

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO**

JOSUELDO PAJAÚ VIEIRA

**MODELO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA PARA A
COMPOSIÇÃO DO LEITO DE SÍNER EM UMA
SIDERURGICA**

**RECIFE
2017**

JOSUELDO PAJAÚ VIEIRA

**MODELO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA PARA A
COMPOSIÇÃO DO LEITO DE SÍNTER EM UMA
SIDERURGICA**

Dissertação de Mestrado apresentada à UFPE para a obtenção de grau de Mestre como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção Área de Concentração: Pesquisa Operacional.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Suzana de França Dantas Daher.

Recife

2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

V658m Vieira, Josuelo Pajaú.
Modelo de programação matemática para a composição do leito de sínter em uma siderúrgica / Josuelo Pajaú Vieira. - 2017.
49 folhas, il., tabs.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Suzana de França Daher.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2017.
Inclui Referências.

1. Engenharia de Produção. 2. Modelo de programação linear. 3. Mistura de minérios. 4. Sínter. I. Daher, Suzana de França (Orientadora). II. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-17



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO PROFISSIONAL DE

JOSUELDO PAJAÚ VIEIRA

***“MODELO DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA PARA A COMPOSIÇÃO DO LEITO
DE SÍNER EM UMA SIDERURGICA”***

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o candidato **JOSUELDO PAJAÚ VIEIRA**.

Recife, 25 de maio de 2017.

Prof. Suzana de França Dantas Daher, DSc - Orientadora

Prof. Caroline Maria de Miranda Mota, DSc – Examinadora Interna

Prof. Maisa Mendonça Silva, DSc - Examinadora Externa

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pela oportunidade de ter recebido o bem maior que um homem pode ter, a vida, principalmente quando acompanhada da sua misericórdia divina, dando-me o direito de pensar, amar e principalmente lutar por objetivos como este.

A minha família pelo apoio e dedicação, em especial o meu filho Gustavo Pajaú, pois, além de possuir apenas 4 anos de idade conseguiu compreender os momentos ausentes.

A minha Orientadora Professora Dra. Suzana Daher, pelos incentivos, ensinamentos e principalmente pela dedicação dispensada no auxílio desse trabalho.

A minha amiga Thalyta de Freitas que sempre esteve ao meu lado, contribuindo para o entendimento de palavras técnicas da língua inglesa na área de sinterização.

Ao apoio da equipe da siderúrgica SIDEPARA, pois a coleta, informações e o acompanhamento durante a análise foram de fundamental importância.

RESUMO

O problema encontrado na área de produção da SIDEPARA, especificamente na área de sinterização, está relacionado à perda de insumos, ociosidade da mão de obra e principalmente ao desperdício de energia. Para mensurar a qualidade do síter no modelo atual, precisa-se primeiramente executar todas as etapas produtivas com base na composição sugerida pelo analista, onde, este não possui nenhuma certeza quanto ao produto final. Para esta pesquisa foi desenvolvida uma aplicação matemática que realiza a composição do leito de síter por aproveitamento de resíduos siderúrgicos, onde a aplicação considera como matéria-prima os minérios que foram rejeitados em processos externos aos da sinterização. Propõe-se um modelo de programação linear atendendo uma série de restrições, de tal forma que o produto final denominado síter esteja dentro dos limites das especificações de qualidade, satisfazendo as necessidades dos altos-fornos, onde o síter será usado como coproduto. Os resultados obtidos durante o processo de produção, quando sugeridos por esta aplicação comprovaram que é possível compor um leito de síter superior ao modelo atual, mostrando-se eficiente na redução do tempo da composição do leito, ao aproveitamento dos insumos, minimizando o desgaste da mão de obra e principalmente ao excessivo uso de energia.

Palavras-Chave: Modelo de programação linear. Mistura de minérios. Síter.

ABSTRACT

The production area of SIDEPARA is dealing with a problem in the sintering area related to loss of raw material, idleness of work force and mainly to the waste of energy during the sintering process. In order to measure the quality of the sinter in real system, it is necessary performing all the production steps considering the composition suggested by an analyst, whose is not sure about the final product since his/her decision is based on past experiences and a trial and error process. For this research a mathematical application was developed that recommend a better sinter bed composition by considering the use of steelwork waste. The application considers as raw materials the ores that were rejected in external processes to sintering. Thus, a linear programming model is proposed subject to set of constraints, in such a way that the quality of the final product called sinter is within the limits of the accepted specifications to satisfy the needs of the blast furnaces, in which the sinter is used as a co-product. The results obtained by this study were considered as satisfactory during the production process, since the new suggested combination of raw material provided a better composition of a sinter bed when compared with current process. Moreover, the model proposed also seems more efficient in time reduction for sinter bed composition, better use of the raw material, minimizing the labor waste and especially promote a decreasing of energy use.

Keywords: Linear programming model. Ore mix. Sínter.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Classificação da Pesquisa científica	13
Figura 2.1 - Diagrama de um Projeto de Pesquisa Operacional.....	16
Figura 2.3 - Ilustração de um processo contínuo de sinterização.....	18
Figura 2.4 - Análise química de amostragens dos dejetos	19
Figura 2.5 - Alocação dos insumos/dejetos em suas devidas baias.....	20
Figura 2.6 - Esteira principal responsável por conduzir os insumos/dejetos até o misturador.....	20
Figura 2.7 - Misturador	21
Figura 2.8 - Esteira de mistura prepara a composição para receber a água.....	21
Figura 2.9 - Misturador adicionando água para formar micro pelotas	22
Figura 2.10 - Esteiras de grelhas exposta a temperatura de 1200° C.....	23
Figura 2.11 - Esteira que conduz ao processo de britagem	24
Figura 2.12 - Processo de resfriamento e peneiramento – processo final do sinter	25
Figura 3.1 - Composição da mistura e percentual da granulometria resultante – 1° Dia	29
Figura 3.2 - Composição da mistura e percentual da granulometria resultante – 2° Dia	30
Figura 3.3 - Composição da mistura e percentual da granulometria resultante – 3° Dia	30
Figura 3.4 - Composição da mistura e percentual da granulometria resultante – 4° Dia	31
Figura 3.5 - Composição da mistura e percentual da granulometria resultante – 5° Dia	32
Figura 3.6 - Composição da mistura e percentual da granulometria resultante	37
Figura 3.7 - Composição da mistura respeitando a perda com o fogo	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Entrada dos insumos com seus percentuais de elementos químicos	28
Tabela 4.1 - Percentual de perda das matérias primas após o processo de produção.....	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	JUSTIFICATIVA	11
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	12
1.2.1	Objetivo Geral.....	12
1.2.2	Objetivos Específicos.....	12
1.3	METODOLOGIA.....	12
1.4	SOBRE A SIDERÚRGICA ESTUDADA	14
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	15
2	BASE CONCEITUAL E REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	BASE CONCEITUAL	16
2.1.1	Programação matemática	16
2.1.2	Processo de produção da sínter	17
2.2	REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.3	RESUMO DO CAPITULO	26
3	COLETA DE DADOS PRÉ APLICAÇÃO DO MODELO.....	28
3.1	RESUMO DO CAPITULO	32
4	MODELO PROPOSTO	33
4.1	IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO	36
4.2	COLETA DE DADOS PÓS APLICAÇÃO DO MODELO – SEGUNDO CENÁRIO	37
4.3	ANÁLISE CRÍTICA QUANTO AO MODELO PROPOSTO.....	39
4.4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	39
4.5	RESUMO DO CAPITULO	43
5	CONCLUSÃO.....	44
5.1	CONTRIBUIÇÕES DESTA PESQUISA	44
5.2	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	45
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

A Sinterização é o processo que aglomera finos de minério de ferro, misturados a fundentes, adições e finos de combustíveis sólidos (Fino de Calcário, Moinha, Carepa, Pó de Balão, Lama AF, Pó de Aciaria, RAF, Retorno Interno e o *Sinter Feed* etc.). Desta mistura obtém-se um produto granulado, poroso, com propriedades físicas, químicas e metalúrgicas ideais para o consumo em Altos Fornos, denominado SÍNTER (LOO, 2014). Simplificando, a sinterização é o fenômeno no qual duas ou mais partículas sólidas se ligam pelo efeito de sucção e de aquecimento à temperatura em que ocorre o início de fusão.

Atualmente, a empresa a qual será chamada de SIDEPARA, possui sua área de sinterização em funcionamento. Todo o processo inicia-se pelo recebimento das matérias primas em suas devidas baias. Em seguida o analista usando método de tentativas e erro aponta o percentual em toneladas que cada matéria-prima deverá ser conduzida até o bloco de misturas. A condução ocorre por meio de duas esteiras e calibrando, assim, os reservatórios para iniciar o processo de dosagem de acordo com o percentual de cada insumo. Até o dia 17 de janeiro de 2017 a mistura estava sendo realizada pelo método de tentativas e erros, inclusive as matérias-primas já possuindo seu teor aferido de cada percentual químico.

Independente de conhecer o teor químico de cada insumo, faz-se necessário a presença de um profissional com grande experiência para que ele possa determinar as quantidades necessárias para dosar e compor o leito. Porém, o atual processo da composição do leito de sínter, não garante um produto final de qualidade, além da incerteza, dos valores reais que estão sendo gastos para uma determinada linha de produção.

Para JAGANNATH PAL et al. (2014), o sínter produzido com qualidade precisa atender aos requisitos mínimos: Índice de Basicidade Binária (IB): 1,8 ~ 2,0; Volume de Escória (VE): entre 14% ~ 18%; FeO: entre 4% ~ 8% e Fe: > 57%. A siderúrgica SIDEPARA, tem produzido o sínter com base nesses requisitos mínimos. Entretanto, de acordo Wu *et al.* (2014), além de atender bem a esses requisitos, também é importante atender aos custos de cada insumo relacionados à alimentação durante a composição do leito.

O problema encontrado atualmente dentro da área de produção da SIDEPARA - e especificamente a área de sinterização, está relacionando à perda de insumos, ociosidade da mão de obra e principalmente ao desperdício de energia. Os cálculos informados pelo analista durante a mistura das matérias primas não são precisos, pois tratam-se, como mencionado anteriormente, de um modelo por tentativas e erro.

Assim, no modelo atual de operação, para saber se a composição foi bem elaborada, precisa-se primeiramente executar todas as etapas produtivas com base na composição sugerida pelo analista, para, somente após essa produção ser finalizada, poder-se qualificar ou quantificar o sinter produzido.

Para esse estudo, busca-se propor para a empresa uma forma de otimização da composição do leito de sinter respeitando os requisitos anteriormente comentados, bem como a minimização das perdas de insumos, a ociosidade da mão de obra e a energia dispendida. Uma consequência imediata, além da melhoria no processo, é a redução dos impactos ambientais causados pela quantidade de rejeitos.

Com a aplicação de um modelo matemático, a composição do leito passará por uma análise dos insumos, principalmente com base nos custos de cada matéria-prima. Dando assim, um rumo diferente do processo atual: o sinter será produzido de acordo com algumas variáveis de restrição (IB, VE, FeO e Fe), minimizando o desperdício de carvão, os custos e o retorno. Como fator positivo, a maximização do volume de *Sinter*.

1.1 Justificativa

A necessidade de manter-se competitivo e alcançar seus objetivos estratégicos, tem levado as empresas a explorar novos modelos de gestão. Dentro dessa visão, as empresas estão buscando formas de administrar o negócio que seja possível adotar políticas operacionais visando minimização de custos, maximização de lucro e gerenciamento do conhecimento adquirido (Moreira, 2008). Além disso, estão sendo obrigadas também, a criar planos de negócio que considerem o desenvolvimento sustentável (WILL, 2002).

A estruturação e implementação de um planejamento estratégico de produção está relacionada à demanda e principalmente aos recursos que a empresa possui. No entanto, para algumas empresas os planejamentos nem sempre são satisfatórios, pois demanda tempo, esforços e custos desnecessários para empresa (MOREIRA, 2013).

A composição do Sinter realizado com base em um modelo matemático pode garantir a qualidade do produto final. Segundo Merschmann (2002) pode inclusive gerar benefícios para outros setores produtivos que usam o Sinter como coprodutos na fabricação do ferro.

No mundo, cerca de 70% da produção de aço é obtida via rota integrada a coque, sendo o percentual restante produzido pela rota semi-integrada. No Brasil, 77% do aço provém da rota integrada e 23% da semi-integrada, cabendo destacar que cerca

de 11% da produção de aço pela rota integrada usa carvão vegetal em substituição ao coque carvão mineral (CNI, 2012).

É evidente a necessidade de adotar um plano estratégico canalizando à sinterização e reaproveitamento de finos de minérios, onde atualmente estão sendo despejados diretamente ao meio ambiente. Há poucos estudos desenvolvidos no setor de sinterização com finos de minérios utilizando as ferramentas da Pesquisa Operacional para compor o leito de sínter. Logo, este estudo pretende desenvolver um modelo de Programação Linear otimizando a produtividade do sínter, contribuindo assim, com a redução dos impactos ambientais e principalmente os custos.

1.2 Objetivos do Trabalho

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver e validar um modelo matemático para otimizar a composição do leito de sínter, de forma a promover a minimização dos custos e dos impactos ambientais em uma siderúrgica.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- a) entender o processo de sinterização na SIDEPARA;
- b) desenvolver um modelo de programação matemática para composição do leito de sínter;
- c) realizar testes com a aplicação matemática por meio computacional;
- d) realizar a validação do modelo desenvolvido comparando com o sistema atual;
- e) propor contribuições que estejam ligadas a produção de sínter na SIDEPARA;

1.3 Metodologia

Pesquisa é um conjunto de ações, que podem ser sugeridas para descobrir a solução de um problema, tendo como base procedimentos sistemáticos. O Estudo é realizado quando se

tem um ou mais problemas e quando se consegue visualizar informações para decidir (SILVA e MENEZES, 2005).

Para Bertrand e Fransoo (2002), a maioria dos problemas dentro das organizações é apresentada na linha operacional, mostrando-se complexos e de difícil aspecto o cunho científico. No entanto uma pesquisa pode ser classificada conforme o Figura 1.1 - Classificação da Pesquisa científica.

Para Minayo e Sanches (1993, apud TEIXEIRA, 2001, p.24), a pesquisa quantitativa utiliza a linguagem matemática para descrever as causas de um fenômeno e as relações entre variáveis. Esse método considera a realidade como formada por partes isoladas; não aceita outra realidade que não seja os fatos a serem verificados; busca descobrir as relações entre fatos e variáveis; visa ao conhecimento objetivo; propõe a neutralidade científica; rejeita os conhecimentos subjetivos; adota o princípio da verificação; utiliza o método das ciências naturais – experimental-quantitativo – e propõe a generalização dos resultados obtidos.

Uma pesquisa tem suas variações e podem ser classificadas quanto a sua natureza, abordagem, objetivos e procedimentos técnicos (SILVA e MENEZES, 2005).

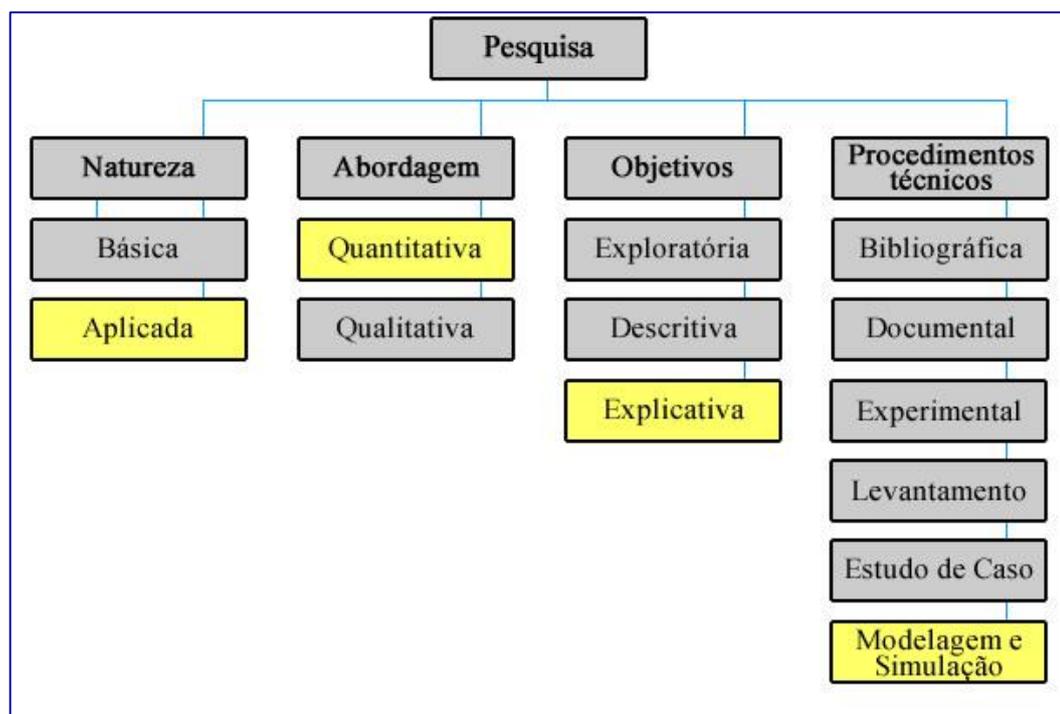


Figura 1.1 - Classificação da Pesquisa científica
Fonte: SILVA e MENEZES (2005)

Inicialmente será focado na conceitualização, ou seja, no modelo conceitual, este por sua vez, permite o pesquisador tomar decisões sobre as variáveis que precisam ser anexadas no modelo. Nesta fase será desenvolvido as relações causais entre as variáveis.

Segundo Chung (2004), a modelagem e simulação são o processo de criar e experimentar um sistema físico por intermédio de um modelo matemático computadorizado. Um sistema pode ser definido como um conjunto de componentes ou processos que se interagem e que recebem entradas e oferecem resultados para algum propósito.

Realizado os relacionamentos vinculados às variáveis, pode-se considerar ainda o custo da composição. Para Chung (2004), dentre as vantagens da simulação, podemos considerar que a possibilidade de experimentação em níveis que não são permitidos nos experimentos físicos.

Durante o processo de validação do modelo proposto, será empregado as mudanças nos parâmetros de entrada, e comparada ao modelo atual, pois, estes tendem a mudar de acordo com o resultado final da composição do leito.

1.4 Sobre a siderúrgica estudada

A empresa Siderúrgica Norte Brasil S.A – SIDEPARA, situada no distrito industrial de Marabá, no Estado do Pará, possui uma cadeia produtiva dividida em 4 unidades operacionais: Alto-forno e Sinterização, Aciaria, Laminação e Trefila. Produz 380 mil toneladas de aço laminado/ano, gerando aproximadamente 1.284 empregos diretos. Esta empresa está no mercado desde 2006, sempre atualizada e pronta para enfrentar as mudanças que ocorrem no segmento de exploração de minério, principalmente nas mudanças da legislação.

A produção que gera o sínter, apontada como adequada para os altos-fornos da SIDEPARA exige cuidados. Já existe essa preocupação por parte dos técnicos da siderúrgica, porém, com a otimização do processo, será possível atingir a redutibilidade das moléculas granulométricas, tratando a resistência da massa composta, evitando a degradação da matéria elevando ao estado ótimo.

Atualmente a zona conhecida como sinterização, possui processos de composição, porém, classificados como primária, ou seja, apenas com a experiência dos integrantes daquele setor. Espera-se que o modelo proposto, traga um produto viável para ser empregado como

coproduto do alto forno, evitando assim, desperdícios de recursos e principalmente a agressão ao meio ambiente.

1.5 Estrutura da Dissertação

Para a materialização deste trabalho foram assentados, neste primeiro capítulo, os dados canalizadores desse estudo passando por uma rápida contextualização, sendo os seguintes: introdução, justificativa para a realização desta pesquisa, objetivos a serem alcançados.

O restante desta pesquisa está organizado conforme a seguir:

No capítulo 2, as particularidades do problema pesquisado são exibidas em detalhes, bem como sua aplicação na área de sinterização de finos de minérios.

No capítulo 3 é apresentada uma formulação de programação matemática linear para o problema, propondo um modelo de simulação computacional capaz de validar os resultados e determinar o percentual de cada insumo/dejeto que farão parte da composição do leito de sínter.

O capítulo 4 inicia-se apresentando o modelo da aplicação matemática proposta para a solução do problema da composição do leito de sínter. Em seguida apresentou-se o modelo proposto que fora adaptado, justificando cada etapa das equações que seriam.

Por fim, mostrou-se uma análise crítica no modelo, que corresponde à adição de percentuais que estão previstos na queima dos insumos e conseqüentemente seriam alterados no resultado final do sínter.

No capítulo 5 é apresentado os resultados sobre o conteúdo geral conduzindo principalmente os efeitos obtidos, tais como as contribuições desta pesquisa para a SIDEPARA, incluindo as sugestões para trabalhos futuros.

2 BASE CONCEITUAL E REFERENCIAL TEÓRICO

Esse capítulo visa a apresentação dos conceitos de programação matemática necessários para o desenvolvimento deste estudo, bem como otimizar as dimensões, descrevendo os algoritmos de otimização que serão utilizados, e uma revisão da literatura acerca do tema.

1.6 Base conceitual

1.6.1 Programação matemática

A programação matemática é dividida em várias áreas de concentração, pelo uso e facilidade de aplicação, pode-se apontar: programação linear, programação não-linear, programação inteira, programação dinâmica, dentre outras. A pesquisa em questão busca tratar problemas de gerenciamento envolvendo recursos naturais e matérias reaproveitáveis na composição do leito de síter.

Em 1947 começaram a surgir os interesses em obter-se melhores resultados em produção nas indústrias e siderúrgicas. Com isso, fez-se necessário a utilização das técnicas desenvolvidas e praticadas na área militar. O intuito estava relacionado ao auxílio do planejamento e controle da produção. A Figura 2.1 representa os processos de programação matemática até o momento apresentadas (MERSCHMANN, 2002).

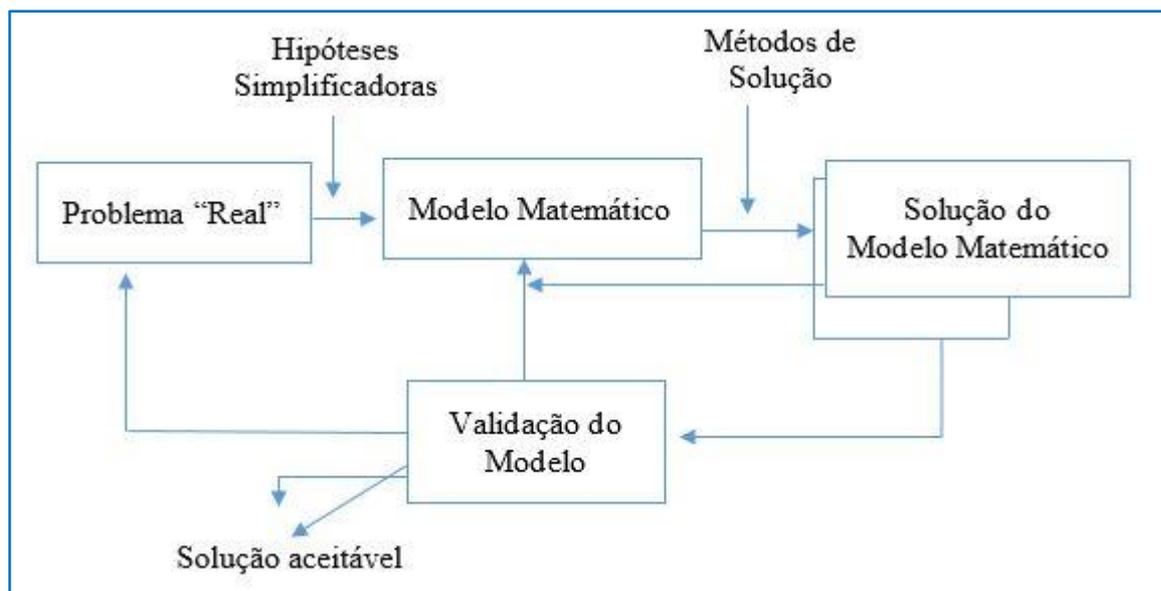


Figura 2.1 - Diagrama de um Projeto de Pesquisa Operacional
Fonte: Esta pesquisa (2017)

Programação Linear incide em métodos praticados na resolução de problemas característicos de Otimização com restrições (imposições) onde, sua Função Objetivo é LINEAR quando relacionadas as variáveis de influência x_1, x_2, \dots, x_n , e o domínio destas variáveis são obtidas por um sistema de inequações lineares.

A programação linear busca fundamentalmente localizar a melhor solução para problemas que tenham seus modelos que sejam enquadrados e certamente representados por expressões lineares. De moto geral a sua maior aplicabilidade e simplicidade são favoráveis graças à linearidade do modelo (MARINS, 2011). Os dados essenciais dos modelos de programação linear são: variáveis de decisão; função-objetivo; e restrições do problema (ANDRADE, 2002).

A pesquisa operacional (PO) é uma metodologia que auxilia o processo de decisão e busca os melhores rendimentos possíveis de uma organização. Assim, procede de técnicas e meios científicos, fundamentando-se em análises quantitativas, seu objetivo principal é obter regularidade em situações que se correlacionam aos outros conhecimentos, de forma que estes possam ser alterados ou controlado (HILLIER, 2006).

A programação não linear possui referência às estruturas que não são apresentadas em um sentido único. Apresentando sentidos ou caminhos distintos, desencadeia-se em finais múltiplos. Para Bertalanffy (1972), quando se estuda a teoria geral dos sistemas, a não linearidade pode ser facilmente comparada à sistemas complexos conduzindo a resultados distintos, inesperados até mesmo pelo seu desenvolvedor.

A programação Inteira é um modelo de otimização ao qual partes ou todas as variáveis de um determinado problema sejam pertencentes ao conjunto dos números inteiros. Assim, ao observar que todas as variáveis do problema são inteiras, passa a chamar de programação inteira pura; ao contrário, passa a ser reconhecida como programação inteira mista.

Dentre as abordagens da programação matemática, a técnica de otimização linear, apresentou-se genérica à aplicação e solução do problema que vem sendo apresentado neste estudo.

1.6.2 Processo de produção da sínter

A sinterização é um processo de aglomeração ar quente de uma mistura de finos de minérios, coque, fundentes e adições, onde o produto resultante é o sínter, apresentando características químicas, físicas e metalúrgicas apropriadas para a operação dos altos fornos.

A unidade de sinterização destacada na parte baixa da SIDEPARA, foi posicionada estrategicamente para melhor coletar os dejetos que foram expelidos do local por meio natural dos processos entendendo assim, caso esses dejetos não sejam coletados ou ainda, descartados de forma errônea, poderão acarretar agressão ao meio ambiente igualmente ou superiores às tragédias ocorridas com o derramamento de lama, caso recente envolvendo o derramamento de lama na Cidade de Mariana-MG.

O processo inicia-se de forma cuidadosa desde a separação dos dejetos até o recebimento dos resultados de análise química, em seguida serão transportados e alocados em suas devidas baias, onde estarão posicionados próximo à esteira a qual é responsável pela condução das quantidades tipificadas pelo analista, em seguida alimentando o misturador. A Figura 2.2 ilustra o processo atual da área de sinterização da SIDEPARA.

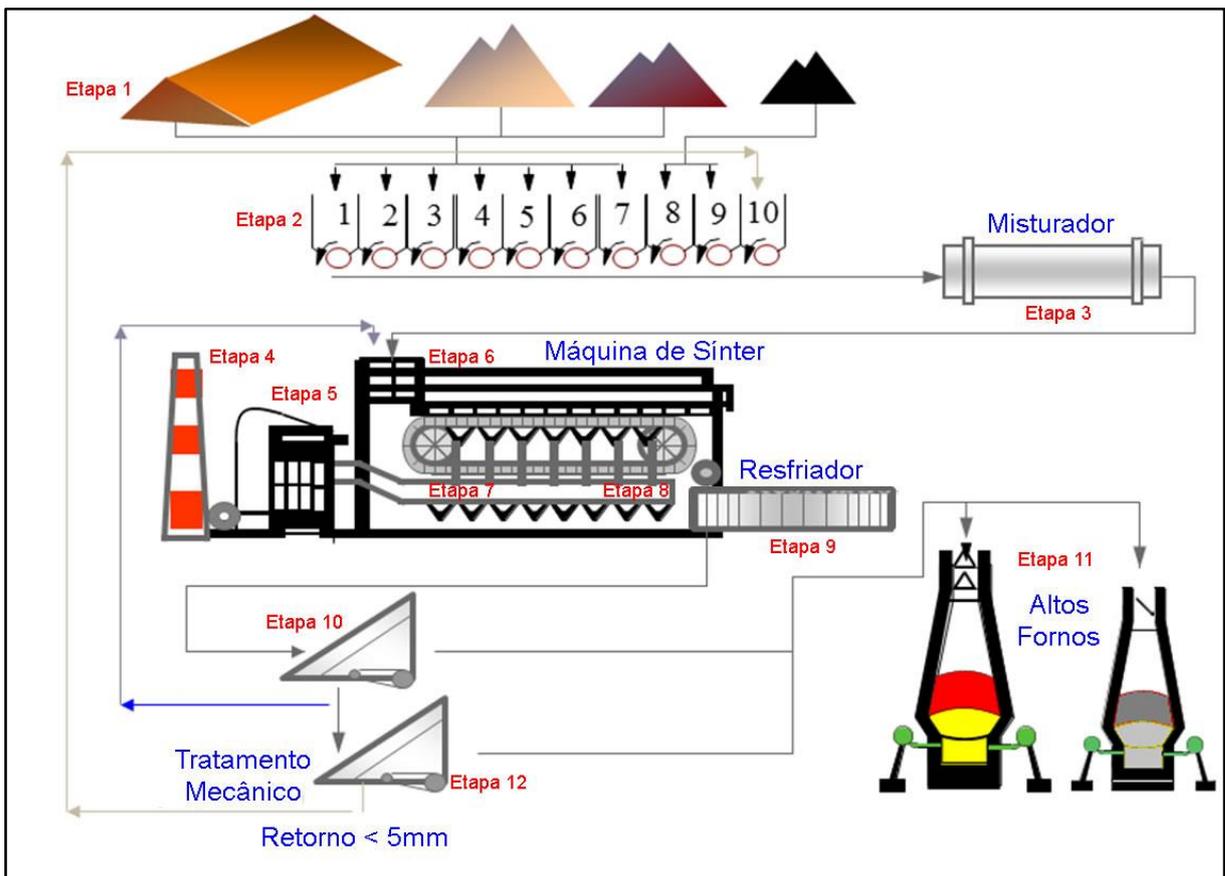


Figura 2.2 - Ilustração de um processo contínuo de sinterização
Fonte: Esta pesquisa (2017)

A Figura 1.1Figura 2.2, precisamente na etapa 1, observada de cima para baixo, podemos encontrar o galpão utilizado como repositório que aloja todos os insumos quer que

seja matéria prima ou dejetos rejeitados pelas linhas de produção das áreas como um todo da siderúrgica em questão. Em seguida, as equipes especializadas em análise técnica em metalurgia por meio de amostragens, como mostra a Figura 2.3, no intuito de tipificar e informar à equipe operacional quais as quantidades em toneladas que deverão fazer parte da composição com seus respectivos elementos químicos de cada insumo/dejetos na formação daquela composição do leito.



*Figura 2.3 - Análise química de amostragens dos dejetos
Fonte: Esta pesquisa (2017)*

O processo da composição do leito de sínter, inicia-se na dosagem de todas as matérias finas de granulometria que são elevados pela esteira de alimentação primária, precisamente na etapa 2, até no misturador etapa 3. Conforme mostrado nas Figura 2.4, Figura 2.5 e Figura 2.6 adicionando água para assim formar as micros pelotas. Este material blendado é distribuído na esteira da máquina de sínter pelos sidos de estocagens, a mistura a sintetizar é carregada sobre a esteira de grelhas e é posta a alta temperatura a partir do forno de ignição a aproximadamente 1200°C iniciando o processo de sinterização desta massa, que sofre combustão pelo ar succionado de cima para baixo ao longo do leito.



Figura 2.4 - Alocação dos insumos/dejetos em suas devidas baias
Fonte: Esta pesquisa (2017)



Figura 2.5 - Esteira principal responsável por conduzir os insumos/dejetos até o misturador
Fonte: Esta pesquisa (2017)



*Figura 2.6 - Misturador
Fonte: Esta pesquisa (2017)*

Após a mistura a seco, saindo do misturador; o leito percorre por uma esteira ilustrada na Figura 2.7, misturando assim de forma que os instrumento côncavos alternados desta esteira à qual está situada na etapa 4 do fluxo de produção possa preparar esta mistura e em seguida receber os percentuais de água à qual é responsável pela geração de granulometria.



*Figura 2.7 - Esteira de mistura prepara a composição para receber a água
Fonte: Esta pesquisa (2017)*

Passada pela etapa 4 de mistura pós esteira, inicia-se a etapa 5 de granulometria. O minério misturado começa a ficar concentrado sendo transportado e ao mesmo tempo recebendo a homogeneização de composição, sendo encaminhado para a moagem aumentando a superfície, logo resulta em granulometria de consistência fina, obtendo sua reatividade aumentada.

O consumo causado pelo desgaste das micro pelotas é elevado, uma vez que a reação de possíveis elementos químicos começam a ter reações, exemplo do estudo foi o (Fe_2O_3) pois trata de um óxido duro, exigindo assim o aditivo de água para melhor formar as micro pelotas.

Todo o processo de moagem é realizado em circuito fechado, de modo que o material mais grosseiro retorna e os finos são espessados. Assim, fica evidente a quantidade exata da adição de água conforme visto na Figura 2.8 para que essa composição não fique seca em demasia ou fique em forma de lama.



*Figura 2.8 - Misturador adicionando água para formar micro pelotas
Fonte: Esta pesquisa (2017)*

Neste momento as micro pelotas prontas para serem sinterizadas, são carregas para a esteiras em formatos de grelhas etapa 5 sendo expostas a uma temperatura de $1200^{\circ}C$ a partir do forno de ignição. Assim inicia o processo de sinterização da composição hora composta, é nesta etapa que a massa micropelotizada, recebendo combustão pelo ar succionado de cima para baixo durante todo o leito.

Na Figura 2.9 é possível visualizar três painéis em formato de grelhas, ainda aquecidas, aguardando o momento do pré-esfriamento para depois ser encaminhada para a britadeira para depois formar os tamanhos no peneiramento.



*Figura 2.9 - Esteiras de grelhas exposta a temperatura de 1200° C
Fonte: Esta pesquisa (2017)*

O processo de saída da massa desde as painelas em formato de grelha até o resfriador ocorre por meio da esteira de britagem ilustrada na Figura 2.10, ela é responsável por transportar toda a massa ainda superaquecida e de forma cronológica efetuar o despejo até o britador.



*Figura 2.10 - Esteira que conduz ao processo de britagem
Fonte: Esta pesquisa (2017)*

A frente de sinterização, termina no final da máquina de sínter, onde a massa de sinter passa ainda em um resfriador. Ao sair da máquina, o bolo de sínter passa pelas etapas de britagem e peneiramento onde poder ser melhor visualizado na Figura 2.11, que prepara o material para ser enviado para os altos fornos. Após o processo, forma-se o material aglomerado, sólido e poroso denominado sínter, as partículas superfinais geradas no processo são succionadas e direcionada para o precipitador eletroestático o pó coletado é reaproveitado no processo.

A sinterização é uma unidade que exerce importante papel no controle ambiental, pois é a maior consumidora de rejeitos gerados nos processos de produção da usina. Estes rejeitos retornam como matérias-primas no processo no processo de sinterização.



Figura 2.11 - Processo de resfriamento e peneiramento – processo final do sinter
Fonte: Esta pesquisa (2017)

1.7 Referencial teórico

Para Min Wu *et. al.* (2014), as reações químicas e mudanças físicas envolvidas no processo de sinterização são normalmente num estado de equilíbrio dinâmico, os componentes da mistura de cru, juntamente com o estado do processo e os parâmetros operacionais têm um forte efeito sobre os índices de qualidade (teor de ferro, basicidade, índice tumbler). O estado do processo e dos parâmetros de funcionamento variam continuamente e, geralmente, não pode ser determinado a partir de medições em linha. Eles estão acoplados um ao outro, e as relações entre eles são não-linear. Isso os torna difíceis de estimar. Além disso, o estado e os parâmetros têm efeitos diferentes sobre os três índices de qualidade.

De acordo com Sheng-li Wu (2013), vários tipos de minérios do mundo, entraram no mercado chinês e assim, foi afetando diretamente o desempenho das instalações de sinterização. No entanto, estudos foram realizados para encontrar uma mistura ótima dos minérios, envolvendo desta forma, o desenvolvimento de um modelo matemático eficaz para padronizar uma composição de acordo com as exigências do sinter.

De acordo com Zhengwei YU *et. al.* (2015), a importância do efeito da basicidade binária na sinterização passando por uma escala experimental, conseguiu-se resultados que indicaram os melhores resultados, rendimento, produtividade e índice de redução de (RI) do sinter final.

Após entender os processos de sinterização. E com base na afirmação Tian *et al.* (2015), entrando em comum acordo com Zhang *et al.* (2013), é notório que a metodologia mais indicada no processo da produção do sinter será a otimização das misturas para que a composição obtenha uma aglomeração adequada atendendo os pré-requisitos das variáveis de restrição.

Segundo WANG Ya-lin (2006), a estratégia inteligente na otimização se baseia na qualitativa e quantitativa, e para isso, usou um modelo para o processo de sinterização misturando Pb Zn chegando a uma mistura ótima. Para resolver esse problema ele usou duas fases, uma no processo de otimização programação linear e na segunda fase o processo da mistura.

Para ZHANG Jun-hong *et. al.* (2007), quando se pretende analisar questões de decisão muito complexa no processo de sinterização, principalmente quando envolve: custo e energia, o correto seria prever a saída desse produto, empregando à otimização por meio de um modelo matemático de programação linear. Atualmente, existem vários modelos dentro das siderúrgicas que trabalham com base nos modelos programação linear, mas que tem causado um certo desconforto, pois o processo de sinterização prático é o estado dinâmico, sendo que o formato linear não atende a essa prática.

De acordo com Vargas (2014), problemas de otimização estrutural visam o aumento do desempenho da estrutura e a diminuição de seus custos garantindo, entretanto, os requisitos de segurança aplicáveis. Devido à natureza conflitante desses aspectos, a formulação de um problema de otimização estrutural como programação linear é natural, embora pouco frequente, e tem a vantagem de apresentar um conjunto diversificado de soluções ao(s) tomador(es) de decisão.

Apesar de poucos estudos encontrados na literatura relacionadas à área de pesquisa operacional precisamente ao leito de sinter em siderúrgicas de metalurgias, este estudo traz uma solução (a ser discutido no Capítulo 3) mostrando uma evolução positiva aos processos que estão sendo desenvolvidos atualmente. Assim, o modelo matemático de programação linear proposto, aperfeiçoará as funcionalidades da produção do sinter, incluindo a minimização dos custos operacionais, desgaste da equipe técnica, redução de energia e do tempo de produção, principalmente reduzindo ou eliminando a agressão ao meio ambiente.

1.8 Resumo do capítulo

Neste Capítulo 2, foram apresentados conceitos da programação matemática necessários para o desenvolvimento deste estudo; uma prévia sobre a classificação dos principais tipos de

otimização, dando ênfase na programação matemática linear; o processo de sinterização, mostrando uma visão macro por meio de uma figura ilustrativa, percorrendo todo o processo e tipificando o passo a passo de cada momento da composição. Por fim, buscou-se fazer uma revisão de literatura para construir uma visão sobre os estudos já realizados nesta área.

No próximo capítulo será apresentada a coleta de dados da pré-aplicação do matemático proposto para melhor compor o leito de sínter.

3 COLETA DE DADOS PRÉ APLICAÇÃO DO MODELO

Neste capítulo apresenta-se o procedimento de coleta de dados utilizado para esse trabalho antes da aplicação do modelo.

Os problemas envolvendo a mistura dos insumos que fazem parte da produção de sinter inicia-se quando o técnico em mineração precisa saber qual o percentual de cada insumo deverá entrar no processo de produção. Esses percentuais são mensurados de acordo com o conhecimento adquirido na prática, na maioria das vezes, pela metodologia tentativa e erro.

Para este trabalho, fez-se necessário o acompanhamento *in loco* do processo durante 5 (cinco) dias. A empresa possui estoque dos insumos suficientes para serem misturados durante 10 (dez) dias.

A **Tabela 3.1** apresenta a entrada dos insumos com seus percentuais de elementos químicos necessários para formar a composição do leito de sinter.

Tabela 3.1 - Entrada dos insumos com seus percentuais de elementos químicos

Composição Química e Características Físicas das Matérias Primas								
INSUMOS/EQ	Fe	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	MnO	ZnO	FeO
Sinter Feed	64,0	3,4	7,5	0,7	6,5	0,9	0,0	0,0
Retorno	57,0	2,6	9,0	0,6	6,0	0,5	0,0	10,0
Calcário	1,0	0,3	54,2	1,5	2,0	0,0	0,0	0,0
Moinha	2,0	2,1	2,0	0,5	9,0	0,0	0,0	0,0
Carepa	72,0	0,2	0,6	0,1	1,0	0,6	0,0	70,0
Pó de Balão	47,0	2,7	6,0	0,6	11,2	0,6	0,0	0,0
Chumbinho	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	60,0

Fonte: Esta pesquisa (2017)

Com base na Tabela 3.1, pode-se observar que trata-se de dados fornecidos após exames executado pela equipe de análise química ilustrado na Figura 2.3. Esses dados são repassados para o analista responsável em compor a mistura do leito.

A partir do recebimento dos dados mencionados na Tabela 3.1, o analista responsável por apontar as quantidades de cada matéria, lança de acordo com sua experiência as quantidade em toneladas, iniciando assim, o processo de carregamento conforme ilustrado na Figura 2.5. O principal objetivo do analista responsável por compor a mistura está relacionado a garantir que o índice de maior saída seja concentrado em granulometria entre 10 e 15mm.

Analisando processos, iniciou-se a observação e o comportamento de cada etapa, que foram assistidos e registrados. Considerou-se como período de observação os 5 primeiros dias do mês agosto como sendo o **primeiro cenário**, ou cenário do modelo autal.

- **Primeiro dia**

No primeiro dia de acompanhamento da produção, os resultados obtidos estão apresentados na Figura 3.1.

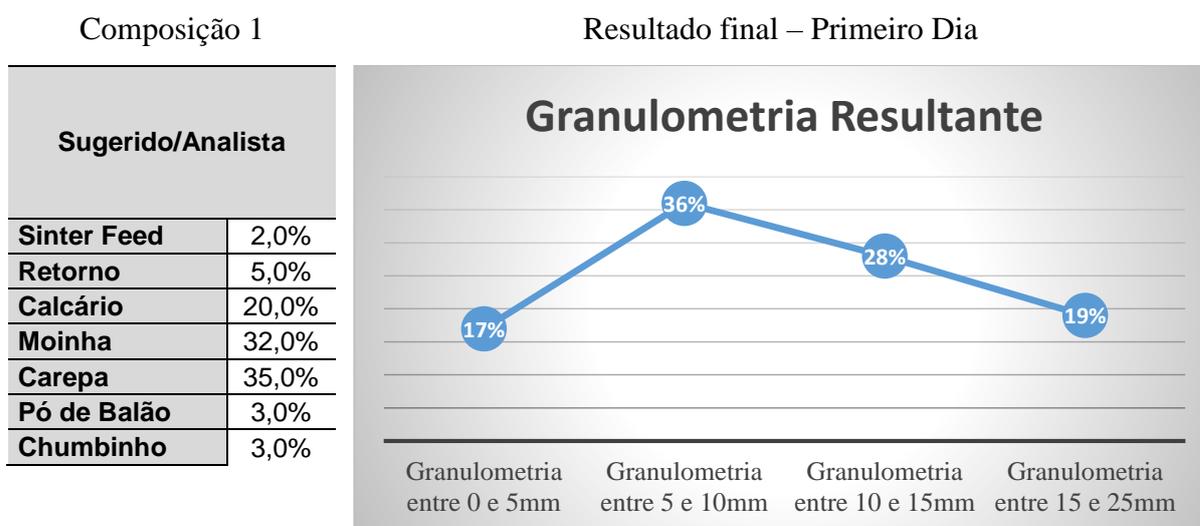


Figura 3.1 - Composição da mistura e percentual da granulometria resultante – 1º Dia
Fonte: Esta pesquisa (2017)

Para o modelo atual, no entendimento do analista, o resultado foi positivo, porém, respeitadndo o processo evitou-se a intervenção na linha de produção, nesta fase da pesquisa considerou-se como insatisfatória pois, apenas 30% seria aproveitado na produção dos altos fornos, os demais percentuais estariam gerando novamente dejetos ao meio ambiente ou formatos não esperado pela siderurgica.

- **Segundo dia**

No segundo dia de produção, foram obtidos resultados ainda mais contrários aos que estavam sendo esperados, em observação à Figura 3.2. O índice de granulometria desejada diminuiu para 26% e aumentou o percentual de dejetos. Como a granulometria entre 0 a 5mm podem ser considerados como poeira e pode ser reaproveitada em outras composições depois de passar por uma nova análise química, essa produção pode voltar ao processo, sendo assim considerado um retrabalho.

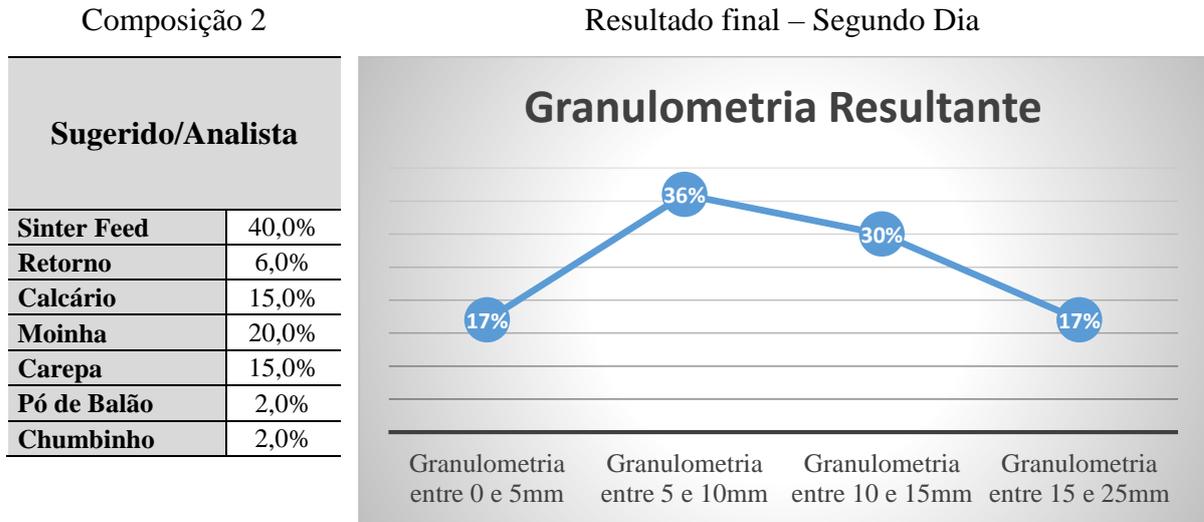


Figura 3.2 - Composição da mistura e percentual da granulometria resultante – 2º Dia
Fonte: Esta pesquisa (2017)

- **Terceiro dia:**

O cenário do terceiro dia, obteve-se uma diminuição da granulometria que é considerada inservível a qualquer processo de reaproveitamento, ainda assim, o percentual de maior relevância na produção não foi satisfatório, pois, a própria equipe julgou 33% um índice melhor do que os outros dias, mas ainda assim, poderiam ter obtido melhores resultados. Conforme ilustrado na figura a seguir.

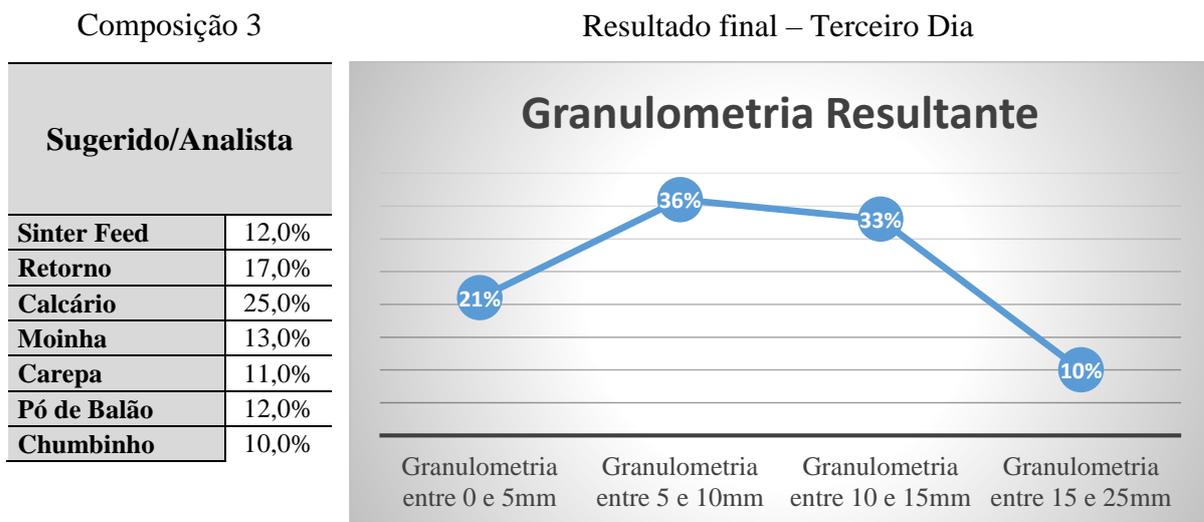


Figura 3.3 - Composição da mistura e percentual da granulometria resultante – 3º Dia
Fonte: Esta pesquisa (2017)

- **Quarto dia**

Analisando a Figura 3.4, ficou nítido uma exagerada porcentagem na granulometria entre 15 e 25mm, isso causou um elevado número de escória. Este tipo de produto resultante só é bem empregado na região em casos de aterros, quando empresas de construção civil resolve usar.

O índice de 25% ainda ficou entre um dos maiores se comparados aos cenários desde o início desta pesquisa.

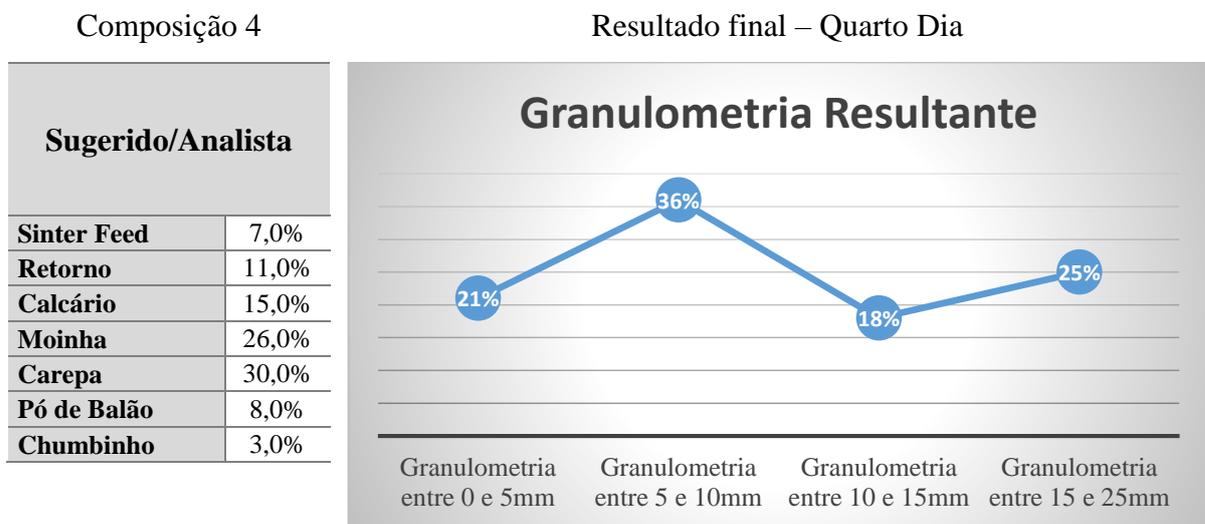


Figura 3.4 - Composição da mistura e percentual da granulometria resultante – 4º Dia
Fonte: Esta pesquisa (2017)

- **Quinto dia**

A Figura 3.5 ilustra o registro do fim da análise *in loco*. Em acordo com a siderúrgica, ficou firmado que seriam feitos 5 dias de registros buscando sempre o melhor cenário, avaliando o processo de produção atual (deles) e posteriormente, mais 5 dias utilizando o modelo proposto neste trabalho.

Assim, foram obtidos novamente 28% de granulometria resultante ideal, elevando novamente a granulometria de espessuras 5 a 10mm. Vale ressaltar que a granulometria de 5 a 10mm, quando empregada serve apenas para construção de asfalto, contrariando novamente o percentual desejado pelo processo de sinterização.

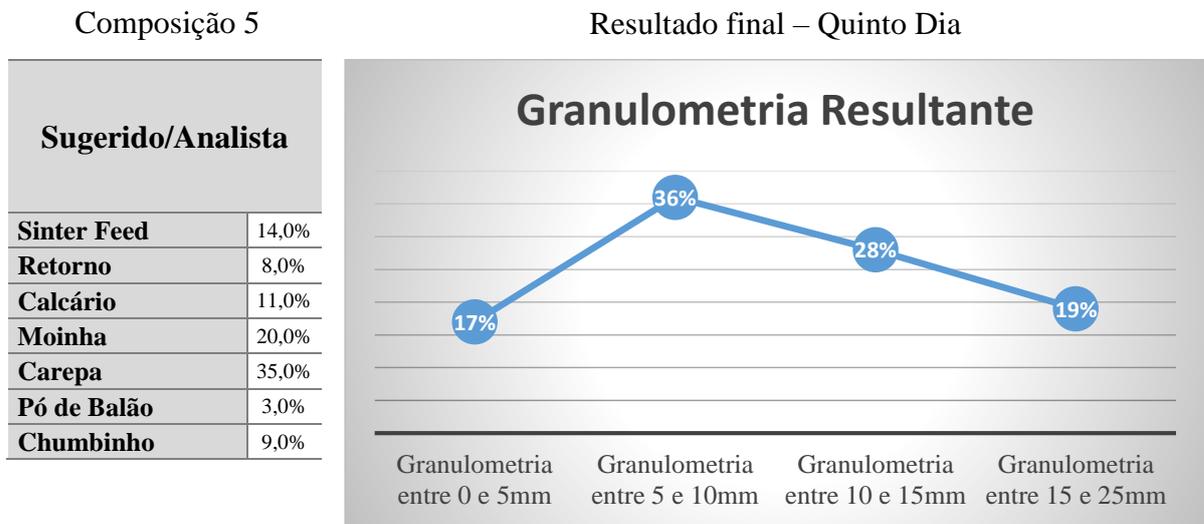


Figura 3.5 - Composição da mistura e percentual da granulometria resultante – 5º Dia

Fonte: Esta pesquisa (2017)

O acompanhamento do primeiro dia de observação fez-se necessário pois, além de possuírem processos de rotinas que envolvem equipes de trabalho em regime de escala trabalhista, possivelmente sem este acompanhamento a coleta dos dados teriam disparidades.

Foram claramente evidenciados que o modelo atual é funcional, mas não garante a qualidade da produção, cabendo assim, um empenho maior no modelo que será proposto a seguir.

1.9 Resumo do capítulo

Neste capítulo 3 apresentou-se o procedimento de coleta dos dados por método assistido utilizados no modelo atual da SIDEPARA, aplicou-se formas gráficas para melhor ilustrar os dados de entrada e saída do processo de sinterização. Apresentou ainda, uma prévia sobre os menores e maiores resultados apresentados nos 5 dias observados, dados observados e confirmados pela equipe da sinterização da siderúrgica em questão.

No próximo capítulo será apresentado o modelo matemático proposto que propõe um modelo matemático linear na composição do leito de sinter.

4 MODELO PROPOSTO

No Capítulo 2 foi apresentado como é o processo de produção da sínter. Apesar dos modelos encontrados na literatura não tratarem diretamente da composição dos finos de minérios, o modelo em questão, parte de uma adaptação do modelo de George Bernard Dantzig (1970), que ficou conhecido como o problema da mistura ou problema da dieta.

Logo, a contribuição proposta para área da sinterização é propor um modelo que se adeque de forma genérica, uma vez que a complexidade de variáveis em cada matéria prima é maçante, podendo causar problemas complexos, e assim, mudando o foco desta pesquisa.

As particularidades do modelo matemático proposto seguirão uma sequência descritiva após a formulação matemática. Assim, acredita-se que a compreensão seja facilitada conforme os passos abaixo.

Considere a seguinte notação:

I - Elementos químicos (FeO, CaO...)

J - Insumos (Carepa, pó de balão...)

x_{ij} – Fração de elementos i no insumo j

y_i – Fração do insumo i na mistura

C_j – Custo de uma unidade do insumo P

- **Variáveis de Decisão**

k_j – Quantidade de insumos j a ser usadas em uma unidade da mistura.

- **Função Objetiva: Minimizar Z**

Otimizar Z modela a produção da sínter, buscando a granulometria entre 10mm e 15mm, propondo inclusive aumentar o índice desse percentual, diminuir os índices de 5mm a 10mm e de 15mm a 20mm, pois, conforme apresentado neste capítulo, precisamente na seção que trata o discorrer do primeiro cenário.

$$Z \min = \sum_{i=1}^n (C_i k_j) \quad \text{Equação 4.1}$$

As restrições técnicas apresentam a quantidade total dos elementos químicos i de cada insumo, informando que o somatório de i em todos os insumos J devam ser maiores que a fração na mistura final. Logo, atendem à quantidade mínima de componentes respeitando os valores de cada insumo.

Na restrição técnica 2 o somatório dessas frações dos insumos J somam-se 1, ou seja, precisam de cem por cento no total da mistura.

Restrição técnica 1

$$\sum_{j=1}^J X_{ij} k_j \geq Y_i \quad \text{Equação 4.2}$$

Restrição técnica 2

$$\sum_{j=1}^J k_j = 1 \quad \text{Equação 4.3}$$

Restrição Índice de Basicidade (IB):

Para JAGANNATH PAL *et al.*, (2014), o síter produzido com qualidade, precisa-se atender aos requisitos mínimos conforme as variáveis de restrição: Índice de Basicidade Binária (IB): 1,8% ~ 2,0%. Logo, a Equação 4.4 limita ao menor percentual aceito, enquanto a Equação 4.5 restringe o limite máximo. Esse valor é calculado de acordo com a divisão CaO/SiO_2 resultado final de saída no balanço de massa.

Índice de Basicidade 1

$$\frac{\sum_{i=1}^n (C_{aO_i} X_{ij})}{\sum_{i=1}^n (S_{O_{2i}} X_{ij})} \geq 1,8 \quad \text{Equação 4.4}$$

Índice de Basicidade 2

$$\frac{\sum_{i=1}^n (CaO_i X_{ij})}{\sum_{i=1}^n (SO_{2i} X_{ij})} \leq 2,0 \quad \text{Equação 4.5}$$

Restrições Volume de Escória (VE):

Ainda para JAGANNATH PAL *et al.*, (2014), o sínter produzido com qualidade, precisa-se atender aos requisitos mínimos conforme as variáveis de restrição: Volume de Escória (VE): entre 14% ~ 18%. Assim, a Equação 4.6 limita-se ao volume mínimo a 14%, enquanto a Equação 4.7 restringe o volume máximo à 18%. Esses resultados são obtidos no somatório de CaO/SiO₂.

Volume de Escória 1 e 2

$$\sum_{i=1}^n (CaO_i + SO_{2i})x_{ij} \geq 14 \quad \text{Equação 4.6}$$

$$\sum_{i=1}^n (CaO_i + SO_{2i})x_{ij} \leq 18 \quad \text{Equação 4.7}$$

As restrições do FeO (1 e 2) limitam as frações de cada elemento i dos insumos J que serão mantidos durante todo o processo, restringindo o percentual desse componente entre 4 e 8 por cento na mistura.

Restrições FeO (1 e 2):

$$\sum_{i=1}^n (FeO_i X_{ij}) \geq 4 \quad \text{Equação 4.8}$$

$$\sum_{i=1}^n (FeO_i X_{ij}) \leq 8 \quad \text{Equação 4.9}$$

A restrição Fe, limita ao somatório dos elementos químicos i multiplicando pela fração de cada elemento químico contido em J . restringe ainda, que seu percentual deva permanecer maior ou igual a 97% de ferro na mistura.

- Restrições Fe:

$$\sum_{j=1}^n (F_{e_i} X_{ij}) \geq 97 \quad \text{Equação 4.10}$$

- Não negatividade:

$$x_i \dots x_n \geq 0 \quad \text{Equação 4.11}$$

1.10 Implementação do modelo proposto

O modelo matemático considerado aqui como genérico, tem como base Araújo (2008), foi desenvolvido em linguagem PHP, fazendo necessário a interface de saída no HTML5 (linguagem de marcação) e CSS3 (*Cascading Style Sheets*).

Durante alguns ensaios, precisamente em softwares, em especial o Solver, este demonstrou-se restrito aos resultados, precisamente ao atender as restrições Índice de Basicidade. Logo, fez-se necessário a aplicação de algoritmos específicos usando as tecnologias acima citadas.

Para a realização do primeiro teste, considerando-se o uso da aplicação matemática desenvolvida, os dados de entrada que foram ilustrados conforme a **Tabela 3.1**, tiveram seus números devidamente preservados para que os insumos fossem comparados aos do primeiro cenário ora apresentados nesta seção.

Após realizar o procedimento com a ferramenta de aplicação matemática desenvolvida, conforme especificações das linguagens de programação citadas anteriormente e com uso de um computador Intel Core i7, com 8GB de RAM sob a plataforma Windows 10, foram repassados os dados de saída para que o analista tomasse decisão.

Com a influência dos dados de saída, tendo o analista recebido as porcentagens de cada matéria prima, bastou-se apenas que determinasse a composição do leito de síter e iniciar o

processo de produção, momento em que passar-se-á a chamar de segundo cenário, conforme mostrado na Figura 4.2 - Composição da mistura respeitando a perda com o fogo.

1.11 Coleta de dados pós aplicação do modelo – Segundo cenário

Semelhante ao procedimento apresentado no Capítulo 3, analisou-se o cenário de produção de sinter com os dados calculados pelo modelo por 5 dias.

- **Primeiro dia:**

No segundo cenário, observando o primeiro dia conforme ilustra a Figura 4.1, atendendo os resultados obtidos no modelo proposto, percebe-se que a granulometria resultante dada como ótima para servir de coproduto nos altos fornos, seguiu um percentual melhor do que os do primeiro cenário. Porém, o percentual de granulometria entre 15mm e 25mm não foi o mesmo que a aplicação matemática mostrou.

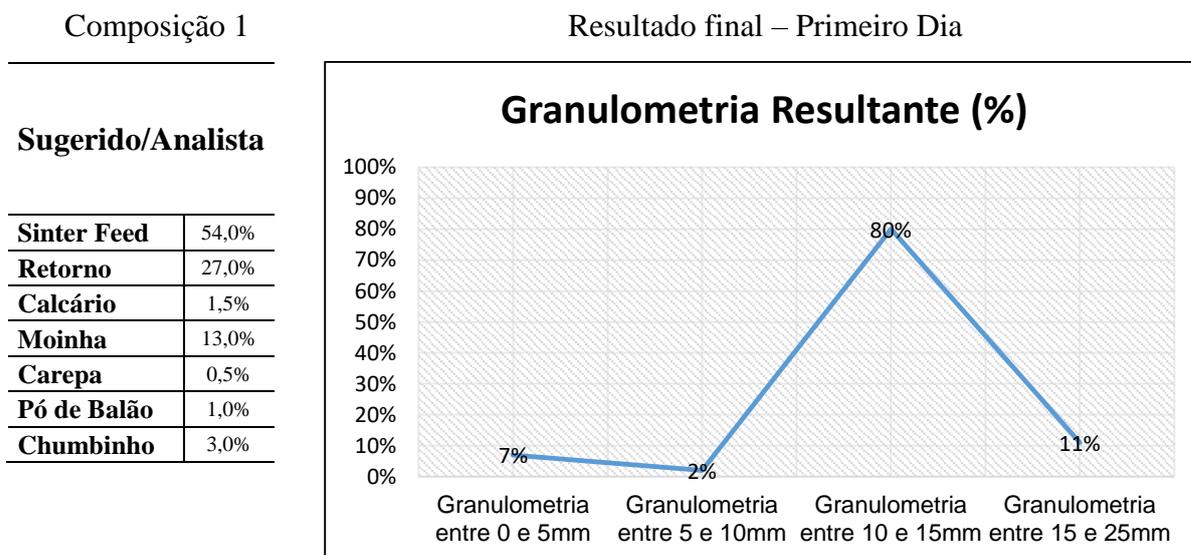


Figura 4.1 - Composição da mistura e percentual da granulometria resultante

- **Segundo dia**

Para Zhengwei YU *et. al.* (2015), a perda das matérias primas após a queima, devido à alta temperatura que deve ser exatamente há 1200° C precisam ser observadas, checadas, e principalmente mensurar as quantidades de cada insumo que foram misturadas no início da composição com os produtos de saída. Logo, os resultados apontam que as granulometrias

resultantes, foram levadas novamente para testes químicos, resultando em perda dos percentuais em cada matéria prima conforme abaixo a Tabela 4.1 que segue.

Tabela 4.1 - Percentual de perda das matérias primas após o processo de produção

Percentual de perda ao fogo									
INSUMOS/EQ	Fe	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	MnO	ZnO	FeO	PF
Sinter Feed	64,0	3,4	7,5	0,7	6,5	0,9	0,0	0,0	1,5
Retorno	57,0	2,6	9,0	0,6	6,0	0,5	0,0	10,0	1,5
Calcário	1,0	0,3	54,2	1,5	2,0	0,0	0,0	0,0	40,5
Moinha	2,0	2,1	2,0	0,5	9,0	0,0	0,0	0,0	83,7
Carepa	72,0	0,2	0,6	0,1	1,0	0,6	0,0	70,0	0,1
Pó de Balão	47,0	2,7	6,0	0,6	11,2	0,6	0,0	0,0	1,1
Chumbinho	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	60,0	0,1

Fonte: Esta pesquisa (2017)

Na segunda análise, o cenário mudou, pois foram respeitados os percentuais das perdas e assim, foram adicionados os valores que certamente seriam eliminadas durante o processo da queima. O resultado esperado conforme a Figura 4.2 foram apresentados após um esforço computacional, considerado demorado, uma vez que as variáveis foram aumentadas.

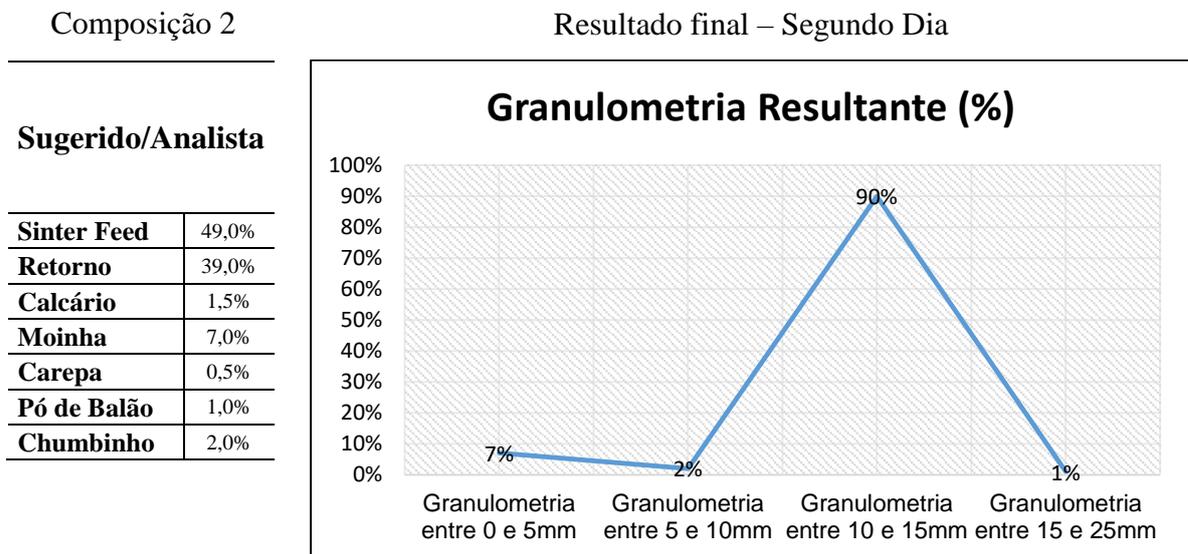


Figura 4.2 - Composição da mistura respeitando a perda com o fogo

Fonte: Esta pesquisa (2017)

O sistema foi desenvolvido com base nos requisitos do problema de sinterização da SIDEPARA, apresentado no segundo capítulo deste estudo, usou-se 5 instâncias-teste, que

consistiram em diferentes resultados apenas no primeiro dia do cenário em questão, pois este estava sendo testado com base no modelo atual da siderurgia, ou seja, sem aplicar o percentual de perda com o fogo.

A partir do segundo teste, os demais mantiveram o mesmo percentual granulométrico até a quinta instância-teste. Ressalta-se ainda que para cada linha de produção foram analisados os dois principais níveis granulométricos, sendo eles o primeiro e o terceiro, sabendo-se que o primeiro na pior das hipóteses pode ser reaproveitado como insumo em outras misturas, o terceiro mostrou-se a forma granulométrica ótima, considerado assim, o sínter esperado.

1.12 Análise crítica quanto ao modelo proposto

A aplicação matemática proposta nesta seção, até o presente momento foi apresentado sem que se discutisse sua veracidade e validade com dados teóricos. Observou-se que os dados de entradas independente do teor de cada tipo de minério, devem ser rigorosamente respeitados, pois qualquer valor informado de forma arbitrária fara com que a aplicação apresente resultados não compatíveis com o esperado.

Observou-se que a aplicação quando submetida à análise computacional, precisamente as restrições dos índices de basicidades 1 e 2, apresentaram uma latência demorara, sabendo-se que essas restrições às vezes podem sofrer conflitos de números negativos com positivos causando disparidades nos resultados, esses conflitos foram nitidamente percebidos quando aplicado ao suplemento solver do Excel (teste realizados antes de desenvolver o algoritmo).

Na seção que segue a validade será questionada, uma vez que o modelo em questão apresentou resultados diferentes ao modelo atual. É possível, previamente, definir um valor para limitar ou até mesmo não anular a instância-teste que será executada, satisfazendo aos critérios de qualidade das saídas dos dados.

1.13 Análise de sensibilidade

Observa-se, no modelo proposto, que é possível, previamente, definir um valor para limitar ou até mesmo não anular a instância-teste que será executada, satisfazendo aos critérios de qualidade das saídas dos dados. Neste caso, precisa-se apenas anular os percentuais que seriam perdidos com o fogo.

Com o intuito de analisar a variação da qualidade do produto final, conforme apresentando nesta pesquisa como sínter, durante o processo de produção, ressalta-se ainda, os valores observados e os valores esperados conforme mostrado nas seções Tabela 2 – Resultados

escolhidos do primeiro cenário (observado) e Tabela 3 - Resultados escolhidos do segundo cenário (esperado).

Para TAYLOR (1997) o teste qui-quadrado serve para avaliar quantitativamente uma relação entre o resultado de uma distribuição esperada com o fenômeno. Considera-se ainda, a observação das chances em que esses resultados aconteceram ao acaso.

De forma minuciosa, qual o grau de certeza os valores que foram observados podem ser aceitos e regidos com base na teoria aqui apresentada. Ressalta-se ainda que muitos outros testes de hipótese usam, também, a distribuição X^2 .

Esta pesquisa utilizou-se de duas restrições em cada cenário, sendo elas, os dois menores resultados e os dois maiores resultados relacionado à granulometria entre 10 à 15mm, apresentados nos dois cenários.

No primeiro cenário foram escolhidos os valores mínimo e máximo dentre os resultados que correram durante a observação, sendo eles, 18% (menor resultado) e 33% (maior resultado) conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados escolhidos do primeiro cenário (observado)

PRIMEIRO CENÁRIO (OBSERVADO)					
Granulometria	1º Dia	2º Dia	3º Dia	4º Dia	5º Dia
0 à 5 mm	17%	17%	21%	21%	17%
5 à 10 mm	36%	36%	36%	36%	36%
10 à 15 mm	28%	30%	33%	18%	28%
15 à 25 mm	19%	17%	10%	25%	19%

Fonte: Esta pesquisa (2017)

As variáveis escolhidas no segundo cenário foram 80% (menor resultado) e 90% (maior resultado), dentre os valores considerados no final da produção esperada. Ressalta-se ainda, que do terceiro dia em diante os resultados foram iguais conforme a

Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados escolhidos do segundo cenário (esperado)

SEGUNDO CENÁRIO (ESPERADO)					
Granulometria	1º Dia	2º Dia	3º Dia	4º Dia	5º Dia
0 à 5 mm	7%	7%	7%	7%	7%
5 à 10 mm	2%	2%	2%	2%	2%
10 à 15 mm	80%	90%	90%	90%	90%
15 à 25 mm	11%	1%	1%	1%	1%

Fonte: Esta pesquisa (2017)

Após determinar as variáveis dos mínimos e máximos resultados dos dois cenários, aplicou-se, o teste Qui-quadrado, este teste utiliza a fórmula matemática para melhor identificar um valor denominado, conforme mostrado na Equação . Tornando o entendimento da equação mais prático, observa-se que a letra o refere ao número de vezes observadas e a letra e , as frequências esperas. O n é o tamanho amostral, i representa cada elemento amostral e o qui-quadrado é representado por X^2 .

Equação qui-quadrado

$$Q^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - e_i)^2}{e_i} \quad \text{Equação 1}$$

A Tabela 4 apresenta as variáveis que foram submetidos à análise conforme a equação Equação . Observa-se que apenas os dois valores mínimos e máximos dos resultados estão na tabela abaixo.

Tabela 4 - Os menores e maiores resultados

GRANULOMETRIA	ASSISTIDO		ESPERADO	
Cenário	A	B	C	D
Percentual	18%	33%	80%	90%

Fonte: Esta pesquisa (2017)

Tabela 5 - Teste de hipóteses – qui-quadrado (X^2)

CENÁRIO	MÍNIMO	MÁXIMO	TOTAL
I	a	b	a + b = n1
II	c	d	c + d = n2
Total	m1 = a + c	m2 = b + d	n1 + n2 = N

Fonte: Esta pesquisa (2017)

A Tabela 6 apresenta a organização das variáveis conforme formulação da Tabela 5.

Tabela 6 - Alocação das variáveis para aplicar descobrir o grau de liberdade

CENÁRIO	MÍNIMO	MÁXIMO	TOTAL
I	1,80	0,33	0,51
II	0,80	0,90	1,70
Total	0,98	1,23	2,21

Fonte: Esta pesquisa (2017)

O grau de liberdade é, em estatísticas, a quantidade de determinações independentes, dimensão da amostra, subtraindo o número de parâmetros estatísticos a serem avaliados na população. A apresentação de forma matemática.

- Grau de liberdade

$$GL = (NL - 1) * (CL - 1) \quad \text{Equação 13}$$

$$GL = (2 - 1) * (2 - 1) = 1$$

O Valor-p igual ou menor do que 5%, afirma-se que os valores são diferentes devido ao acaso, em outras palavras, a aplicação matemática apresentada neste estudo seria considerado como inservível ao processo. 5% (0,05) é a significância mais utilizada.

Após encontrar o grau de liberdade, busca-se o valor de p, sabendo-se que grau de liberdade é 1, aplicou-se as variáveis conforme à equação XX, obtendo o valor-p igual a 2,200.

Equação 2 - Fórmula Valor-p

$$X^2 = \frac{N(ad - bc)^2}{m1 \times m2 \times n1 \times n2} \quad \text{Equação 15}$$

$$X = \frac{2,21(0,18 \times 0,90 - 0,80 \times 0,33)^2}{0,98 \times 1,23 \times 0,51 \times 1,70} = 0,022 \times 100 = 2,200$$

Logo, o valor-p está entre 75% e 90% conforme mostrado na Figura 4.3. Assim conclui-se que a chance desse resultado acontecer apenas do acaso é nula, pois o valor de significância é de 5%, mostrando eficiente os resultados do segundo cenário.

Figura 4.3 - Distribuição de Qui-Quadrado – X²

n	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	0,25	0,5	0,75	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995
1	3,93E-05	0,000157	0,000982	0,003932	0,016	0,102	0,455	1,323	2,706	3,841	5,024	6,635	7,879
2	0,010	0,020	0,051	0,103	0,211	0,575	1,386	2,773	4,605	5,991	7,378	9,210	10,597
3	0,072	0,115	0,216	0,352	0,584	1,213	2,366	4,108	6,251	7,815	9,348	11,345	12,838
4	0,207	0,297	0,484	0,711	1,064	1,923	3,357	5,385	7,779	9,488	11,143	13,277	14,860
5	0,412	0,554	0,831	1,145	1,610	2,675	4,351	6,626	9,236	11,070	12,832	15,086	16,750
6	0,676	0,872	1,237	1,635	2,204	3,455	5,348	7,841	10,645	12,592	14,449	16,812	18,548
7	0,989	1,239	1,690	2,167	2,833	4,255	6,346	9,037	12,017	14,067	16,013	18,475	20,278
8	1,344	1,647	2,180	2,733	3,490	5,071	7,344	10,219	13,362	15,507	17,535	20,090	21,955
9	1,735	2,088	2,700	3,325	4,168	5,899	8,343	11,389	14,684	16,919	19,023	21,666	23,589
10	2,156	2,558	3,247	3,940	4,865	6,737	9,342	12,549	15,987	18,307	20,483	23,209	25,188
11	2,603	3,053	3,816	4,575	5,578	7,584	10,341	13,701	17,275	19,675	21,920	24,725	26,757
12	3,074	3,571	4,404	5,226	6,304	8,438	11,340	14,845	18,549	21,026	23,337	26,217	28,300
13	3,565	4,107	5,009	5,892	7,041	9,299	12,340	15,984	19,812	22,362	24,736	27,688	29,819

Fonte: (Moreira, 2008).

Assim, não se pode afirmar que os resultados esperados, são resultado do acaso, uma vez que o valor da significância é inferior ao da probabilidade. Pode até ocorrer resultados diferentes, mas com base nos dados desta pesquisa, não há influência do acaso.

1.14 Resumo do capítulo

Este capítulo iniciou-se apresentando o modelo da aplicação matemática proposta para a solução do problema da composição do leito de síter. Usando-se como base fundamental o modelo proposto por George Bernard Dantzig (1970), conhecido como o pai da pesquisa operacional.

Abordou-se sobre o histórico da siderúrgica cedente desse estudo, apontando seus números de produção, funcionários e perspectiva de crescimento na região. Passos ao momento de estudos, mostrou-se como os processos dos dados de entradas eram apontados pelo analista de decisão, assim como mostrou-se no primeiro cenário cada etapa do modelo atual.

Em seguida apresentou-se o modelo proposto que fora adaptado, justificando cada etapa das equações que seriam empregadas mais a frente conforme segundo cenário. Este momento conseguiu-se apontar dados de entrada após instâncias-teste terem sido liberados para que a sinterização pudesse realizar a produção com base nos dados que saíram da aplicação matemática.

Durante a implementação do modelo, observou-se que os insumos devem ser respeitados, pois, além das não-conformidades que ocorrem em todo e qualquer processo produtivo, ocorreu também, perda mensurada conforme a tabela Tabela 4.1. Logo, somando assim a possível perda com o teor do fogo, o modelo mostrou-se capaz de gerar dados de saída mais eficazes do que o modelo atual.

Por fim, mas não menos importante, mostrou-se uma análise crítica no modelo, que corresponde à adição de percentuais que estão previstos na queima dos insumos e conseqüentemente seriam alterados no produto resultado final do síter.

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa contribui com o desenvolvimento de uma aplicação matemática com base na programação linear voltada para solução de problemas de composição do leito de síter da siderúrgica SIDEPARA. A aplicação proposta procura atender os indicadores de qualidade da granulometria esperada em um processo de sinterização de pós de minério, atendendo as especificações das restrições às quais são limitadoras de cada matéria prima.

A aplicação foi implementada com algoritmos próprio, precisamente em linguagens de programação PHP, foi validada a partir de 10 cenários, sendo 5 observações o modelo atual da SIDEPARA e 5 dos sugeridos por esta pesquisa comparando os resultados obtidos entre si.

Com a comparação dos resultados obtidos entre os 10 cenários, os números computacionais sugeridos pela aplicação matemática descrita nesta pesquisa mostrou-se capaz de gerar um síter de qualidade superior aos produzidos pelo processo atual, sendo na maioria dos casos, capaz de atingir índices nunca alcançados no processo de sinterização desta siderúrgica.

Além disso, a aplicação mostrou-se capaz de compor a mistura em tempo inferior ao modelo atual, bem inferior ao tempo gasto pelos analistas quando buscam apenas uma única solução de mistura. Com o tempo reduzido o analista ganhou tempo para acompanhar melhor os resultados do síter e acompanhamento na dosagem do misturador.

Ainda pode-se destacar a confiabilidade que a aplicação desenvolvida oferece. Além de ser menos suscetível ao erro, quando comparada ao homem, a aplicação mostrou-se capaz de realizar combinações rapidamente sem erros. Logo, os resultados obtidos em campo, precisamente síter produzidos de acordo com os dados informados sugeridos por esta pesquisa, validam, portanto, a aplicação em questão.

Esta pesquisa, ao promover um relacionamento entre a UFPE e a SINDEPARA, contribuiu, também, com o estreitamento dos laços de amizade e formação na área de conhecimento, além da divulgação de métodos de otimização no processo de sinterização de pós de minérios.

1.15 Contribuições desta pesquisa

Como apresentado nesta pesquisa as porcentagens relacionadas ao indicador que melhor acentua ao produto final do síter apresentou um crescimento considerável entre o primeiro

cenário e o segundo cenário. Houve um crescimento de 57% quando observados os melhores resultados, considerando os números registrados entre os dois cenários.

Com o crescente índice atribuído ao produto sinter, a equipe do setor de sinterização buscou aperfeiçoamento nas técnicas utilizadas nesta pesquisa, tornando-se uma ferramenta chave para a continuidade da produção, uma vez que as comparações dos resultados foram consolidadas de acordo com as saídas dos resultados gerados pelo modelo proposto.

No início desse estudo a SIDEPARA não possuía um modelo matemático que pudesse auxiliar nas tomadas de decisão, as escolhas das quantidades eram baseadas na experiência do profissional que ditaria a composição, logo, com base neste estudo, mostrou-se necessário a adequação dos procedimentos quanto à composição das misturas no processo do sinter.

Os números de dejetos foram reduzidos e conseqüentemente deixaram de agredir ao meio ambiente, uma vez que os insumos/dejetos foram melhor utilizados na produção do sinter.

O algoritmo deve como limitação, a ausência de interfaces para melhor entendimento na leitura dos resultados, não ficando assegurado os resultados por profissionais que não sejam da área de tecnologia, precisamente quem não entenda a linguagem PHP.

Apesar desta pesquisa ter sido realizada em cenário real e restritamente à SIDEPARA, acredita-se que o modelo proposto pode sim, ser submetidos a todas siderúrgicas do país. Bastando apenas observar os tipos de matérias-primas utilizadas em cada uma para que assim, sejam avaliados os percentuais da perda com o fogo conforme abordado na **Tabela 3.1**.

1.16 Propostas para trabalhos futuros

Como propostas para trabalhos futuros, esse estudo sugere a comparação de outras misturas sempre que houver mudanças dos insumos, uma vez que estes estão suscetíveis a mudanças de acordo com as matérias primas capturadas em outros processos.

Para o algoritmo, que seja programado na linguagem C#, linguagem à qual o departamento de tecnologia e o atual sistema funciona. Pois, este modelo matemático foi programado em PHP.

As restrições do índice de basicidade 1 e 2, mostraram durante todos os testes da aplicação um retardo na apresentação dos resultados da composição. Acredita-se que essas restrições precisam ser melhor validadas na linguagem de programação computacional, quando forem implantadas nas siderúrgicas.

Sugere-se a coleta de indicadores financeiros para a realização da mensuração das misturas de acordo com o custo de cada matéria prima. Sendo ela recebida de fontes primárias ou os custos para coletar os pós de minérios que foram evadidos do local de produção.

Sugere-se ainda que seja aumentado o número de dias para a análise dos dois cenários, assim a probabilidade de ter uma alteração nos insumos será maior, possibilitando uma análise mais crítica, uma vez que os dados de entrada serão diferentes dos praticados conforme a persistência mantida nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, AT de; COSTA, A. P. C. S. *Aplicações com métodos multicritério de apoio à decisão*. Recife: Editora Universitária, 2003.

ARROYO, Jose Elias Claudio. *Heurísticas e metaheurísticas para otimização combinatória multiobjetivo*. 2002.

CORRÊA, Henrique L.; GIANESI, Irineu GN; CAON, M. *Planejamento, programação e controle da produção: MRPII/ERP: conceitos, usos e implantação*. São Paulo: Atlas, 2001. Robson Nogueira Tomas, Levi Sato, Rosane Lucia Chicarelli Alcantara, 2001.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. *Introdução à Pesquisa Operacional*. 8. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

LOO, C. E. et al. *Laboratory iron ore sintering studies. 3. Critical heat transfer period* | NOVA. The University of Newcastle's Digital Repository. 2014.

MERSCHMANN, L. H. C. *Desenvolvimento de um sistema de otimização e simulação para análise de cenários de produção em minas a céu aberto*. Rio De Janeiro, RJ, Brasil: Master's thesis-Universidade Federal do Rio de janeiro, COPPE, 2002.

MITRA, Kishalay; MAJUMDER, Sushanta. *Successive approximate model based multi-objective optimization for an industrial straight grate iron ore induration process using evolutionary algorithm*. Chemical engineering science, v. 66, n. 15, p. 3471-3481, 2011.

MOREIRA, Daniel Augusto. *Administração da Produção e Operações*. 2013. São Paulo, Cengage Learning.

PAL, Jagannath et al. *Development of pellet-sinter composite agglomerate for blast furnace*. ISIJ international, v. 54, n. 3, p. 620-627, 2014.

ROBINSON, Stewart et al. *Simulation model reuse: definitions, benefits and obstacles*. Simulation modelling practice and theory, v. 12, n. 7, p. 479-494, 2004.

SEILA, A. F. *Introduction to simulation*. In: *WINTER SIMULATION CONFERENCE, Arlington, proceedings...* Arlington: Regency Crystal City, 1995.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. *Administração da produção*. Atlas, 2009.

TANG, Christopher S. *Perspectives in supply chain risk management*. International Journal of Production Economics, v. 103, n. 2, p. 451-488, 2006.

TELLES, Victor Bridi et al. *Produção de Sinter de minério de ferro utilizando poeira de aciaria elétrica como matéria prima*. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 10, n. 1, 2013.

VARGAS, D. E. C. et al. *Um algoritmo baseado em evolução diferencial para problemas de otimização estrutural multiobjetivo com restrições*. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, v. 32, n. 2, p. 91-99, 2016.

VAZ, Daniel et al. *Representation of the non-dominated set in biobjective discrete optimization*. Computers & Operations Research, v. 63, p. 172-186, 2015.

WANG, Ya-lin et al. *Multi-objective intelligent coordinating optimization blending system based on qualitative and quantitative synthetic model*. Journal of Central South University of Technology, v. 13, n. 5, p. 552-557, 2006.

WIBOWO, Santoso; DENG, Hepu. *A fuzzy rule-based approach for screening international distribution centres*. Computers & Mathematics with Applications, v. 64, n. 5, p. 1084-1092, 2012.

WILL M. BERTRAND, J.; FRANSOO, Jan C. *Operations management research methodologies using quantitative modeling*. International Journal of Operations & Production Management, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.

WU, Min et al. *An intelligent integrated optimization system for the proportioning of iron ore in a sintering process*. Journal of Process Control, v. 24, n. 1, p. 182-202, 2014.

WU, Sheng-li et al. *Ore-blending optimization model for sintering process based on characteristics of iron ores*. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, v. 19, n. 3, p. 217-224, 2012.

YU, Zhengwei et al. *Effect of basicity on titanomagnetite concentrate sintering*. ISIJ International, v. 55, n. 4, p. 907-909, 2015.

ZHANG, Jun-Hong; XIE, An-Guo; SHEN, Feng-Man. *Multi-objective optimization and analysis model of sintering process based on BP neural network*. Journal of Iron and Steel Research, International, v. 14, n. 2, p. 1-5, 2007.

ZIO, Enrico; BAZZO, Roberta. *A clustering procedure for reducing the number of representative solutions in the Pareto Front of multiobjective optimization problems*. European Journal of Operational Research, v. 210, n. 3, p. 624-634, 2011.