sendo que a demanda será determinada pelo valor em uso da pelota para o período em avaliação.

Para ambos os produtos a estratificação da demanda em produtos específicos é realizada através de contatos comerciais. Na abordagem proposta são considerados os produtos desejados pelos clientes. A hipótese de substituição de produtos da empresa avaliada

nos clientes não foi considerada uma vez que estariam associados a custos comerciais inerentes ao processo de negociação.

As Tabela 6 e Tabela 7 apresentam respectivamente as demandas de *sinter feed* e pelotas consideradas neste trabalho.

Tabela 6 Demanda de *sinter feed* considerados no trabalho

Nome Produto	Demanda Anual de <i>sinter feed</i> (Milhões de toneladas por ano)
SF Norte 1	90
SF Norte 2	9
SF Norte 3	14
SF Norte 4	14
SF Norte 5	14
SF Sudeste 1	36
SF Sudeste 10	18
SF Sudeste 11	18
SF Sudeste 2	27
SF Sudeste 3	27
SF Sudeste 4	18
SF Sudeste 5	18
SF Sudeste 6	18
SF Sudeste 7	18
SF Sudeste 8	18
SF Sudeste 9	18
SF Sul 1	41
SF Sul 2	23
SF Sul 3	18
SF Sul 4	18
SF Sul 5	18
SF Sul 6	18
SF Sul 7	18
SF Sul 8	18

Tabela 7 Demanda de pelota de minério de *ferro* considerados no trabalho

Nome Pelota	Demanda anual de pelota (Milhões de toneladas por ano)
Pel_RDSudeste1	15
Pel_RDSudeste2	3
Pel_RDSudeste3	2
Pel_PAFSudeste1	20
Pel_PAFSudeste2	5
Pel_PAFSudeste3	0
Pel_PAFSudeste4	2
Pel_PAFSudeste5	1
Pel_RDNorte1	3
Pel_RDNorte2	5
Pel_RDNorte3	3
Pel_RDNorte4	1
Pel_RDNorte5	1
Pel_RDNorte6	1
Pel_PAFSul1	5
Pel_PAFSul2	3
Pel_PAFSul3	2
Pel_PAFSul4	2
Pel_PAFSul5	1
Pel_PAFSul6	1
Pel_PAFSul7	1
Pel_PAFSul8	1

#### **4.4 Capacidade de produção dos produtos considerados**

A capacidade de produção de um determinado complexo minerador está associada a capacidade de processamento de minério dos equipamentos implantados na unidade operacional, por exemplo britadores, concentradores, máquinas empilhadeiras, máquinas recuperadoras, viradores de vagão em se tratando do processo de produção e transporte do minério de ferro. Como neste trabalho foram considerados os períodos correspondem a um ano a capacidade de produção será informada numa taxa de produção por ano.

Por outro lado, a disponibilidade de diferentes produtos em uma mina depende prioritariamente da disponibilidade de subtipos de minérios em cada uma das minas em exploração. Ou seja, a disponibilidade dos subtipos de minério em cada uma das minas depende do processo geológico de formação do corpo mineral no qual as minas estão localizadas.

Para traduzir ambas as restrições citadas em input para o modelo, a disponibilidade de cada produto foi considerada limitada a partir de um parâmetro.

#### **4.5 Custos de produção**

No modelo proposto os custos de produção foram divididos em custo fixo, custo variável e custo de variedade de produtos.

##### **4.5.1 Custos de desativação/ ativação da uma unidade de produção**

Uma das propostas deste trabalho é avaliar o custo de incremento de variedade de produtos versus ao custo de se interromper a operação de uma unidade operacional. Para tanto foi criado um parâmetro que contabiliza todos os custos associados a parada de uma usina ou mais usina. Ou seja, devem ser considerados os custos de desmobilização de pessoal, condicionamento adequado para os equipamentos e consumíveis críticos, encerramento contratual com prestadores de serviço desde manutenção à suporte administrativo.

Naturalmente o modelo deve ser capaz de prever a viabilidade da retomada das unidades que por ventura tenham tido sua operação interrompida num determinado momento. O parâmetro criado para penalizar esta ação deve considerar o investimento necessário para adequar as instalações para a retomada da produção.

O custo de pessoal e custos necessários para manutenção da produção devem ser previsto no parâmetro custo fixo.

#### **4.5.2 Custos fixos**

O custo fixo foi associado à unidade operacional e representa a parcela do custo que não varia com a produção.

Tanto para mineração quanto para a pelletização estes custos tem origem principalmente na mão de obra de operação e manutenção. Também devem ser considerados as despesas indiretas para se manter o corpo de empregados como transporte de pessoal, afinal as minas/usinas são normalmente remotas, alimentação dos empregados, controle de qualidade (manutenção de laboratórios), serviços de infraestrutura, e também despesas com saúde e segurança do trabalho.

Este parâmetro terá relevância significativa para a avaliação de qual unidade é mais competitiva e numa condição de mercado ofertado suportará a decisão de interrupção da operação de uma ou mais unidades de produção.

#### **4.5.3 Custos Variáveis**

Neste trabalho o custo variável da mina foi associado a cada produto. Esta abordagem foi adotada a fim de indicar quais os produtos serão mais atrativos para a empresa.

Os custos variáveis da mineração puderam ser divididos em custos de remoção de estéril, extração dos minérios, movimentação de minérios, beneficiamento, concentração.

Na pelotização os principais custos variáveis estão associados a compra de minérios, compra de aditivos para ajuste da química das pelotas, A energia elétrica para funcionamento dos moinhos e os combustíveis para o forno de pelotização também são importantes fontes de custo variável e variam de acordo com a especificação da pelota ou do minério destinado para a produção da pelota.

Aqui também serão consideradas perdas de eficiência como, perda de produtividade da unidade de produção, associada ao produto e não contabilizadas nas componentes anteriores.

#### **4.5.4 Custos da variedade de produtos**

Para tornar possível que o modelo seja sensível a variedade de produtos no portfólio uma curva penalizando o incremento de produtos na linha de produção deve ser inserida no modelo. Esta curva deve ser elaborada de forma que todos custos indiretos relacionados com a variedade de produtos sejam considerados.

O usuário do modelo poderá criar sua curva baseando-se nos dados do seu processo produtivo ou mesmo utilizar os índices propostos por Martin et al [1999].

Um parâmetro discreto foi proposto a fim de representar a curva de penalização da variedade. Desta forma será possível quantificar o impacto da maior complexidade do sistema produtivo devido aos custos indiretos de se possuir um portfólio de produtos variado.

Para que esta curva tenha algum significado prático uma análise detalhada dos processos de mineração e pelotização foram realizados e os custos inerentes a diversidade de produtos foram contabilizados neste parâmetro. Vale a pena salientar que os custos associados a estes parâmetros não podem ser individualizados por produtos. Caso seja possível associar um custo qualquer a um determinado produto este custo deve ser classificado como custo variável.

Nas próximas seções estão apresentados os critérios utilizados para quantificação dos custos de variedade considerados neste trabalho.

#### 4.5.4.1 Análise do impacto da variedade de produtos mineração

##### 4.5.4.1.1 Lavra do minério de ferro

O processo de lavra de minério de ferro consiste no desmonte mecânico, carregamento e transporte de minério e de estéril e é concluído na recomposição das áreas lavradas.

Nesta etapa os principais custos envolvidos estão associados à movimentação do estéril e do minério, como, principalmente, gastos de combustível e pneus dos caminhões fora de estrada.

Diferentes produtos no plano de produção podem afetar o planejamento de lavra, que é o plano de produção de uma mina. Nesta etapa, a principal origem de custo é a variação na distância percorrida pelos caminhões dentro da mina, seja para destinação do estéril ou mesmo para o transporte do minério para o sistema de britagem, uma vez que o custo de combustíveis e pneus para caminhões fora de estrada compõe a maior parte do custo variável desta etapa do processo. Além disso, devido a oferta de pneus para caminhões fora de estrada possui oferta restrita e pode se tornar um gargalo operacional caso o consumo não seja monitorado. A Figura 16 ilustra as características de um caminhão



fora de estrada.

Figura 16 Imagem de um caminhão fora de estrada (fonte <http://www.cat.com>)

Porém, avaliando-se a natureza dos custos gerados, é possível constatar que eles ocorreriam caso o plano de lavra contemplasse dois, três ou até mesmo mais produtos e

estariam associados aos produtos contidos no plano. Desta forma os custos oriundos na etapa de lavra, como o consumo de combustível e desgaste dos pneus podem ser associados ao custo variável dos produtos.

#### **4.5.4.1.2 Britagem/Peneiramento/Classificação**

Estas etapas basicamente consistem em processamento num fluxo contínuo nos quais variações de produção e qualidade estão associados à heterogeneidade da disposição do material na frente de lavra. Porém, seguindo no processo de produção a disposição no pátio de estocagem de produtos diferentes demandaria mais área de armazenamento de produtos intermediários e também esforço de pessoal para manuseio adequado para que não houvesse contaminação entre os produtos.

Outro ponto importante a ser observado é que a utilização inadequada dos equipamentos no manuseio dos materiais poderia implicar na geração e gargalos operacionais e por consequência impacto na produtividade ou até mesmo na capacidade de produção da unidade, conforme ilustrado na Figura 17.

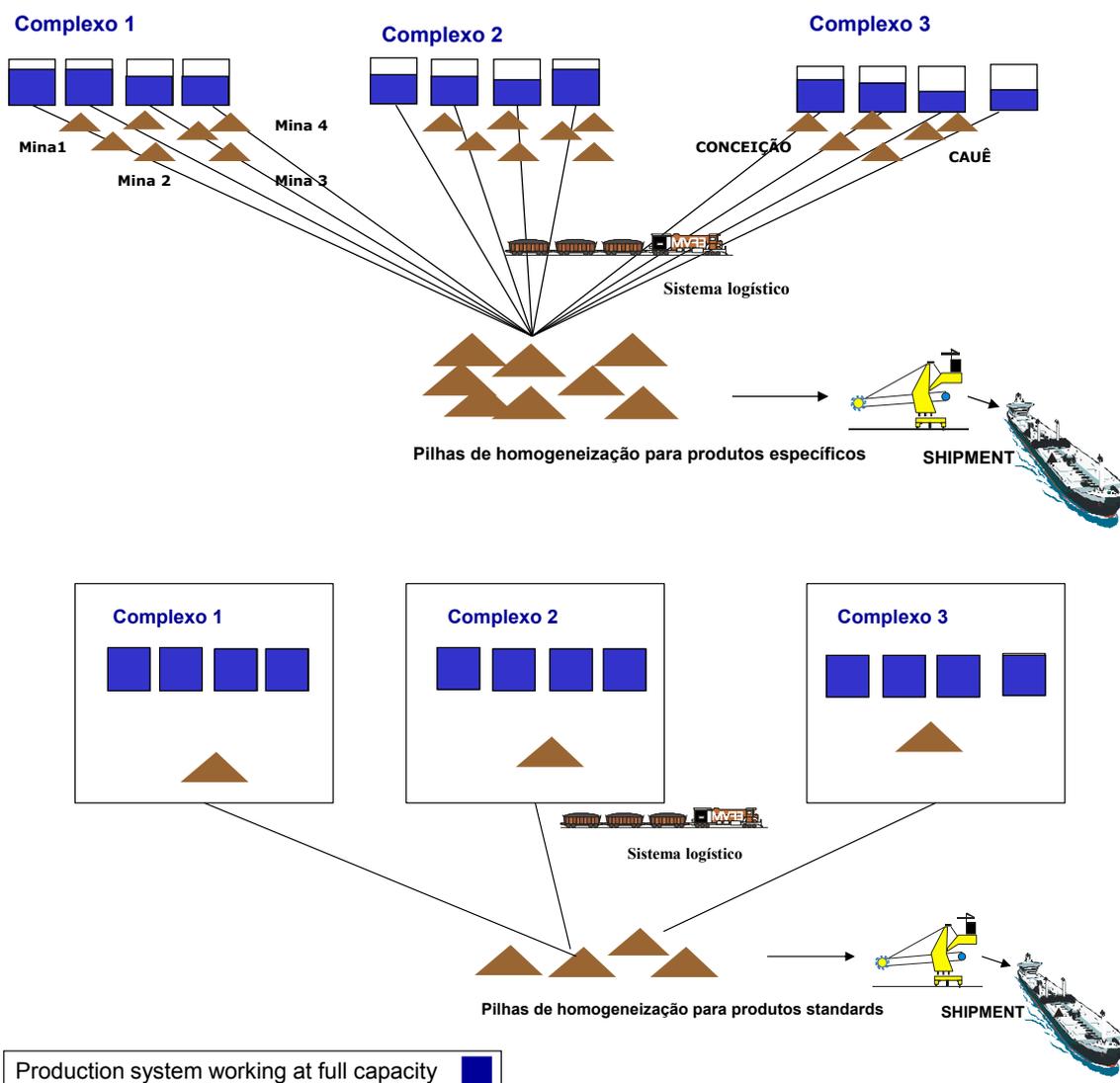


Figura 17 Esquema de ilustração do impacto da variedade de produtos num sistema de produção de minério de ferro.

A Figura 17 mostra que dependendo do número de produtos na linha de produção a necessidade de segregação dos produtos de mina, produtos intermediários, pode demandar tanto movimentação de equipamentos quanto espaço físico que pode implicar em redução da capacidade produtiva de todo o sistema. Por outro lado quando sistema logístico e de estocagem estão operando aliviados é possível aproveitar toda a disponibilidade dos equipamentos, o que pode resultar em incremento da produção, homogeneização dos materiais e redução dos custos operacionais.

Portanto, num processo de produção de minério de ferro é possível inferir que o maior impacto da variedade de produtos está associada à redução da capacidade de produção dos sistema, impacto da qualidade dos produtos e nos custos de movimentação dos subprodutos.

Desta forma a curva de penalização proposta para a variedade de produtos de *sinter feed* no portfólio deve ser quantificada principalmente com o impacto na produção de *sinter feed* a cada produto adicionado na linha de produção.

#### **4.5.4.2 Análise do impacto da variedade de produtos pelota de minério de ferro**

Assim como o processo de mineração o processo de pelotização é um processo contínuo no qual todas as etapas do processo estão envolvidas para qualquer um dos produtos pelotas.

Porém no processo de pelotização é possível notar que a variedade de produtos pode implicar em custos adicionais em diferentes etapas do processo, como será destacado a seguir.

##### **4.5.4.2.1 Preparação de matérias primas**

As matérias primas necessárias para a produção de pelotas de minério de ferro são aglomerantes, aditivos, como calcário, que pode ser calcítico ou dolomítico, e carvão, obviamente também o minério de ferro.

Das matérias primas listadas somente o aglomerante e o carvão são comuns para qualquer tipo de pelota. Isto é intrínseco ao processo, uma vez que qualquer tipo de pelota precisa de um agente ligante e também de uma fonte de energia para o processo de sinterização. Ou seja, para a produção de diferentes tipos de pelotas nem mesmo o minério de ferro segue uma especificação comum. Portanto, na etapa de preparação de matérias primas faz-se necessário esforço na gestão do estoque adequada para os tipos de pelota que estão para entrar na linha de produção.

A gestão das matérias primas mencionadas é uma atividade intrínseca ao processo de pelotização e seguindo a metodologia proposta neste trabalho foi associada ao custo fixo do processo produtivo. Mas vale ser ressaltado que caso ocorra necessidade de compra de um novo aditivo para a adição de um produto na linha de produção esta premissa seria alterada significativamente. Afinal, estaríamos considerando a necessidade de um novo contrato, mais tempo de gerenciamento de estoque, também mais restrição no espaço físico e eventuais contaminações dos aditivos que implicariam em variação na qualidade do produto podendo resultar em produção fora da especificação.

Como ocorre no processo de produção de *sinter feed*, a necessidade de segregação de matérias primas e posterior homogeneização pode implicar na geração de gargalos e por consequência na redução da capacidade de produção.

Após a etapa de preparação de matérias primas o fluxo de produção é contínuo e independentemente do tipo de pelota em produção todo o processo é utilizado.

A perdas associadas a potenciais perdas de produtividade em função das características das pelotas devem ser consideradas nos custo variável deste produtos.

#### **4.5.4.2.2 Estocagem da pelota em pátios**

Na etapa de estocagem a disposição adequada das pelotas com a devida separação dos tipos faz-se necessário e novamente a variedade de produtos pode implicar em perda de eficiência e também em contaminação. Produtos fora de especificação normalmente demandam descontos para serem comercializados. Caso demorem a ser vendidos, ocorre redução da área de estocagem que dependendo do planejamento de embarque das pelotas em navios pode resultar em perdas em função de redução do ritmo de produção.

#### **4.5.4.2.3 Custo de setup na pelotização**

No processo de pelotização para que não haja contaminação entre a última pilha do produto em produção e a primeira pilha do produto a entrar na linha de produção ocorre um processo de transição. Este processo consiste em reduzir a presença dos materiais referentes ao produto em produção para que o sistema possa receber de forma mais rápida o material do produto a ser produzido. Neste processo o sistema de moagem,

espessamento, e homogeneização passam por um processo de limpeza através do esvaziamento do circuito e posterior enchimento como o novo material.

Neste processo é necessário que seja reduzida a produção da usina a fim de evitar que a instabilidade gerada no sistema por este processo seja prolongada e implicando numa quantidade de produto de transição maior que o necessário.

Como é possível perceber neste processo naturalmente são gerados produtos que não possuem as características do produto que está deixando de ser produzido e nem do que está entrando em produção. Estes custos devem ser associados a variedade. Considerando que com maior número de produtos na linha de produção será necessário um maior número de transições este impacto é naturalmente agravado.

A estimativa do impacto na produtividade e na geração de materiais fora do especificado associados a transição entre produtos devem se basear nos dados históricos da empresa. Os dados considerados neste trabalho são meramente ilustrativos.

A análise do impacto da variedade de produtos nos processos de mineração e de pelotização são de mesma natureza porém, podem possuir comportamentos distintos. Naturalmente o modelo proposto deve ser capaz de processar estas diferenças e garantir o melhor portfólio para empresa independente do comportamento da curva de penalização da diversidade de produtos.

#### **4.6 Modelo proposto**

Para se garantir um método eficiente de planejamento de portfólio foi proposto um modelo que contempla a integração de um modelo matemático para suporte ao planejamento, capaz de maximizar o resultado da empresa contemplando a penalização por variedade de produtos, e processos de inteligência de mercado. Esta integração visa alimentar, ou retro-alimentar, os processos de planejamento de longo prazo e análise de mercado a fim de considerar o impacto da decisão da empresa nos indicadores de mercado, como demanda, oferta e preço dos produtos avaliados.

O modelo matemático de suporte ao planejamento foi desenvolvido com o objetivo de maximizar o lucro da empresa, selecionando quantos e quais produtos serão produzidos e em qual unidade de produção deverão ser associados. Além disso, faz necessários que a penalização de variedade de produtos independente da natureza ou comportamento desta curva de penalização em cada um dos processos.

A seguir serão apresentados o modelo e a descrição textual de cada uma das restrições contempladas.

### Parâmetros

- $P$ : Conjunto de períodos avaliados
- $N$ : conjunto de produtos
- $U$ : conjunto de usinas
- $Q_u \subseteq N$ : conjunto de produtos possíveis de serem produzidos na usina  $u \in U$
- $\rho_n^p$ : margem bruta de cada produto  $n \in N$  no período  $p$ .
- $f_n^p$ : custo fixo de se operar uma usina  $u \in U$  no período  $p$ .
- $b_{du}^p$ : custo associado a se produzir  $d = 1, \dots, |Q_{uj}|$  produtos diferentes na usina  $u \in U$ , representa o custo de complexidade do processo em função da diversidade de produtos, no período  $p$ .
- $r_n^p$ : limitante superior à quantidade do produto  $n \in N$  a ser produzida, dado pelo valor mínimo entre a demanda por  $n$  no mercado e a oferta de  $n$  que a empresa pode disponibilizar no mercado considerando as restrições de disponibilidade interna da empresa, no período  $p$ .
- $w_u^p$ : capacidade de produção da usina  $u \in U$  no período  $p$ .
- $g_u^{+p}$ : Custo de ativar a usina  $u \in U$  no período  $p$ .
- $g_u^{-p}$ : Custo de desativar a usina  $u \in U$

### Variáveis

- $x_{nu}^p$ : produção do produto  $n \in Q_u$  na usina  $u \in U$  no período  $p$ .
- $h_u^p$ : assume 1 se a usina  $u \in U$  é ativada, e 0 caso contrário
- $v_u^{+p}$ : assume 1 se a usina  $u \in U$  muda do estado desativada para o estado ativada, e 0 caso contrário.
- $v_u^{-p}$ : assume 1 se a usina  $u \in U$  muda do estado ativada para o estado desativada, e 0 caso contrário.
- $y_{nu}^p$ : assume 1 se o produto  $n \in Q_u$  é produzido na usina  $u \in U$ , e 0 caso contrário
- $z_{du}^p$ : assume 1 se  $d, d = 1, \dots, |Q_{uj}|$ , produtos são produzidos na usina  $u \in U$ , e 0 caso contrário

$$\max \sum_{p \in P} \sum_{u \in U} \left( \sum_{n \in Q_u} \rho_n^p x_{nu}^p - f_u^p h_u^p - \sum_{d=1}^{|Q_u|} b_{du}^p z_{du}^p - v_u^{+p} g_u^{+p} - v_u^{-p} g_u^{-p} \right) \quad (7)$$

$$\sum_{u \in U} x_{nu}^p \leq r_n^p \quad \forall n \in N, \forall p \in P \quad (8)$$

$$\sum_{n \in Q_u} x_{nu}^p \leq w_u^p \quad \forall u \in U, \forall p \in P \quad (9)$$

$$x_{nu}^p - w_u^p y_{nu}^p \leq 0 \quad \forall u \in U, \forall n \in Q_u, \forall p \in P \quad (10)$$

$$y_{nu}^p - h_u^p \leq 0 \quad \forall u \in U, \forall n \in Q_u, \forall p \in P \quad (11)$$

$$\sum_{d=1}^{|Q_u|} d z_{du}^p - \sum_{n \in Q_u} y_{nu}^p = 0 \quad \forall u \in U, \forall p \in P \quad (12)$$

$$\sum_{d=1}^{|Q_u|} z_{du}^p \leq 1 \quad \forall u \in U, \forall p \in P \quad (13)$$

$$v_u^{+p} - \left( h_u^p - h_u^{(p-1)} \right) \geq 0 \quad \forall u \in U, \forall p \in P, \quad (14)$$

$$v_u^{-p} + \left( h_u^p - h_u^{(p-1)} \right) \geq 0 \quad \forall u \in U, \forall p \in P, \quad (15)$$

$$0 \leq h_u^p \leq 1 \quad \forall u \in U, \forall p \in P \quad (16)$$

$$0 \leq v_u^{+p} \leq 1 \quad \forall u \in U, \forall p \in P \quad (17)$$

$$0 \leq v_u^{-p} \leq 1 \quad \forall u \in U, \forall p \in P \quad (18)$$

$$x_{nu_p} \geq 0 \quad \forall u \in U, \forall n \in Q_u, \forall p \in P \quad (19)$$

$$y_{nu_p} \in \{0,1\} \quad \forall u \in U, \forall n \in Q_u, \forall p \in P \quad (20)$$

$$z_{du_p} \in \{0,1\} \quad \forall u \in U, \forall n \in Q_u, \forall p \in P \quad (21)$$

O problema proposto é um problema de maximização de margem, portanto a primeira componente desta equação é formada pela margem de cada um dos produtos avaliados em cada uma das usinas avaliadas. Os parâmetros de cálculo dessa equação são o preço previsto para os produtos, custo variável, que está associado ao produto e o custo de operação das usinas, que naturalmente é associada as unidades operacionais.

A seleção da combinação de produtos e usinas são regidos pelas regras descritas nas equações de (8) a (11).

Na equação (8) a produção dos produtos está restrita ao parâmetro  $r_u$ . Este parâmetro representa o menor valor entre a demanda do produto mapeada e a capacidade de produção estimada para o produto  $n$ . Assim é possível garantir que o produto na linha de produção tenha produção planejada compatível tanto com a disponibilidade de insumos, seja proto-minério ou mesmo algum aditivo necessário, quanto com a demanda do produto pelos clientes.

Já na equação (9) é garantida que a produção da usina seja limitada a sua capacidade de produção -  $w_u^p$ .

A equação (10) faz associação do produto a usina de forma que a margem da empresa a máxima possível. Este mecanismo é ativado através da variável binária  $y_{nu}^p$ . Quando a variável  $y_{nu}^p$  assumir o valor 1 o produto será selecionado para ser produzido na usina  $u$ . Caso  $y$  assuma o valor 0 o produto não será produzido na usina. Vale chamar atenção que foi previsto um parâmetro para associar o produto  $n$  a usina  $u$ :  $Q_u$ . Ou seja, as regras descritas acima serão válidas para o produto  $n \in Q_u$ .

A restrição (11) é responsável por garantir que um produto  $n$  ativo esteja associado a uma usina ativa. Ela é descrita pela diferença de duas variáveis binárias limitadas superiormente por 0. Uma responsável pelo controle e ativação dos produtos,  $y_{nu}^p$  e uma segunda,  $h_u^p$ , responsável pelo controle e ativação das usinas. Esta restrição indica que um produto deve estar associado a uma usina, enquanto que uma usina pode ou não ter o produto  $n_u$  associado a ela para estar ativa.

A variável  $h_u^p$ , está presente na segunda componente da função objeto. Essa é responsável por debitar da primeira componente, a margem bruta, o custo fixo de operação da usina. Esse é descrito pelo parâmetro  $f_u^p$ . Portanto, toda usina ativa

implicará em redução no valor da função objetivo do custo fixo referente a usina ativada.

Na terceira componente está descrita a penalização de diversidade de produtos no portfólio. Nessa componente estão considerados todos os custos e perda de margem associados ao incremento de produtos no portfólio. Para garantir que o modelo proposto fosse aplicado a qualquer complexidade da curva de penalidade, essa foi descrita em intervalos discretos de forma que o custo de penalidade fosse associada a um única diversidade de produtos. A curva de penalidade é descrita no parâmetro  $b_{du}^p$ . A Figura 18 ilustra a discretização da curva de penalidade de produtos  $b_{du}^p$ . No eixo x estão representadas as quantidades de produtos avaliadas, enquanto que no eixo y são representados os custos associados a cada uma das quantidades de produtos com valores em x.

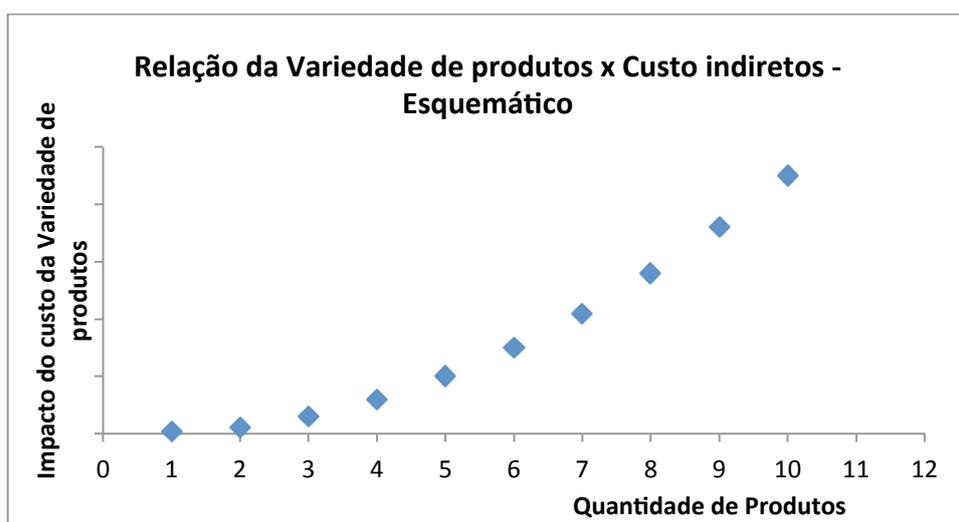


Figura 18 Comportamento da curva de variedade de produtos vs. Custos indiretos

Para que esta abordagem funcionasse adequadamente as Equações (12) e (13) são fundamentais. Na Equação (12) a quantidade de produto  $d$  é associada ao somatório de produtos ativos através da variável  $z_{du}^p$ . Já a Equação (13) garante que somente um custo de variedade será ativo através da contagem dos valores de  $z_{du}^p$  iguais a 1.

Vale chamar atenção que todas as equações estão sujeitas a um índice de tempo,  $p$ . Este parâmetro representa o número de períodos em avaliação e permitirá a visualização da evolução do portfólio e produção da empresa de acordo com as variáveis demanda e preço dos produtos mapeados pelo processo de inteligência de mercado.

Dependendo da dinâmica do mercado do produto avaliado uma nova avaliação nos processos de inteligência de mercado deve ser considerada, uma vez que a oferta de produtos pode influenciar a dinâmica de formação de preços e conseqüentemente influenciar o resultado do modelo.

A próxima seção apresentará a aplicação do modelo e iteração com alguns modelos/ferramentas de inteligência de mercado a fim de ilustrar a dinâmica do método proposto.

## 5 Aplicação do método proposto – Resultados e discussões

Para realização dos experimentos computacionais de aplicação do método proposto foi utilizado um workstation HP Z600 com dois processadores Intel Xeon(R) 2.27GHz e com 3 GB de memória RAM.

O sistema operacional instalado na máquina foi Windows 7 64-bit.

A implementação do modelo foi realizada em AMPL. O solver utilizados foi o CPLEX.

### 5.1 Minérios não aglomerados - Sinter feed

Nesta avaliação foram considerados três sistemas produtivos, num horizonte de dez anos.

Neste período foi considerado um total de vinte e quatro produtos demandados para a empresa, sendo cinco produtos associados ao sistema norte, onze produtos ao sistema sudeste e oito produtos ao sistema sul. O processo de mapeamento da demanda é fruto de interações da área comercial com os clientes e a partir da previsão de demanda de aço por mercado é realizada uma projeção da demanda desses produtos para o horizonte avaliado.

Diante da demanda já descrita no modelo a empresa deve tomar a decisão de quais e qual quantidade destes produtos serão atendidas por seu plano de produção.

Para avaliar a resposta do modelo frente a diferentes entradas de dados de demanda e cenário de preço de produtos foram realizados experimentos considerando dois níveis de preço e seis níveis de demanda.

A Tabela 8 apresenta o perfil de produtos no portfólio indicados pelo modelo para a empresa para os diferentes cenários de demanda e preço para os produtos *sinter feed* considerados no estudo.

Para classificar os produtos em especiais ou padrão foi levado em consideração a vocação do sistema produtivo, ou seja, os produtos padrão são aqueles de maior capacidade de produção, enquanto os especiais são os produtos com menor capacidade de produção, mas possuem características específicas para um nicho do mercado.

Tabela 8 Resultados do modelo para avaliação do portfólio de *sinter feed*

		Cenário Preço minério referência\$100/t	Cenário Preço minério referência\$55/t
Recuo de 30% na demanda de SF	Número de Produtos Padrão	7	6
	Produção de produtos padrão (Mt ano)	174	148
	Número de Produtos Especiais	4	5
	Produção de produtos padrão (Mt ano)	46	72
	FO	122892	46338
Recuo de 15% na demanda de SF	Número de Produtos Padrão	7	6
	Produção de produtos padrão (Mt ano)	196	173
	Número de Produtos Especiais	4	2
	Produção de produtos padrão (Mt ano)	24	47
	FO	123390	46740
Recuo de 10% na demanda de SF	Número de Produtos Padrão	7	6
	Produção de produtos padrão (Mt ano)	199	179
	Número de Produtos Especiais	1	1
	Produção de produtos padrão (Mt ano)	21	41
	FO	123503	123503
Demanda referência	Número de Produtos Padrão	7	6
	Produção de produtos padrão (Mt ano)	220	220
	Número de Produtos Especiais	0	0
	Produção de produtos padrão (Mt ano)	0	0
	FO	123640	46906
Incremento de 10% na demanda de SF	Número de Produtos Padrão	6	6
	Produção de produtos padrão (Mt ano)	220	220
	Número de Produtos Especiais	0	0
	Produção de produtos padrão (Mt ano)	0	0
	FO	123649	46906
Incremento de 20% na demanda de SF	Número de Produtos Padrão	6	6
	Produção de produtos padrão (Mt ano)	220	220
	Número de Produtos Especiais	0	0
	Produção de produtos padrão (Mt ano)	0	0
	FO	123649	46906

Os experimentos demonstraram que a fim de maximizar a margem da empresa o número de produtos é reduzido, a fim de maximizar a produção, uma vez que a redução de produção devido ao manuseio dos protos produtos foram identificadas como a maiores fontes de perdas associadas a variedade de produtos.

Foi observado que o número de produtos no portfólio só foi incrementado quando a demanda de produtos padronizados não foi suficiente para manter a empresa operando. Estes resultados são apresentados nos cenários de recuo de 15 e 30% de produção apresentados na Tabela 8. Neste ponto a decisão avaliada no modelo é variedade de produtos vs. interrupção da operação de uma unidade operacional. Naturalmente este comportamento ocorre como defesa do negócio, uma vez que aumentar a diversidade de produtos no cenário de pouca demanda foi mais lucrativo que do que a alternativa de interromper a operação de uma ou mais minas.

Por outro lado, quando foi avaliado o cenário de maior demanda, cenários de incremento de 10 e 20% de produção apresentados na Tabela 8, o número de produtos no portfólio pode ser reduzido ainda mais, uma vez que existia demanda suficiente dos produtos standards para ocupara a linha de produção.

Foi possível observar que a decisão de diversidade de produtos priorizados na linha de produção é sensível ao cenário de preço praticado. Executando o modelo para os mesmos cenários de produção, o número de produtos no portfólio para um cenário de preço significativamente menor, apresentado na coluna cenário preço minério referência USD\$55/t, foi possível observar que o portfólio resultante teve o número de produtos reduzido quando comparado ao cenário de preço referência, uma vez que o impacto do incremento de produtos na produção das minas seria maior que a margem resultante neste cenário. Porém, quando foram consideradas variações de demandas o portfólio encontrado possui o mesmo número de produtos do cenário com maior preço.

Os experimentos apresentados até agora somente mostraram quais são as principais variáveis que influenciam a seleção do portfólio de uma empresa do setor de mineração. Porém, a questão aqui é sobre o posicionamento da empresa. Até neste ponto o modelo foi utilizado para avaliar um risco de se proteger de uma oscilação do mercado de produção de aço através do portfólio de produtos. No contexto no qual foi aplicado o modelo, a empresa responde às oscilações do mercado. Porém, considera apenas as questões associadas à previsão de demanda e como ela pode reagir, enquanto que para

melhor aproveitar os benefícios de variedade de produto a empresa deveria influenciar as bases de equilíbrio do mercado.

Avaliando-se estes resultados sem atentar para outras questões externas ao fluxo produtivo pode-se inferir que em função das características do processo contínuo o comprometimento da produção da empresa os melhores portfólios deverão ser os portfólios de produtos mais enxutos possíveis. Porém, como exposto na revisão da literatura ao se avaliar a customização em massa para uma empresa deve-se atentar para as variáveis de mercado como previsão de demanda e preços dos produtos ofertados.

Como as componentes de variedade de produtos da função objetivo reduzem o valor dessa equação, naturalmente o modelo proposto indicará o portfólio com menor número de produtos que resulte em maior margem, considerando a demanda dos produtos disponíveis na linha de produção.

Para que o método proposto tenha sentido prático a remuneração adequada para a adição de valor através do aumento da variedade de produtos deve ser discutida. Para tanto, foram consideradas as características da demanda de cada um dos produtos avaliados neste trabalho.

### **5.1.1 Iteração custo de variedade e variáveis de mercado**

O processo de formação de preços do produto *sinter feed* é função do custo de produção do player de pior posicionamento na curva de custo para atender a demanda de minério prevista para o período em avaliação. Ou seja, a precificação do *sinter feed* segue o conceito de concorrência perfeita ou pura. Nestas condições o preço praticado no mercado independe do nível de produção da empresa. Isto significa que a empresa só tem de se preocupar com a quantidade de produto ela deseja produzir, e obviamente a qual custo é indicado que ela produza. Seja qual for a quantidade produzida, ela só poderá vendê-la a um preço: o preço de suporte do mercado.

Outro ponto que deve ser observado é que existe uma diversidade de produtos ofertados no mercado por diferentes players que são capazes de no preço adequado substituir o *sinter feed* ofertado pela empresa avaliada.

Portanto, a prática de preços diferentes de produtos específicos pode não ser sustentável no longo prazo, o que sugere que recuperar os custos inerentes à diversidade de produtos no portfólio pode ser uma tarefa difícil de ser emplacada.

Para avaliar o comportamento da resposta do modelo considerando variações nos preços dos sinter feeds num horizonte de dez anos. Neste contexto ocorreu o desequilíbrio entre oferta e demanda de sinter feed, seja por aumento da oferta ou redução da demanda, que implicou em redução do patamar de preços a partir do período dois até o sexto período da avaliação. A partir do sétimo período ocorreu ligeira recuperação dos preços.

A Figura 19 ilustra a resposta do modelo considerando um possível cenário no qual os preços do sinter feed retraem ao longo de um período de dez anos. Como vimos anteriormente este comportamento pode ser efeito de um incremento da oferta maior que o incremento da demanda por minério de ferro, ou mesmo por uma situação onde ocorra retração da demanda de minério de ferro para um mesmo nível de oferta.

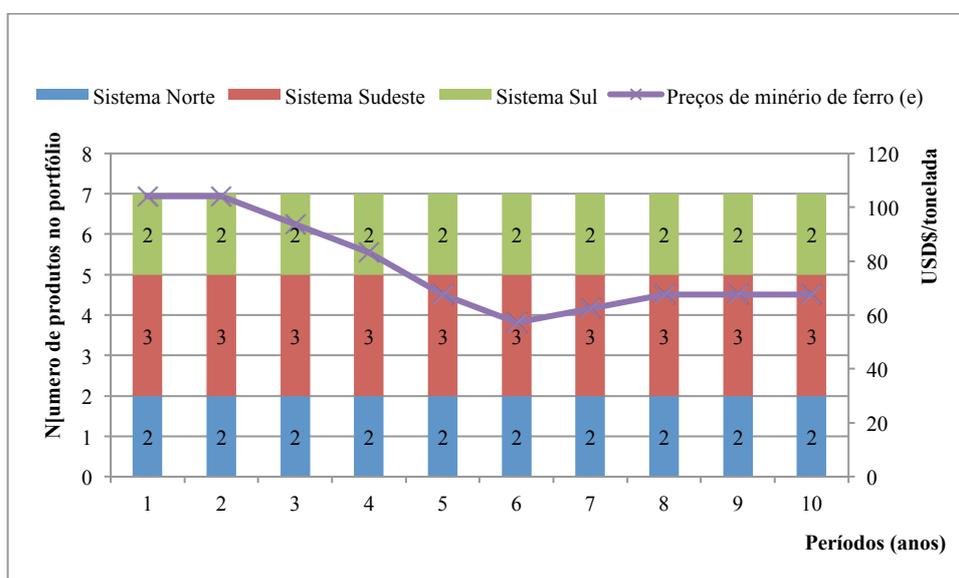


Figura 19 Comportamento do portfólio de produtos sinter feed ao longo de dez anos num cenário de preços decrescentes

Foi possível verificar que independente do preço considerado, seja um preço elevado, que permita a empresa obter elevadas margens (períodos um a quatro), ou com o preço baixo, resultando em margens menores para a empresa (períodos cinco a dez) o portfólio não foi alterado. Esse comportamento se deve ao fato de que incrementando o número de produtos ofertados a produção da empresa seria prejudicada sem alternativas de retomada do patamar de lucros.

Neste caso resta a empresa manter-se vigilante aos custos de produção para evitar que seja ela a empresa que poderá deixar o mercado em função dos preços de seus produtos não justificarem a manutenção de suas operações.

Para ilustrar qual seria o posicionamento da empresa caso ocorresse um aumento do desequilíbrio entre oferta e demanda mais acentuada que o representado no cenário anterior foi realizado um experimento no qual o preço de minério chegaria no patamar de \$43/ tonelada de minério, a partir do período sete. Nesta condição o modelo indica para a empresa que a forma de se manter mais lucrativa seria interrompendo a produção dos sistemas Norte e Sul, uma vez que o custo de produção, custo total por tonelada de minério, destes sistemas seriam maiores que o preço praticado para o seus produtos. Adicionalmente o portfólio resultante indicado para o único sistema que estaria em produção foi reduzido a um produto, uma vez que a adição de novos produtos poderiam implicar em perda da competitividade do sistema e como consequência a empresa poderia ter que interromper na totalidade suas operações.

Este cenário é apresentado na Figura 20.

Para avaliar o resultado do modelo num cenário onde ocorresse recuperação dos preços no horizonte avaliado um novo experimento foi realizado considerando a retomada de preços no período 10. Nesse período o preço considerado foi na ordem de USD\$80/ tonelada de minério. Nesse contexto, a resposta do modelo para os períodos de preços reduzidos foi a mesma do cenário anterior, onde não ocorreria recuperação dos preços, porém, no período 10 o modelo indicou que a produção dos sistemas anteriormente parados fossem retomadas. Afinal, o preço considerado seria suficiente para gerar margem positiva nos produtos do sistemas anteriormente parados.

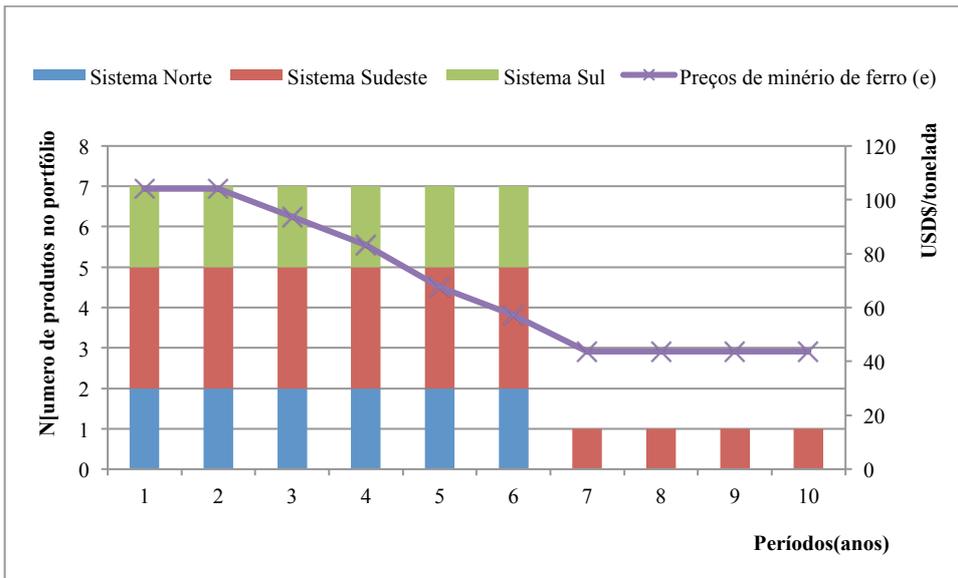


Figura 20 Resultados do modelo indicando que a empresa deveria encerrar as operações em dois de seus sistemas produtivos de *sinter feed* no cenário de margens negativas

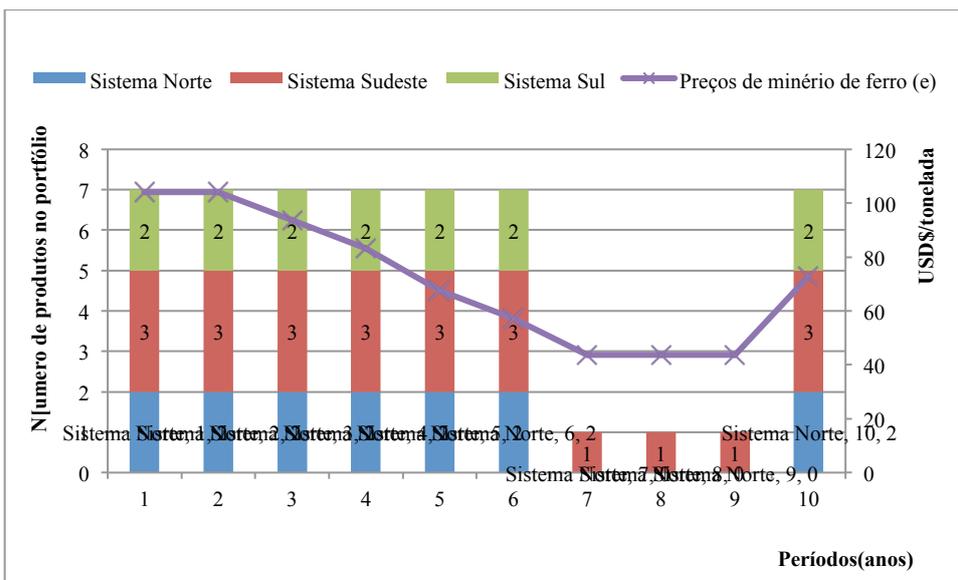


Figura 21 Resultados do modelo indicando que a empresa deveria encerrar as operações em dois de seus sistemas produtivos de *sinter feed* no cenário de margens negativas e retomada quando os preços reagissem

A interpretação dos resultados apresentados indicam que caso a empresa estivesse realmente correndo o risco de interromper as operações em função de variação no preço do minérios, a empresa em questão deveria se antecipar e buscar tornar-se mais competitiva reduzindo seus custos operacionais para que num cenário de baixos preços estivesse bem posicionada na curva de custo e pudesse manter-se em operação com margens de lucros positivas.

Outra informação que é possível extrair da análise é que no mercado de sinter feed, que possui dinâmica de formação de preços com comportamento similar ao de um mercado com concorrência perfeita a variedade de produtos pode não gerar os resultados esperados para essa ferramenta de geração de valor. Isso porque foi possível verificar que o incremento do número de produtos pela empresa traria consequências negativas, como a redução de produção, que poderiam não ser recuperados pela precificação dos produtos incrementados no portfólio da empresa.

Desta forma, é possível inferir que a dinâmica do mercado de sinter feed é favorável para a prática de um portfólio enxuto e que a empresa foque esforços para redução dos custos e maximização da produção.

## **5.1 Pelota de minério de ferro**

Seguindo a mesma linha dos experimentos realizados para os produtos *sinter feed*, a avaliação do portfólio dos produtos pelota foi realizada primeiramente verificando o comportamento do modelo frente a variações da demanda e no preço destes produtos.

O objetivo é avaliar a resposta do modelo, portfólio e nível de produção, frente a diferentes entradas de dados de demanda e cenário de preço de produtos.

O sistema produtivo considerado para a linha de produtos pelota possui onze usinas em operação, com vinte e dois produtos possíveis de serem produzidos, sendo oito produtos no sistema sudeste, que conta com oito usinas, oito produtos no sistema sul, que conta com duas usinas e sei produtos no sistema norte que conta com apenas uma usina.

A Tabela 9 apresenta o resultado do modelo considerando variações na demanda de pelotas e de preço deste produto a fim de avaliar o comportamento da resposta do modelo.

Nessa tabela, as variações da demanda são apresentados na divisões de linha, enquanto que as duas variações de preço.

Em princípio os experimentos seguiram a mesma lógica dos experimentos realizados para o produto *sinter feed*. Ou seja, a variedade de produtos só foi incrementada como forma de assegurar a produção da capacidade total dos sistemas produtivos. Mesmo no cenário de preços menores a variedade de produtos não seria atrativa para o negócio uma vez que implica em redução da capacidade produtiva seja via necessidade de maior número de transições de produtos quanto por manuseio e gerenciamento dos estoques.

A razão deste comportamento é ligada à penalização de variedade de produtos presente na função objetivo. Desta forma o modelo busca maximizar a presença dos produtos de maior margem, minimizando a quantidade de produtos no portfólio, enquanto a demanda dos produtos ativados no cenário referência foi suficiente para manter as plantas em operação. Esse comportamento somente é alterado quando a perda de produção devido à redução potencial por redução dos produtos ativos no cenários referencia foi maior que a penalidade da diversidade de produtos, ilustrados nas linhas dos cenários com 10 e 15% de redução na demanda de pelotas.

A variação dos preços do produto não alterou a dinâmica descrita e no experimento com forte redução de preços o portfólio não foram alterados.

Tabela 9 Resultados do modelo para avaliação do portfólio de pelotas de minério de ferro

		Cenário Preço minério referência\$100/t	Cenário Preço minério referência\$55/t
Recuo de 15% na demanda de pelotas	Número de Produtos Padrão	12	12
	Produção de produtos padrão (Mt ano)	57,5	57,5
	Número de Produtos Especiais	5	5
	Produção de produtos padrão (Mt ano)	7,0	7,0
	FO	14621.5	13690.8
Recuo de 10% na demanda de pelotas	Número de Produtos Padrão	12	12
	Produção de produtos padrão (Mt ano)	61,5	61,5
	Número de Produtos Especiais	1	1
	Produção de produtos padrão (Mt ano)	3	3
	FO	14880.2	13935.6
Demanda referência	Número de Produtos Padrão	12	12
	Produção de produtos padrão (Mt ano)	64,5	64,5
	Número de Produtos Especiais	0	0
	Produção de produtos padrão (Mt ano)	0	0
	FO	14986.8	14033.2
Incremento de 10% na demanda de pelotas	Número de Produtos Padrão	10	10
	Produção de produtos padrão (Mt ano)	64,5	64,5
	Número de Produtos Especiais	0	0
	Produção de produtos padrão (Mt ano)	0	0
	FO	15117.3	14163.7
Incremento de 20% na demanda de pelotas	Número de Produtos Padrão	10	10
	Produção de produtos padrão (Mt ano)	64,5	64,5
	Número de Produtos Especiais	0	0
	Produção de produtos padrão (Mt ano)	0	0
	FO	15254.2	14304.3

Mas diferentemente dos *sinter feed*, em se tratando da demanda de pelota de minério de ferro a forte elasticidade em relação ao preço é característica marcante.

Essa diferença é atribuída ao processo de formação de preços do *sinter feed*, que segue o conceito de competição perfeita, e a formação do preço das pelotas é formado pela atratividade da pelota para o produtor de aço, dependendo do cenário de custos de combustíveis.

A Figura 22 ilustra a diferença do comportamento da demanda em função ao preço dos produtos *sinter feed* e pelota de minério de ferro. O comportamento da demanda de *sinter feed* é inelástica ao preço, enquanto que a demanda de pelota de minério de ferro responde de forma negativa quando o preço da pelota é incrementado. A causa desta diferença de comportamento é a simples: O *sinter feed* é a base da fonte de ferro na carga metálica da produção de aço mundial, enquanto que a pelota é uma alternativa de incremento de desempenho do processo de redução. Ou seja, não existe uma segunda opção sustentável que substitua o *sinter feed*, enquanto que a pelota o próprio *sinter* é a principal alternativa à pelota de minério de ferro.

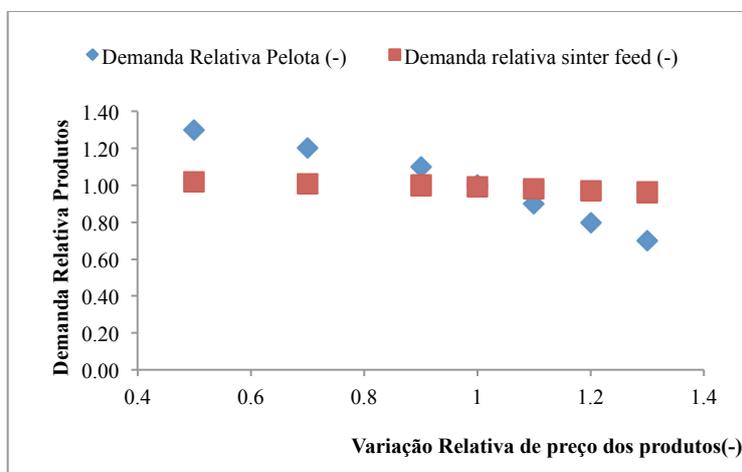


Figura 22 Gráfico ilustrativo esquemático de comparação do comportamento da demanda de *sinter feed* e pelota de minério de ferro vs. preço

Esta forte elasticidade demonstrada na Figura 22 indica que uma estratégia a ser avaliada para aplicação da customização em massa para a pelota de minério de ferro é influenciar a elasticidade.

Uma forma de se influenciar a elasticidade é ofertando um produto novo de melhor qualidade que os existentes. Vale chamar atenção que o objetivo deste novo produto não

é deslocar um outro produto do tipo pelota, mas sim gerar uma nova demanda de pelotas. Portanto, para que essa estratégia seja bem sucedida o cliente correto, parceiro correto, deve ser bem selecionado e abordado com um proposta de valor atrativa.

A Figura 23 e a Figura 24 mostram como que um produto mais competitivo que os produtos existentes no mercado podem influenciar a elasticidade do preço da pelota de minério de ferro.

Na Figura 23 é apresentada uma situação representando a demanda natural de pelotas e seus respectivos preços de substituição. O esquema apresentado na Figura 24 ilustra qual seria a demanda e o preço de substituição da pelota adicional a ser ofertada para os clientes parceiros selecionados.

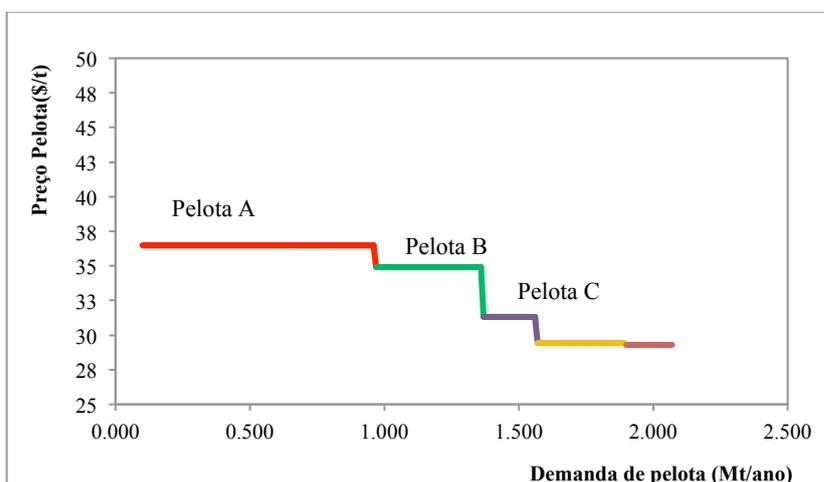


Figura 23 Ilustração esquemática da demanda de pelotas original

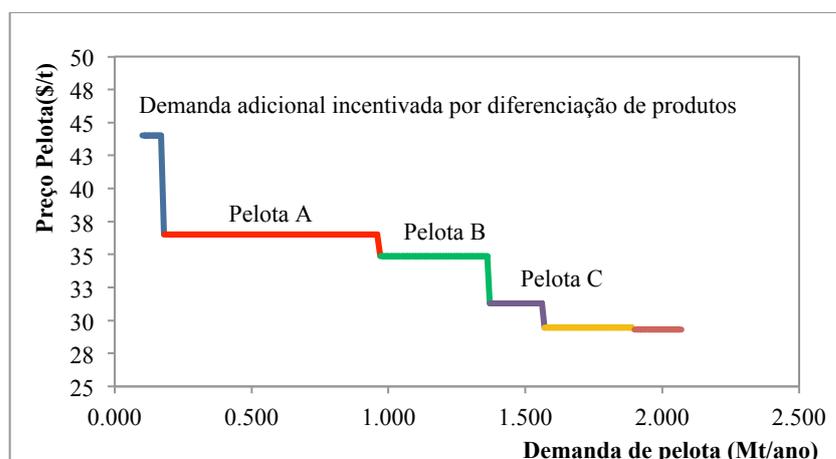


Figura 24 Ilustração do efeito da entrada de um produto diferenciado na demanda de pelotas

Na curva proposta, ilustrada na Figura 24, a demanda do novo produto é incrementada à demanda já existente, ilustrada na Figura 23. Ou seja, a pelota proposta deve ser competitiva em relação a principal opção de matéria prima da siderurgia, o sínter. Ou seja, para incentivar a demanda extra de pelotas a empresa deve dedicar esforço em desenvolvimento de produtos e propor para o nicho que clientes adequados um produto que possa desestimular a produção de sínter, desde que possua um preço adequado.

Ou seja, para que esta demanda seja realmente adicional à demanda natural, a estratégia de precificação será um driver importante. Afinal, caso o preço deste produto seja o preço de equilíbrio entre este produto e o sínter a elasticidade pode não ser impactada, conforme ilustrado na Figuras 25, uma vez que o preço de equilíbrio é volátil em função de outras variáveis de mercado. A Figura 26 mostra como a demanda a este novo produto será mais sustentável caso possua um preço competitivo com relação ao sínter.

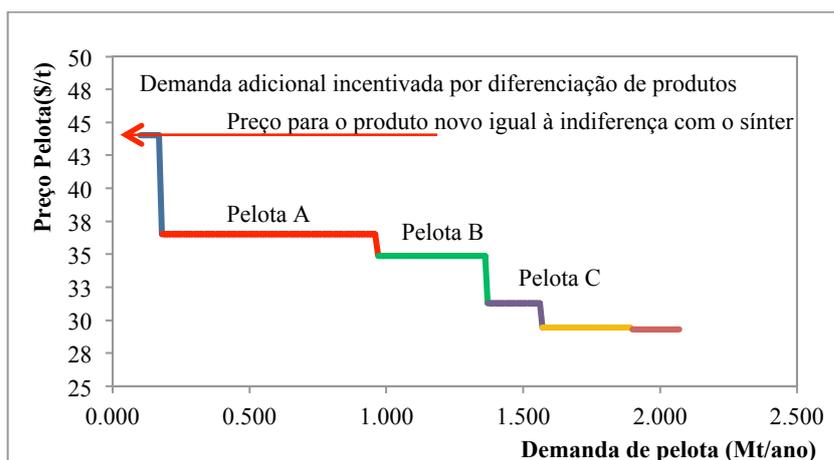


Figura 25 Estratégia de precificação do produto no preço de indiferença entre novo produto e sínter

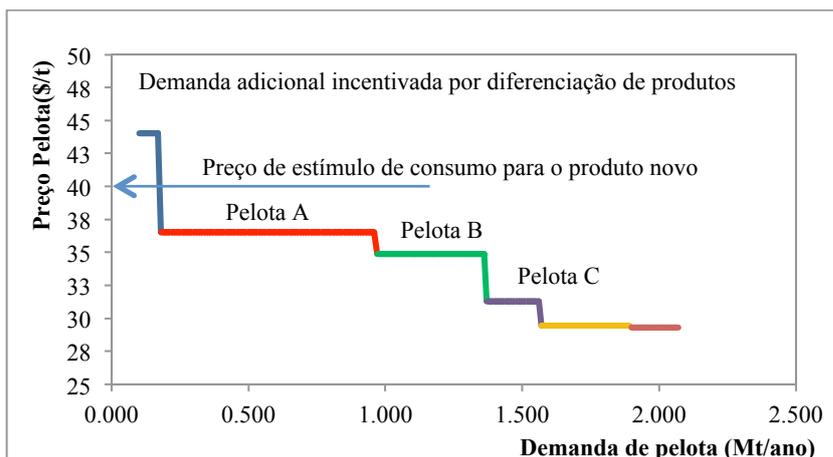


Figura 26 Estratégia de precificação do produto abaixo do preço de indiferença entre o novo produto e sínter.

Por outro lado, a empresa deverá buscar uma forma de remunerar adequadamente seu portfólio afim de recuperar o custo de se incrementar um produto prêmio em sua linha de produção. Naturalmente, o menor valor que a empresa deverá faturar a mais em função da inclusão de um ou mais produtos na linha de produção será o custo da variedade quantificado anteriormente. Porém, como precificar este produto será fundamental na estratégia de implementação da estratégia de customização de massa da empresa. Caso a empresa associe o ganho ao produto incluído, ou aos produtos incluídos na linha de produção a demanda continuará com alto nível de elasticidade. Por outro lado, caso a empresa precifique este produto seguindo o mesmo método de precificação que rege o preço dos produtos existentes o resultado será que os produtos específicos possuirão uma demanda mais robusta uma vez que o preço resultante pode ser abaixo do preço de equilíbrio entre a nova pelota e o sínter.

Desta forma a empresa ainda poderia ter redução dos seus lucros, afinal o repasse dos custos da elevação de produtos na linha de produção refletiu sobre os produtos da empresa que podem não ser receptivos ao mercado. Porém, como enfatizamos a demanda dos novos produtos foi estimulada de forma que ela seja incremental a demanda existente anteriormente. Como a oferta de pelota continua mesma o equilíbrio do mercado foi deslocado, e os preços dos produtos foram ajustados como um todo. O comportamento deste fenômeno foi ilustrado na Figura 27.

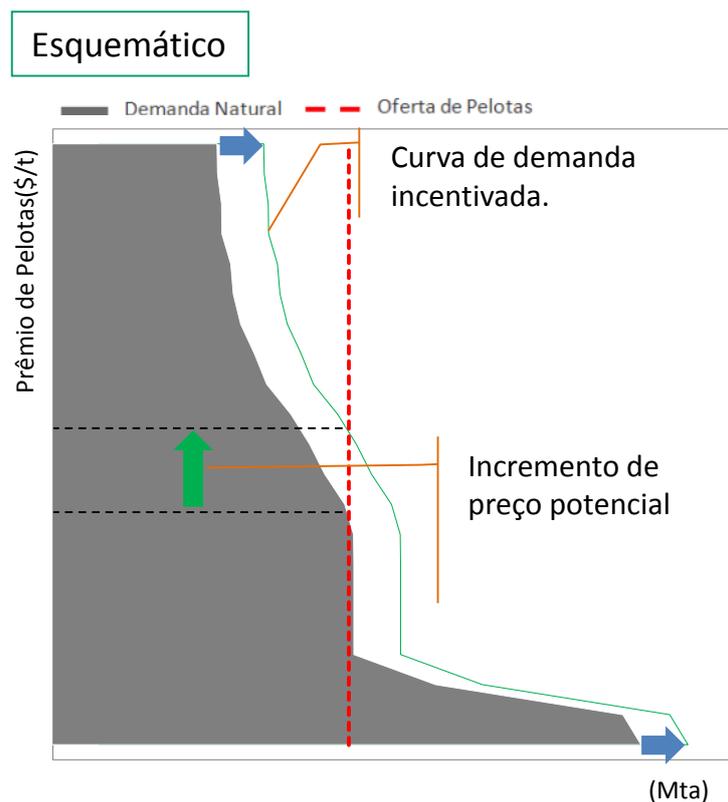


Figura 27 Dinâmica do efeito do estímulo do consumo adicional de pelotas no preço da pelota.

Para testar a aplicabilidade desta hipótese foram realizadas algumas simulações considerando o cenário de preços de pelota recuando ao longo do horizonte de dez anos. Observem na Figura 28 que o portfólio de produto não foi alterado quando os preços foram alterados.

O cenário ilustrado na Figura 28 testa o comportamento do portfólio de produto numa condição onde é previsto dos preços das pelotas de minério de ferro em função de alteração no equilíbrio no mercado. Este fenômeno pode ocorrer tanto por aumento da oferta ou mesmo por redução da demanda. Como resultado é possível esperar que o resultado da empresa seja impactado. De posse desta informação a empresa poderia se antecipar e planejar uma estratégia para contornar esta condição. A alternativa proposta neste trabalho sugere que a empresa dedique tempo e recurso no desenvolvimento de produtos e obviamente na prospecção de clientes para o consumo deste novo produto de forma incremental a demanda existente.

A Figura 29 ilustra o efeito da inclusão de um produto adicional no portfólio para influenciar o equilíbrio entre oferta e demanda de pelotas com o intuito de reduzir a exposição do mercado.

Para se elaborar este cenário foi considerado que o mínimo a se obtido com esta manobra seria o custo adicional de se aumentar um produto no portfólio. A partir deste dado a fórmula de elasticidade foi utilizada para se determinar quanto deste novo produto deveria se vendido para deslocar o preço da pelota para zerar as perdas, conforme demonstrado na fórmula abaixo:

$$\text{Elasticidade} = \Delta q / \Delta \$ \quad (23)$$

$$\Delta q = \text{Custo de variedade} * \text{Elasticidade} \quad (24)$$

$\Delta q$ : variação da quantidade de produto ofertado.

$\Delta \$$ : variação do preço de equilíbrio do produto referente a variação da oferta do produto.

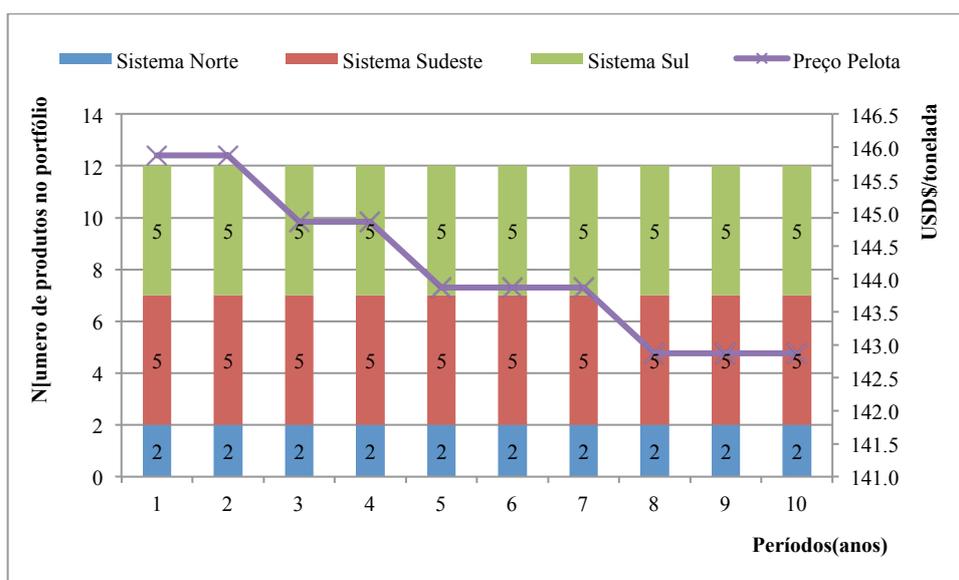


Figura 28 Evolução do portfólio de produtos com a redução do preço da pelota ao longo do horizonte de dez anos

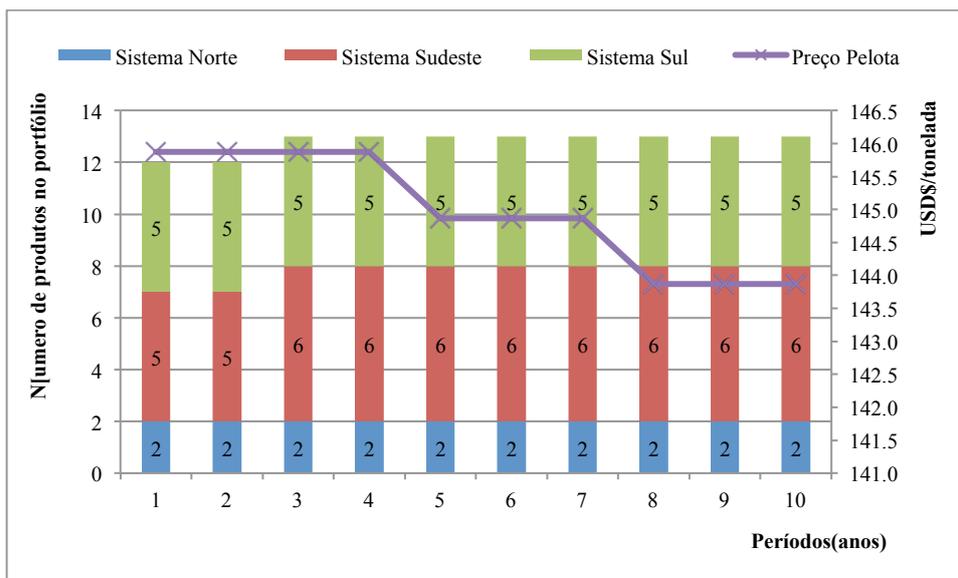


Figura 29 Evolução do portfólio de produtos a inclusão de um novo produto no portfólio para minimizar a redução do preço da pelota ao longo do horizonte de dez anos

Como resultado é esperado que exista uma correção dos preços de pelota com um todo, afinal o incremento da demanda para uma mesma capacidade produtiva de pelota, ou seja, mesma oferta desloca o equilíbrio do mercado elevando os preços da pelota.

Para avaliar como se comportariam os resultados da empresa utilizando o recurso proposto para se defender do cenário projetado na Figura 29 foram realizados experimentos para diversos níveis incrementais de um produto prêmio na linha de produção da empresa.

A Tabela 10 e a Tabela 11 apresentam os resultados destes experimentos, com seus respectivos impactos nos preços estimados na curva de demanda vs. oferta de pelotas. Sendo que a tabela 14 tem como base um índice de preço de minério de USD\$100 e a Tabela 11 tem como base os preços de minério em USD\$55. Além disso, estão apresentados os custos de variedade de produtos, bem como o impacto na função objetivo.

Tabela 10 Tabela resultados sensibilidade da função objetivo ao método proposto preço  
base USD\$100/t

	Caso referência	Venda adicional de 800.000t/ ano do novo produto		Venda adicional de 1.5Mt/ ano do novo produto		Venda adicional de 2.0Mt/ ano do novo produto	
		Sem ajuste de preço	Considerando ajuste no preço	Sem ajuste de preço	Considerando ajuste no preço	Sem ajuste de preço	Considerando ajuste no preço
Número de produtos	12	13	13	13	13	13	13
FO	13890.3	13858.05	13913.2	13851.6	14730.4	13845.15	14873.2
Incremento do custo de variedade USD/t	–	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-0.7	-0.7
Variação Preço de equilíbrio USD/t pelota	–	–	0.8	–	1.5	–	2.0

Tabela 11 Tabela resultados sensibilidade da função objetivo ao método proposto preço  
base USD\$55/t

	Caso referência	Venda adicional de 800.000t/ ano do novo produto		Venda adicional de 1.5Mt/ ano do novo produto		Venda adicional de 2.0Mt/ ano do novo produto	
		Sem ajuste de preço	Considerando ajuste no preço	Sem ajuste de preço	Considerando ajuste no preço	Sem ajuste de preço	Considerando ajuste no preço
Número de produtos	12	13	13	13	13	13	13
FO	13743.3	13720.7	14269.6	13716.5	14530.8	13842.5	14802.3
Incremento do custo de variedade USD/t	–	-0.4	-0.4	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6
Variação Preço de equilíbrio USD/t pelota	–	–	0.8	–	1.5	–	2.0

Os resultados apresentados nas Tabela 10 e Tabela 11 mostram que a função objetivo do modelo foram incrementados quando foi considerado que a demanda adicional de pelotas poderia resultar em deslocamento do preço de pelota maior que a incremento de custos oriundos da variedade de produtos. Ou seja, é possível inferir que enquanto a elasticidade do preço da pelota em relação à venda incentivada do produto prêmio for maior que o custo de variedade será possível para a empresa utilizar do método proposto para se defender das eventuais variações do mercado.

É possível observar que nos dois cenários de preços avaliados o comportamento foi similar. Porém, ambos os comportamentos partiram do princípio que o cruzamento da previsão de demanda e oferta ocorria numa região de forte elasticidade. Caso o cruzamento ocorresse numa região mais elevada do esquema apresentado na Figura 27, por exemplo, provavelmente a elasticidade poderia implicar em variações de preço menores que o incremento de custos e esta abordagem não seria recomendada.

Os resultados detalhados por período pode ser observado na Tabela 12.

A utilização dos fundamentos de equilíbrio de mercado como alavanca de valor poderia resultar em ganhos para a empresa. Para tanto seria necessário a combinação de estratégias de precificação e de alocação de produtos adequadas para suportar a estratégia de diversificação de produtos afim de maximizar o lucro da empresa.

Desta forma, mesmo a pelotização sendo um processo de produção contínuo, como o processo de produção de sinter feed, as características da demanda viabilizam o uso do portfólio de produtos como ferramenta de maximização dos lucros da empresa.

Tabela 12 Resultados detalhados por período e comportamento do preços em função do descolamento do equilíbrio do preço de mercado.

	Cenário Preço minério referência \$100/t	Cenário Preço minério referência \$55/t
Casos referência	<p>FO: 13890.3</p>	<p>FO: 13743.3</p>
Venda adicional de 800.000t do novo produto	<p>FO: 14269.6</p>	<p>FO: 14269.6</p>
Venda adicional de 1.500.000t do novo produto	<p>FO: 14730.4</p>	<p>FO: 14530.8</p>

<p>Venda adicional de 2.00.000t do novo produto</p>	<p>FO: 14873.2</p>	<p>FO: 14802.3</p>
	<p>FO: 14873.2</p>	<p>FO: 14802.3</p>

FO: 14873.2

FO: 14802.3

## 6 Conclusões

Neste trabalho foi proposto um método de avaliação da viabilidade de se utilizar o portfólio de produtos como forma de alavanca de resultados de uma empresa mineradora.

Este método é baseado na integração de um modelo de suporte ao planejamento de longo prazo, que considera a penalidade se incluir um ou mais produtos no portfólio de produtos da empresa avaliada, e processos de análises de inteligência de mercado. Nos processos de inteligência de mercado destacam-se as análises de projeção de preços de produtos, considerando o processo de formação de preços de cada um dos produtos avaliados.

O método proposto mostrou que a análise de portfólio deve ser específica para o tipo de produto em análise, uma vez que para dois produtos do mesmo tipo de indústria foi possível verificar que a estratégia de utilizar o portfólio de produtos como alavanca de valor teve impactos diferentes. Na análise em questão o processo de formação de preços foi decisivo para se inferir se a diversidade de produtos seria ou não uma abordagem com potencial de sucesso.

Dessa forma o presente trabalho vem cobrir uma lacuna importante na bibliografia uma vez que a avaliação da atratividade de variedade de produtos era focada na indústria de bens de consumo, deixando a indústria de base a margem das discussões sobre o tema.

Por outro lado existem desafios para o sucesso da estratégia proposta. Para que a variedade de produtos traga ganhos para a empresa além do processo de formação de preços ser favorável, será necessário que existam clientes parceiros interessados no novo produto(s) de maneira que a demanda seja incremental à demanda natural existente.

De qualquer forma, avaliando-se tanto as variáveis do processo produtivo e também as variáveis do tipo de mercado do produto pelota de minério de ferro, foi indicada uma potencial atratividade da diversificação do produto. Esta viabilidade está associada a influência do equilíbrio do mercado através do incentivo à demanda adicional de uma pelota fruto de um processo de desenvolvimento de produtos. Portanto, enquanto variação de preço em função do deslocamento da demanda de produto for maior que os

custos adicionais da inclusão de um ou mais produtos na linha de produção, a estratégia de diferenciação de produtos será favorável para a empresa.

Isso quer dizer que a ferramenta poderia contribuir para a empresa se preparar com antecedência para variações de preço de seus produtos, tanto para sínter feed quanto para pelotas de minério de ferro, que serão identificados nos processos de inteligência de mercado. A ferramenta mostrou que a variedade de produtos não seria uma via de incremento de ganhos, porém, uma vez que for identificado potencial de incremento de preços em função de crescimento da demanda maior que a oferta de produtos a empresa deveria trabalhar para aproveitar o ciclo incrementando sua produção. Por outro lado, caso a empresa venha a identificar potencial de redução dos preços de seus produtos a empresa deveria buscar reduzir seus custos de produção para garantir que sua produção não aquela que suportará o preço do minério e ter a menor a menor margem do mercado.

Já para o produto pelota de minério de ferro seria possível utilizar a variedade de produtos como alavanca de valor e agir de forma pró-ativa para proporcionar margens maiores para a empresa, tanto nos cenários de previsão de redução dos preços quanto para o cenário de incremento nos preços dos produtos. No cenários de incremento dos preços a ferramenta mostrou que seria importante um trabalho junto ao clientes e mostrar a importância de privilegiar a produção e garantir que o volume ofertado minimize o desequilíbrio entre demanda e oferta, o que iria minimizar o impacto nos preços dos produtos. Essa abordagem de negociação seria uma abordagem “ganha-ganha” que poderia garantir maiores ganhos tanto para empresa quanto para o cliente.

Por outro lado, considerando o cenário de redução dos preços e conseqüentemente margem, a empresa poderia usar a variedade de produtos como alavanca de valor incentivando com antecedência a demanda por produtos específicos para clientes selecionados com critério, uma vez que a demanda por estes produtos “novos” deverá ser adicional a demanda natural do produto pelota. Desta forma o equilíbrio entre oferta e demanda de pelotas poderá ser deslocado e minimizar a redução de margem da empresa em função da redução de preços de seus produtos.

## **7 Trabalhos futuros**

A evolução desse trabalho prevê a inclusão da previsão de percepção potencial de valor para diferentes produtos no horizonte avaliado. Esse desenvolvimento permitirá que características individuais do produto sejam precificadas a fim de permitirem uma maior confiança na estimativa de margem dos produtos.

Outro ponto a ser implementado será a individualização das penalidades identificadas. Desse forma cada uma das penalidade de variedades mais importante passariam a possuir sua própria curva de penalidade.

Essa melhoria pode implicar em forte incremento de esforço computacional e novos estudos podem ser motivados no âmbito de métodos computacionais.

## 8 Referência Bibliográfica

Banker, R.; Bardhan, I. & Cooper, W. (1996). A note on returns to scale in dea. *European Journal of Operational Research*, 88(3):583--585.

Banker, R. D. (1984). Estimating most productive scale size using data envelopment analysis. *European Journal of Operational Research*, 17(1):35--44.

Benjaafar, S.; Kim, J.-S. & Vishwanadham, N. (2004). On the effect of product variety in production–inventory systems. *Annals of Operations Research*, 126(1-4):71--101.

Berry, W. L. & Cooper, M. C. (1999). Manufacturing flexibility: methods for measuring the impact of product variety on performance in process industries. *Journal of Operations Management*, 17(2):163--178.

Da Silveira, G.; Borenstein, D. & Fogliatto, F. S. (2001). Mass customization: Literature review and research directions. *International journal of production economics*, 72(1):1--13.

Davis, S. M. (1989). From future perfect: Mass customizing. *Planning Review*, 17(2):16--21.

Eastwood, M. A. (1996). Implementing mass customization. *Computers in Industry*, 30(3):171 – 174. ISSN 0166-3615. Computer Integrated Manufacturing.

ElMaraghy, H.; Schuh, G.; ElMaraghy, W.; Piller, F.; SchÄ{nsleben, P.; Tseng, M. & Bernard, A. (2013). Product variety management. {CIRP} *Annals – Manufacturing Technology*, 62(2):629 – 652. ISSN 0007-8506.

Fernandes, R.; Gouveia, J. B. & Pinho, C. (2012). Product mix strategy and manufacturing flexibility. *Journal of Manufacturing Systems*, 31(3):301 – 311. ISSN 0278-6125.

Fujita, K. (2002). Product variety optimization under modular architecture. *Computer-Aided Design*, 34(12):953--965.

He, H. & Pindyck, R. S. (1992). Investments in flexible production capacity. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 16(3):575--599.

- Helo, P.; Xu, Q.; Kristianto, Y. & Jiao, R. J. (2013). Withdrawn: Decision support system for product variety management. *Journal of Engineering and Technology Management*.
- Hougen, D. R. & Ahuja, N. (1993). Estimation of the light source distribution and its use in integrated shape recovery from stereo and shading. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 148--155.
- Hu, S.; Zhu, X.; Wang, H. & Koren, Y. (2008). Product variety and manufacturing complexity in assembly systems and supply chains. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 57(1):45--48.
- Huang, S.-M. & Su, J. C. (2013). Impact of product proliferation on the reverse supply chain. *Omega*, 41(3):626--639.
- J A Quelch, D. (1994). Extend profits, not product lines. *Harvard Business Review*, September/October:153--160.
- Jahanshahloo, G. R. & Soleimani-Damaneh, M. (2004). Estimating returns to scale in data envelopment analysis: A new procedure. *Applied Mathematics and Computation*, 150(1):89--98.
- Jiao, J. R.; Simpson, T. W. & Siddique, Z. (2007). Product family design and platform-based product development: a state-of-the-art review. *Journal of intelligent Manufacturing*, 18(1):5--29.
- Kotha, S. (1996). From mass production to mass customization: The case of the National Industrial Bicycle Company of Japan. *European Management Journal*, 14(5):442--450.
- Lancaster, K. (Summer, 1990). The economics of product variety: A survey. *Marketing Science*, 9(3):189--206.
- M. Martin, W. Hausman, K. I. (1999). Design for variety. *Product Variety Management: Research Advances Kluwer International Series in Operations Research and Management Science*, pp. 103--122.

Morgan, L. O.; Daniels, R. L. & Kouvelis, P. (2001). Marketing/manufacturing tradeoffs in product line management. *Iie Transactions*, 33(11):949--962.

Nélo, A. M. (2008). *Decisão de mix de produtos: comparando a teoria das restrições, o custeio baseado em atividades e o modelo geral com a utilização de custos discricionários*. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo.

Thompson, D. V.; Hamilton, R. W. & Rust, R. T. (2005). Feature fatigue: When product capabilities become too much of a good thing. *Journal of Marketing Research*, pp. 431--442.

Thonemann, U. W. & Bradley, J. R. (2002). The effect of product variety on supply chain performance. *European Journal of Operational Research*, 143(3):548--569.

Varian, H. (2010). *Intermediate Microeconomics: A Modern Approach*. W.W. Norton & Company. ISBN 9780393934243.

Wan, X.; Evers, P. T. & Dresner, M. E. (2012). Too much of a good thing: The impact of product variety on operations and sales performance. *Journal of Operations Management*, 30(4):316--324.

Yano, C. & Dobson, G. (1998). Profit-optimizing product line design, selection and pricing with manufacturing cost consideration. Em *Product Variety Management*, pp. 145--175. Springer.