

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Sistema de Controle dos Componentes  
Químicos do Sinter de Minério de Ferro  
Baseado em Controle Automático e Controle  
Estatístico do Processo**

Autor : Ulisses Tetti  
Orientador : Prof. Dr. Ademir José Petenate

12 / 2004

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Sistema de Controle dos Componentes  
Químicos do Sinter de Minério de Ferro  
Baseado em Controle Automático e Controle  
Estatístico do Processo**

Autor : Ulisses Tetti

Orientador : Prof. Dr. Ademir José Petenate

Curso : Engenharia Mecânica – Mestrado Profissional

Área de Concentração : Gestão da Qualidade Total

Trabalho Final de Mestrado Profissional apresentado à Comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica , como requisito para a obtenção do título de Mestre Profissional em Engenharia Mecânica / Gestão da Qualidade Total.

Campinas , 2004  
S.P. - Brasil

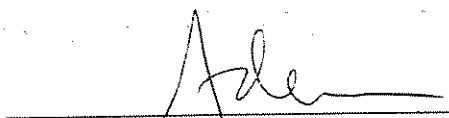
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Trabalho Final de Mestrado Profissional**

**Sistema de Controle dos Componentes Químicos do  
Sinter de Minério de Ferro Baseado em Controle  
Automático e Controle Estatístico do Processo**

Autor : Ulisses Tetti

Orientador : Prof. Dr. Ademir José Petenate



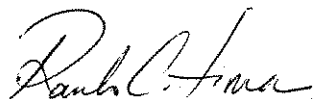
---

Prof. Dr. Ademir José Petenate  
Universidade Estadual de Campinas



---

Prof. Dr. Sérgio Tonini Button  
Universidade Estadual de Campinas



---

Prof. Dr. Paulo Correa Lima  
Universidade Estadual de Campinas

Campinas, 29 de outubro de 2004.

## **Dedicatória :**

À meus pais.

## **Agradecimentos**

Este trabalho não poderia ser concretizado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem :

A minha esposa pelo incentivo.

A meus filhos pela compreensão de que as obrigações profissionais do pai estão muitas vezes em primeiro lugar.

A todos os professores e colegas da UNICAMP que ajudaram de forma direta e como exemplo , na conclusão deste trabalho.

A toda Comunidade Cosipana que colaborou ativamente neste trabalho . Pela confiança , ajuda , estímulo , críticas e respeito mútuo durante todo o trabalho.

*A paciência e a perseverança transportam os objetivos*

## Resumo

TETTI, Ulisses, *Sistema de Controle dos Componentes Químicos do Sinter de Minério de Ferro Baseado em Controle Automático e Controle Estatístico do Processo*, Campinas, : Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 92p. Trabalho Final de Mestrado Profissional.

Foi desenvolvido um sistema para controlar a composição química do sinter de minério de ferro utilizado nos Altos Fornos da Companhia Siderúrgica Paulista.

O sistema baseia – se em ajustes feitos nas proporções das matérias primas alimentadas ao processo, em função da comparação entre valores da composição química do sinter previstos pela média móvel exponencialmente ponderada e os valores objetivados pela especificação. Foi aplicado em formato manual e mostrou ser de fácil utilização pelos operadores da planta industrial, conseguindo – se com seu uso, drástica redução na variabilidade de alguns de seus componentes chegando a 30 % do valor original no caso do teor de MnO.

Para outros componentes químicos, não foi detectada melhoria, provavelmente pela inadequação do atual sistema de medição.

Os resultados desse trabalho são de importância para motivar melhorias no atual sistema de medição, sendo também o ponto de partida para o desenvolvimento de sistemas de controle mais refinados.

### *Palavras Chave*

Controle Automático, Controle Estatístico, variabilidade, sinter

## **Abstract**

TETTI, Ulisses, *Control System of the chemical components of Iron Ore Sinter based in Automatic Process Control and Statistical Process Control*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 92p. Trabalho Final de Mestrado Profissional.

It was developed a system to control the chemical compositions of the iron ore sinter feed, used in the Blast Furnaces of Companhia Siderúrgica Paulista – COSIPA.

The system is based in adjustments to the proportion of raw materials used in the process, due to the comparison between the expected values obtained from the exponentially weighted moving average and the desired values of the specification and it was manually used and indicated to be of easy utilization by the operators of the industrial plant. As a result of its utilization, a drastic reduction of variability of some of the components was obtained as 30 % of original variability in MnO content case.

For other chemical components, any improvement were found, probably due to the non adequation of the measurements system.

The results of the present work are of great importance to motivate improvements in the actual measuring system, being also the start up point for the development of more refined controlling systems.

### *Key words*

Automatic Control, Statistical Control, variability, sinter



## **Índice**

Lista de Figuras	ii
Lista de Tabelas	vi
Nomenclatura	viii
1. Introdução	01
2. Revisão da literatura	05
3. Material e Métodos	37
4. Resultados e Discussão	74
5. Conclusões e Sugestões para próximos Trabalhos	88
Referencias Bibliográficas	90

## Lista de Figuras

1. Etapas de um processo siderúrgico	02
2. Etapas da produção de sinter	06
3. Esquema mostrando o empilhamento e a recuperação da pilha blendada	07
4. Escoamento de materiais em silos – fluxo centralizado	11
5. Passos fundamentais no controle de qualidade segundo Shewhart	16
6. Concentração de um composto em um processo químico mostrando vários pontos fora de controle , segundo Alwan <sup>16</sup>	19
7. Componente previsível da série que representa a concentração do componente no processo químico descrito na Figura 6.	20
8. Carta de controle dos resíduos do modelo descrito na Figura 7	20
9. Fluxograma descrevendo o Controle Estatístico Algorítmico de Processo , conforme definição de Faltin <sup>18</sup> .	22
10. Dados de um processo químico , mostrando uma série de alarmes falsos em uma carta de controle conforme Montgomery <sup>21</sup>	24
11. Carta de controle para os resíduos do modelo usado para descrever o processo mostrado na Figura 10.	25
12. Tipos de variação em uma série de acordo com Box <sup>26</sup> .	29
13. Decomposição da variabilidade , segundo Box <sup>25</sup>	34
14. Projeto hierárquico $5 \times 3 \times 2$	35
15. Carta de Controle para o teor de MgO do sinter durante o ensaio de GR&R.	41
16. Carta de Controle para o teor de MnO do sinter durante o ensaio de GR&R.	41

17. Carta de Controle para o teor de FeO do sinter durante o ensaio de GR&R.	42
18. Carta de Controle para a relação CaO / SiO <sub>2</sub> do sinter durante o ensaio de GR&R.	42
19. Macro fluxo do processo de produção de sinter	47
20. Esquema de coleta e agrupamento de incrementos formando amostras de sinter a serem analisadas- método anterior	49
21. Teor de MgO do sinter – Resultados referentes a 4 horas de produção.	51
22. Teor de MnO do sinter – Resultados referentes a 4 horas de produção.	51
23. Teor de FeO do sinter – Resultados referentes a 4 horas de produção.	52
24. Relação CaO / SiO <sub>2</sub> do sinter - Resultados referentes a 4 horas de produção.	52
25. Desvio do teor de MgO do sinter em relação ao valor objetivado – Resultados referentes a 8 horas de produção.	53
26. Desvio do teor de MnO do sinter em relação ao valor objetivado – Resultados referentes a 8 horas de produção.	53
27. Desvio do teor de FeO do sinter em relação ao valor objetivado – Resultados referentes a 8 horas de produção.	54
28. Desvio da relação CaO / SiO <sub>2</sub> do sinter em relação ao valor objetivado – Resultados referentes a 8 horas de produção.	54
29. Soma dos quadrados dos erros de previsão do teor de MgO , usando a média móvel exponencialmente ponderada ( EWMA )em função de $\theta$ .	58
30. Soma dos quadrados dos erros de previsão do teor de MnO , usando a EWMA em função de $\theta$ .	58
31. Soma dos quadrados dos erros de previsão do teor de FeO , usando a EWMA em função de $\theta$ .	59
32. Soma dos quadrados dos erros de previsão da relação CaO / SiO <sub>2</sub> , usando a EWMA em função de $\theta$ .	59
33. Resíduos do Modelo de previsão via EWMA para o teor de MgO do sinter.	61
34. Resíduos do Modelo de previsão via EWMA para o teor de MnO do sinter.	61
35. Resíduos do Modelo de previsão via EWMA para o teor de FeO do sinter.	62
36. Resíduos do Modelo de previsão via EWMA para a relação CaO / SiO <sub>2</sub> do sinter.	62
37. Esquema de coleta e agrupamento de incrementos formando amostras de sinter a serem analisadas- método implantado	67

38. Gráfico de controle para o teor de MgO do sinter – correção de Olivina	68
39. Gráfico de controle para o teor de MgO do sinter – correção de Calcário	68
40. Gráfico de controle para o teor de MnO do sinter – correção de Minério de manganês	69
41. Gráfico de controle para o teor de FeO do sinter – correção de Moinha de coque	69
42. Gráfico de controle para a relação $\text{CaO} / \text{SiO}_2$ do sinter – correção de calcário	70
43. Erro quadrático desvio do teor de MgO do sinter ( Sinterização nº2 ) em relação a especificação para duas situações : Método anterior e Controle Feedback com $G= 0,2$	76
44 Erro quadrático desvio do teor de MnO do sinter ( Sinterização nº2 ) em relação a especificação para duas situações : Método anterior e Controle Feedback com $G= 0,2$	76
45. Erro quadrático desvio do teor de FeO do sinter ( Sinterização nº2 ) em relação a especificação para duas situações : Método anterior e Controle Feedback com $G= 0,8$	77
46. Erro quadrático desvio da relação $\text{CaO} / \text{SiO}_2$ do sinter ( Sinterização nº2 ) em relação a especificação para duas situações : Método anterior e Controle Feedback com $G= 0,6$	77
47 . Erro quadrático desvio do teor de MgO do sinter ( Sinterização nº2 ) após aumento do tempo de pulverização da amostra final	80
48 . Erro quadrático desvio do teor de MnO do sinter ( Sinterização nº2 ) após aumento do tempo de pulverização da amostra final	81
49. Erro quadrático desvio para a relação $\text{CaO} / \text{SiO}_2$ do sinter ( Sinterização nº2 ) após aumento do tempo de pulverização da amostra final	82
50 . Erro quadrático desvio do teor de FeO do sinter ( Sinterização nº2 ) , mostrando o uso parcial do método em setembro e outubro de 2003 e retornando ao uso do novo método em novembro de 2003.	83
51. Erro quadrático desvio do teor de MgO do sinter ( Sinterização nº3 ) em relação a especificação para duas situações : Método anterior e Controle Feedback com $G= 0,2$	85
52. Erro quadrático desvio do teor de MnO do sinter ( Sinterização nº3 ) em relação a especificação para duas situações : Método anterior e Controle Feedback com $G= 0,2$	85
53. Erro quadrático desvio do teor de FeO do sinter ( Sinterização nº3 ) em relação a especificação para duas situações : Método anterior e Controle Feedback com $G= 0,8$	86

54. Erro quadrático desvio da relação  $\text{CaO} / \text{SiO}_2$  do sinter ( Sinterização nº3 ) em relação a especificação para duas situações : Método anterior e Controle Feedback com  $G= 0,6$  86

## Lista de Tabelas

1. Composição química típica das matérias primas utilizadas no processo de sinterização de minérios de ferro.	08
2. Teor de $\text{SiO}_2$ ( % ) em várias faixas granulométricas para os minérios de ferro usados na produção de sinter.	11
3. Comparação das duas formas de controle , segundo Faltin <sup>18</sup>	22
4. Desvio Padrão de uma característica de qualidade de um produto da planta de produção de Nylon , segundo Baxley.	26
5. Arranjo dos dados para cálculo da repetibilidade e da reprodutibilidade pelo método longo segundo a AIAG <sup>8</sup> .	33
6. Tabela para decomposição da variabilidade, segundo Box <sup>25</sup>	35
7. Dados obtidos nos ensaios para determinação do GR & R.	40
8. Influência da Medição ( GR&R ) na variação total do processo para o teor de MgO do sinter .	43
9. Influência da Medição ( GR&R ) na variação total do processo para o teor de MnO do sinter .	43
10. Influência da Medição ( GR&R ) na variação total do processo para o teor de FeO do sinter .	43
11. Influência da Medição ( GR&R ) na variação total do processo para a relação $\text{CaO} / \text{SiO}_2$ do sinter .	44
12. Valores do parâmetro $\theta$ que minimizam o erro de previsão utilizando – se a média móvel exponencialmente ponderada .	57

13. Valores do ganho $g$ para cada uma das variáveis compensatórias .	64
14. Valores obtidos nos ensaios para determinação da variabilidade	72
15. Decomposição da variabilidade dos elementos químicos estudados	72
16. Valores de $G$ usados nos testes	75
17. Comparação entre os Erros quadráticos médios para os compostos estudados no sinter	78
18. Comparação entre os Erros quadráticos médios dos elementos químicos $MgO$ e $MnO$ após o aumento do tempo de pulverização das amostras na Sinterização nº 2.	84
19. Erros quadráticos médios para as duas plantas de Sinterização antes e após a implantação do novo método de controle.	87

## Nomenclatura

### *Letras Latinas*

G : fator de amortecimento utilizado na média móvel exponencialmente ponderada [ - ]

### *Letras Gregas*

$\theta$  : constante que define a memória da média móvel exponencialmente ponderada [ - ]

### *Superescritos*

$\wedge$  : denota a estimativa de um parâmetro

$\sim$  : denota o resultado da aplicação da média móvel exponencialmente ponderada

### *Subscritos*

T : denota o valor de uma variável ou de um parâmetro no instante t

### *Abreviações*

EWMA : Média Móvel Exponencialmente Ponderada

GR&R : Repetibilidade e Reprodutibilidade do sistema de medição

ASPC : Controle Algorítmico Estatístico de Processo

CEP : Controle Estatístico de Processo

CAP : Controle Automático de Processo

CUSUM : Carta de Controle baseada em somas cumulativas

EQM : Erro Quadrático Médio



ESP : Especificação

LSE : Limite Superior de Especificação

LIE : Limite Inferior de Especificação

***Siglas***

COSIPA : Companhia Siderúrgica Paulista

AIAG : Automotive Industry Action Group

# Capítulo 1

## Introdução

O controle de processos produtivos torna – se cada vez mais , uma exigência no atual ambiente competitivo. A obtenção de produtos com menor variabilidade e com maior previsibilidade de desempenho no cliente tem sido uma busca constante no ciclo produtivo.

Em industrias de processo como aquela que será tratada nesse trabalho a própria variação inerente da matéria prima ,como ela é retirada da natureza , aumenta a complexidade e a dificuldade de controle.

Em uma usina siderúrgica integrada , são necessárias várias transformações até obtenção do produto final . Assim , partindo do minério de ferro , carvão e fundentes obtidos nas reservas minerais , após várias etapas será obtida a chapa de aço , produto final da siderúrgica integrada de planos.

O fluxo de produção em um processo siderúrgico pode ser dividido em três etapas principais :

1. Redução
2. Refino
3. Metalurgia de Transformação

A Figura 1 apresenta um fluxo simplificado das principais etapas do processo siderúrgico.

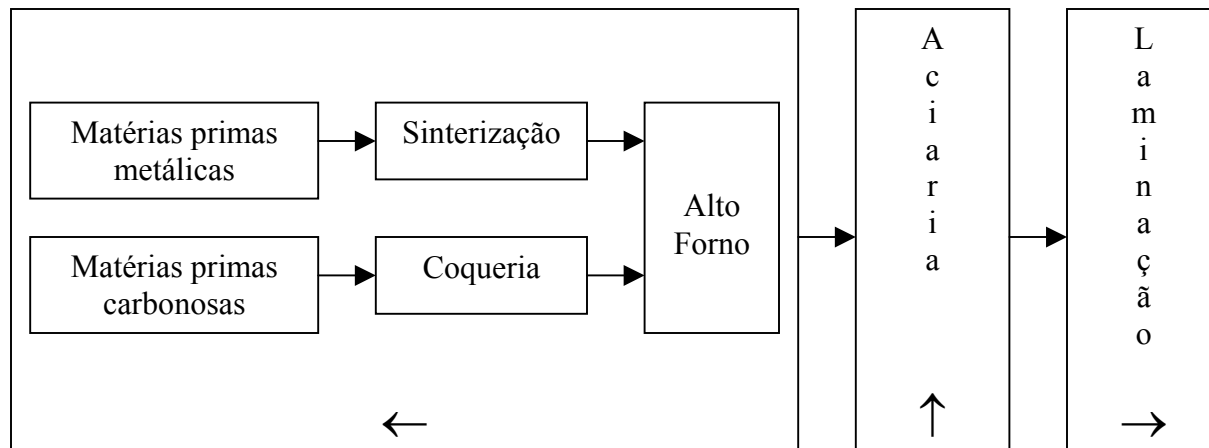


Figura 1 : Etapas de um processo siderúrgico.

A etapa de metalurgia de Redução tem uma grande importância devido :

A- Ser o início do processo e dessa forma transferir propriedades do seu produto , o gusa , para a Aciaria ( qualidade , quantidade , custo , etc.)

B- Ser o contato com os fornecedores de matérias primas necessitando administrar desde o planejamento das misturas de matérias primas até o controle do desempenho efetivo de cada um dos fornecedores .

C- Ser a etapa responsável pela maior transformação ocorrida no processo. Assim , partindo de minérios de ferro , carvões e aditivos , após os processos de Sinterização , Coqueria e Altos Fornos , gera o gusa líquido ( liga Fe – C ) que será a matéria prima da Aciaria.

D- Ser responsável por praticamente 70 % do custo final do aço.

E- Ser o principal responsável pelo controle ambiental da siderurgia.

O Alto Forno , chamado então “ Coração da Usina Siderúrgica “ deve operar de maneira mais estável o possível .

O sinter , correspondendo a 75 % da carga metálica, tem papel decisivo na marcha estável do Alto Forno <sup>1,2</sup> .

O sinter , produto da fábrica de Sinterização é o resultado da aglomeração de uma mistura de finos de minério de ferro , calcário , recirculados gerados na própria Usina e finos de coque . Todos esse materiais são utilizados com tamanhos de grãos inferiores à 6 mm.

Essa mistura é alimentada continuamente a uma esteira metálica , formando uma camada de aproximadamente 400 mm de altura , que passa sob um forno de ignição .

Sob essa esteira , um sistema de dutos , ligados à um potente exaustor, forçam o ar a atravessar a camada , causando dessa forma a combustão dos finos de coque e a geração de calor.

Esse calor será responsável pela aglomeração dos finos que compõem a mistura , tornando a mistura no fim do processo em um bloco compacto , que nada mais é que as cinzas dessa combustão.

Esse bloco é quebrado , resfriado e gera um produto granulado com tamanhos de grãos superiores à 5 mm chamado sinter que é adequado para uso nos Altos Fornos.

Uma série de propriedades do sinter são necessárias para a boa operação dos Altos Fornos<sup>3</sup>, destacando – se :

- Propriedades químicas : % de vários compostos químicos tais como : FeO , MgO , MnO , relação CaO / SiO<sub>2</sub> entre outros,
- Propriedades físicas : distribuição granulométrica , resistência à queda , etc.
- Propriedades metalúrgicas : índice de redutibilidade .

O objetivo deste trabalho é desenvolver um método de controle da composição química do sinter com maior eficácia que o até então utilizado , com o objetivo de se conseguir maior estabilidade de seus compostos químicos em torno dos valores objetivados .

Muita variação na composição do sinter acarreta :

- Aumento no volume de escória no Alto Forno pois exige que seja adicionado quartzito , aumentando a necessidade de combustível e diminuindo a produtividade do equipamento.
- Diminuição do poder de dessulfuração da escória formada resultando em piora na qualidade do gusa.
- Alteração nas propriedades químicas e metalúrgicas do sinter , influenciando o ritmo operacional do Alto Forno.

Dessa forma , é importante manter a variação no mínimo possível de modo a garantir a previsibilidade da qualidade do sinter , assegurando um desempenho otimizado do Alto Forno .

No entanto , o controle dos componentes químicos do sinter é de relativa complexidade , fato que se deve principalmente aos seguintes fatores :

- São utilizadas várias matérias primas no processo produtivo , cada matéria prima tem uma variação inerente.

- São utilizados dosadores para compor a mistura a sinterizar . Esses dosadores propiciam certa variação no fluxo das matérias primas influenciando na variação do produto.

- As matérias primas são armazenadas em silos que causam segregação granulométrica dos materiais , acentuando a variação.

- O produto sinter é uma material particulado e todo sistema de medição desde a coleta de amostras até a análise química pode afetar em muito a variabilidade observada do produto.

Antes do desenvolvimento de um Método de Controle para a planta industrial da COSIPA , será abordada a influencia do sistema de medição em utilização .

Para poder desenvolver um método de controle , após revisão da literatura sobre as causas da variação da composição química do sinter no tempo , serão revistos os métodos de controle disponíveis usados em plantas industriais .

Após essa visão , será abordado com maior detalhe o controle pelo uso da previsão com a Média Móvel Exponencialmente Ponderada – EWMA , método escolhido para utilização devido sua simplicidade e sua capacidade de absorver variações como aquelas oriundas das matérias primas , conforme encontrado na literatura .

Com o sistema desenvolvido , será descrita a implantação do método e os resultados obtidos nas plantas industriais da COSIPA . Em tratando – se de processo vital para a produção da siderúrgica , a implantação foi realizada em etapas , tomando – se todas as precauções para evitar um possível distúrbio na rotina de produção.

Por fim são apresentados os principais resultados obtidos , as conclusões e as sugestões para a continuidade do trabalho .

## Capítulo 2

### Revisão da Literatura

#### **2.1 Causas da variação da composição química do sinter**

A Figura 2 mostra as etapas da produção de sinter desde o recebimento das matérias primas , até o envio do produto sinter para o Alto Forno.

As matérias primas são recebidas de vagões e ou navios e cada lote ( composição de vagões ou um navio ) é estocado, após amostragem , de forma isolada no Pátio de Recebimento .

Devido à necessidade de utilização de vários tipos de minérios , aditivos e recirculados ( questões estratégicas , custo , propriedades dos minérios ) , essas matérias primas , seguindo um planejamento prévio, serão misturadas e homogeneizadas em um outro pátio , chamado de Pátio de Mistura , que tem ainda algumas outras funções :

- Garantir um estoque “ pulmão “ para o processo de Sinterização
- Obter uma composição média que atenda os requisitos necessários . Isso é conseguido através do cálculo da ponderação das características das matérias primas e das quantidades utilizadas.
- Obter um maior grau de homogeneização com a pilha “ blendada “ devido o método de empilhamento em camadas sobrepostas longitudinalmente e o método de recuperação em camadas transversais , como pode ser visto na Figura 3 , adaptada de Ferretti <sup>4</sup> .

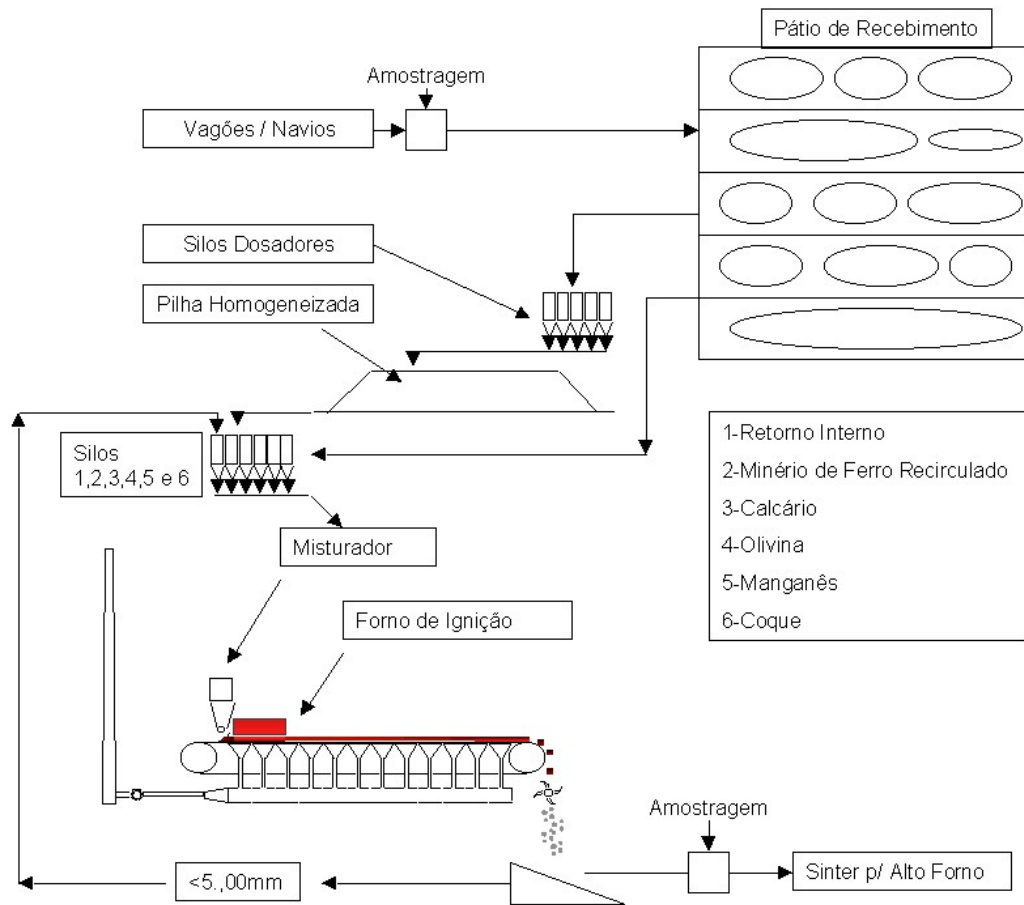


Figura 2 : Etapas da produção de sinter.

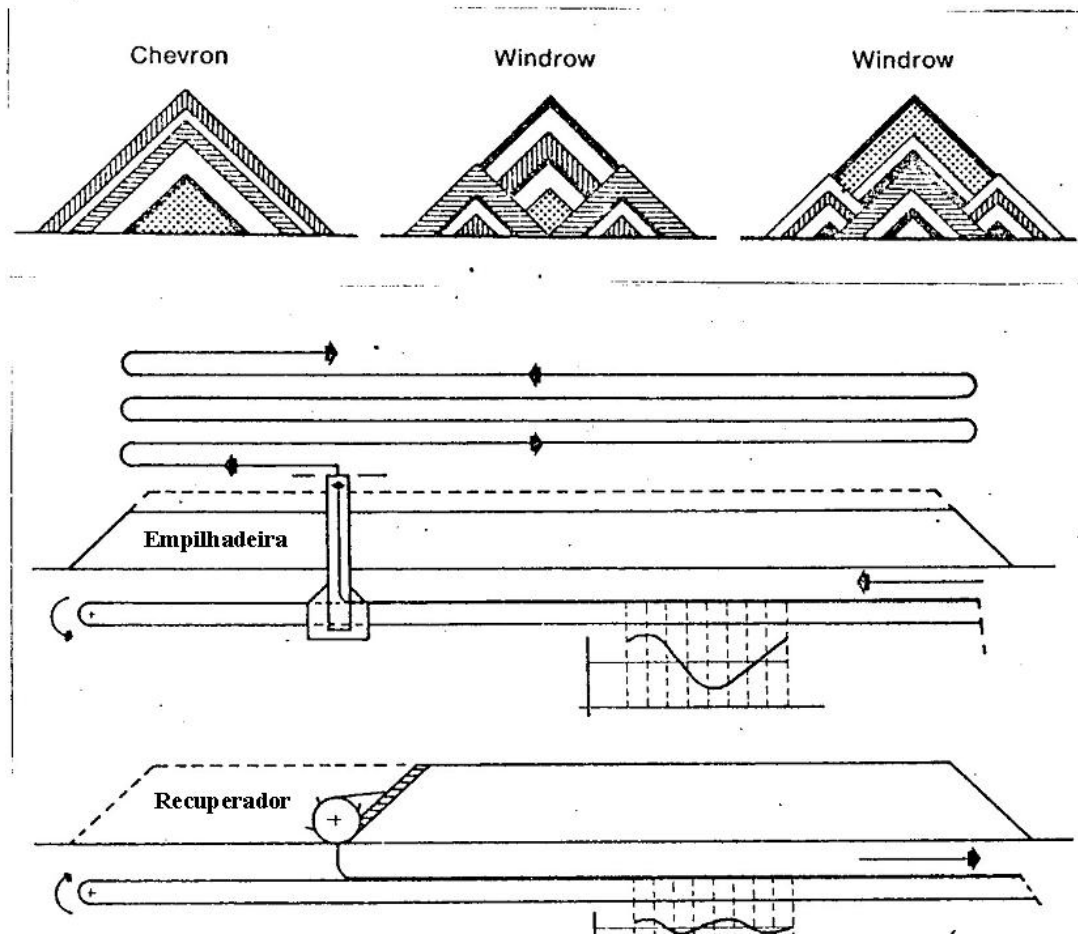


Figura 3 : Esquema mostrando o empilhamento , a recuperação e na parte superior um corte mostrando a seção transversal do tipo de empilhamento usado na COSIPA – Método Chevron.

Essa matéria prima é então enviada para os silos da planta de Sinterização.

Outras matérias primas utilizadas são o calcário ( fornecedor de  $\text{CaO}$  ) , olivina ( fornecedor de  $\text{MgO}$  ) ; minérios de manganês ( fornecedor de  $\text{MnO}$  ) e coque ( fornecedor de Carbono que será o combustível sólido que irá gerar o calor necessário para a aglomeração das matérias primas). Há ainda uma carga circulante no processo , que são os finos de sinter (  $< 5 \text{ mm}$  ) que retornam para o processo para serem reprocessados.

A tabela 1 mostra a composição química típica dessas matérias primas bem como do próprio sinter.



MATERIAIS	COMPOSIÇÃO QUÍMICA ( % )					
	Fe	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	MnO	C
Pilha Blendada	57,00	6,00	3,40	0,44	0,26	0,32
Calcário	1,00	50,00	4,60	3,20	0,20	0
Olivina	5,20	0	42,00	50,00	0,10	0
Manganês	18,00	0	4,20	0	55,00	0
Moinha de Coque	0,90	0,20	7,00	0,10	0,10	83,00
Mistura à sinterizar	50,00	8,45	4,50	1,65	0,80	4,10
Sinter ( produto )	57,00	9,70	5,10	1,90	0,90	0

Tabela 1 . Composição química típica das matérias primas utilizadas no processo de sinterização.

Os silos dosadores da sinterização são então programados de acordo com cálculo previamente elaborado , de modo que a mistura resultante da dosagem desses silos seja aquela desejada ( Mistura à sinterizar ) , visando que após o processamento térmico , o sinter resultante esteja de acordo com a solicitação do Alto Forno.

Essa mistura é então passada por um tambor rotativo visando aumentar o grau de homogeneização e após essa etapa , é alimentada em um silo que está sobre a esteira de sinterização como pode ser visto na figura 2.

Esse silo alimentará de forma contínua a esteira metálica de sinterização , onde após a ignição , haverá a queima , sendo alcançadas temperaturas da ordem de 1300° C.

No fim da esteira , todo o combustível sólido já terá sido queimado , resultando então em um bloco poroso e resistente . Esse bloco será então fragmentado em britadores , resfriado até temperaturas da ordem de 50 °C de modo a poder ser transportado em correias transportadoras de borracha e finalmente classificado através de operações de peneiramento , resultando então em três frações :

- Fração menor que 5 mm : chamada de retorno interno , irá retornar ao processo com o intuito de ser reprocessada. Corresponde à 27 % do bloco de sinter.
- Fração entre 10 e 20 mm : chamada de falsa grelha , também retorna para o processo com o objetivo de proteger a base da esteira de sinterização das altas temperaturas desenvolvidas no processo ( cerca de 1300 °C ). Corresponde à 7 % do bloco de sinter.

- Fração > 5mm : é o sinter produto que irá para o Alto Forno e que corresponde à 66 % do bloco de sinter.

Na saída da fábrica de sinter é feita uma amostragem do sinter com o objetivo de realizar ensaios no produto. Os resultados obtidos tem duas finalidades :

- Alimentar de informações o Alto Forno , sobre o sinter que está sendo enviado ,
- Comparar os resultados obtidos com os objetivados , visando realizar ajustes se necessário , inclusive desviando o produto da rota de abastecimento do Alto Forno em casos de desvios mais significativos.

Com a análise de todo o fluxo de produção , desde o recebimento das matérias primas até o abastecimento do Alto Forno , podemos identificar uma série de fatores e ou etapas que podem estar influenciando na variação de um determinado elemento químico no tempo . As principais podem ser descritas como :

#### **A - Variação dentro de um lote de uma matéria prima recebida :**

De acordo com Pierre Gy<sup>5</sup> , a variação de um determinado elemento químico de uma matéria prima no tempo , é um fenômeno estocástico , ou em outras palavras , existe algum elemento aleatório envolvido em sua estrutura .

Ele define então uma função estocástica , como uma espécie de um híbrido entre elementos funcionais e elementos aleatórios , ou em outras palavras , entre fenômenos essencialmente contínuos e essencialmente descontínuos, sendo a porção aleatória descontínua e a funcional contínua.

Define então a função que representa os valores do elemento químico no tempo como sendo composta por três termos :

$$a(t) = a_L + a_1(t) + a_2(t), \text{ onde :}$$

$a(t)$  : função que representa os valores de um elemento químico no tempo .

$a_L$  : constante que descreve as propriedades médias de  $a(t)$ .

$a_1(t)$  : componente aleatório caracterizado pelo fato que entre dois instantes  $t$  e  $t'$  , não existe correlação entre  $a_1(t)$  e  $a_1(t')$  . Com materiais particulados ,  $a_1(t)$  aponta para a estrutura discreta do material ( cada grão é um indivíduo ) . Esse termo também é chamado de componente de pepita e aponta para as variações aleatórias de  $a(t)$ .

$a_2(t)$  : componente não aleatório , caracterizado pelo fato de ser essencialmente contínuo . Com materiais de origem mineral , a continuidade de  $a_2(t)$  é um resíduo da continuidade muito freqüentemente observada em depósitos minerais , mais ou menos transferidos para o lote de particulados quando o material é retirado da reserva e manuseado. Essas continuidades resultam ou de fenômenos geológicos naturais tais como falhas ou de intervenções humanas tais como mudanças bruscas na proporção de um componente de uma mistura.

Para ilustrar a diferença entre continuidade e descontinuidade em matérias particulados , Pierre Gy , cita a seguinte analogia : Imagine dois fragmentos adjacentes do material particulado na correia transportadora , que está saindo da planta de beneficiamento da mina . É muito provável que eles venham do mesmo bloco ou de blocos muito adjacentes na reserva..

Analogia com os humanos , esses fragmentos são irmãos ou pelo menos primos . Suas composições são provavelmente similares , certamente mais similares que aquelas de dois fragmentos coletados com intervalo de horas ou dias .Em termos humanos , irmãos são provavelmente mais similares que dois indivíduos pertencentes à diferentes famílias ou diferentes raças. Essa é a fonte de continuidade apontada por  $a_2(t)$  .

Mas , como irmãos , esses fragmentos não são estritamente idênticos . Então , por exemplo a diferença no teor de CaO , de dois elementos adjacentes da correia transportadora pode ser assimilada como sendo causada por uma variável aleatória , sendo representadas por diferentes valores  $a_1(t)$  . Essa é a fonte de continuidade apontada por  $a_1(t)$  .

## **B - Variação causada pela segregação em silos e pilhas :**

Reisner e Eisenhart<sup>6</sup> classificam o fluxo de materiais granulados em silos como sendo de dois tipos : fluxo mássico e fluxo central .

O fluxo mássico é idealizado como sendo aquele em que camadas horizontais são descarregadas sucessivamente . Ainda que durante o enchimento do silo , possa ocorrer uma tendência às partículas maiores segregarem para a base do empilhamento ( no caso dos silos sua parede ) , o material descarregado apresenta as mesmas características granulométricas do material alimentado durante todo o tempo.

Já no fluxo central , devido à parte central do silo , que contém essencialmente materiais mais finos , ser descarregada primeiro , e somente após isso , o material que está próximo às

paredes e que é mais grosso ser descarregado , ocorre uma variação granulométrica no tempo , podendo ser de maior ou menor grau de acordo com o tipo de silo e das condições do material particulado que está sendo descarregado do silo , conforme pode ser visto esquematicamente na figura 4.

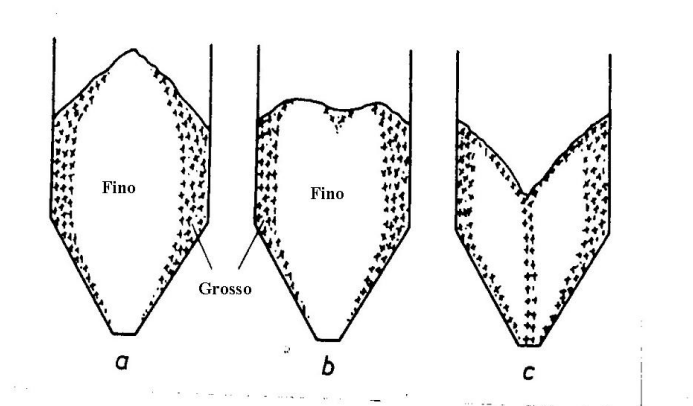


Figura 4 : Fluxo centralizado em um silo . Adaptado de Reisner<sup>6</sup>.

Nos silos envolvidos nas operações de fabricação do sinter é visível o modelo de fluxo central, resultando então em segregação granulométrica e conseqüente variação química no tempo.

A tabela 2 mostra a associação existente entre segregação granulométrica e segregação química para alguns tipos de minérios de ferro usados no processo de produção de sinter. Fica evidente a maior concentração de SiO<sub>2</sub> nas frações mais finas .

	Fração > 6 mm	Fração entre 1 e 6 mm	Fração entre 0,15 e 1 mm	Fração <0,15mm
FORNECEDOR A	0,68	0,81	1,50	2,15
FORNECEDOR B	2,46	2,44	4,25	6,52
FORNECEDOR C	3,79	2,78	4,65	6,54
FORNECEDOR D	1,02	1,17	1,77	2,08

Tabela 2 : Teor de SiO<sub>2</sub> ( %) em várias faixas granulométricas , para os minérios de ferro usados na produção de sinter.

Durante o empilhamento das matérias primas nos pátios , o mesmo fenômeno ocorre . Há a tendência dos grãos maiores segregarem para a base do empilhamento , permanecendo os grãos menores nas regiões superiores. Decorre desse fato que durante a recuperação dessa pilha , teremos uma variação granulométrica e química no tempo.

### **C– Variações causadas durante a dosagem das matérias primas :**

Nas várias operações tanto na composição da pilha blendada quanto nos próprios silos da Sinterização , são usados dosadores que consistem basicamente em correias transportadoras montadas sob os silos de armazenagem e que possuem controle de velocidade permitindo maior ou menor taxa de extração do silo. Nessa correia é instalada uma balança dinâmica que indica instantaneamente a carga na correia. A multiplicação da carga instantânea pela velocidade é traduzida em fluxo mássico que está saindo do silo .

Alguns fatores podem afetar a indicação desse fluxo mássico , tais como :

- A umidade da matéria prima
- A uniformidade do fluxo na correia transportadora
- Estado dos componentes elétricos e mecânicos da balança.

Esse efeitos podem causar desvios entre o valor indicado como fluxo mássico e o valor que realmente está se desenvolvendo.

Esse desvio pode afetar um ou mais componentes químicos do produto.

### **D- Variações causadas pelo sistema de amostragem e de medição**

Há sempre uma margem de erro associada à análise obtida em uma amostra que está tentando representar um lote de material particulado. Os processos de amostragem , preparação de amostras e análises para materiais particulados , estão sempre sujeitos à variação , segundo Pierre Gy<sup>7</sup> .

Partindo-se do recebimento por exemplo de um navio de 50.000 t de minério de ferro , após algumas etapas de coletas de incrementos ( unidades modulares que são extraídas do fluxo , e que reunidas irão compor a amostra ) e redução de tamanho de amostra ( quarteamento ) , serão geradas porções de cerca de 1 g que serão analisadas e devem representar o lote todo.

Há dois componentes básicos envolvidos :

- Um erro devido ao processo de amostragem.
- Um erro devido ao processo de medição .

Pierre Gy<sup>7</sup> em seu trabalho define métodos e equipamentos que devem ser utilizados durante o processo de amostragem , mas reconhece que na operação de amostragem de uma material particulado , sempre teremos uma margem de erro associada ao valor obtido.

Para o processo de medição ( quarteamento e análise ) , a variabilidade pode ser expressa por exemplo em termos do GR&R – Gage Repeatability and Reproducibility , como proposto por Down et alii<sup>8</sup> como será visto adiante.

#### **E - Variação entre lotes de matérias primas e ou entre pilhas homogeneizadas :**

Quando há troca de lotes de matérias primas , até de um mesmo fornecedor e ou quando há troca das pilhas blendadas , devido cada lote ter um valor médio provavelmente diferente do anterior , também presenciaremos variação . Essa diferença de valor médio pode ser causada por alguns dos itens anteriores ( variação intrínseca , erros de dosagem , segregação , etc. ).

#### **F - Variação causada pela inércia do processo em se ajustar á novos valores objetivados**

Uma das características do sinter é a de ser o responsável por fazer compensações que se fazem necessárias quando ocorre variação significativa nos outros materiais que são alimentados ao Alto Forno. Assim , quando há troca de lotes de minério peneirado e ou mudanças no coque , cabe ao sinter fazer uma compensação visando manter a escória gerada no Alto Forno sempre com a mesma composição química.

O processo de passar de um valor médio objetivado para outro , por si só , já é um gerador de variação , visto que há um componente da carga de sinterização que é circulante causando um tempo de residência desse componente e uma inércia até atingir o novo alvo.

#### **H – Variações causadas por erros operacionais :**

Neste caso , podemos citar alguns problemas passíveis de acontecer tais como :

- Contaminação ou mistura de materiais em pilhas e ou silos,
- Erros na programação dos dosímetros,
- Não cumprimento dos métodos de estocagem e ou recuperação das pilhas de matérias primas entre outros .

## **I – Variação causada pela carga circulante que existe no processo de sinterização .**

Como descrito anteriormente , uma parte do sinter produzido retorna para o processo , mantendo uma espécie de memória na mistura à sinterizar. Como esse material tem um certo tempo de residência em silos , o efeito de uma eventual alteração feita na proporção das matérias primas carregadas , tem um efeito residual até toda a recirculação do retorno ter sido efetuada.

### **2.2 Métodos de Controle**

Já no prefácio de seu livro , Shewhart<sup>9</sup> resume claramente seus objetivos :

“ Falando de maneira ampla , o objetivo da industria é o de encontrar meios econômicos de satisfazer necessidades humanas , fazendo isso através de rotinas que exijam o mínimo de esforço humano. Através do uso de método científico , levando em conta os conceitos estatísticos modernos , é possível determinar limites dentro dos quais os esforços rotineiros devem estar para serem econômicos . Desvios nos resultados de um processo rotineiro fora desses limites indicam que a rotina foi quebrada e o processo não será mais econômico até que a causa do problema seja removida”.

Para ele , um fenômeno será dito controlado , quando , através do uso de experiência passada , podemos prever , pelo menos dentro de limites , como o fenômeno pode ser esperado variar no futuro. O sentido de previsão usado aqui está ligado ao conceito de probabilidade que um fenômeno observado acontecer dentro de certos limites.

Ele dá o exemplo de um eclipse solar como sendo algo previsível , mostrando por outro lado a falta de previsibilidade por exemplo do valor da resistência a ruptura de um fio de aço. Cita ainda que a previsão de fenômenos do tipo daquele da época em que ocorrerá um eclipse solar é uma exceção no trabalho científico e industrial .

Conclui : “ Em todas as formas de previsão , está presente um elemento aleatório . O problema específico que devemos considerar no presente momento é a formulação de uma base científica para a predição , levando em conta o elemento de chance , onde , para o propósito de nossa discussão , qualquer causa desconhecida de um fenômeno será chamada de uma causa comum “.

Shewhart define então que através de dados passados , em períodos considerados como de produção normal , podemos traçar limites para uma certa característica de qualidade , limites que , na sua região interior toda a variação será atribuída à essas causas comuns.

Na definição desses limites , admite – se através de considerações estatísticas , uma probabilidade associada ao fato de um dado cair fora desses limites e mesmo assim , ainda ser considerado uma obra do acaso.

Esse limites são determinados de modo a indicar a necessidade de interrupção do processo e a procura e remoção de causas especiais , quando for retratada uma situação externa a esses limites.

Define – se um risco , normalmente muito baixo , de acontecer essa situação e ela ser ainda assim devida a causas comuns.

Caso não estejam presentes fatores especiais , pela teoria dos grandes números Shewhart admite que o processo deve estar oscilando em torno de um valor médio , ou em outras palavras sob controle estatístico.

Em outro trabalho , Shewhart e Deming<sup>10</sup> dizem que a experiência em controle de qualidade tem provado que esta é uma técnica prática para detectar e eliminar causas especiais de variabilidade no processo de produção , até que um estado de controle estatístico seja alcançado , estado este , onde predições baseadas na suposição de aleatoriedade sejam provadas válidas.

Eliminando – se as causas assinaláveis de variabilidade , pode – se fazer o uso eficiente de matérias primas , maximizar a garantia da qualidade do produto manufaturado , minimizar o custo de inspeção e minimizar as perdas por rejeitos.

Segundo eles , os métodos estatísticos auxiliam na produção em massa e podem ser utilizados nos três passos fundamentais no controle de qualidade :

- I. A especificação de qualidade do objeto procurado
- II. A produção dos objetos projetados para alcançar as especificações



III. A inspeção dos objetos produzidos para verificar se eles atendem as especificações.

Assim , para que seja possível atender uma especificação é necessário avaliar economicamente através dos passos II e III , qual a posição do processo de produção em relação á especificação.

Para avaliar essa posição , é necessário colocar o processo de produção em controle estatístico utilizando cartas de controle .

Após essa etapa , é possível negociar a produção de um bem de acordo com o trio : capacidade de produção , especificação e viabilidade econômica.

O ponto importante , é que os três passos : especificação , produção e inspeção , não podem ser considerados independentemente , ao invés , eles devem ser coordenados , cada passo , servindo aos outros dois como sugerido na Figura 5.



Figura 5 : Passos fundamentais no controle da qualidade segundo Shewhart<sup>10</sup>.

Barnard<sup>11</sup> , apresenta um breve histórico da evolução das cartas de controle como sugeridas por Shewhart , mostrando os esforços feitos para aumentar a sensibilidade das cartas , através por exemplo de testes feitos em seqüências de pontos , porém ainda assim , a essência do controle estatístico , onde as sucessivas observações feitas em um processo industrial em estado de controle estatístico podem ser consideradas como amostras sucessivas independentes de uma população. Segundo ele , o período em que foram desenvolvidas as cartas de controle , corresponde ao período de desenvolvimento da teoria das probabilidades , na qual longas seqüências de variáveis aleatórias eram consideradas.

Com o crescimento da Teoria dos processos estocásticos , parece mais apropriado considerar os processos industriais como sendo aqueles onde a variabilidade intrínseca ou natural é melhor descrita como uma seqüência de variáveis aleatórias dependentes.

Ele cita que a crescente aplicação de controle feedback em várias aplicações , indicava que havia a necessidade de desenvolver a aplicação para a produção industrial.

Hunter<sup>12</sup> apresenta a carta de controle média móvel exponencialmente ponderada ( EWMA ) . Ele resume as principais propriedades dessa carta como :

- Fácil de plotar,
- Fácil de interpretar,
- Facilidade também na obtenção dos limites de controle .

A EWMA é definida como sendo o valor previamente previsto mais  $\lambda$  vezes o erro observado nessa previsão.

Hunter<sup>12</sup> sugere um método iterativo de mínimos quadrados para obtenção do valor de  $\lambda$  . Nesse método é selecionado o valor de  $\lambda$  , que resulta na menor soma dos quadrados dos erros de previsão.

São definidos também limites de controle de modo que a carta de controle fica com uma função de monitoramento semelhante a carta Shewhart.

Além do papel de monitoramento, igual á função da carta tipo Shewhart , essa carta possibilita prever onde o processo estará no próximo instante. Dessa forma , fornece um mecanismo para realizar um controle dinâmico do processo.

Diz o autor “ Para controlar um processo é conveniente prever onde o processo estará no próximo instante . Se a previsão mostrar um desvio em relação ao alvo , algum sistema de controle eletromecânico ou um operador de processo pode executar uma ação , para que , levando – se em conta o efeito dessa ação , a nova previsão esteja bem no alvo “.

Harris<sup>13</sup> cita em seu trabalho a presença de elementos inerciais tais como tanques , reatores e fluxos de recirculados nas características de produtos em por exemplo indústrias químicas . Esses fatores aliados á uma amostragem relativamente freqüente resultam em correlação serial significativa na variável medida . Ele utiliza os modelos de séries temporais para representar a estrutura de correlação em processos onde a inércia está presente .

Os resíduos desses modelos são variáveis aleatórias , independentes e identicamente distribuídas , podendo ser monitorados com gráficos tipo Shewhart em busca de causas especiais.

Maragah<sup>14</sup> mostra que o principal objetivo do Gráfico de Shewhart , que é o de detectar rapidamente a ocorrência de causas assinaláveis propiciando então que uma investigação

possa ser feita , e uma ação corretiva de eliminação de causas especiais , fica completamente prejudicada quando a premissa de independência das observações no tempo não é realista.

Ele mostra que alguns processos produzem dados autocorrelacionados , por exemplo , quando medições são feitas automaticamente em cada item manufaturado na ordem em que foram produzidos .

Os gráficos Shewhart apresentam distorções se os dados são correlacionados e se a autocorrelação não puder ser removida do processo. Resume , que dependendo do caso , ou um aumento no numero de alarmes falsos de presença de causas especiais ou em um aumento indevido dos limites de controle.

Alwan<sup>15</sup> também abordou o efeito da autocorrelação na performance de uma carta de controle tipo Shewhart . A série estudada referia – se a temperatura de gusa em um Alto Forno e duas situações problemáticas foram encontradas :

- Detecção de pontos fora de controle quando na realidade não estavam e
- Presença de pontos fora de controle que não foram detectados.

Os resultados indicaram que mesmo para baixos níveis de autocorrelação que são difíceis de ser detectados sem a técnica formal empregada em séries temporais , há uma deterioração da habilidade da carta de controle em diferenciar os efeitos de causas comuns daqueles das causas especiais .

Em outro trabalho , Alwan<sup>16</sup> , mostra que é difícil na prática atingir um estado de controle estatístico no sentido estrito. Esse estado é identificado como um processo gerando variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas.

Segundo o autor , autocorrelações e outros efeitos sistemáticos são freqüentemente observados e significativos.

Em vista desses efeitos , o uso de cartas de controle Shewhart podem apresentar resultados seriamente distorcidos. Propõe o uso de um modelo de série temporal para esses casos , aplicando cartas de controle nos resíduos do modelo.

Os valores previstos no modelo são plotados separadamente para mostrar as estimativas dos efeitos sistemáticos , como pode ser visto nas Figuras 6 , 7 e 8.

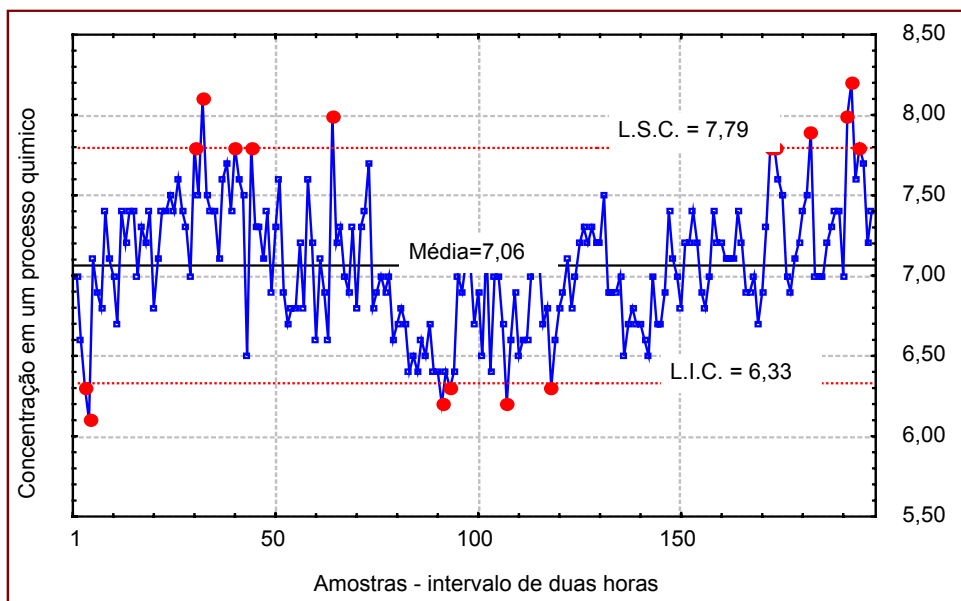


Figura 6 : Concentração de um composto em um processo químico mostrando vários pontos fora de controle , segundo Alwan<sup>16</sup>.

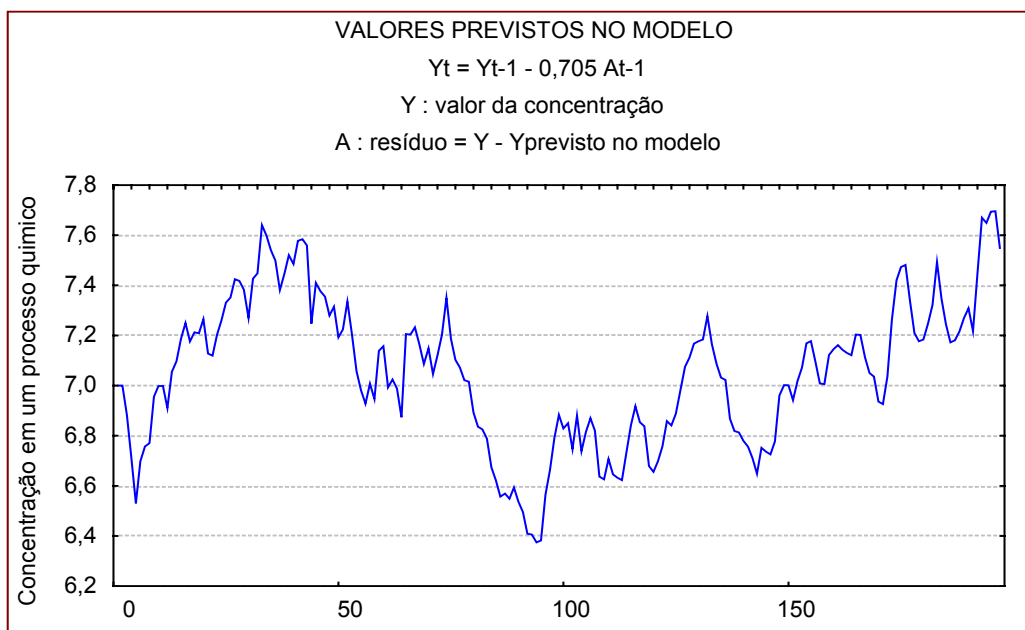


Figura 7 : Componente previsível da série que representa a concentração do componente no processo químico descrito acima.

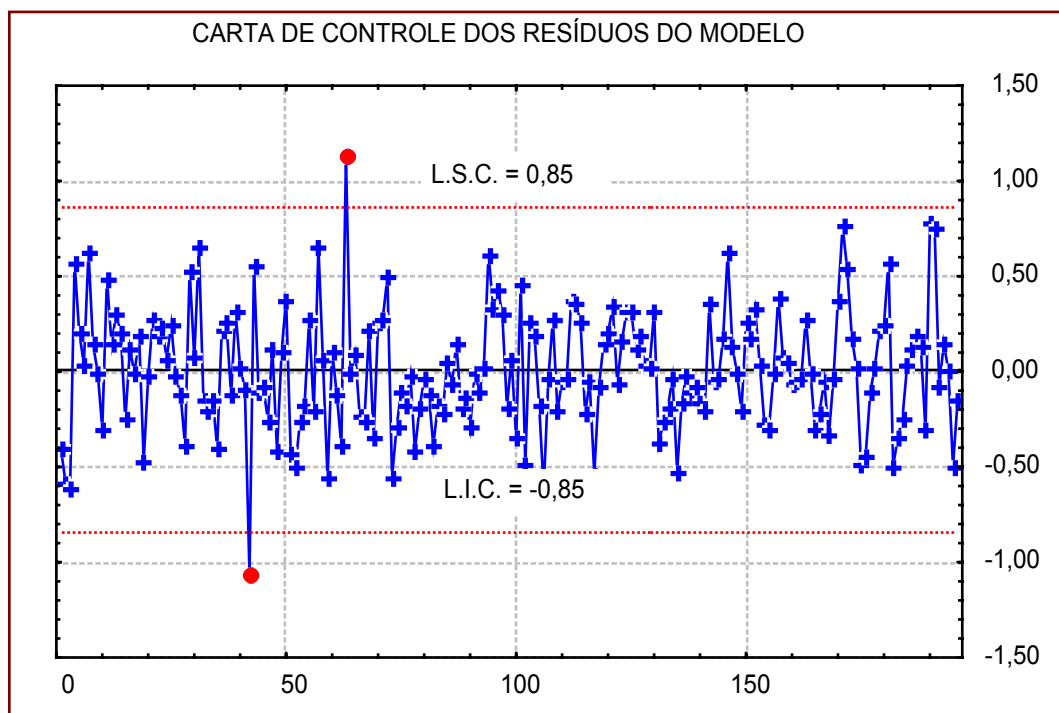


Figura 8 : Carta de controle dos resíduos do modelo descrito na Figura 7 . Na realidade , apenas dois pontos fora de controle.

Em um outro estudo , Alwan<sup>17</sup> estudou a utilização de gráficos Shewhart em 235 aplicações de controle de qualidade .Ele lembra que duas premissas são fundamentais para calcular os limites usados nas cartas de controle :

- O processo gerador de dados está em estado de controle estatístico de processo , isto é os dados são independentes e identicamente distribuídos (i.i.d.),
- Para gráficos da Média , é assumido que as observações individuais ou pelo menos a média de subamostras possa ser modelada pelo modelo normal.

Na pesquisa de Alwan , a assimetria das distribuições e principalmente a violação da premissa de (i.i.d.) são o lugar comum . Limites de controle que ignoram esse efeito anulam uma importante informação sobre o processo.

Em cerca de 40 % dos gráficos pesquisados , a autocorrelação estava presente e era ignorada , causando que o numero de sinais de fora de controle observados era de 674 ocorrências . Após consideração da correlação entre os dados e aplicação da carta para os resíduos , esse numero caiu para 90 ocorrências.

Faltin et alii<sup>18,19,20</sup> aplicam tanto a técnica de ajuste quanto a de monitoramento em uma planta de polimerização. . Usando técnicas de controle por retroalimentação (feedback ) e por introalimentação (feedforward) procuram reduzir a variação previsível.

Após isso monitoram todo o sistema para detectar e remover causas inesperadas de variação.

Sua técnica faz uso então de duas ferramentas :

- A de controle automático de processo ( CAP )
- A de controle estatístico de processo ( CEP )

Eles caracterizam e comparam as duas técnicas conforme pode ser visto na tabela 3 .

	CEP	CAP
FILOSOFIA	Minimizar variabilidade através da detecção e remoção de causas que geram variabilidade	Minimizar variabilidade pelo ajuste realizado visando anular o efeito de causas que geram variabilidade
FUNÇÃO	Detectar distúrbios	Manter no Alvo
RESULTADO CASO HAJA SUCESSO	Melhoria	Otimização

Tabela 3 : Comparação das duas ferramentas de controle segundo Faltin<sup>18</sup>.

Definem o então chamado “ Controle Algorítmico Estatístico de Processo “ – designado por eles de ASPC ( Algorithmic Statistical Process Control ). O fluxo de atividades que descreve o ASPC é dado na Figura 9.

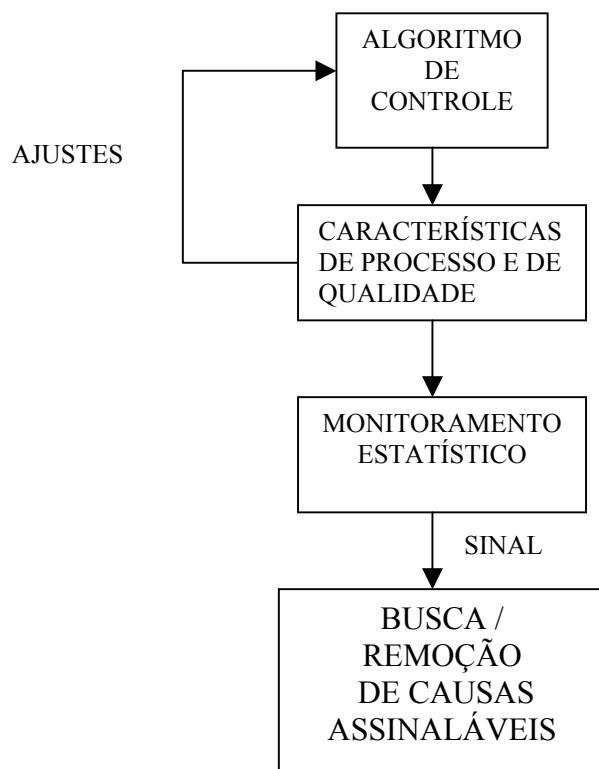


Figura 9 : Controle Algorítmico Estatístico de Processo , conforme definido por Faltin<sup>18</sup>.

Para eles as características de um processo que o tornam atrativo para implantação do ASPC são :

- Possibilidade de prever a performance do processo ( ter um modelo de previsão adequado ).
- Existência de variáveis de ajuste compensatórias.
- A variabilidade do processo de medição é pequena em relação à variabilidade do processo.
- O efeito da variável compensatória na variável controlada é bem conhecido.
- Possibilidade de avaliar a performance do processo com dados , em tempo hábil ( não há tempo morto entre a produção e a obtenção de resultados que caracterizem a característica daquilo que foi produzido.
- Quando o principal objetivo é minimizar a variabilidade em torno de um valor alvo.

Concluem seu trabalho dizendo que para implantação do ASPC é necessário muita paciência e disciplina.

Montgomery<sup>21</sup> mostra que , tradicionalmente , cartas de controle são desenvolvidas assumindo que a seqüência de observações do processo aos quais a carta é aplicada , é uma seqüência não correlacionada . Segundo ele , na prática industrial , essa premissa é freqüentemente violada .

A presença de autocorrelação tem um sério impacto na performance das cartas de controle , causando um aumento dramático na freqüência de alarmes falsos . Ele apresenta um método para contornar esse problema , modelando a estrutura de autocorrelação e aplicando cartas de controle aos resíduos. Mostra ainda que a média móvel exponencialmente ponderada ( EWMA ) é uma estatística adequada para modelar essa autocorrelação . Ilustra seu trabalho com dados obtidos em um processo químico.



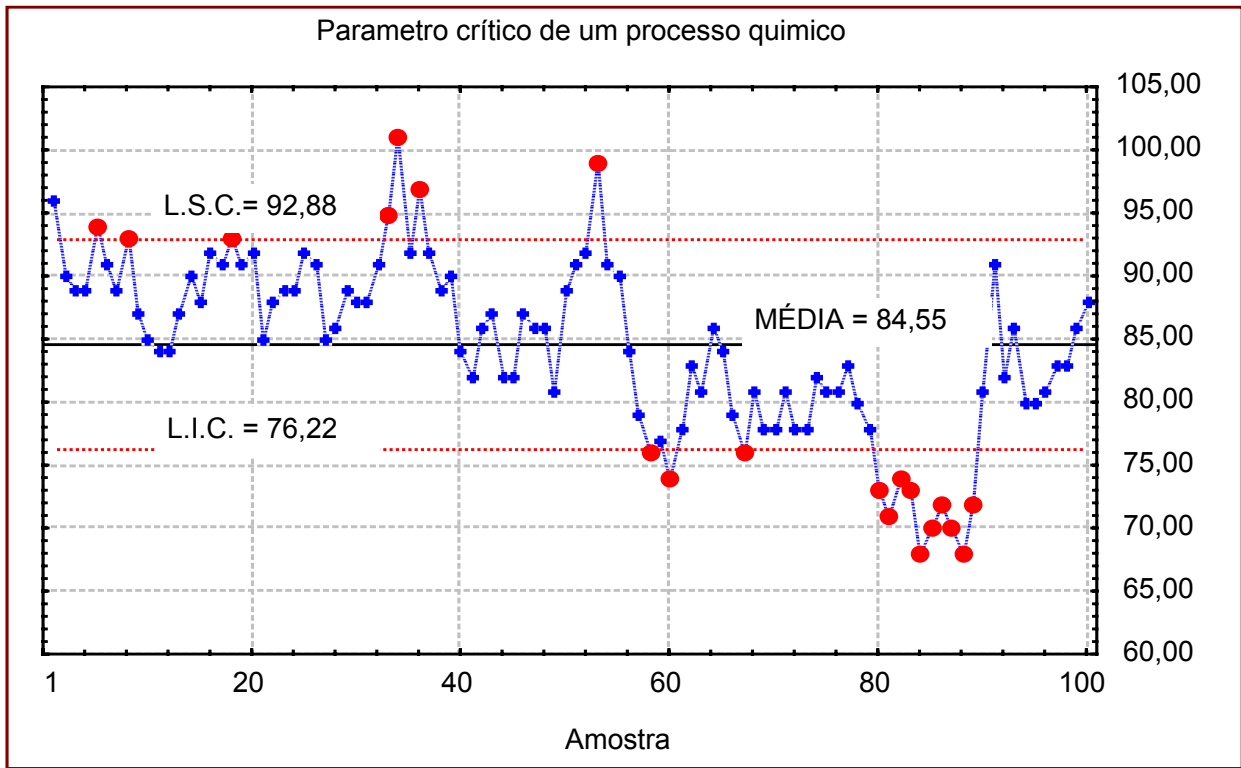


Figura 10 : Dados de um processo químico , mostrando uma série de alarmes falsos em uma carta de controle segundo Montgomery<sup>21</sup>.

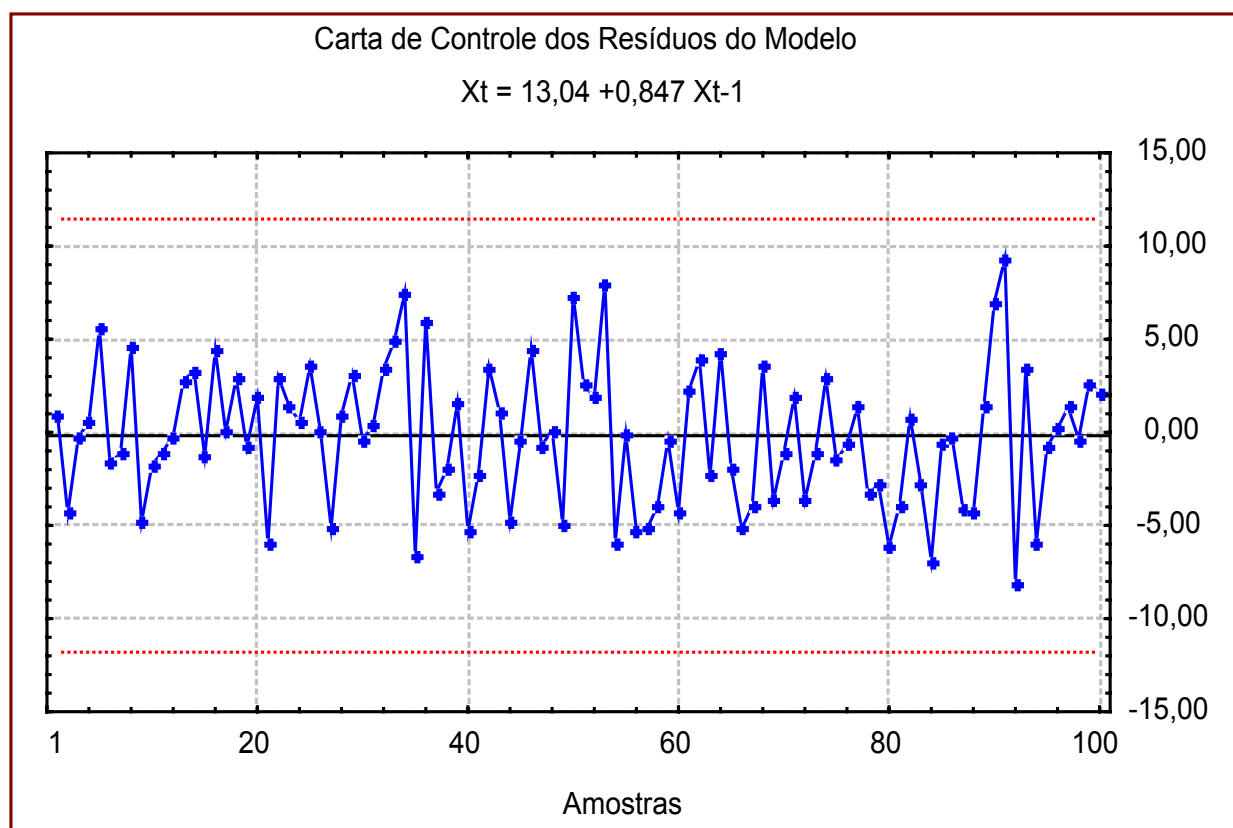


Figura 11 : Carta de controle para os resíduos do modelo descrito na Figura 10 , como mostrado por Montgomery<sup>21</sup> , mostrando estado de controle estatístico.

Baxley<sup>22</sup> , utiliza a estatística média móvel exponencialmente ponderada (EWMA) para a implementação de uma estratégia de controle utilizada em processos químicos . Essa estratégia , segundo o autor , mantém o processo centrado no alvo , como resultado de pequenos ajustes no processo.

Aplicou essa técnica em um planta de produção de Nylon , substituindo uma sistemática anterior que utilizava uma carta de controle Shewhart modificada , com regras que determinavam ajustes no processo . A nova estratégia ( EWMA ) , mostrou melhoria por causa da melhor capacidade de ajuste , pela técnica ser robusta à ajustes incorretos e devido á uma tendência decrescente de causar variabilidade adicional com ajustes muito grandes e inapropriados.

Como resultado final , em uma das variáveis de interesse do seu produto , uniformidade do filamento usado para confecção de tapetes , obteve os resultados mostrados na Tabela 4 .

Desvio Padrão sem nenhum ajuste	0,531
Desvio Padrão com uso de gráficos Shewhart	0,450
Desvio Padrão com ajustes baseados na EWMA	0,369

Tabela 4 : Desvio Padrão de uma característica de qualidade de um produto na planta de produção de Nylon , segundo Baxley<sup>21</sup> .

Box et alii<sup>23</sup> analisam as características dos dois tipos de controle ( Controle estatístico de processo e Controle automático de processo ) . Mostram , que é necessário distinguir claramente a diferença que existe entre a detecção de sinais em um processo com ruído através do monitoramento e por outro lado a estimativa do nível do distúrbio presente cuja compensação se faz necessária por controle de retroalimentação . Ambos devem ser usados mas não confundidos.

Diz ainda que os conceitos do CAP não estão bem difundidos aos praticantes do CEP , e que esses conceitos não são misteriosos nem requerem matemática avançada. Em particular esquemas de controle PI ( proporcional integral ) podem ser facilmente entendidos e aplicados usando – se cartas simples . Tal controle é extremamente robusto , de forma que a estimativa exata dos parâmetros do modelo , raramente é necessária.

Faltin et alii<sup>24</sup> fazem uma revisão dos métodos de controle propostos , quando da presença de correlação.

Segundo os autores , as condições que resultam em dados correlacionados podem ser resultado do sistema de medição , da dinâmica do processo , ou ambos . Em muitas indústrias de processo , os dados exibem comportamento de afastamento contínuo mesmo quando submetidos a controle por retroalimentação. Esse comportamento é típico , porque muitos processos são regidos por forças inerciais devido a presença de tanques , reatores e fluxos de retorno de materiais que compreendem esses sistemas.

A alternativa mais simples é aumentar o espaçamento entre os limites de controle no gráfico Shewhart . Isso reduz o numero de alarmes falsos porém continua não garantindo que uma causa especial seja discriminada facilmente. A outra alternativa é a de ajustar um modelo de séries temporais às observações e aplicar cartas de controle aos resíduos desse modelo .

Box<sup>26</sup> inicia seu livro dizendo ; “ Controle é um esforço contínuo para manter as medidas de qualidade iguais aos seus valores objetivados por indefinidos períodos de tempo . Isso não é facilmente obtido “

Faz analogia com os cuidados constantes que são necessários para manter em boas condições por exemplo uma casa ( pintura , parte hidráulica , eletrodomésticos , etc. )

O mesmo é verdade , segundo ele , para processos industriais . Se deixadas por si só as máquinas não permanecem reguladas e ajustadas , os componentes se desgastam , gerentes e operadores esquecem detalhes ou mudam seus trabalhos . Dessa forma , um estado estacionário não é natural e a busca desse estado requer uma luta dura e contínua . Essa luta é dura porque tenta anular os efeitos da segunda lei da termodinâmica . essa lei diz que deixado por si só , a entropia ( ou desorganização ) de qualquer sistema nunca irá diminuir .

Enquanto não é possível anular essa inexorável lei através de controle , duas técnicas diferentes que podem nos ajudar são o monitoramento e o ajuste do processo . dependendo das circunstâncias , uma delas ( ou mais provavelmente as duas ) será necessária.

Por monitoramento de processo , ele entende o uso de cartas de controle do tipo Shewhart , Média móvel com peso exponencial , também chamada de EWMA , ou então cartas do tipo somas acumulativas , também chamadas de CUSUM.

Essas cartas , checam continuamente o estado estável do sistema . O uso dessas cartas podem então nos levar à identificação e a eliminação de causas especiais ou causas assinaláveis identificadas através de comportamento discrepante dos dados.

Monitoramento de processo tem o significado dos testes estatísticos de hipóteses . Suas propriedades são descritas em termos de probabilidades , tais como a probabilidade de um ponto cair fora dos limites de ação de uma carta de controle do tipo Shewhart. Faz parte do chamado Controle Estatístico de Processo – CEP.

Por ajuste de processo , ele entende por exemplo , o uso de controle por retroalimentação (“feedback control “) , com o objetivo de manter o processo , o mais próximo possível á um valor objetivado . Esse método emprega inferência estatística ao invés de teste de hipóteses e seu sucesso é medido por exemplo pelo desvio padrão da medida de qualidade na saída de um processo . é freqüentemente considerado como domínio da Engenharia de controle , e é chamado de Controle Automático de Processo – CAP , visto ser algo que pode ser colocado em prática com equipamento automático.

O CEP e O CAP tiveram origens em diferentes tipos de indústrias , indústrias de peças e indústrias de processo respectivamente. Os objetivos de controle nessas duas indústrias eram muito diferentes .

A indústria de peças preocupada em reproduzir itens da melhor forma possível , por exemplo , produzindo parafusos de aço com diâmetro tendo a mínima variação possível em torno de um valor objetivado.

A indústria de processo preocupada com rendimento de produtos , medidas de pureza de componentes , etc. Em outras palavras , com o objetivo de obter os maiores valores possíveis para essas medidas , também com o mínimo de variação.

Sob o aspecto de matérias primas , a indústria de peças , utiliza matérias primas , como por exemplo uma barra de aço , com propriedades muito bem controladas . Já na indústria de processo , algumas importantes características como temperatura , umidade , etc. são afetadas pelo ambiente freqüentemente não controlado , exigindo dessa forma a compensação através de uma outra variável relacionada através de controle por retroalimentação.

Outra grande diferença é que na indústria de peças , o custo de ajuste é freqüentemente substancial pois exige a parada das máquinas ou substituição de uma ferramenta , além da freqüência de monitoramento do processo também poder ser um fator de custo apreciável . por outro lado , na indústria de processo , via de regra , o principal custo é o próprio custo de estar com o produto distante do valor alvo .

A fronteira rígida entre as indústrias de processo e de peças tem começado a desaparecer . Os principais motivos disso são :

- Alguns processos como por exemplo a fabricação de chips de computador são híbridos , tendo certos aspectos da indústria de peças e certos da indústria de processo.
- A globalização e a criação de grandes conglomerados onde ambas indústrias coexistem , facilitando a difusão dos conceitos.
- A cada vez maior importância do controle tem levado muitas empresas á experimentar a tecnologia de controle das outras.

Box<sup>26</sup> , acredita que as atividades de monitoramento e ajuste não devam ser realizadas separadamente mas de forma complementar visando um controle mais eficaz.

Sendo assim , a remoção prévia de causas especiais , permite uma maior eficácia do Controle Automático de Processo e somente a eliminação de causas especiais via controle estatístico de processo , não é capaz de fazer os ajustes necessários à variável de saída.

Box classifica basicamente em três , os tipos de variação , como mostrado na Figura 12.

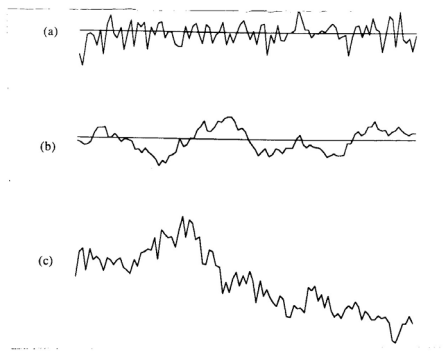


Figura 12 : Tipos de variação ; ( a ) aleatória , ( b ) estacionária e autocorrelacionada e ( c ) não estacionária , segundo Box<sup>25</sup>.

Supondo que se retire amostras de produto de uma linha de produção á iguais intervalos de tempo , após análise e plotagem dos valores em um gráfico seqüencial , as partes (a) e (b) da Figura A , representam o tipo de variação chamada de estacionária porque variam em torno de uma média fixa , enquanto que a parte (c) da Figura A apresenta um tipo de variação sem média fixa.

A série da parte ( a ) da Figura 12 é um ruído ( “ white noise “ ) e a sua principal característica é que os desvios dos valores em relação à média são estatisticamente independentes , isto é ; podem ser obtidos pela retirada ao acaso de uma população que tem média zero e onde é assumido que a população tem aproximadamente a distribuição normal. Sua principal propriedade é que a ordem em que os dados são obtidos , nada nos diz sobre a série , tendo como consequência , o fato de que fatores passados ( anteriores ) da série , não nos servem para prever valores futuros.

A série da parte ( b ) da Figura 12 também é estacionária , mas representa um ruído autocorrelacionado . Nesse caso , um desvio da média não é estatisticamente independente dos desvios adjacentes . A dependência estatística implica em uma probabilidade de que um desvio em particular seja dependente da magnitude de outros desvios . Assim , nessa Figura ,

desvios positivos tendem a ser seguidos por desvios positivos e desvios negativos por desvios negativos.

A série da parte ( c ) da Figura 12 ilustra uma variação não estacionária .

O controle automático de processos será fundamental quando os fatores que afetam o processo em questão não puderem ser padronizados , devido por exemplo serem características inerentes de matérias primas .

Nesse caso , a série resultante da característica de um produto gerado nesse processo deve se apresentar como a parte ( c ) da Figura 12.

Usualmente um processo em operação afetado por um tipo de distúrbio desse tipo já tem algum tipo de controle implantado. Consequentemente , a série que enxergamos , não é a série sem controle , mas sim a série após esse controle ter sido aplicado. Se o controle aplicado é efetivo , a série controlada não irá aparentar como a parte ( c ) da Figura 12 mas sim como as partes ( a ) ou ( b ).

### **2.3 Avaliação do sistema de Medição.**

Segundo McNeese & Klein<sup>27</sup> , a variação total de um processo ( observada no produto ) , pode ser dividida em três componentes principais :

- A variação do processo propriamente dita
- A variação devido ao processo de amostragem
- A variação devido á medição

$$\sigma_t^2 = \sigma_p^2 + \sigma_s^2 + \sigma_{ms}^2$$

onde :

$\sigma_t^2$  : variância total do processo

$\sigma_p^2$  : variância do processo propriamente dito

$\sigma_s^2$  : variância devido a amostragem

$\sigma_{ms}^2$  : variância devido sistema de medição

O percentual de variância devido ao sistema de medição é então dado por :

$$\%devido * medição = \frac{\sigma_{ms}^2}{\sigma_t^2}$$

Define ainda que : “ Um sistema de medição preciso é definido como um sistema de medição que está em controle estatístico com respeito á variação ( por exemplo na carta de amplitudes ) e que é responsável por menos de 10% da variação total do processo .

É utilizada uma regra geral que requer que o instrumento de medição esteja calibrado em um décimo da acurácia requerida na medição final.

Medição, segundo a AIAG<sup>8</sup> , é definida como a função que tem como responsabilidade , atribuir números a coisas materiais , de modo a representar relação entre eles com respeito á determinadas propriedades.

O processo de atribuir números é definido como o processo de medição e o valor atribuído como valor de medição.

Dessas definições , segue que um processo de medição pode ser visto como um processo que produz números ( dados ) . dessa forma , encarado como um sistema de medição , permite – nos utilizar os conceitos , filosofia e ferramentas da Área de Controle Estatístico de Processo .

Sendo assim , um sistema de medição é a reunião de operadores , procedimentos , equipamentos de medição e outros , utilizados para atribuir números á característica que está sendo medida ; ou em outras palavras , o processo completo para obter medições.

Os vários tipos de variação que podem existir em um sistema de medição podem ser descritos como :

- Viés : diferença entre a média de medições observadas e o valor referência,
- Estabilidade : Variação obtida quando um valor de referencia é medido em um determinado intervalo de tempo ( Variação no tempo ).
- Linearidade : Diferença de vício em todo o intervalo de medição em que o instrumento irá medir ( em todo o “ range “ ).
- Repetibilidade : variação nas medições obtidas com um instrumento de medição quando usado várias vezes por um avaliador enquanto medindo a mesma característica no mesmo objeto.



➤ Reprodutibilidade : Variação na média das medições feitas por diferentes avaliadores usando o mesmo instrumento de medição , quando medindo a mesma característica do mesmo objeto.

Sendo a avaliação da repetibilidade e da reprodutibilidade de grande importância para a verificação da adequação do sistema de medição é importante ter meios para quantificação dessa variabilidade.

O método longo de avaliação da repetibilidade e reprodutibilidade do sistema de medição , chamado de GR&R , como sugerido pelo AIAG<sup>8</sup> consiste basicamente de :

- Obter dez amostras que representem o intervalo esperado de variação do processo,
- Selecionar três avaliadores ( A , B e C ) e numerar as 10 amostras de 1 à 10 de modo que não sejam visíveis aos avaliadores .
- Calibrar o instrumento no início de cada turno de trabalho , como rotina normal da operação do instrumento.
- Cada um dos avaliadores , mede as 10 amostras em ordem aleatória duas vezes .

Com esse procedimento são obtidas 60 leituras ( 10 amostras × 3 avaliadores × 2 medições para cada objeto e para cada avaliador ). Desses dados serão obtidas as estimativas da variabilidade do sistema de medição ( repetibilidade e reprodutibilidade ).

A tabela 5 mostra o arranjo dos dados para cálculo das grandezas de interesse

O desvio padrão da repetibilidade pode ser calculado como :

$$\sigma_{repetibilidade} = \frac{\overline{R}}{d_2}$$

Onde

$$\overline{R} = \frac{1}{3} (\overline{R_1} + \overline{R_2} + \overline{R_3})$$

$$\sigma_{reprodutibilidade} = \frac{R_{\overline{X}}}{d_2}$$

Onde

$$R_{\overline{X}} = \overline{X}_{\max} - \overline{X}_{\min}$$

$$\overline{\overline{X}}_{\min} = \min(\overline{\overline{X}}_1, \overline{\overline{X}}_2, \overline{\overline{X}}_3)$$

$$\overline{\overline{X}}_{\max} = \max(\overline{\overline{X}}_1, \overline{\overline{X}}_2, \overline{\overline{X}}_3)$$

Amostra	Operador 1				Operador 2				Operador 3			
	Medição n.º				Medição n.º				Medição n.º			
	1	2	$\overline{X}$	R	1	2	$\overline{X}$	R	1	2	$\overline{X}$	R
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
			$\overline{\overline{X}}_1$	$\overline{R}_1$			$\overline{\overline{X}}_2$	$\overline{R}_2$			$\overline{\overline{X}}_3$	$\overline{R}_3$

Tabela 5 : Arranjo dos dados para cálculo da repetibilidade e da reprodutibilidade pelo método longo , segundo a AIAG<sup>8</sup>.

## 2.4 Decomposição da variabilidade.

Box <sup>25</sup> sugere que a variância observada em determinada característica de qualidade em um produto possa ser decomposta da seguinte forma :

Supondo que a média de determinada característica de qualidade em um período suficientemente longo ( para conter todas as possibilidades de variação intrínsecas ao processo de produção ) seja  $\eta$  então como mostrado na figura 13, o erro total  $\varepsilon = y - \eta$  irá conter três componentes :

et : desvio em relação á média da população de resultados de análise que podem ser obtidos de várias análises feitas em uma única amostra.

$\epsilon_s$  : desvio em relação à média da população de resultados de análises de diversas amostras que podem ser obtidas em um único lote. Para um processo contínuo de produção , um lote pode ser considerado como a produção realizada em determinado intervalo de tempo.

$\epsilon_b$ : desvio em relação à média da população de resultados de análise de diversos lotes produzidos em um período suficientemente longo para conter todas as variações intrínsecas do processo.

Admitindo que esses erros possam ser representados por retiradas aleatórias de distribuições normais com média zero e variâncias  $\sigma_t^2$  ,  $\sigma_s^2$  e  $\sigma_b^2$  respectivamente , se um ensaio for feito de uma única amostra retirada de um único lote e esse procedimento for repetido várias vezes , a variância dos resultados dos testes será a soma das três variâncias.

Para determinar esses componentes é empregado um projeto hierárquico de amostragens e análises como mostrado simbolicamente na Figura 14.

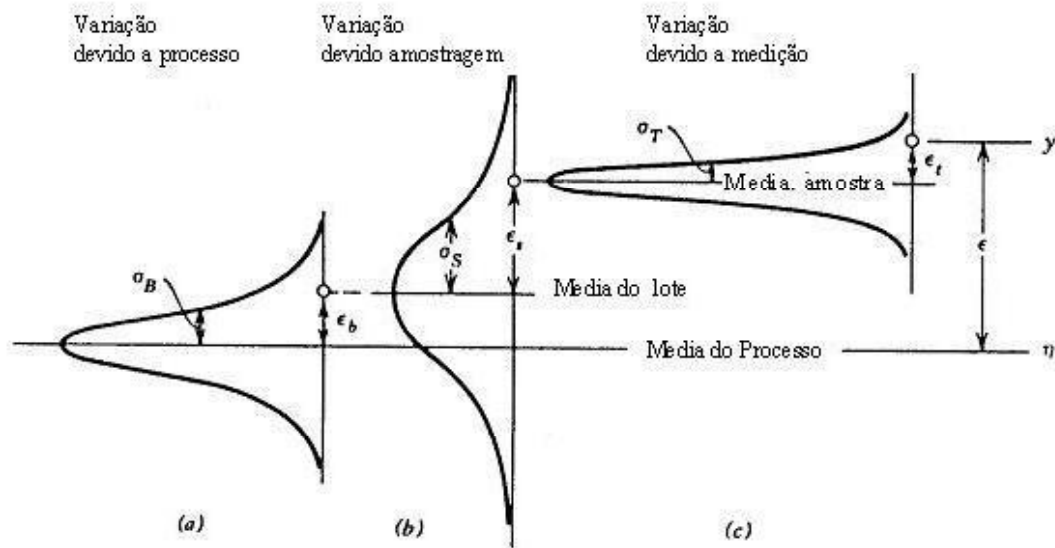


Figura 13 : Decomposição da Variabilidade , segundo Box<sup>25</sup> .

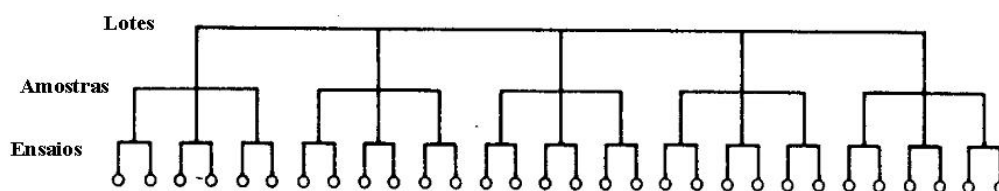


Figura 14 : Projeto hierárquico 5 lotes  $\times$  3 amostras  $\times$  2 análises .

Dessa forma são amostrados B lotes , cada lote é amostrado S vezes e cada amostra é analisada T vezes . Assim serão obtidos  $B \times S \times T$  resultados.

As amostras coletadas são introduzidas na rotina de análises .

Com os dados disponíveis , os componentes da variância podem ser obtidos com ajuda da tabela 6 de Análise de Variância para separação dos componentes da variância associada com lotes , amostras e testes.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Valor Esperado do Quadrado Médio
Média	$BST\bar{y}^2$			
Lotes	$ST\sum_b^B (y_b - \bar{y})^2$	B-1	$m_b$	$ST\sigma_b^2 + T\sigma_s^2 + \sigma_t^2$
Amostras	$T\sum_b^B \sum_s^S (\bar{y}_{bs} - \bar{y}_b)^2$	B( S - 1 )	$m_s$	$T\sigma_s^2 + \sigma_t^2$
Testes	$\sum_b^B \sum_s^S \sum_t^T (y_{bst} - \bar{y}_{bs})^2$	BS(T-1 )	$m_t$	$\sigma_t^2$
Total	$\sum_b^B \sum_s^S \sum_t^T y_{bst}^2$	BST		

Tabela 6 . Tabela para decomposição da variabilidade.

Após avaliação dos componentes  $\sigma_t^2$ ,  $\sigma_s^2$  e  $\sigma_b^2$ , pode-se decidir por caminhos para diminuição da variabilidade, dependendo da magnitude e da importância relativa de cada um deles.

## Capítulo 3

### Material e Métodos

Devido a complexidade do tema e principalmente devido o fato de tratar com um processo participante do fluxo produtivo , não suportando alterações que de alguma forma colocassem em risco o ritmo normal de produção , foi decidido desenvolver os trabalhos de implantação de novo método de controle em etapas , descritas a seguir :

1ª Etapa : Avaliação do sistema de medição com o objetivo de verificar a influencia da medição na variação do produto . Essa etapa tem importância fundamental pois se esse sistema não possuir a precisão necessária , nenhum método de controle resultará em diminuição da variabilidade pois nesse caso será a própria medição a principal responsável pela variação. Diante dessa situação , são necessárias alterações e melhorias para tornar o sistema de medição adequado às necessidades.

2ª Etapa : Desenvolvimento e implantação de um novo Método de Controle para a Planta de Sinterização nº 2 , planta de menor capacidade , correspondendo a cerca de 33 % da produção total , servindo então de uma espécie de planta piloto para os testes com o novo modelo.

3ª Etapa : Após implantação do Novo Método na Planta de Sinterização 2 , seria importante estudar o comportamento dos componentes de variação do produto sinter correspondendo a medição , amostragem e devido ao processo de produção propriamente dito. Após essa etapa possíveis ajustes seriam necessários.

4ª Etapa : Caso os resultados nas etapas anteriores fossem satisfatórios e após eventuais ajustes , implantação do Novo Método na Planta de Sinterização nº 3 completando então 100 % da produção de sinter.

### 3.1. Primeira Etapa : Avaliação do Sistema de Medição

Uma vez que os aparelhos a serem usados na medição dos componentes químicos do sinter ( Espectômetro de Fluorescência de Raios X e o FeO meter) , são aparelhos submetidos à calibrações periódicas com padrões internacionais e operarem sujeitos a cartas de controle , foi decidido avaliar a variação atribuída somente à repetibilidade e à reprodutibilidade do sistema de medição.

O método utilizado foi o sugerido pelo AIAG<sup>8</sup> e consistiu basicamente de :

- Obter dez amostras de sinter que representem o intervalo esperado de variação do processo,
- Selecionar três avaliadores ( A , B e C ) e numerar as 10 amostras de 1 à 10 de modo que não fossem visíveis aos avaliadores .
- Calibrar o instrumento no início de cada turno de trabalho , como rotina normal da operação do instrumento.
- Cada um dos avaliadores , mediu as 10 amostras em ordem aleatória duas vezes .

Com esse procedimento foram obtidas 60 leituras ( 10 amostras  $\times$  3 avaliadores  $\times$  2 medições para cada objeto e para cada avaliador ).

Essas amostras foram coletadas e analisadas em dezembro de 2001 e a tabela 7 mostra os resultados obtidos .

Operador	Amostra	Leitura	Teor de MgO ( % )	Teor de MnO ( % )	Teor de FeO ( % )	Relação CaO/SiO <sub>2</sub> ( - )
1	1	1	1,55	0,90	6,18	1,97
1	2	1	1,56	0,93	7,58	1,94
1	3	1	1,55	0,93	5,98	1,89
1	4	1	1,59	0,87	8,03	1,84
1	5	1	1,78	0,87	6,43	1,84
1	6	1	1,38	0,86	7,33	1,97
1	7	1	1,53	0,83	6,75	2,01
1	8	1	1,70	0,93	7,07	1,97
1	9	1	1,55	0,90	7,75	2,03
1	10	1	1,51	0,96	6,51	2,00
1	1	2	1,76	0,99	6,00	1,95
1	2	2	1,65	0,94	7,82	1,90
1	3	2	1,84	1,06	5,54	1,85
1	4	2	1,53	0,78	8,01	1,83
1	5	2	1,71	0,91	6,41	1,83
1	6	2	1,57	0,92	7,42	1,98
1	7	2	1,31	0,79	6,73	2,00
1	8	2	1,84	0,89	6,96	1,98
1	9	2	1,62	0,93	7,72	2,02
1	10	2	1,55	1,07	6,12	1,95
2	1	1	1,85	0,96	6,14	1,98
2	2	1	1,67	0,94	7,32	1,92
2	3	1	1,86	0,96	5,72	1,89
2	4	1	1,52	0,86	8,31	1,87
2	5	1	1,80	0,88	6,74	1,87
2	6	1	1,68	0,96	7,09	1,97
2	7	1	1,56	0,89	6,50	2,00
2	8	1	1,78	0,99	6,93	2,00
2	9	1	1,54	0,86	7,19	2,01
2	10	1	1,61	0,99	6,31	1,98
2	1	2	1,76	0,98	6,22	2,01
2	2	2	1,64	0,96	7,59	1,94
2	3	2	1,86	0,93	5,45	1,82
2	4	2	1,57	0,84	7,96	1,83
2	5	2	1,65	0,91	6,77	1,87
2	6	2	1,63	0,91	7,11	1,96
2	7	2	1,56	0,91	6,53	2,00
2	8	2	1,76	0,94	6,80	1,99
2	9	2	1,49	0,90	7,58	2,03
2	10	2	1,54	0,93	6,23	1,94
3	1	1	1,72	1,02	6,19	2,02
3	2	1	1,58	0,91	7,73	1,92
3	3	1	1,83	0,86	5,46	1,80
3	4	1	1,61	0,79	7,45	1,80
3	5	1	1,76	0,95	6,55	1,86
3	6	1	1,54	0,87	6,89	1,95



3	7	1	1,61	0,94	6,07	1,97
3	8	1	1,76	0,94	6,80	1,99
3	9	1	1,55	0,95	7,19	2,03
3	10	1	1,77	1,03	6,39	1,98
3	1	2	1,85	0,97	6,11	1,97
3	2	2	1,65	0,98	7,59	1,91
3	3	2	1,86	0,94	5,42	1,81
3	4	2	1,58	0,87	7,69	1,83
3	5	2	1,88	0,87	6,44	1,86
3	6	2	1,69	0,96	6,89	1,95
3	7	2	1,49	0,84	6,22	2,02
3	8	2	1,71	0,95	6,83	1,94
3	9	2	1,47	0,87	7,20	1,98
3	10	2	1,45	0,93	6,06	1,89

Tabela 7 : Dados obtidos para avaliação do GR&R

As figuras 15, 16 ,17 e 18 mostram que durante os testes , o sistema de medição esteve em controle estatístico para os quatro itens avaliados.

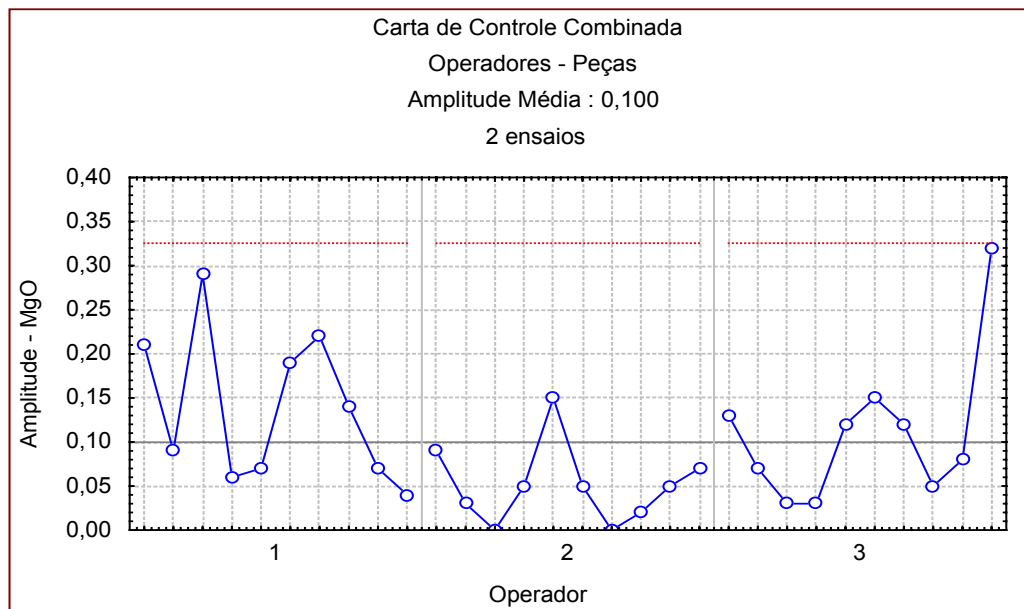


Figura 15 : Carta de Controle para o teor de MgO do sinter durante o ensaio de GR&R.

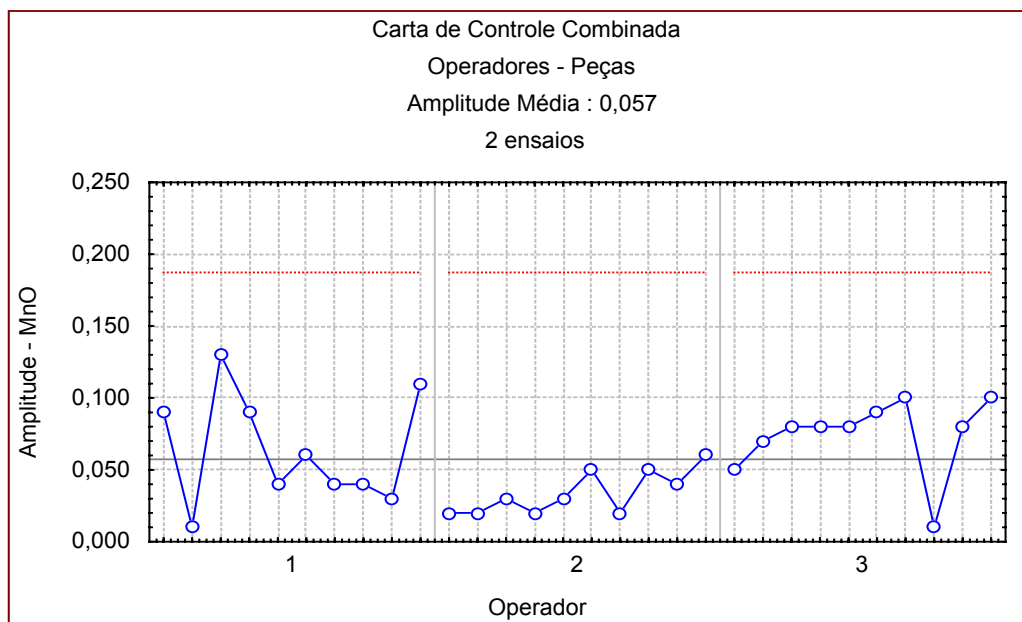


Figura 16 : Carta de Controle para o teor de MnO do sinter durante o ensaio de GR&R.

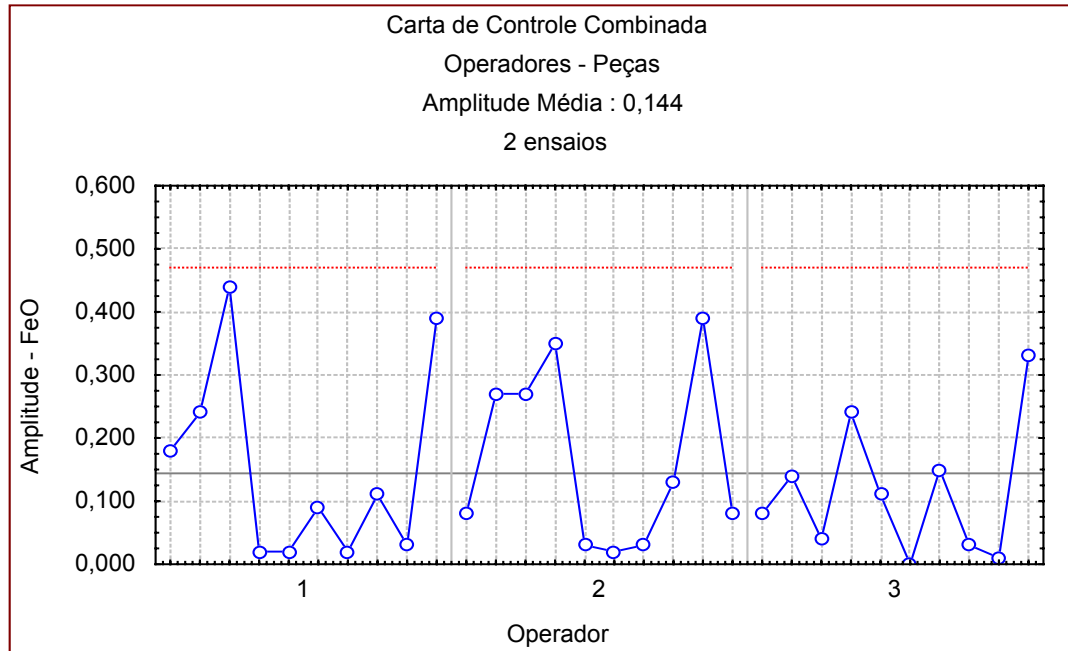


Figura17 : Carta de Controle para o teor de FeO do sinter durante o ensaio de GR&R.

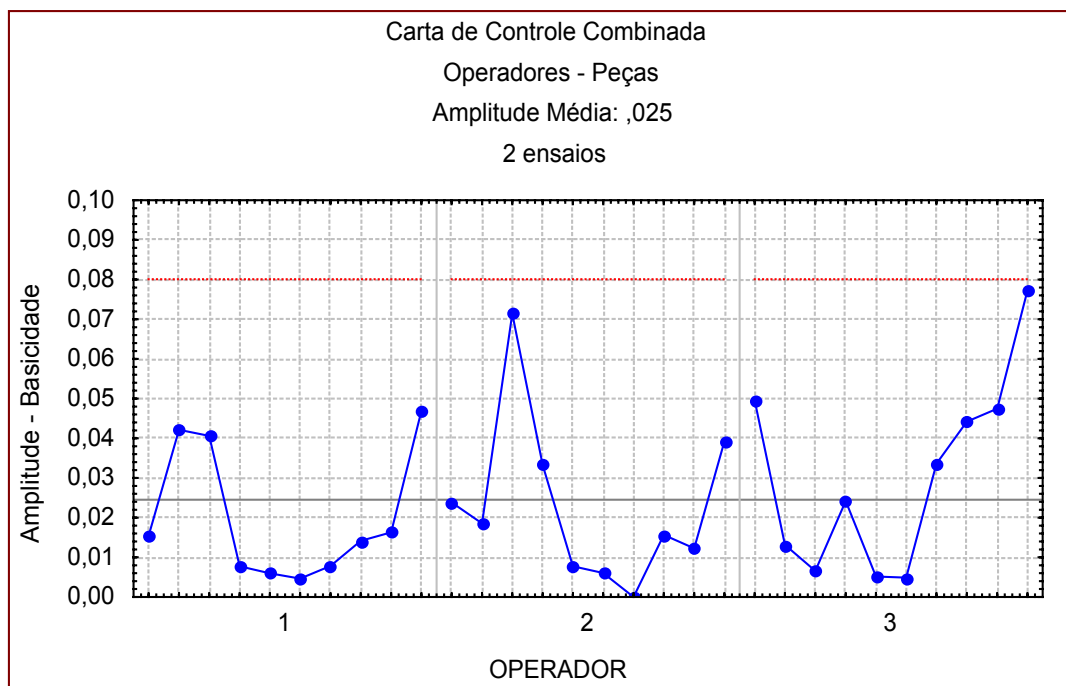


Figura 18 : Carta de Controle para a relação CaO / SiO<sub>2</sub> do sinter durante o ensaio de GR&R.

As tabelas 8 , 9 ,10 e 11 , mostram a decomposição da variação obtida nos testes , para os elementos MgO , MnO , FeO e para a relação CaO / SiO<sub>2</sub> respectivamente.

	desvio padrão	variância	% do R&R	% do Total
Repetibilidade	0,088	0,007779	91	46
Reprodutibilidade	0,027	0,000734	9	4
G R & R	0,092	0,008513	100	51
Entre amostras	0,091	0,008317		49
Total	0,130	0,016830		100

Tabela 8 : Influência da medição ( GR&R ) na variação total do processo para o teor de MgO do sinter

	desvio padrão	variância	% do R&R	% do Total
Repetibilidade	0,050	0,002515	100	52
Reprodutibilidade	0,000	0	0	0
G R & R	0,050	0,002515	100	52
Entre amostras	0,048	0,002325		48
Total	0,070	0,004840		100

Tabela 9 : Influência da medição ( GR&R ) na variação total do processo para o teor de MnO do sinter.

	desvio padrão	variância	% do R&R	% do Total
Repetibilidade	0,127	0,016239	48	3
Reprodutibilidade	0,132	0,017505	52	3
G R & R	0,184	0,033744	100	6
Entre amostras	0,727	0,529203		94
Total	0,750	0,562947		100

Tabela 10: Influência da medição ( GR&R ) na variação total do processo para o teor de FeO do sinter.

	desvio padrão	variância	% do R&R	% do Total
Repetibilidade	0,022	0,000471	85	12
Reprodutibilidade	0,009	0,000081	15	2
G R & R	0,023	0,000552	100	14
Entre amostras	0,058	0,003311		86
Total	0,062	0,003863		100

Tabela 11 : Influência da medição ( GR&R ) na variação total do processo , para a relação CaO / SiO<sub>2</sub>.

Os resultados das percentagens da variação total podem ser utilizadas para determinar se o sistema de medição é aceitável para determinada aplicação .

A Tolerância ( Limite Superior de Especificação – Limite Inferior de Especificação ) pode ser utilizada ao invés da variação do processo . Nesse caso , o valor da variação total é substituída pelo valor da tolerância.

Como orientação , pode – se dizer que , se a % R&R foi :

- Menor que 10 % da variância total : o sistema de medição é aceitável.
- Entre 10 e 30 % da variância total : pode ser aceitável , baseado na importância da aplicação , custos envolvidos , etc.
- Maior que 30 % da variância total : o sistema de medição necessita de melhorias.

Como pode ser observado das tabelas 8 , 9 ,10 e 11 , é evidente que o atual sistema de medição não atende às necessidades para os elementos MgO e MnO pois a variação devida ao sistema de medição corresponde à cerca de 50 % da variação total do processo , contra um valor indicado como aceitável de 10 % do total .

Por outro lado , quanto ao teor de FeO e à relação CaO / SiO<sub>2</sub> , o sistema parece estar adequado .

Como esse equipamento já está sendo utilizado na rotina e ainda não temos previsão de substituição , decidimos por implantar o novo sistema de controle , mesmo utilizando o antigo sistema de medição.

Foi decidido também pela reciclagem de treinamento aos operadores dos aparelhos de medição bem como dos operadores que fazem a preparação das amostras ( quarteamento , britagem , moagem e briquetagem ).

Além disso , uma equipe de técnicos responsáveis pelo laboratório foi enviada para outra Empresa do Grupo com o objetivo de detectar possibilidades de melhoria no nosso sistema .

Resultado das visitas técnicas , duas principais alterações foram identificadas :

- Alteração do tempo de pulverização antes da briquetagem , passando da prática atual de 1 minuto para pelo menos 4 minutos . Essa alteração foi implantada em maio de 2003 e sua influencia será notada nos resultados mostrados mais a frente.

- Troca do britador de rolos de 8mm para 3 mm , com o intuito de somente realizar a divisão da amostra com o sinter já em granulometria inferior. Essa alteração ainda não foi realizada .

## 3.2 Segunda Etapa : Desenvolvimento de um método de controle adequado para a Planta de Sinterização nº 2.

Antes de apresentar o método desenvolvido e implantado , será descrito como era feito o controle , até então .

### 3.2.1. Método Anterior de obtenção da composição química do sinter de acordo com o objetivado

A figura 19 mostra o macro fluxo do processo de obtenção do sinter.

Consiste basicamente de atividades de planejamento , programação e controle das matérias primas recebidas , de modo a garantir que a mistura para a sinterização esteja de acordo com a objetivada e da forma mais estável o possível.

O sinter é então produzido , e nesse ponto é feito um monitoramento da qualidade do produto.

Devido a todos os fatores já descritos , acabam acontecendo desvios em relação aos valores esperados e a informação obtida na amostragem periódica do produto tem várias funções , sendo uma delas , a de tentar influir o mais rápido possível no processo de modo a diminuir ou eliminar os desvios.

Quanto a análise química do sinter , alguns elementos tais como  $\text{SiO}_2$  ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  , P e Fe , são monitorados pela Equipe técnica , com o objetivo de verificar se as previsões feitas no planejamento inicial estão realmente acontecendo . Caso não estejam , causas são procuradas e se necessário alterações nas próximas misturas são executadas . Essas ações normalmente tem um tempo mínimo para surtir efeito , da ordem de 5 dias .

Para alguns elementos químicos tais como  $\text{CaO}$  ,  $\text{MgO}$  ,  $\text{MnO}$  e  $\text{FeO}$  , além desse monitoramento da Equipe técnica , há a possibilidade de ajustes imediatos , pelo fato das principais matérias primas fornecedoras desses elementos serem utilizadas diretamente nos silos da sinterização e a atuação na dosagem desses materiais ser atribuição do operador da planta .



Figura 19 : Macro fluxo do processo de produção de sinter.

A obtenção das análises tem seu início na coleta dos incrementos na ultima correia transportadora da fábrica de sinter . Um amostrador automático do tipo corte de fluxo , passando pelo fluxo do material à cada 30 minutos coleta um incremento ( a reunião de incrementos gera uma amostra ) .

Em situação normal , à cada 4 horas , oito incrementos são coletados e enviados para o laboratório . No laboratório a amostra é composta ( reunião de todos os incrementos ) , quarteada ( para diminuir o tamanho da amostra ) e preparada para análise no espectrometro de fluorescência de Raios X .



A figura 20 mostra o esquema de coleta e agrupamento de incrementos visando a análise do sinter.

O resultado desse processo era a obtenção de uma análise química do produto à cada 4 horas de produção .

Em casos especiais , por exemplo quando estava ocorrendo troca de uma matéria prima , os incrementos eram reunidos á cada 4 coletas e geram uma análise á cada 2 horas . Nesse caso a média aritmética de 2 análises , que correspondia à produção de 4 horas , era plotada em gráfico seqüencial.

Os valores obtidos nessas análises ( correspondendo à quatro horas de produção) eram então disponibilizados ao operador da Planta que os colocava em um gráfico seqüencial . Esse gráfico apresenta uma linha central que corresponde ao valor objetivado para cada componente químico e dois limites ( um inferior e outro superior ) . Esses três valores correspondem à própria especificação do sinter. Essa tolerância em torno da média objetivada foi obtida em períodos passados através de negociações entre o cliente Alto Forno e a própria Sinterização e procurava representar a capacidade do processo.

Havia alguns critérios de modo que quando algum ponto saia fora desses limites , era feita uma alteração na proporção das matérias primas , chamada “ correção de carregamento “ , de acordo com critérios estabelecidos pela Área Técnica , de modo que o produto retornasse para a especificação.

Ainda atuando de forma preventiva , quando da troca de lotes de matérias primas , ( calcário , olivina , manganês e pilha homogeneizada ) onde houvesse alteração na composição destas ( acima de determinados valores ), “ correções de carregamento “ eram realizadas visando neutralizar esse efeito.

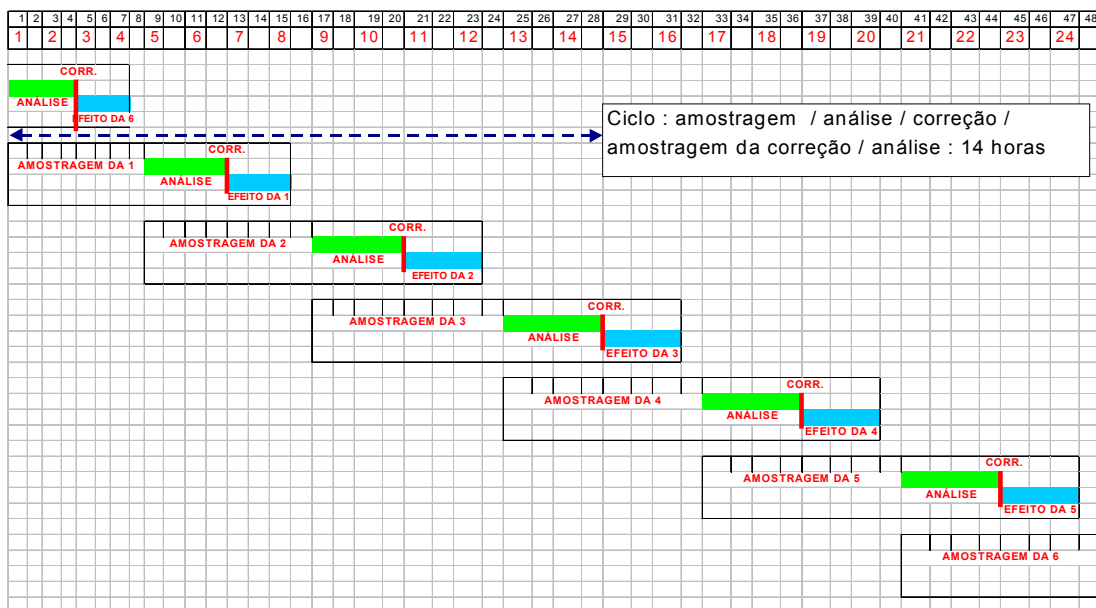


Figura 20 : Esquema de coleta e agrupamentos de incrementos formando amostras de sinter a serem analisadas – método anterior.

Essas correções eram baseadas em balanço de massas e estavam tabeladas e disponíveis aos operadores.

As figuras 21 , 22 , 23 e 24 , mostram os resultados obtidos em um período de 4 meses de produção para os elementos MgO , MnO , FeO e para a relação CaO / SiO<sub>2</sub> respectivamente.

A análise dos gráficos nos mostra :

- Elevado numero de alteração de especificação ( valor médio objetivado ).
- Grande numero de correções efetuadas
- Seqüências não aleatórias.

O resultado de todo esse processo é avaliado pelos operadores do Alto Forno através da comparação entre o valor médio da composição química do sinter fornecida á cada 8 horas e o valor objetivado.

Quanto menos afastado do alvo , melhor estará o desempenho do sinter.

Esse afastamento pode ser medido pelo Erro Quadrático Médio ( EQM ) que é a média da soma dos quadrados das diferenças entre os valores obtidos e o valor objetivado.

$$EQM = \frac{\sum (y - T)^2}{n}$$

onde :

y : valor correspondente ao teor do composto químico do sinter

T : valor objetivado do teor do composto químico do sinter

n : numero de dados

As figuras 25 , 26 , 27 e 28 , mostram os resultados obtidos em um período de 40 dias para os elementos MgO , MnO , FeO e para a relação CaO / SiO<sub>2</sub> respectivamente. O erro quadrático médio para este período está indicado em cada gráfico e esse critério será utilizado mais adiante como um critério para testar possíveis alterações nos resultados obtidos com o método proposto.

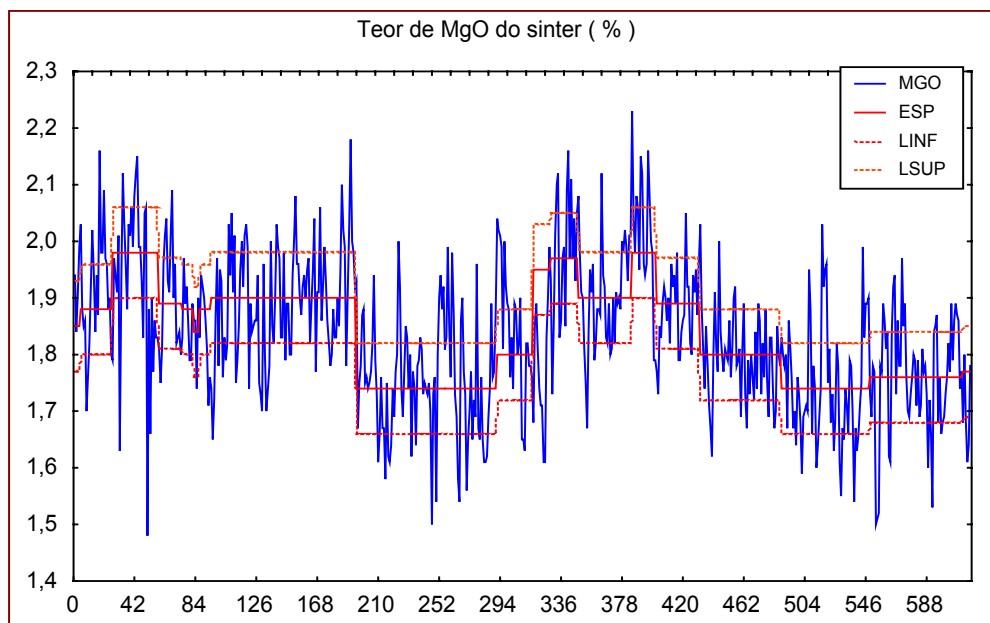


Figura 21 : Teor de MgO do sinter – Resultados referentes à 4 meses . Cada ponto corresponde á 4 horas de produção.

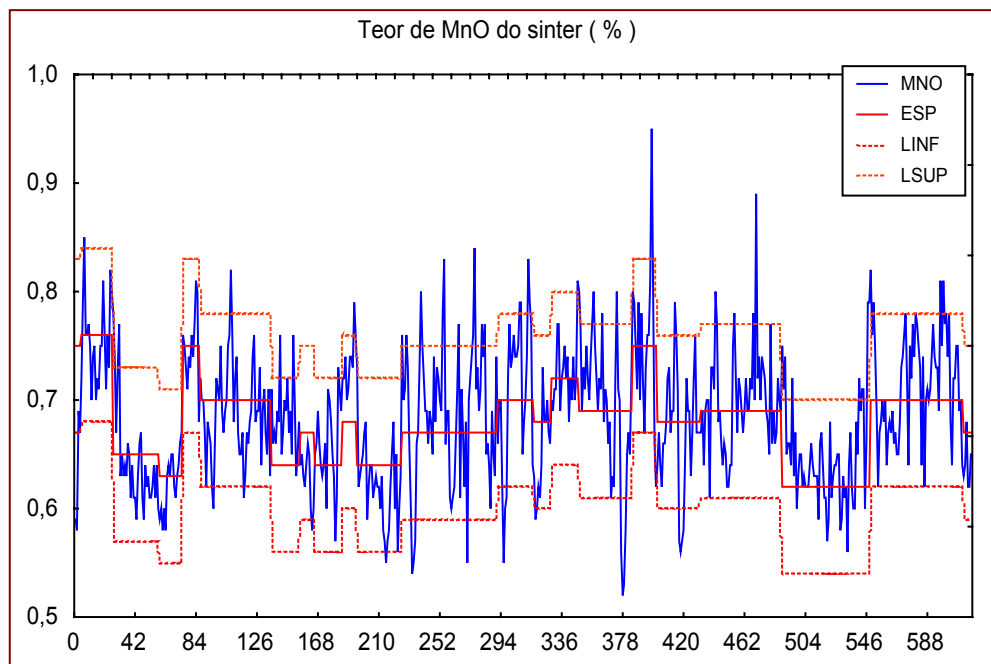


Figura 22 : Teor de MnO do sinter – Resultados referentes à 4 meses . Cada ponto corresponde á 4 horas de produção.

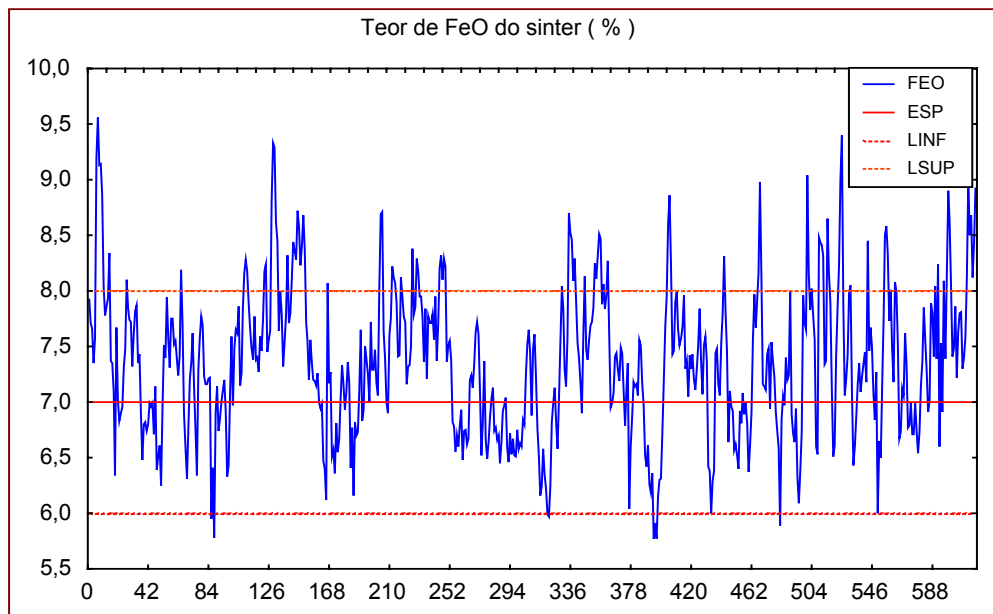


Figura 23 : Teor de FeO do sinter – Resultados referentes à 4 meses . Cada ponto corresponde á 4 horas de produção.

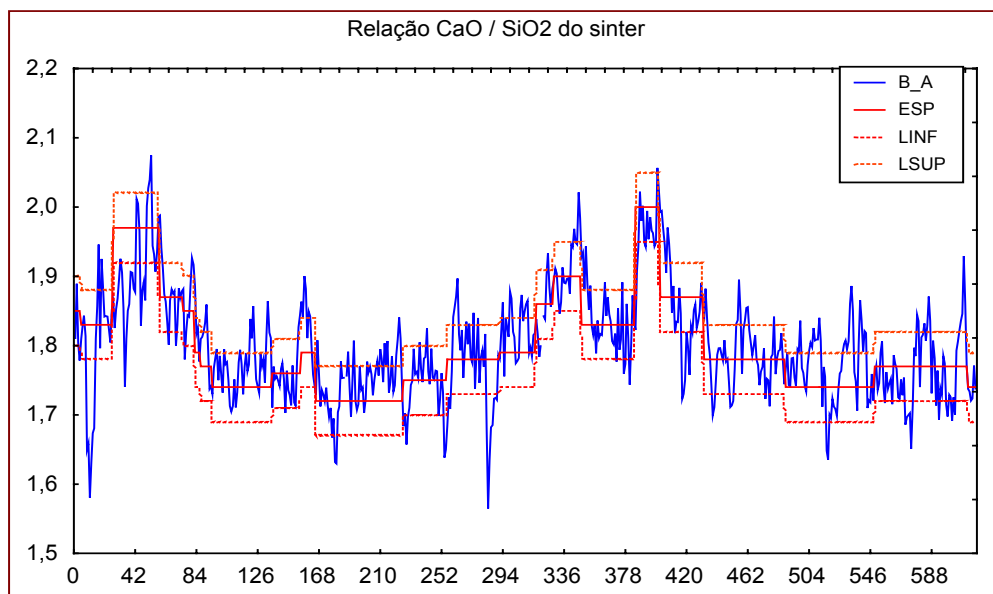


Figura 24 : Relação CaO / SiO<sub>2</sub> do sinter – Resultados referentes à 4 meses . Cada ponto corresponde á 4 horas de produção.

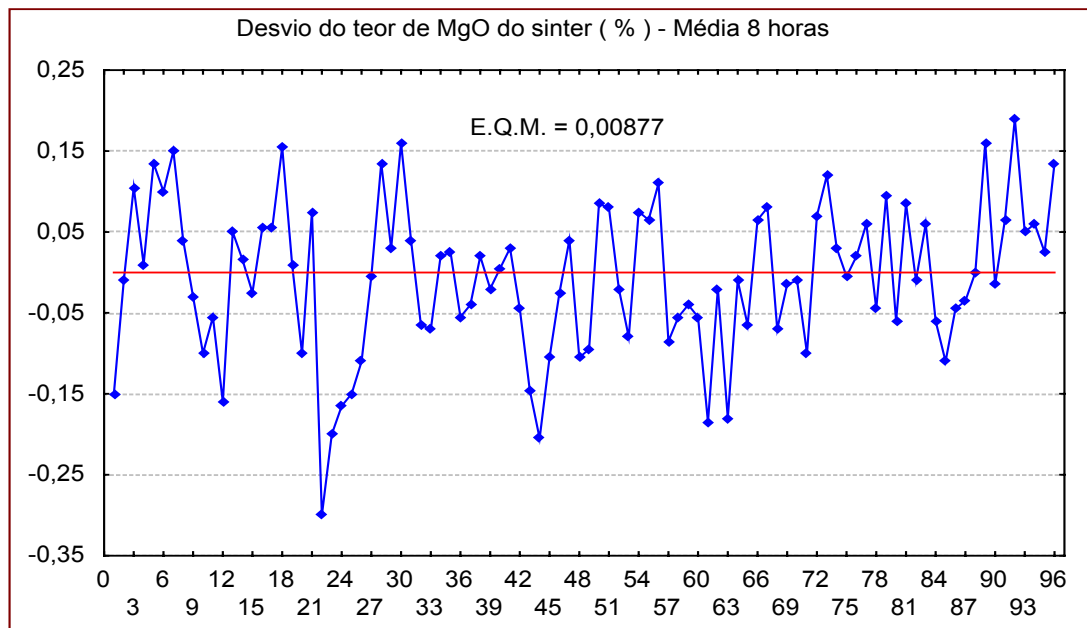


Figura 25 : Desvio do teor de MgO do sinter em relação ao valor objetivado – Resultados referentes a 1 mês de produção . Cada ponto equívale a 8 horas de produção.

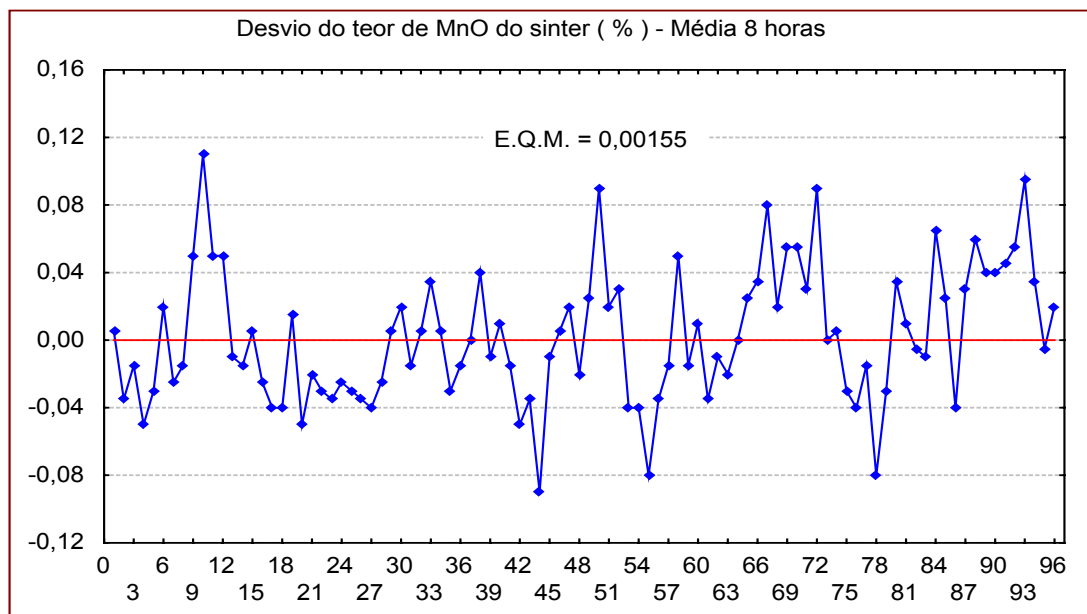


Figura 26 : Desvio do teor de MnO do sinter em relação ao valor objetivado – Resultados referentes a 1 mês de produção . Cada ponto equívale a 8 horas de produção.

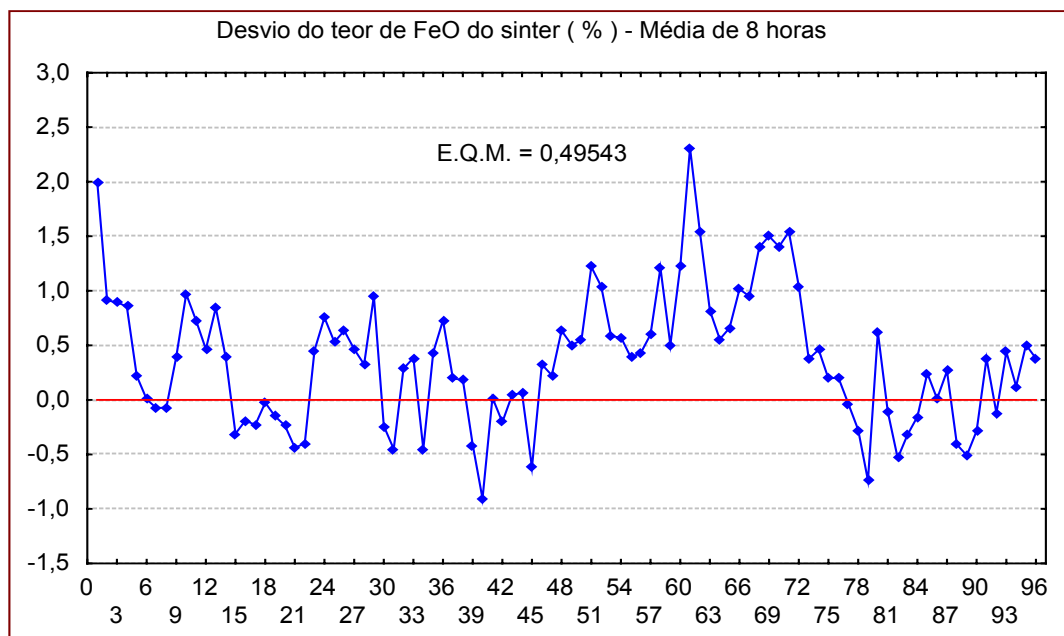


Figura 27 : Desvio do teor de FeO do sinter em relação ao valor objetivado – Resultados referentes a 1 mês de produção . Cada ponto equivale a 8 horas de produção.

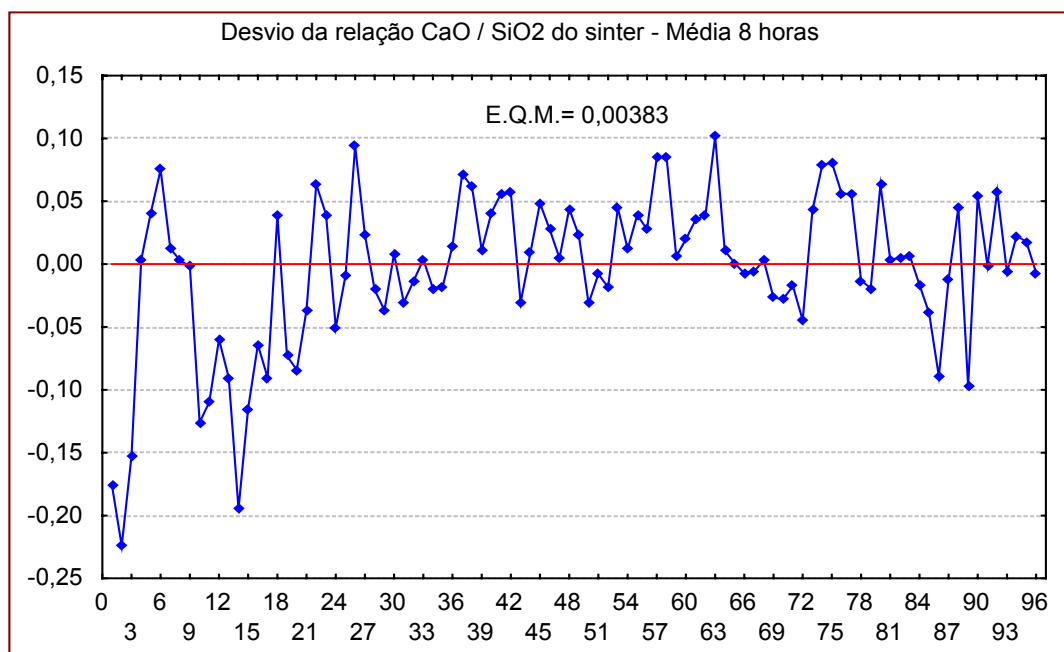


Figura 28 : Desvio da relação CaO / SiO<sub>2</sub> do sinter em relação ao valor objetivado – Resultados referentes a 1 mês de produção . Cada ponto equivale a 8 horas de produção.

### 3.2.2. Desenvolvimento do Novo Método

Em função da diversidade de motivos que podem potencialmente causar variações na composição química do sinter , decidiu-se por um controle baseado em ajustes devido:

➤ Como visto anteriormente , o aspecto de continuidade que se apresenta na composição química do sinter , originário desde a retirada dos minérios da natureza , até o resultado da segregação granulométrica nos silos da fábrica , estarem presentes e não poderem ser anulados com os atuais equipamentos disponíveis.

➤ Não impedir o uso paralelo / posterior das cartas de controle , monitorando o processo , em busca de causas especiais que possam ser eliminadas.

Uma vez decidido pelo ajuste , é importante que ele seja feito em uma base lógica e sistemática . Sem essa base , decisões de quando e quanto corrigir ficariam muito prejudicados pois diferentes operadores podem ser muito diferentes quanto à habilidade e experiência.

Para obter esse esquema racional foi usada a idéia básica de que , uma vez que existe uma continuidade nos dados , ou seja os dados não são independentes , isso também significa que é possível serem feitas previsões dos próximos valores dos componentes químicos do sinter.

Sendo possível fazer essas previsões podemos estar trabalhando preventivamente , ou seja , quando nossas previsões não estiverem de acordo com a especificação , podemos tentar anular os desvios previstos , através de alterações nas proporções das matérias primas .

O modelo da média móvel exponencialmente ponderada ( EWMA ) , como citado por Box<sup>26</sup> e por Hunter<sup>12</sup> mostrou – se à princípio ser bastante adequado principalmente devido sua simplicidade , robustez e aplicação em outros processos análogos como visto na literatura.

Box mostra que principalmente para indústrias de processo onde ocorre esse tipo de variação inerente nas matérias primas , e onde , se o processo é deixado sem controle , o resultado esperado é que a característica de interesse se afaste cada vez mais do valor objetivado ( T ) , é freqüente conseguir – se uma boa previsão do valor adiante da série , através da média móvel exponencialmente ponderada , ou :

$$\hat{Z}_{t+1} = \tilde{Z}_t = (1 - \theta)(Z_t + \theta Z_{t-1} + \theta^2 Z_{t-2} + \theta^3 Z_{t-3} + \theta^4 Z_{t-4} + \dots) \quad (1)$$

onde :

$Z_t$  : é o valor da diferença entre a variável de interesse y e o alvo T , no instante t ou



$$Z_t = y_t - T \quad (2)$$

$\tilde{Z}_t$  : é o valor da média móvel exponencial de  $Z$  , obtida com os dados até o instante  $t$  , incluindo este.

$\hat{Z}_{t+1}$  : é o valor previsto de  $Z$  no instante  $t+1$ .

$\theta$  : é uma constante determinada através de estudo dos dados passados da série  $Z$  e será aquele que resultar nas melhores previsões de  $Z$  .

Uma forma mais prática da equação ( 1 ) , pode ser obtida , observando que :

$$\hat{Z}_{t+1} = \tilde{Z}_t = (1 - \theta)Z_t + (1 - \theta)(\theta Z_{t-1} + \theta^2 Z_{t-2} + \theta^3 Z_{t-3} + \theta^4 Z_{t-4} + \dots)$$

$$\hat{Z}_{t+1} = \tilde{Z}_t = (1 - \theta)Z_t + \theta(1 - \theta)(Z_{t-1} + \theta Z_{t-2} + \theta^2 Z_{t-3} + \theta^3 Z_{t-4} + \dots)$$

$$\text{como , } (1 - \theta)(Z_{t-1} + \theta Z_{t-2} + \theta^2 Z_{t-3} + \theta^3 Z_{t-4} + \dots) = \tilde{Z}_{t-1} = \hat{Z}_t$$

$$\hat{Z}_{t+1} = \tilde{Z}_t = (1 - \theta)Z_t + \theta \hat{Z}_t \quad (3)$$

ou seja , a previsão do próximo instante nada mais é que uma interpolação entre o ultimo valor obtido e o ultimo valor previsto . Para tal ,  $\theta$  será um numero entre 0 e 1 .

Os pesos dos termos da média móvel exponencialmente ponderada em ( 1 ) , indo do ultimo instante disponível para os instantes anteriores são respectivamente :

$$(1 - \theta) , \theta(1 - \theta) , \theta^2(1 - \theta) , \theta^3(1 - \theta) , \dots$$

seguindo os termos de uma progressão geométrica com termo inicial  $(1 - \theta)$  e razão  $\theta$  .

A análise das equações ( 1 ) e ( 3 ) mostram que para valores de  $\theta$  próximos de zero , a previsão do próximo instante será muito influenciada pelo ultimo valor obtido . Para valores de  $\theta$  próximos de 1 , menor será a influencia do ultimo valor e uma maior numero de termos anteriores irão contribuir na previsão.

O fator  $\theta$  chamado fator de desconto pode ser determinado com o seguinte critério : Tendo disponível a série que contém a variável  $Z$  de interesse , pode – se através da equação ( 3 ) , calcular para cada instante  $t$  , o valor previsto para certo valor  $\theta$  . Com os pares de valores  $Z_t$  e  $\hat{Z}_t$  , pode – se calcular o erro de previsão cometido :

$$e_t = Z_t - \hat{Z}_t \quad (4)$$

Fazendo esse cálculo para vários valores de  $\theta$  , adotaremos na utilização da média móvel exponencialmente ponderada , aquele valor de  $\theta$  que resultar na menor soma dos quadrados dos erros de previsão , soma essa calculada de acordo com :

$$S = \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (5)$$

O desvio padrão dos erros de previsão pode ser calculado por :

$$\hat{\sigma}_e = \sqrt{\frac{S_{\min}}{n-1}}$$

onde :

$\hat{\sigma}_e$  : estimativa do desvio padrão do erro de previsão.

$S_{\min}$  : mínima soma dos quadrados dos erros de previsão.

Para saber se o modelo de previsão que utiliza a média móvel exponencialmente ponderada é adequada aos dados , a análise dos erros de previsão  $e_t$  , deve – se constituir em uma série com seus valores independentes , ou seja , o modelo de previsão deve apontar para a continuidade dos dados , ficando o resíduo do modelo como o componente aleatório.

As figuras 29 , 30 , 31 e 32 apresentam os valores da soma dos quadrados dos erros de previsão para os elementos MnO , MgO , FeO e para a relação CaO / SiO<sub>2</sub> respectivamente. Delas podemos observar os valores aproximados de  $\theta$  que minimizam essa soma , conforme os valores mostrados na tabela 12. Foram usados para os cálculos , os dados das Figuras 25,26,27 e 28.

elemento	MgO	MnO	FeO	CaO/SiO <sub>2</sub>
$\theta$	0,6	0,4	0,2	0,4

Tabela 12 . Valores de  $\theta$  que minimizam a soma dos quadrados dos erros de previsão.

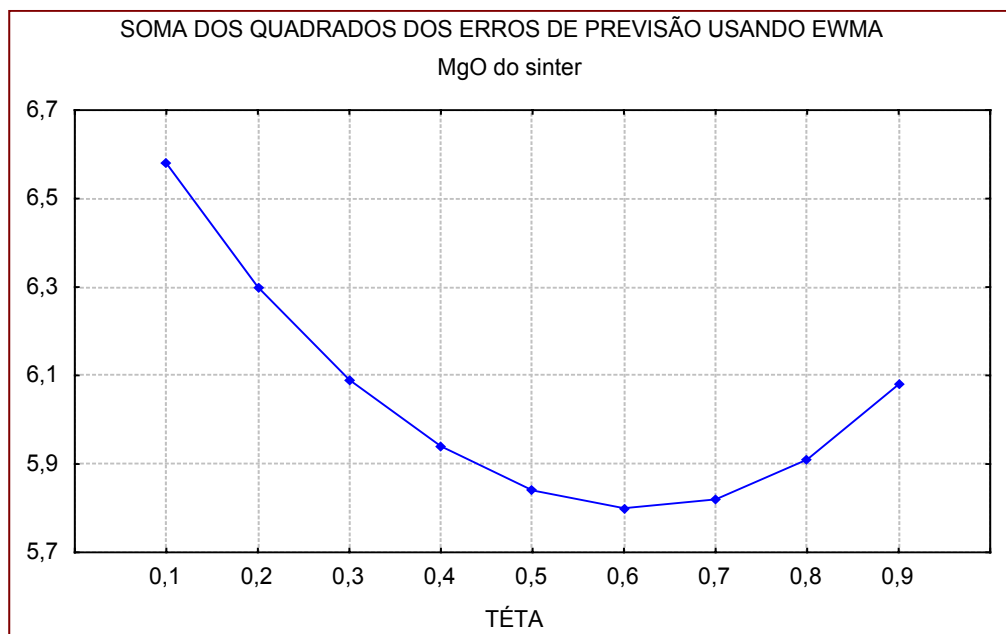


Figura 29 ; Soma dos quadrados dos erros de previsão do teor de MgO do sinter utilizando a média móvel exponencialmente ponderada – EWMA em função de  $\theta$  .

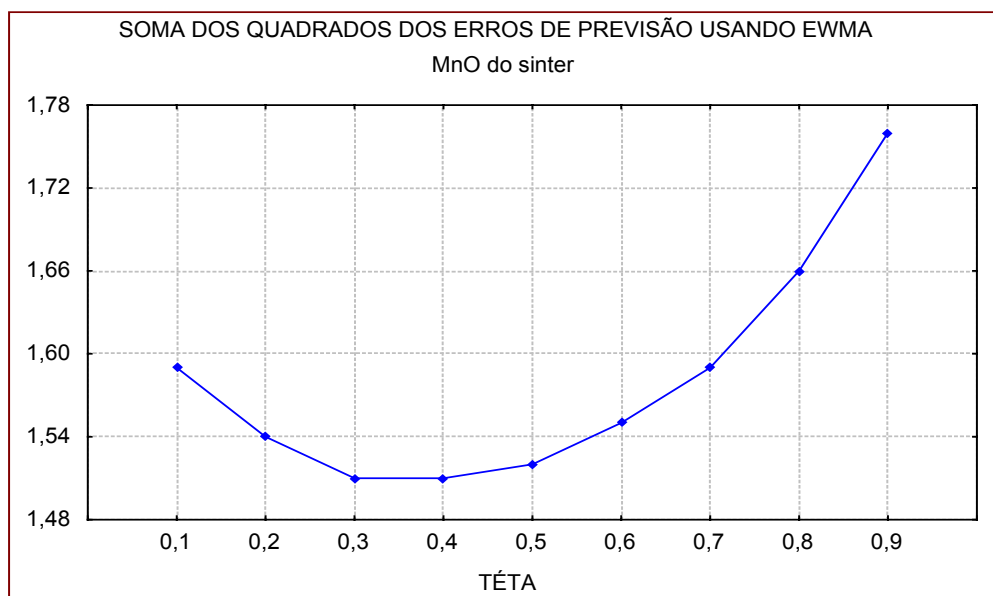


Figura 30 : Soma dos quadrados dos erros de previsão do teor de MnO do sinter utilizando a média móvel exponencialmente ponderada – EWMA em função de  $\theta$  .

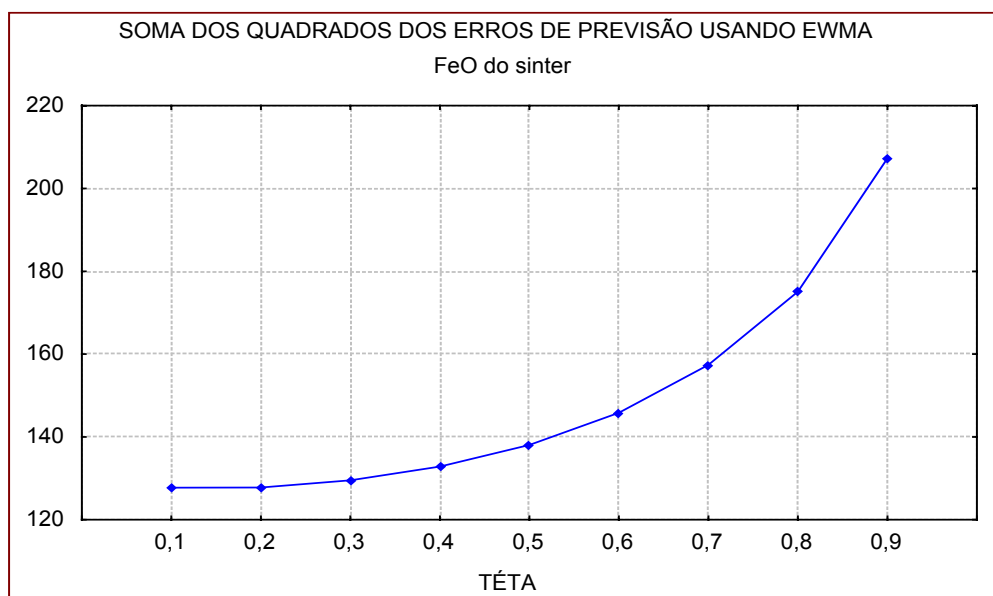


Figura 31 : Soma dos quadrados dos erros de previsão do teor de FeO do sinter utilizando a média móvel exponencialmente ponderada – EWMA em função de  $\theta$  .

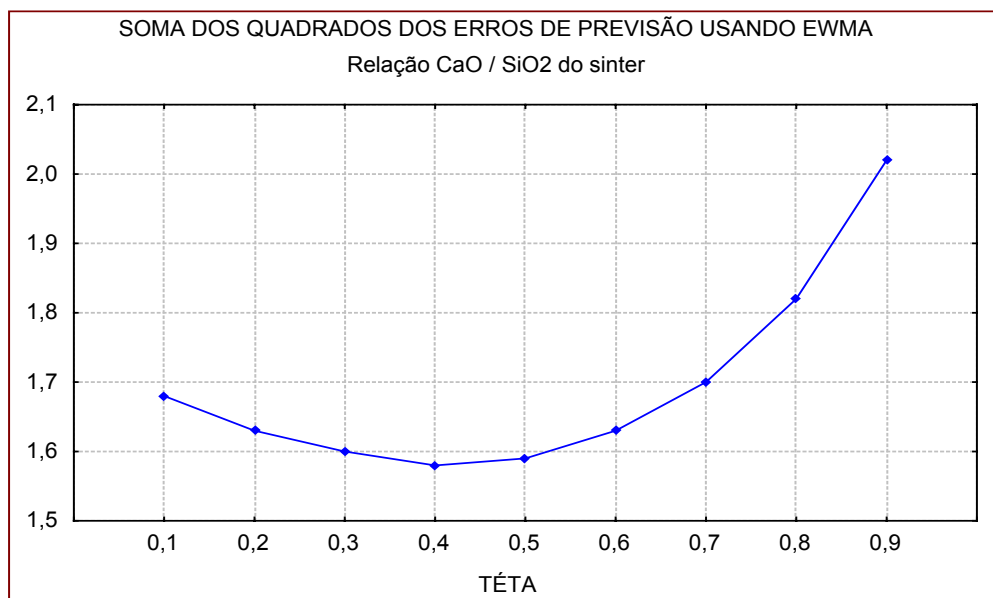


Figura 32 : Soma dos quadrados dos erros de previsão da relação CaO / SiO<sub>2</sub> do sinter utilizando a média móvel exponencialmente ponderada – EWMA em função de  $\theta$  .

As figuras 33 , 34, 35 e 36 mostram as séries dos resíduos et para os elementos MgO , MnO , FeO e para a relação CaO / SiO<sub>2</sub> respectivamente. Elas foram obtidas utilizando – se os valores de  $\theta$  que resultaram na menor soma dos quadrados . A análise delas mostra que aparentemente não há sinais de continuidade ou seja os resíduos comportam – se de forma aleatória , mostrando a princípio a adequação do modelo.

Neste ponto , estamos aptos a fazer previsões dos próximos valores dos desvios dos elementos químicos e dessa forma atuar preventivamente na diminuição desses desvios.

O controle por retroalimentação ( “feedback “ ) pressupõe que existe alguma variável compensatória ( variável X ) que pode ser manipulada para ajustar o nível da variável controlada .

Para o caso da qualidade química do sinter , as variáveis controladas são :

- % de MgO do sinter
- % de MnO do sinter
- % de FeO do sinter
- relação CaO/SiO<sub>2</sub> do sinter

Para cada uma dessas variáveis , existe uma variável compensatória , sendo elas respectivamente:

- proporção de olivina na mistura a sinterizar
- proporção de minério de manganês na mistura a sinterizar
- proporção de coque na mistura a sinterizar
- proporção de calcário na mistura a sinterizar

O controle feedback é colocado em prática , plotando os valores dos desvios de cada uma das variáveis controladas em relação ao alvo em um gráfico seqüencial , e de acordo com esse desvio , alterações são feitas nas variáveis compensatórias.

Sendo implantado de forma manual , o gráfico também fornece uma leitura da quantidade a ser alterada na variável compensatória de modo que o próximo valor da variável controlada seja esperado estar no alvo. Quando dispomos desse novo valor , ele nos mostrará o quanto nos aproximamos do alvo como consequência da compensação realizada no instante anterior e também já servirá para podermos estimar , através de previsão , o novo valor da variável controlada e dessa forma , se necessário atuar novamente através da compensação do desvio previsto.

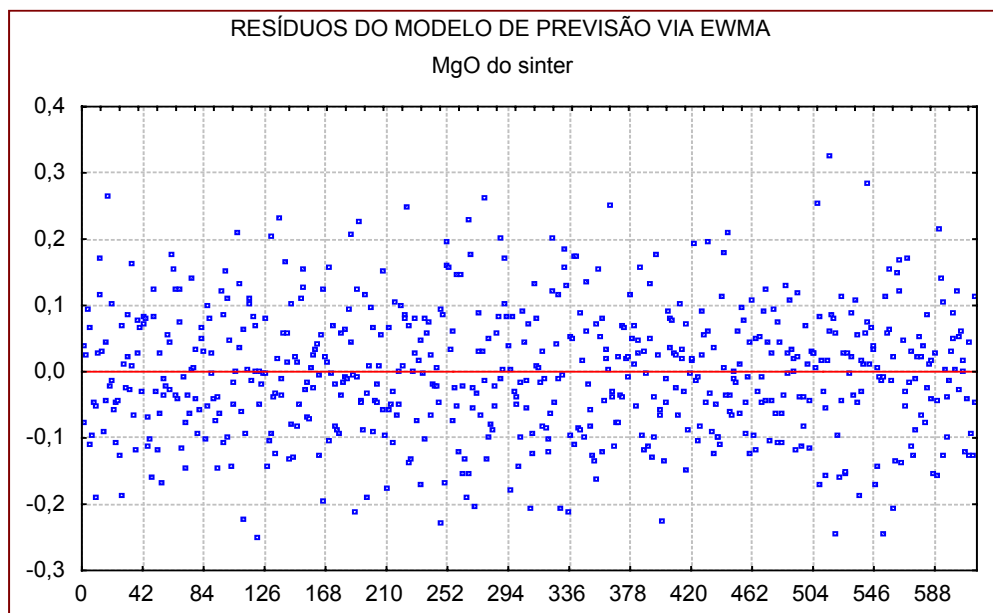


Figura 33 : Resíduos do modelo de previsão via EWMA para o teor de MgO do sinter.

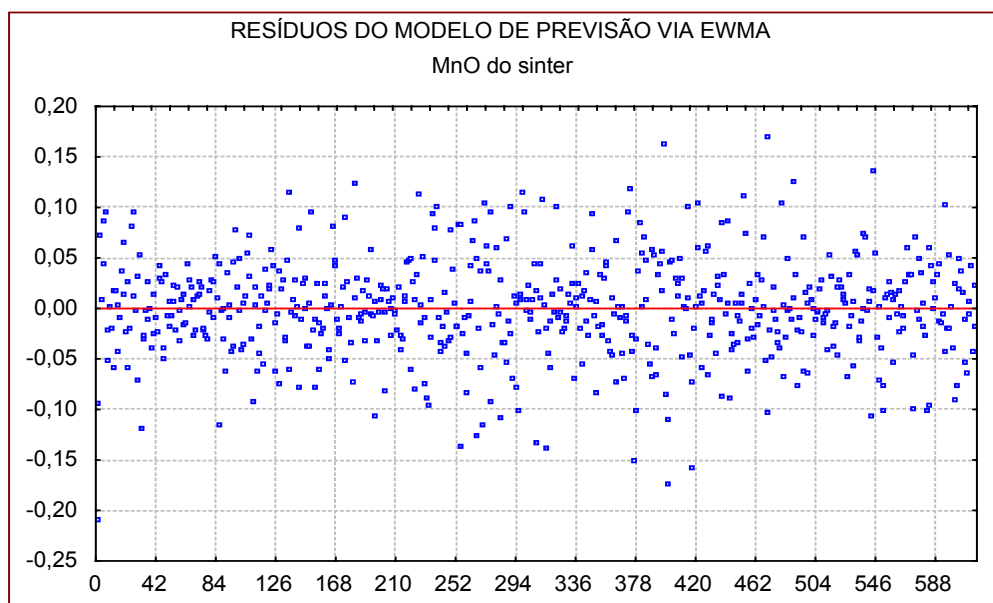


Figura 34 : Resíduos do modelo de previsão via EWMA para o teor de MnO do sinter.

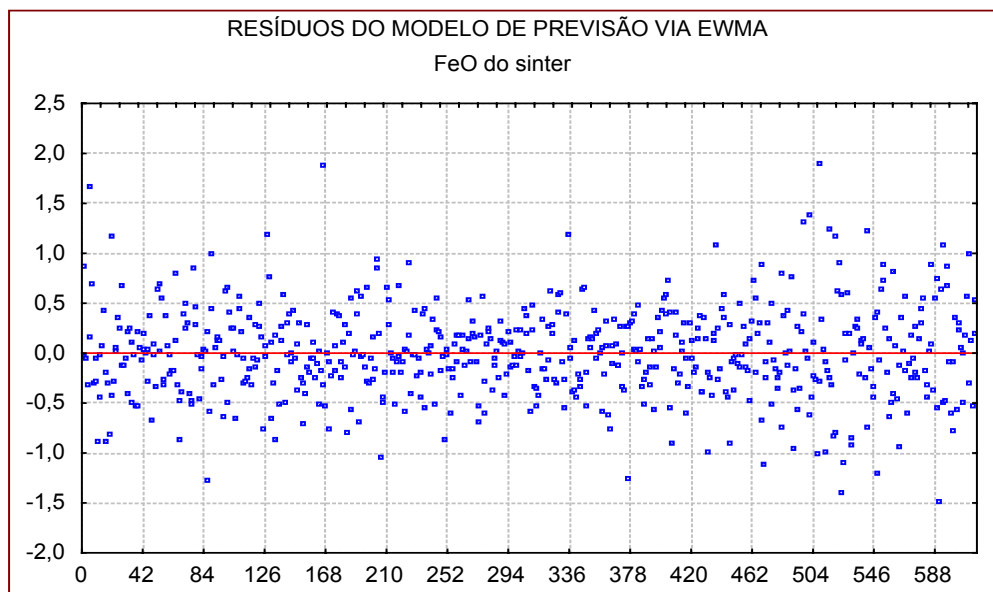


Figura 35 : Resíduos do modelo de previsão via EWMA para o teor de FeO do sinter.

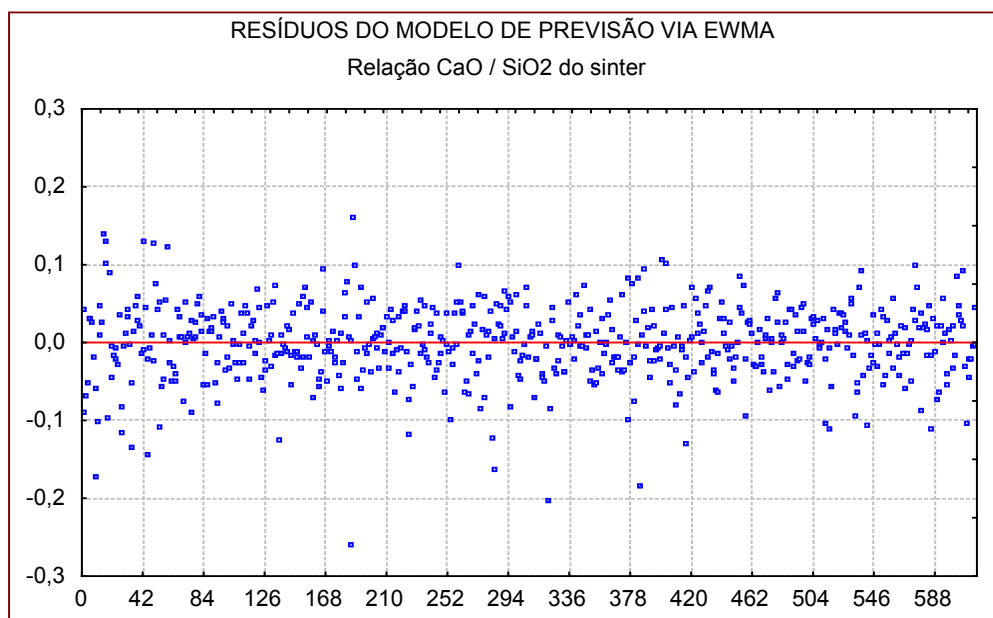


Figura 36 : Resíduos do modelo de previsão via EWMA para a relação CaO / SiO<sub>2</sub> do sinter.

Sabemos que o próximo valor previsto de Z estará de acordo com a equação ( 3 ) , entre  $Z_t$  e  $\hat{Z}_t$

$$\hat{Z}_{t+1} = \tilde{Z}_t = (1 - \theta)Z_t + \theta\hat{Z}_t$$

Como desejamos que nossa variável controlada esteja sempre no alvo , significa que  $\hat{Z}_t = 0$  , de modo que :

$$\hat{Z}_{t+1} = (1 - \theta)Z_t$$

Chamando ( 1 -  $\theta$  ) de G , temos que , se não atuarmos na variável compensatória , o valor previsto em t+1 será :

$$\hat{Z}_{t+1} = GZ_t$$

e como :

$e_t = Z_t - \hat{Z}_t$  , mas  $\hat{Z}_t = 0$  ( estamos fazendo ajustes para conseguir isto ) , vem que :

$$\hat{Z}_{t+1} = Ge_t$$

resulta daí , que a correção que deve ser efetuada para compensar o desvio previsto será , admitindo que uma alteração feita na proporção das matérias primas produz todo seu efeito desde a atuação até o próximo valor ,

$$Ge_t = -g \cdot x_t$$

onde

G : corresponde à ( 1 -  $\theta$  ) é chamado fator de amortecimento .

$e_t$  : é o desvio de previsão que ocorreu em t

$x_t$  : é a alteração necessária na variável compensatória

g : chamada de ganho , representa de quantas unidades a variável  $Z_t$  será influenciada pela alteração de uma unidade na variável  $x_t$ .

Com a análise química de cada uma das matérias primas , aliada à utilização do cálculo estequiométrico do leito de sinterização e à experiência acumulada em testes em escala piloto , obtivemos os valores do ganho g para cada uma das matérias primas que correspondem às variáveis compensatórias , de acordo com a tabela 13.



Variável compensatória	Proporção do minério de manganês [ t de minério de manganês / 100 t de sinter ]	Proporção da olivina [ t de olivina / 100 t de sinter ]	Proporção do coque [ t de coque / 100 t de sinter ]	Proporção do calcário * [ t de calc / 100 t de sinter ]
g	0,5	0,5	7,2	0,1 / 0,3125

\* O calcário é usado tanto para correção da relação  $\text{CaO} / \text{SiO}_2$  , com  $g = 0,1$  , quanto para correção de  $\text{MgO}$  ( neutralizando o efeito do teor de  $\text{SiO}_2$  da olivina ) e nesse caso  $g = 0,3125$ .

Tabela 13 . Valores do ganho g para cada uma das variáveis compensatórias.

O conceito básico para determinação do fator g pode ser descrito por exemplo para o caso da correção do teor de  $\text{MnO}$  por minério de manganês da seguinte forma : Caso haja um desvio de  $-1\%$  de  $\text{MnO}$  no sinter ( teor de  $\text{MnO}$   $1\%$  abaixo do especificado ) , será necessário adicionar 2 t de minério de manganês para cada 100 t de sinter , ou seja  $g = 0,5$  ( cada t de minério de manganês afeta o teor de  $\text{MnO}$  do sinter em  $0,5\%$  ).

Para a implantação do método ainda foi necessário , diminuir o chamado por Box , de tempo morto .

Algumas vezes em controle feedback , alguns processos estão sujeitos à um tempo morto ; isto é em resposta à uma mudança , um período de puro atraso ocorre antes que algum efeito seja notado na saída . Em industrias de processo , tempo morto é causado por dutos , bombas e tanques que atrasam o produto . Em outros casos , tempo morto pode ser causado devido ao tempo gasto entre a amostragem do produto e a efetiva disponibilidade do resultado para que uma ação possa ser efetuada. O tempo morto diminui em muito a eficiência de um controle feedback e por isso deve ser se possível eliminado.

A análise da Figura 20 mostra que , em utilizando o esquema vigente de coleta e agrupamento de incrementos , estaríamos presenciando uma boa dose de tempo morto .

Isso porque o ciclo todo entre coletar uma amostra , ter sua análise , agir no processo de modo a corrigi-lo e ter a resposta dessa correção demorava 14 horas ou seja o ciclo de correção era muito longo .

Visando eliminar essa situação , fizemos medições na Planta de Sinterização 2 da COSIPA e vimos que em aproximadamente 80 minutos , alguma alteração que tivesse sido feita na dosagem das matérias primas ( variáveis compensatórias ) , já estavam surtindo efeito no produto que está passando pelo ponto de amostragem . Estimamos também o tempo mínimo necessário para que fossem efetuadas as operações de preparação de amostra e análise chegando a um valor de 60 minutos . Decidimos então pela implantação de um intervalo entre coletas de incrementos de 160 minutos , e sem agrupamento de incrementos.

Com esse tempo , garantimos que cada análise química efetuada retrata a ultima alteração feita no carregamento. A Figura 37 ilustra o esquema implantado.

Nesse esquema , o mesmo ciclo anteriormente descrito ( agir no processo para corrigi – lo e ter a resposta dessa correção) é diminuído para 3 horas e 40 minutos , tornando a sistemática de ajuste muito mais rápida .

Para não alterar a representatividade da amostra , o numero de incrementos a ser coletado em uma amostra foi estipulado em quatro , de modo a ficar com uma amostra de no mínimo 80 kg , da mesma dimensão do caso anterior quando a amostra era fechada em 2 horas . Para conseguir isto , o equipamento de amostragem foi programado a trabalhar de forma que à cada 160 minutos , quando acionado , ele deveria repetir 4 vezes sucessivas o corte do fluxo do sinter na correia transportadora.

Esse esquema também possibilita a não alteração da rotina vigente de informar a análise química do sinter a cada 8 horas para o Alto Forno , sendo que agora essa análise será composta por três análises (  $3 \times 160$  minutos = 480 minutos ou 8 horas ).

Mantida a frequência de informação para o Alto Forno será possível comparar os resultados obtidos com a implantação do método em relação à período anterior.

Nesse ponto do trabalho , temos a seguinte condição já estruturada :

- Equação de controle para cada elemento químico ( modelo EWMA aparentemente adequado e ganho  $g$  previamente calculado ).
- Novo sistema de coletas de incrementos e composição das amostras visando diminuir o tempo morto.
- Operadores já acostumados com o uso de gráficos seqüenciais plotados manualmente. Partimos então para a elaboração de gráficos de ajustes manuais como proposto por Box<sup>26</sup>.

Os gráficos para os três elementos químicos estudados bem como para a relação  $\text{CaO} / \text{SiO}_2$  estão mostrados nas figuras 38 , 39 , 40 , 41 e 42 .

O modo de utilização desse gráficos está indicado na figura 41 . No eixo x tem – se uma escala temporal , sendo os pontos 1 A , 1 B , 2 B , 3 A , 3 B , 4 B , 5 A , 5 B e 6 B , as identificações das nove amostras realizadas em um dia de produção , abrangendo então o gráfico , o período de sete dias de produção.

O operador , após receber o resultado de análise química do laboratório , plota o valor da % de FeO , baseando – se na escala Y da direita.

O valor lido na escala Y da esquerda , correspondente a esse ponto , é o ajuste que deve ser realizado na variável compensatória “ dosagem de moinha de coque “ para procurar manter o teor de FeO em torno do valor alvo de 7 %.

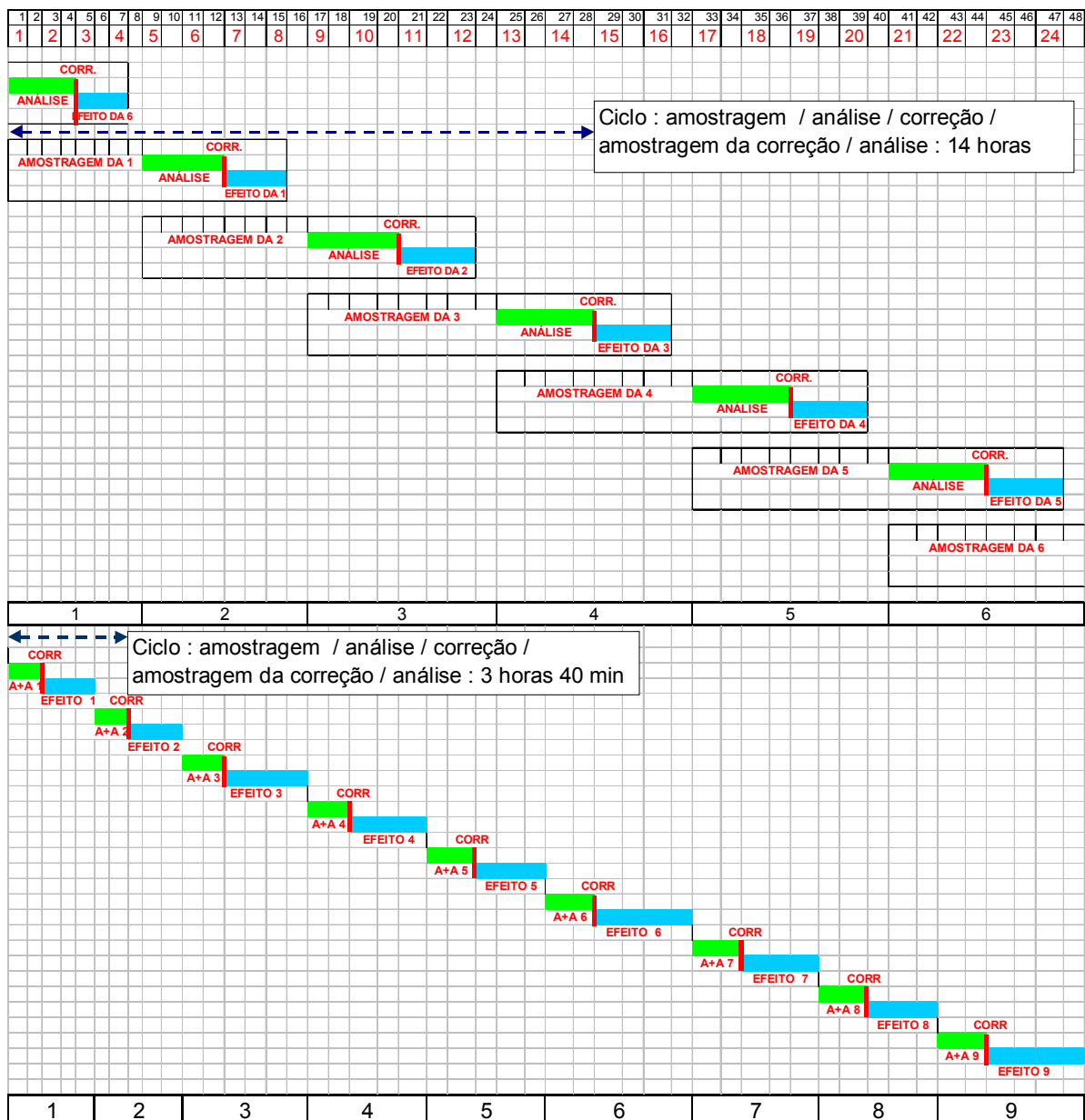


Figura 37 : Esquema de coleta e agrupamento de incrementos formando amostras de sinter a serem analisadas . Comparação entre o método anterior e o método implantado.

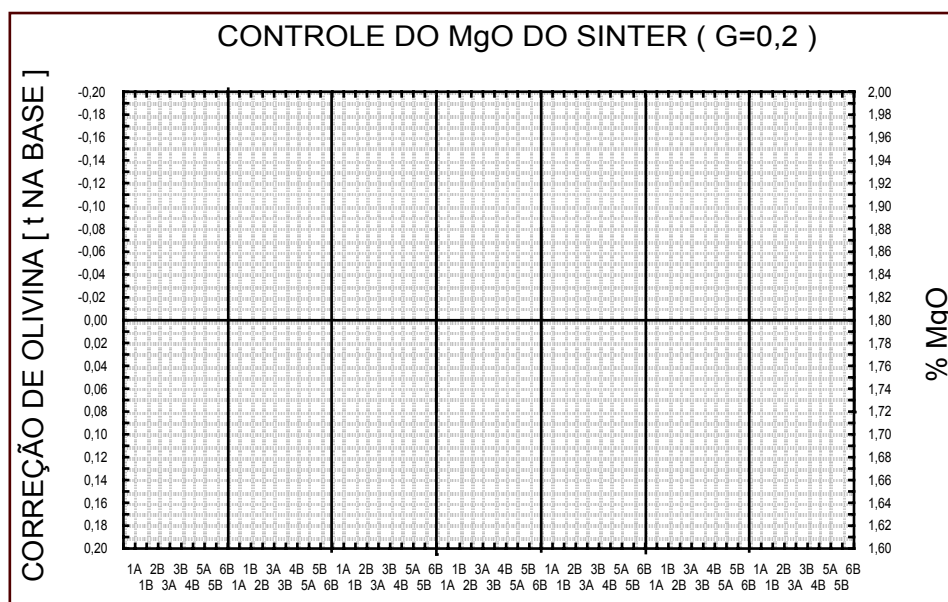


Figura 38 : Gráfico de controle para o teor de MgO do sinter – Correção de olivina .

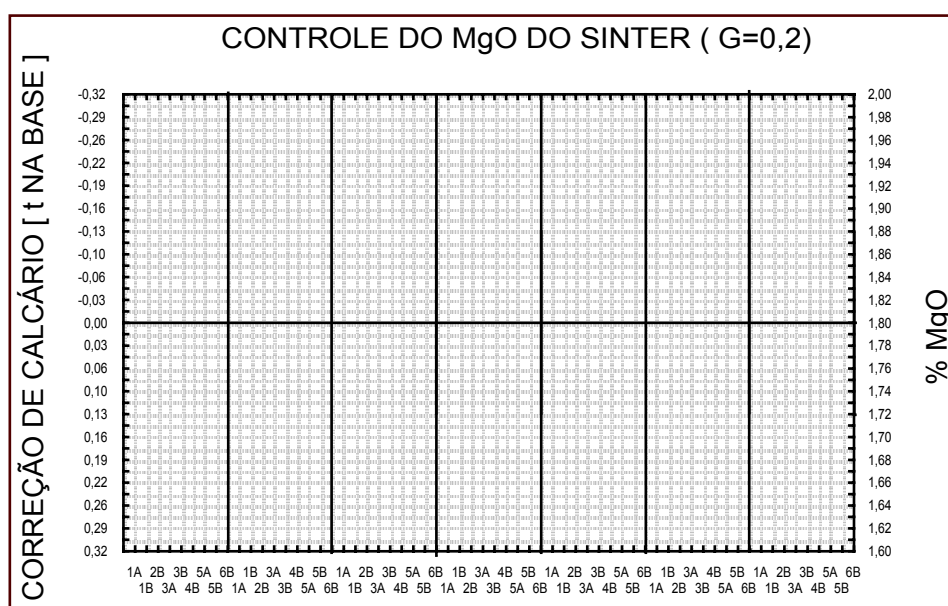


Figura 39 : Gráfico de controle para o teor de MgO do sinter – Correção de calcário .

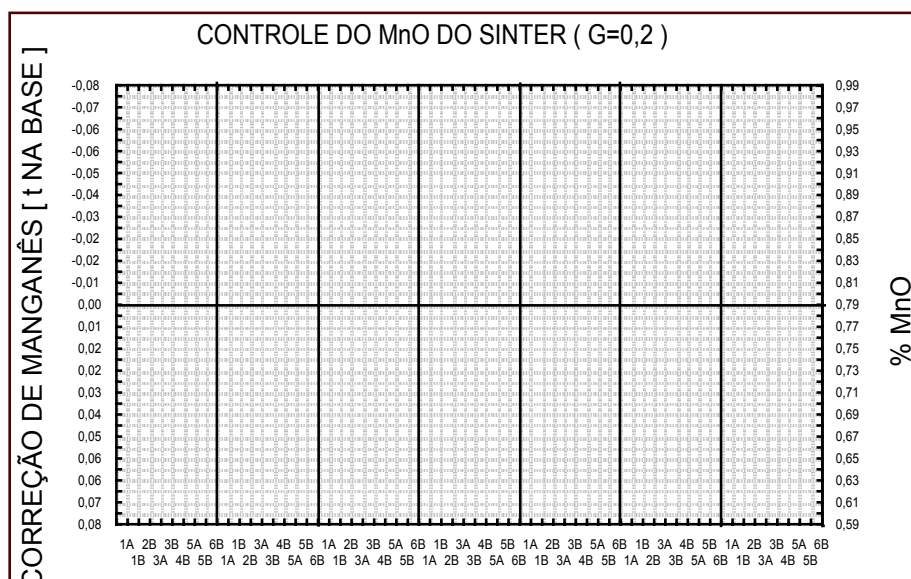


Figura 40 : Gráfico de controle para o teor de MnO do sinter – Correção de minério de manganês.

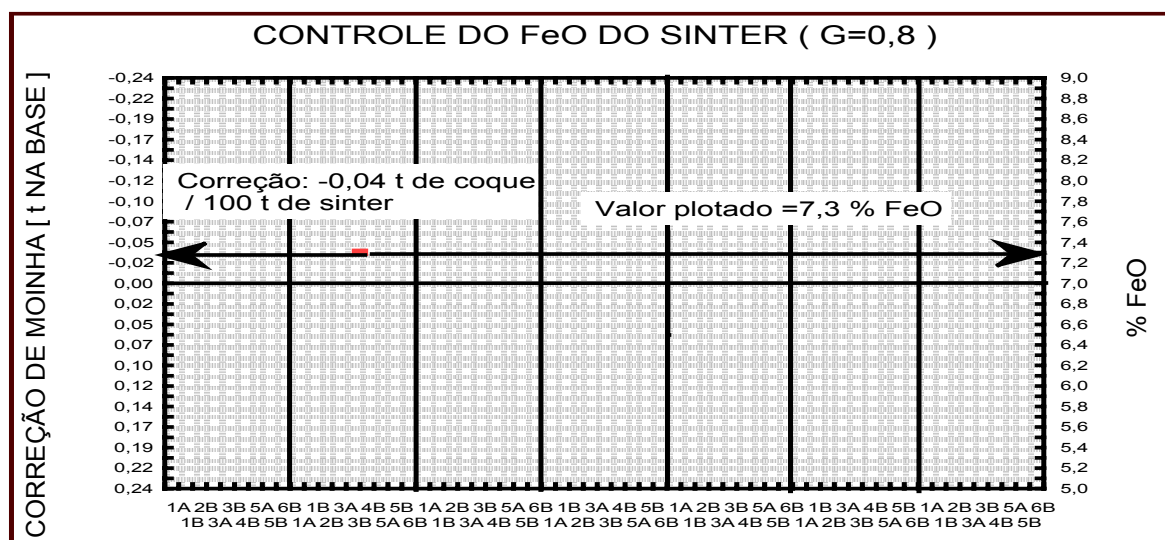


Figura 41 : Gráfico de controle para o teor de FeO do sinter – Correção de moinha .

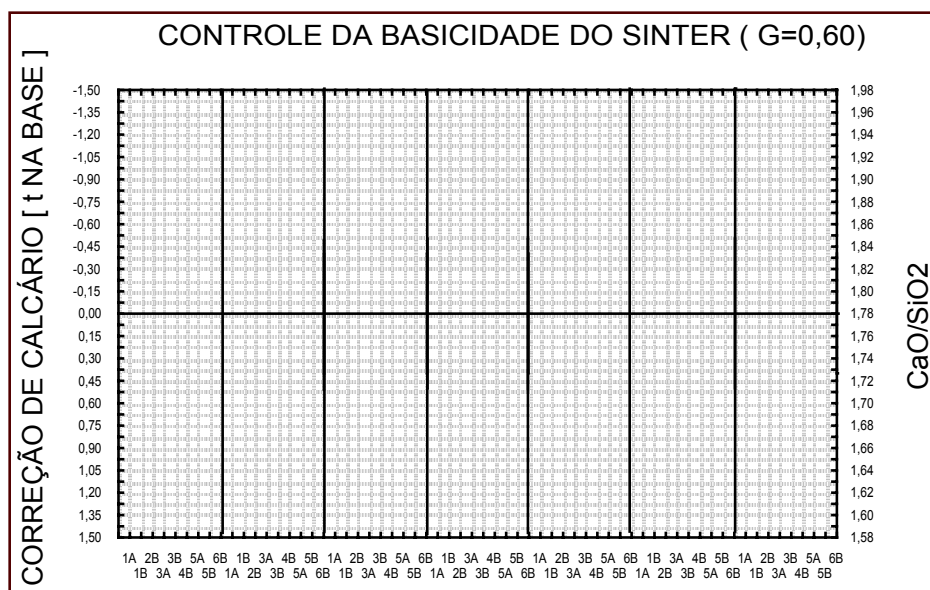


Figura 42 : Gráfico de controle para a relação CaO / SiO<sub>2</sub> do sinter – Correção de calcário .

Cumpra-se notar que :

- Visto que a olivina tem elevados teores de MgO e de SiO<sub>2</sub> , como mostrado na tabela 2 , quando é feita uma correção no MgO do sinter via olivina , a % de SiO<sub>2</sub> é alterada por consequência . Portanto , nesse caso será necessária uma correção de calcário para compensar esse efeito , para manter a mesma relação CaO / SiO<sub>2</sub> .
- Visto que o calcário é usado também para correção da relação CaO / SiO<sub>2</sub> , independente da correção de olivina , caso haja necessidade de correção pelos dois motivos , deve – se somar os dois componentes e então atuar na correção de calcário.

### 3.3. Terceira Etapa : A Decomposição da variabilidade

Seguindo o método sugerido por Box <sup>25</sup> em agosto de 2002 realizamos um experimento para determinar a composição da variabilidade dos elementos químicos estudados no sinter .

Para tal , escolhemos como um lote , a produção de um intervalo de tempo de 160 minutos . Esse valor corresponde aquele usado na nova rotina de amostragem e que leva em conta o tempo necessário para que uma alteração na dosagem das matérias primas tenha efeito no resultado do produto. Nesse período , espera – se que o produto represente um período onde a variação seja menor que aquela observada entre lotes distintos.

Decidimos por selecionar um lote por dia no horário administrativo , de modo que o tempo necessário para coletar 10 lotes correspondeu a aproximadamente 15 dias , levando – se em conta os fins de semana . Durante esse período de 15 dias podemos a princípio admitir que a maioria das causas que influem na variabilidade do produto estiveram presentes.

Em cada lote foram coletadas duas amostras espaçadas em 80 minutos uma da outra. Cada uma das amostras foi analisada duas vezes . A tabela 14 apresenta os dados obtidos .

Data	Lote	Am.	análise	MgO			MnO			FeO			B / A		
				valor	esp.	Z	valor	esp.	Z	valor	esp.	Z	valor	esp.	Z
28/Ago	1	1	A	1,76	1,75	0,01	0,76	0,75	0,01	7,61	7,00	0,61	1,93	1,95	-0,02
			B	1,78	1,75	0,03	0,77	0,75	0,02	7,33	7,00	0,33	1,95	1,95	0,00
		2	A	1,67	1,75	-0,08	0,72	0,75	-0,03	6,99	7,00	-0,01	1,93	1,95	-0,02
			B	1,78	1,75	0,03	0,79	0,75	0,04	6,95	7,00	-0,05	1,91	1,95	-0,04
29/Ago	2	1	A	1,76	1,75	0,01	0,73	0,75	-0,02	6,37	7,00	-0,63	2,00	1,95	0,05
			B	1,71	1,75	-0,04	0,66	0,75	-0,09	6,35	7,00	-0,65	1,98	1,95	0,03
		2	A	1,67	1,75	-0,08	0,73	0,75	-0,02	6,36	7,00	-0,64	2,01	1,95	0,06
			B	1,54	1,75	-0,21	0,72	0,75	-0,03	6,49	7,00	-0,51	2,00	1,95	0,05
30/Ago	3	1	A	1,55	1,75	-0,20	0,65	0,75	-0,10	7,80	7,00	0,80	2,02	1,95	0,07
			B	1,61	1,75	-0,14	0,7	0,75	-0,05	7,76	7,00	0,76	1,98	1,95	0,03
		2	A	1,78	1,75	0,03	0,81	0,75	0,06	7,00	7,00	0,00	2,10	1,95	0,15
			B	1,64	1,75	-0,11	0,73	0,75	-0,02	6,92	7,00	-0,08	2,06	1,95	0,11
02/Set	4	1	A	1,64	1,75	-0,11	0,71	0,75	-0,04	6,45	7,00	-0,55	1,75	1,95	-0,20
			B	1,66	1,75	-0,09	0,75	0,75	0,00	6,82	7,00	-0,18	1,83	1,95	-0,12
		2	A	1,62	1,75	-0,13	0,69	0,75	-0,06	6,35	7,00	-0,65	1,82	1,95	-0,13
			B	1,85	1,75	0,10	0,68	0,75	-0,07	6,32	7,00	-0,68	1,85	1,95	-0,10
04/Set	5	1	A	1,6	1,85	-0,25	0,68	0,75	-0,07	6,41	7,00	-0,59	1,93	2,03	-0,10
			B	1,6	1,85	-0,25	0,74	0,75	-0,01	7,86	7,00	0,86	2,09	2,03	0,06
		2	A	1,78	1,85	-0,07	0,73	0,75	-0,02	7,06	7,00	0,06	2,04	2,03	0,01
			B	1,86	1,85	0,01	0,73	0,75	-0,02	6,86	7,00	-0,14	2,03	2,03	0,00
05/Set	6	1	A	1,83	1,85	-0,02	0,74	0,75	-0,01	6,54	7,00	-0,46	2,04	2,03	0,01



		2	B	1,87	1,85	0,02	0,79	0,75	0,04	6,25	7,00	-0,75	1,99	2,03	-0,04
			A	1,86	1,85	0,01	0,76	0,75	0,01	6,51	7,00	-0,49	2,02	2,03	-0,01
			B	1,95	1,85	0,10	0,78	0,75	0,03	6,41	7,00	-0,59	2,04	2,03	0,01
06/Set	7	1	A	1,87	1,85	0,02	0,75	0,75	0,00	6,35	7,00	-0,65	2,08	2,03	0,05
			B	1,78	1,85	-0,07	0,72	0,75	-0,03	6,38	7,00	-0,62	2,07	2,03	0,04
		2	A	1,91	1,85	0,06	0,75	0,75	0,00	6,31	7,00	-0,69	2,08	2,03	0,05
			B	1,94	1,85	0,09	0,74	0,75	-0,01	6,37	7,00	-0,63	2,08	2,03	0,05
09/Set	8	1	A	1,82	2,00	-0,18	0,75	0,75	0,00	6,65	7,00	-0,35	2,04	2,03	0,01
			B	1,81	2,00	-0,19	0,71	0,75	-0,04	6,84	7,00	-0,16	2,09	2,03	0,06
		2	A	2,1	2,00	0,10	0,69	0,75	-0,06	6,86	7,00	-0,14	2,05	2,03	0,02
			B	2,18	2,00	0,18	0,77	0,75	0,02	6,94	7,00	-0,06	2,10	2,03	0,07
10/Set	9	1	A	1,74	2,00	-0,26	0,69	0,75	-0,06	6,77	7,00	-0,23	2,02	2,03	-0,01
			B	2	2,00	0,00	0,81	0,75	0,06	6,71	7,00	-0,29	2,00	2,03	-0,03
		2	A	1,93	2,00	-0,07	0,75	0,75	0,00	6,39	7,00	-0,61	1,97	2,03	-0,06
			B	2,05	2,00	0,05	0,85	0,75	0,10	6,36	7,00	-0,64	2,00	2,03	-0,03
11/Set	10	1	A	2	2,20	-0,20	0,72	0,75	-0,03	8,02	7,00	1,02	2,02	2,03	-0,01
			B	1,96	2,20	-0,24	0,74	0,75	-0,01	8,01	7,00	1,01	2,03	2,03	0,00
		2	A	1,94	2,20	-0,26	0,76	0,75	0,01	7,66	7,00	0,66	1,97	2,03	-0,06
			B	2,04	2,20	-0,16	0,74	0,75	-0,01	7,60	7,00	0,60	2,00	2,03	-0,03

Tabela 14 : Valores obtidos nos ensaios para decomposição da variabilidade

Utilizando o método proposto por Box , foram obtidos os seguintes valores , conforme observado na tabela 15.

	Variabilidade devido análise $\sigma_T^2$	Variabilidade devido amostragem $\sigma_S^2$	Variabilidade devido processo $\sigma_B^2$
MgO	0,0059 ( 41,0 % )	0,0083 ( 57,6 % )	0,0002 ( 1,4 % )
MnO	0,0015 ( 87,7 % )	0,00001 ( 0,6 % )	0,0002 ( 11,7 % )
FeO	0,0634 ( 20,1 % )	0,0362 ( 11,5 % )	0,2157 ( 68,4 % )
B/A	0,0012 ( 24,9 % )	0,00001 ( 0,2 % )	0,0036 ( 74,8 5 )

Tabela 15 : Decomposição da variabilidade dos elementos químicos estudados no sinter.

Pode – se notar a grande influência da variabilidade da análise para todos elementos e principalmente para o MgO e MnO .

Marcante também é a variabilidade que existe dentro de um mesmo lote ( 160 minutos de produção ) para o MgO.

A variabilidade devido ao processo propriamente dito é marcante para o caso do FeO e da relação CaO / SiO<sub>2</sub> .

Convém lembrar que esse testes foram realizados após a implantação do Controle Feedback de acordo com o já descrito.

### 3.4. Quarta Etapa : Adequação do Método desenvolvido para utilização na Planta de Sinterização nº 3.

A observação mais detalhada do método desenvolvido e implantado na Planta de Sinterização nº2 e através da comparação dos dados pertinentes das duas Plantas ( tempo de trânsito , sistema de amostragem , etc. ) mostraram que praticamente não seriam necessários ajustes e o mesmo método poderia ser aplicado na Planta de maior capacidade.

Essa implantação ocorreu em novembro de 2003 , 22 meses após a implantação na Planta nº 2.

Durante esse período acredita – se que todos os tipos de alterações em matérias primas , em manutenção dos equipamentos e nas condições climáticas , adaptação dos operadores e dos supervisores , enfim todos fatores que podem ocorrer a médio e longo prazo tenham ocorrido .

A implantação na Planta nº 3 foi suportada pelos resultados obtidos na Planta nº 2 , como será visto adiante.

## Capítulo 4

### Resultados e Discussão

De acordo com o sequenciamento de etapas já discutido no capítulo anterior , os resultados obtidos serão analisados .

No início de janeiro de 2002 , foi decidido então , por testar o método desenvolvido na Sinterização 2 da Companhia Siderúrgica Paulista .

Os valores de  $G$  a serem usados nas equações de controle seriam à princípio aqueles que foram obtidos dos valores ótimos de  $\theta$  ( mínima soma dos quadrados dos erros de previsão ) conforme mostrado na tabela 12.

Porém restava alguma dúvida ainda sobre esse valor pois :

- Os dados que foram utilizados para determinação desse parâmetro  $\theta$  ( Figuras 21 , 22 , 23 e 24 ) correspondiam a 4 horas de produção , escala diferente da adotada para a execução do teste que foi de 2 horas e 40 minutos.
- A composição das amostras também seria feita de maneira diferente daquela anteriormente utilizada.
- Há no processo de sinterização a presença de uma carga circulante ( retorno interno ) que de certa forma cria um certo atraso nas correções efetuadas . Para que haja todo o efeito de uma correção é necessário que o retorno interno produzido após a correção repita todo o ciclo novamente para que o efeito dessa correção seja completa. Box<sup>26</sup> apresenta um método simplificado para tratar dessa inércia , método que se baseia

basicamente na seleção de um outro valor de  $G$  , menor que aquele obtido com o método dos mínimos quadrados.

- Box<sup>26</sup> cita que mesmo quando não há dados suficientes para determinar  $G$  , pode – se aplicar o método utilizando  $G$  no intervalo de 0,2 a 0,4 correndo um risco de , mesmo que o processo já esteja sob controle , aumentar levemente ( cerca de 5 à 10 % ) a variabilidade do produto.
- Os resultados obtidos no ensaio de GR&R apontarem para baixo poder de discriminação para os elementos químicos MgO e MnO

Com todas essas considerações , foi decidido então , experimentar o método CAP com os seguintes valores de  $G$  , conforme mostrado na Tabela 16.

TESTE	Valor de $G$			
	MgO	MnO	FeO	CaO / SiO <sub>2</sub>
1º	0,2 (1)	0,2 (1)	0,8 (2)	0,6 (2)

(1) : Recomendado por Box<sup>26</sup> quando não há dados disponíveis.

(2) : Próximo ao valor ótimo que minimiza a soma dos quadrados dos erros de previsão.

Tabela 16 : Valores de  $G$  usados nos testes .

As figuras 43 , 44 ,45 e 46 mostram uma comparação entre os resultados obtidos após a implantação do método descrito em comparação com período anterior .

A métrica utilizada para tal , foi o erro quadrático médio que foi computado à cada semana , baseando – se então nos 21 valores semanais de cada elemento químico que representam cada um , a média de 8 horas de produção da Sinterização 2 e que servem de valor característico do sinter para utilização do Alto Forno.

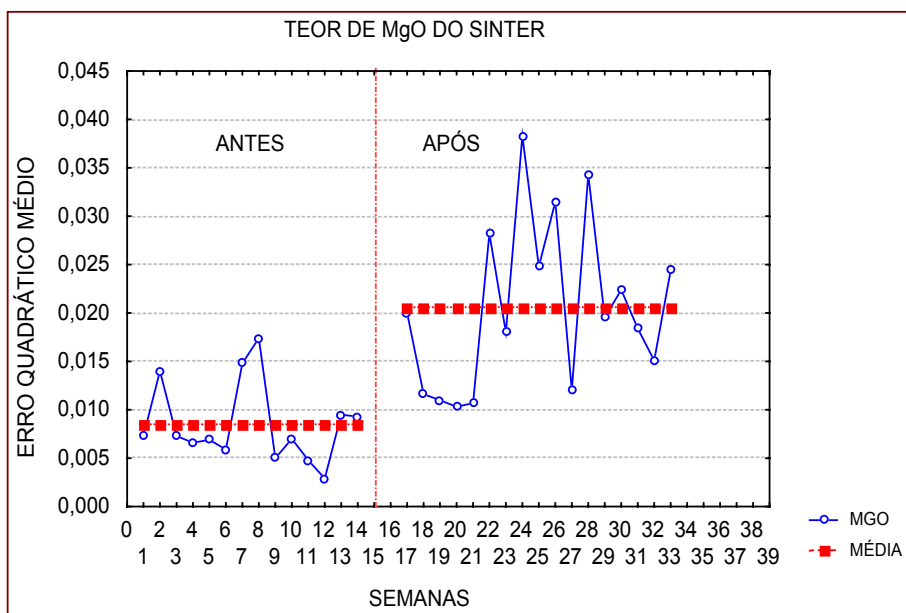


Figura 43 : Erro quadrático desvio do teor de MgO do sinter em relação a especificação para duas situações : Método anterior e Controle Feedback com  $G=0,2$  .

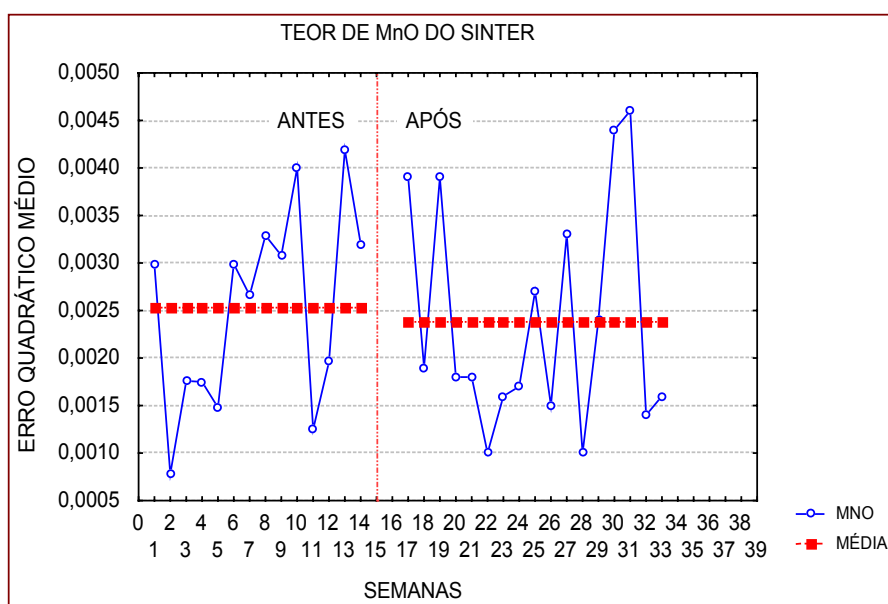


Figura 44 : Erro quadrático desvio do teor de MnO do sinter em relação a especificação para duas situações : Método anterior e Controle Feedback com  $G=0,2$  .

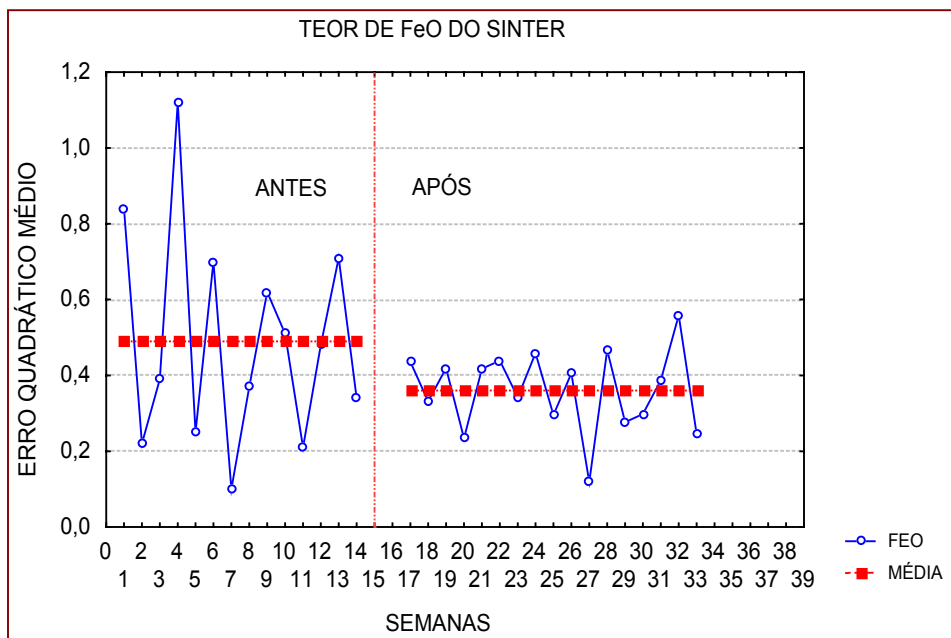


Figura 45 : Erro quadrático desvio do teor de FeO do sinter em relação a especificação para duas situações : Método anterior e Controle Feedback com  $G=0,8$  .

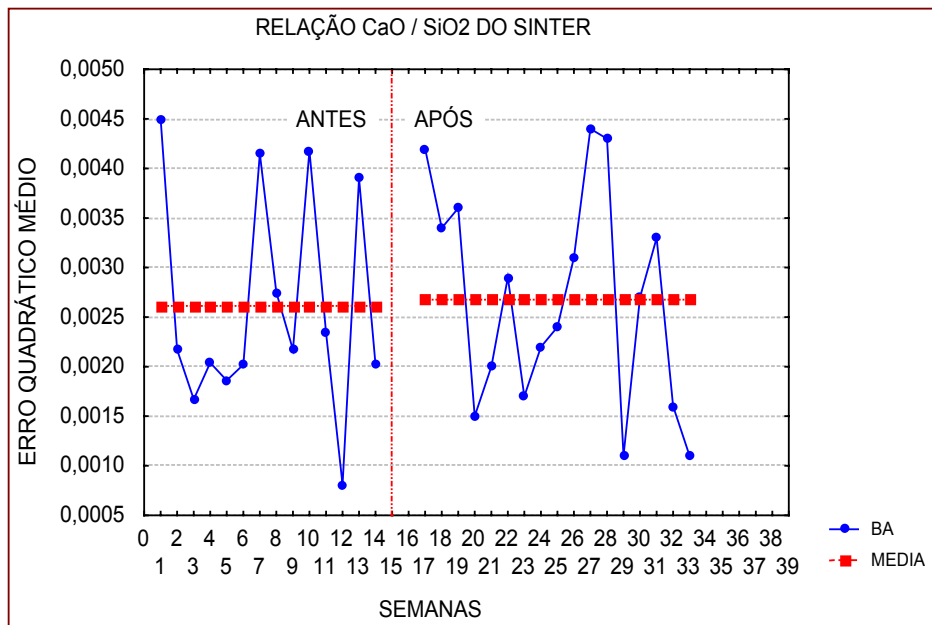


Figura 46: Desvios da relação CaO / SiO<sub>2</sub> do sinter em relação a especificação para três situações : Método anterior , Controle Feedback com  $G = 0,6$ .

Da análise dessas figuras podemos notar três comportamentos diferentes :

- Para o teor de MnO e para relação CaO / SiO<sub>2</sub> não podemos notar nenhuma diferença entre o método implantado e o método anterior .
- Para o teor de MgO houve aumento no Erro Quadrático Médio , o que significa que atualmente está havendo maior dispersão em relação ao valor objetivado do que antes da implantação do novo método.
- Para o teor de FeO houve diminuição no Erro Quadrático Médio , o que significa que atualmente está havendo menor dispersão em relação ao valor objetivado do que antes da implantação do novo método.

A tabela 17 apresenta os valores médios do erro quadrático médio dos elementos nos dois períodos .

	ERRO QUADRÁTICO MÉDIO ( - )	
	ANTES	DEPOIS
MgO	0,0085	0,0206
MnO	0,0025	0,0024
FeO	0,490	0,360
CaO/SiO <sub>2</sub>	0,0026	0,0027

Tabela 17 : Comparação entre os Erros quadráticos Médios dos elementos químicos estudados.

Quanto ao FeO , a análise conjunta das tabelas 14 e 17 mostra que a melhoria obtida no EQM ( Redução de cerca de 26 % ) foi devida provavelmente ao método de controle implantado .

A melhoria obtida para esses item chega próximo dos valores obtidos por Baxley<sup>21</sup> na Fábrica de Nylon . Segundo ele a redução obtida no desvio padrão do produto após ajustes feitos com uso da EWMA foi de 18 % no desvio padrão o que corresponderia a uma redução de cerca de 32 % na variância , estatística esta comparável ao Erro quadrático médio.

Quanto a relação CaO / SiO<sub>2</sub> , os dados indicam que a variação que continua sendo observada é devida principalmente à variação que está ocorrendo no processo propriamente dito , visto que o sistema de medição apresentou – se adequado para esse item .

Fica a dúvida se as condições vigentes , principalmente de matéria prima , são as mesmas nos dois períodos comparados. Como o período considerado de antes da implantação corresponde ao período de setembro á novembro de 1998 e o período após o novo método implantado é o de

fevereiro á julho de 2002 fica difícil afirmar que está mantida a mesma condição da matéria prima , pois passaram – se quase quatro anos.

Quanto ao teor de MnO a análise da tabela 17 mostra que a variabilidade está mantida ( antes e após o método ) e ela é principalmente devida à variabilidade devido análise , não estando ligada então ao processo de produção propriamente dito.

A piora obtida no erro quadrático médio do teor de MgO foi marcante . A análise da tabela 14 mostra que apenas 1,4 % da variabilidade é devida ao processo propriamente dito. A variabilidade devido a análise ( 41,0 % ) e aquela devido a amostragem ( 57,6 % ) são as maiores responsáveis pela variabilidade . Neste caso cumpre rastrear o método de análise anterior para verificar se houve degradação no período. A melhoria no método de análise poderá diminuir a variabilidade desse elemento químico.

Como foi evidente a influencia do Sistema de Medição , tanto no estudo de GR&R ( que apontou cerca de 50 % da variabilidade para os elementos químicos MgO e MnO ) quanto no estudo de decomposição da variabilidade , ficou patente a necessidade de sua melhoria .

Após estudo mais detalhado e visitas técnicas a outros laboratórios , as alterações da sistemática atual que envolviam simplesmente mudança de rotina foram implementadas , destacando – se o aumento do tempo de pulverização da amostra final de 1 para 4 minutos , melhorando dessa forma a granulometria do material a ser briquetado , permitindo a obtenção de briquetes mais adequados para leitura no espectometro de Raios X .

Essa alteração aconteceu em maio de 2003 , e as figuras 47 , 48 e 49 mostram os resultados obtidos no Erro Quadrático Médio após essa alteração .

Fica clara a diminuição da variabilidade para os teores de MgO e MnO .

O teor de MgO voltou ao patamar que era praticado pelo método anterior em 1998.

Quanto ao teor de MnO é marcante a melhoria obtida em relação ao método anterior .

Não foi notada alteração significativa quanto a relação  $\text{CaO} / \text{SiO}_2$  .

Esses resultados ilustram bem a influência do sistema de medição na variabilidade . É marcante também a necessidade de implantação das outras medidas necessárias para melhorar ainda mais o atual Sistema de Medição.



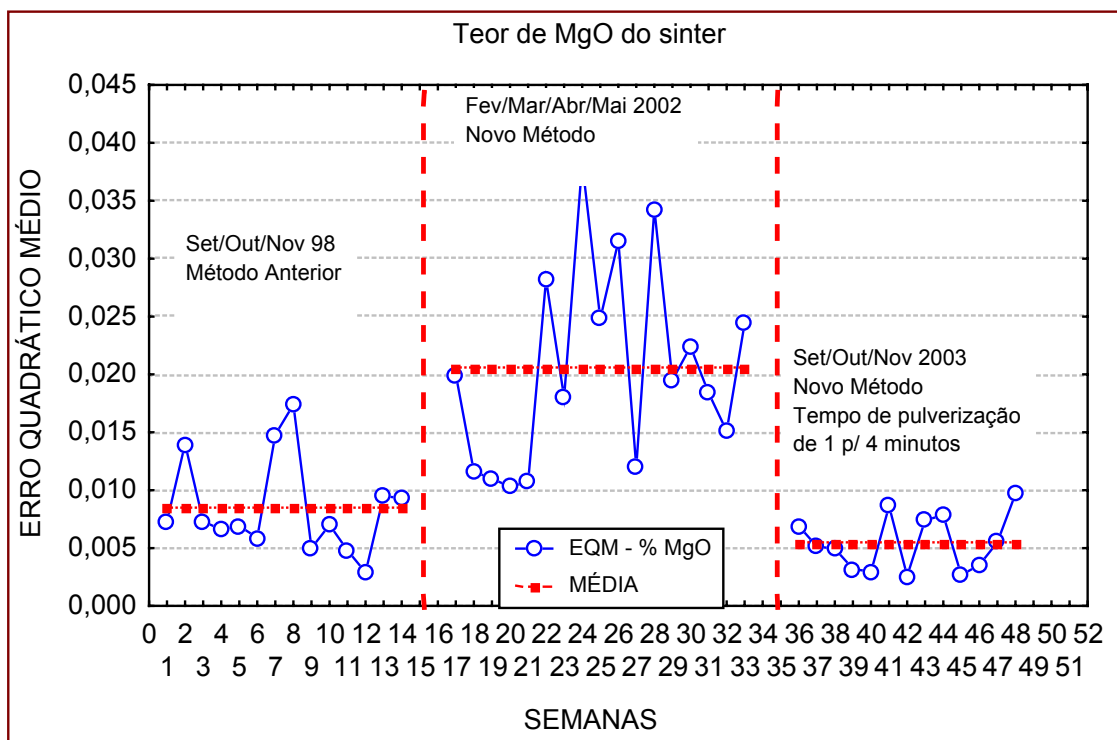


Figura 47 : Erro quadrático Médio para o teor de MgO da Planta de Sinterização 2 após aumento do tempo de pulverização da amostra final.

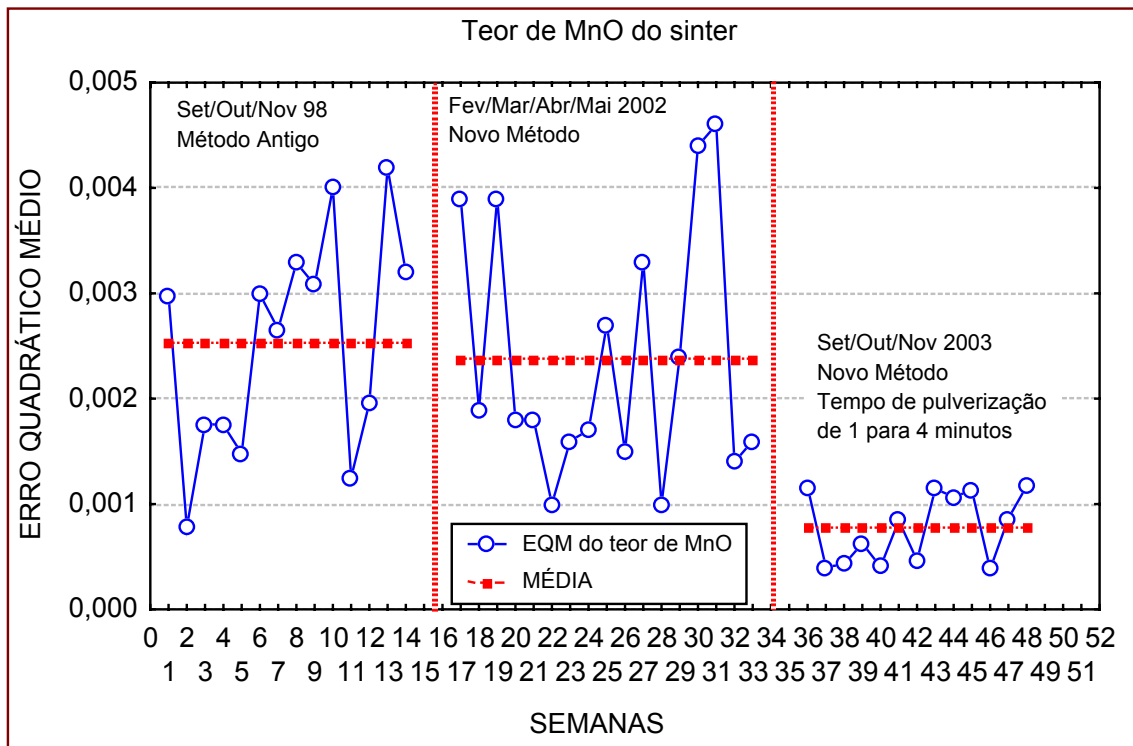


Figura 48 : Erro quadrático Médio para o teor de MnO da Planta de Sinterização 2 após aumento do tempo de pulverização da amostra final.

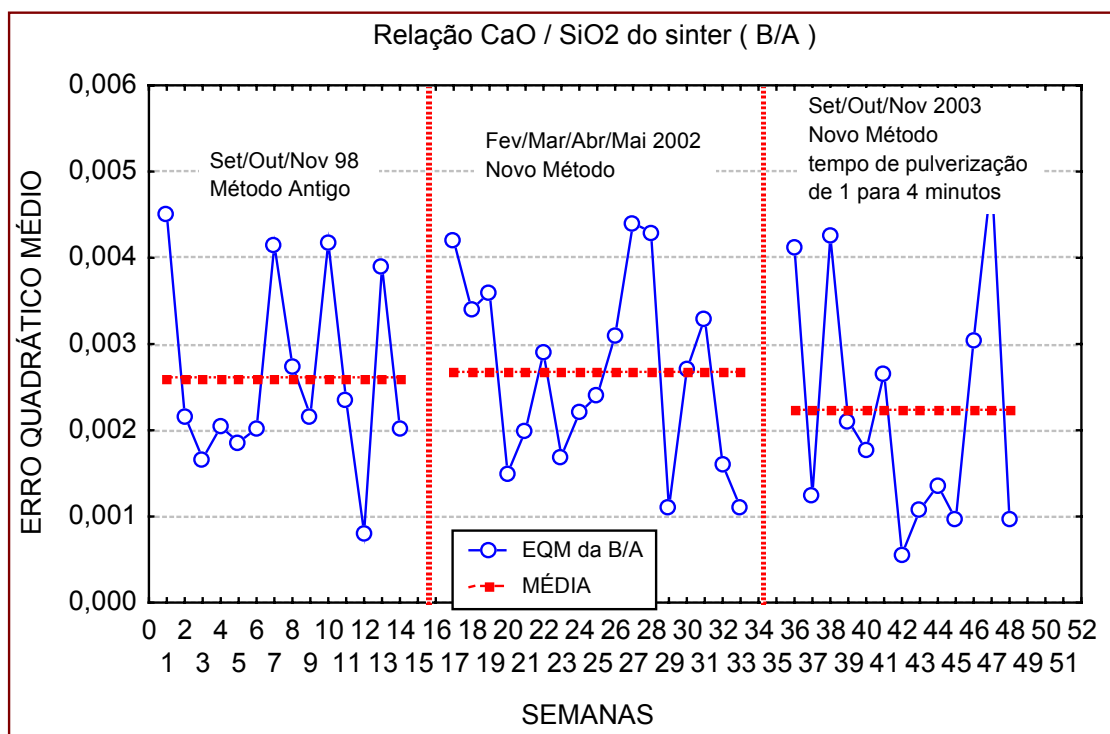


Figura 49 : Erro quadrático Médio para a relação CaO / SiO<sub>2</sub> da Planta de Sinterização 2 após aumento do tempo de pulverização da amostra final.

Outros motivos , levaram ao uso parcial do método de controle do teor de FeO do sinter . A figura 50 ilustra os resultados obtidos e mostra que houve piora nos resultados e que após o retorno ao uso do método a situação foi normalizada , mostrando a consistência do método.

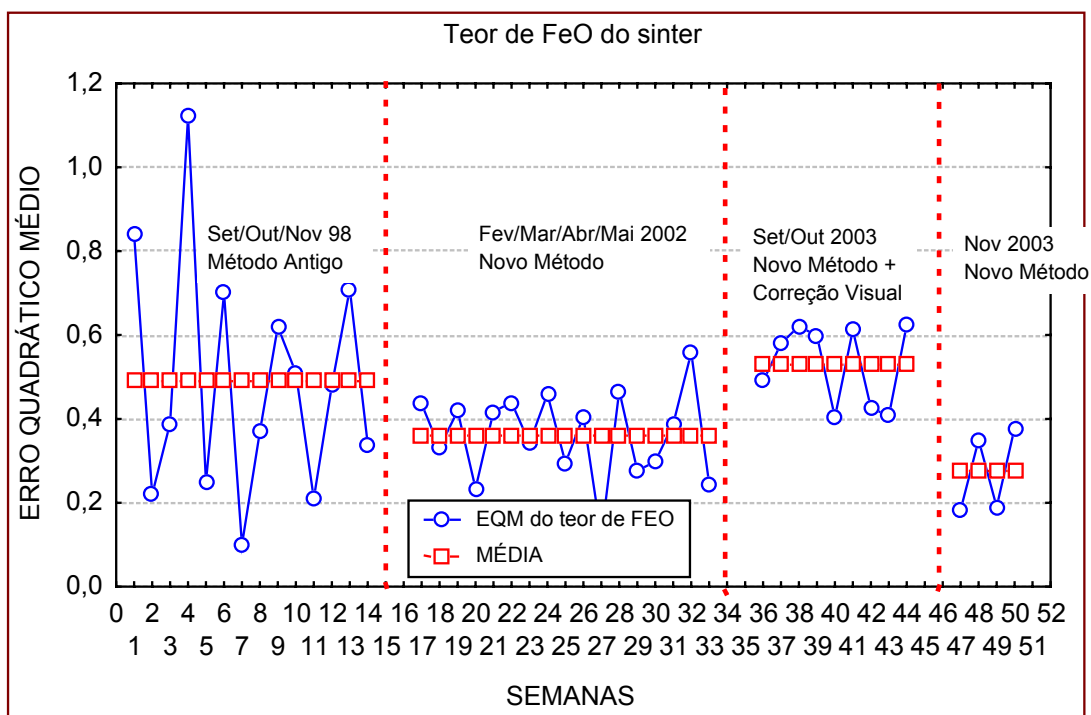


Figura 50 : Erro quadrático Médio para o teor de FeO da Planta de Sinterização 2 , mostrando o uso parcial do método em setembro e outubro de 2003 e retornando ao uso do novo método em novembro de 2003.

A tabela 18 apresenta os valores do erro quadrático médio dos elementos MgO e MnO após aumento do tempo de pulverização das amostras .

	ERRO QUADRÁTICO MÉDIO ( - )	
	ANTES	DEPOIS
MgO	0,0085	0,0053
MnO	0,0025	0,0008
B/A	0,0026	0,0022

Tabela 18 : Comparação entre os Erros quadráticos Médios dos elementos químicos MgO e MnO após aumento do tempo de pulverização das amostras.

Em vista dos resultados obtidos na Planta de Sinterização nº 2 , em novembro de 2003 , decidiu – se pela implantação do método na Sinterização nº 3 , que corresponde a 66 % da produção total.

Devido a similaridade de matérias primas utilizadas , equipamentos , etc.. não foi necessária nenhuma alteração significativa em relação ao método já implantado.

As figuras 51 , 52 , 53 e 54 , ilustram os resultados obtidos , comparando – se o chamado período anterior ( outubro , novembro e dezembro de 1998 ) com o período do método novo ( novembro e dezembro de 2003 e janeiro de 2004 ).

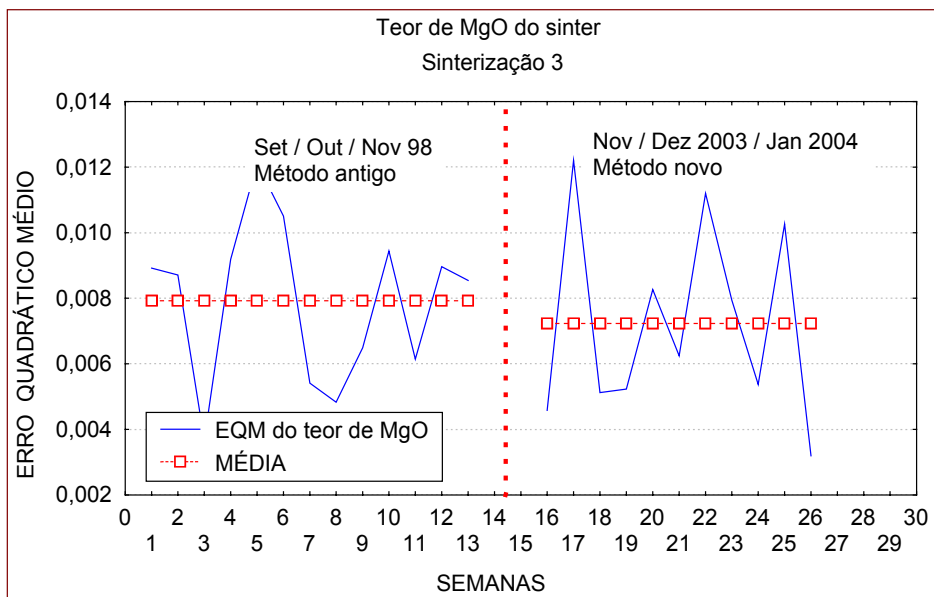


Figura 51 : Erro quadrático Médio para o teor de MgO do sinter da Planta de Sinterização 3 .

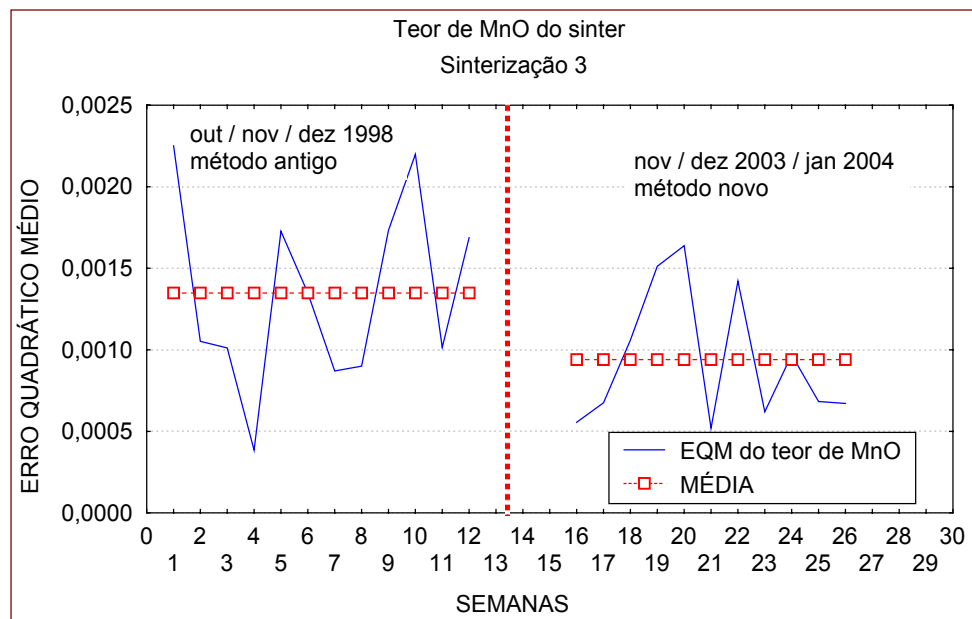


Figura 52 : Erro quadrático Médio para o teor de MnO do sinter da Planta de Sinterização 3 .

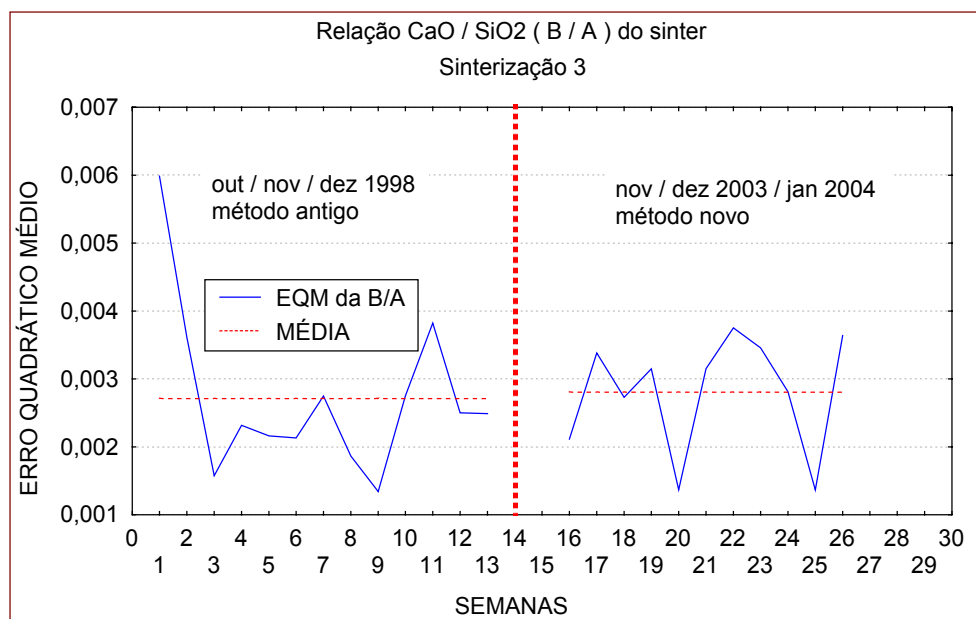


Figura 53 : Erro quadrático Médio para a relação CaO / SiO<sub>2</sub> do sinter da Planta de Sinterização 3 .

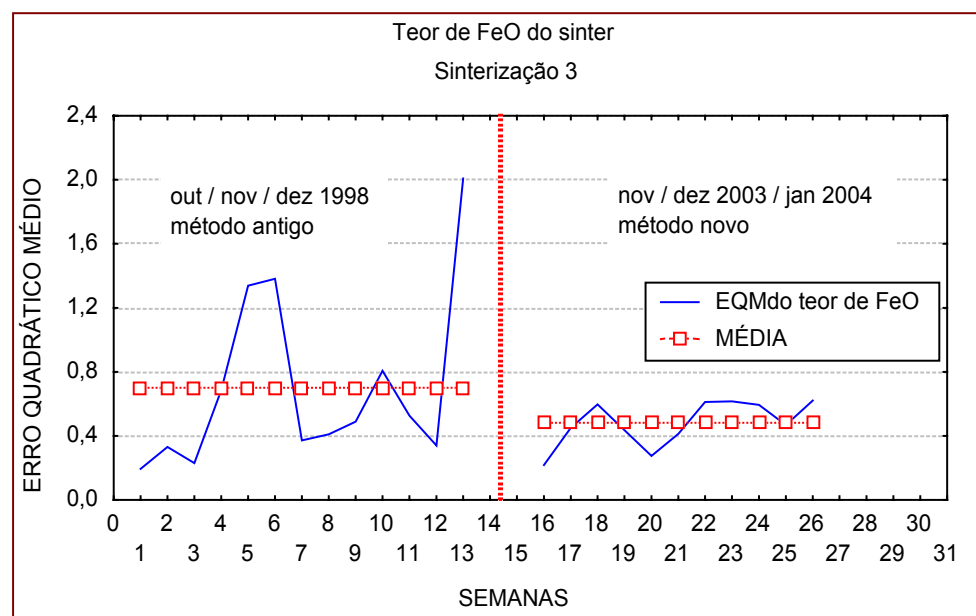


Figura 54 : Erro quadrático Médio para o teor de FeO do sinter da Planta de Sinterização 3 .

A tabela 19 mostra a comparação dos valores obtidos nas Plantas nº 2 e 3 antes e após a implantação do novo método . É notável a maior eficácia do método para a Planta nº 2 .

Porém , o mesmo tipo de comportamento é observado nas duas unidades , ou seja , melhoria nos desvios dos teores de MgO , MnO e FeO e manutenção dos desvios para a relação CaO / SiO<sub>2</sub>.

	Planta de Sinterização nº 2		Planta de Sinterização nº 3	
	ANTES	DEPOIS	ANTES	DEPOIS
MgO ( % )	0,0085	0,0053	0,0079	0,0072
MnO ( % )	0,0025	0,0008	0,0013	0,0009
B / A	0,0026	0,0022	0,0022	0,0023
FeO ( % )	0,4900	0,3600	0,7012	0,4822

Tabela 19 : Erros quadráticos médios para as duas plantas de Sinterização , antes e após a implantação do novo método de controle .



## Capítulo 5

### Conclusões e sugestões para próximos trabalhos

(1) Aproveitando a cultura já existente dos operadores de plotar os dados que representam a qualidade química do sinter na forma seqüencial , o Sistema de Controle Automático de Processos foi implantado de forma manual e mostrou – se simples e de fácil manuseio pelos operadores. Sem dúvida , simplificou em muito o trabalho deles.

(2) A implantação de um sistema de controle da composição química do sinter por ajuste , através de variáveis compensatórias , baseado nas análises do produto e nas previsões feitas pela média móvel exponencialmente ponderada , resultou em uma redução de cerca de 30 % no erro quadrático médio do teor de FeO do sinter.

(3) Para a relação  $\text{CaO} / \text{SiO}_2$  , não houve melhoria em relação ao método anterior . Como ainda a variabilidade é principalmente devida ao processo propriamente dito , serão feitas tentativas com outros valores de G com o intuito de melhorar a eficácia do método.

(4) Para os compostos químicos MgO e MnO , o sistema de medição mostrou a princípio não estar adequado para a atual necessidade de produção . A variação do sistema de medição em relação a variação total do processo mostrou ser da ordem de 50 % para o MgO e 90 % para o MnO, desqualificando-o da função desejada. Após terem sido feitas algumas melhorias no

sistema , a variação no teor de MnO foi reduzida em 70 % na Planta nº 2 e em 30 % na Planta nº3. Para o teor de MgO essa redução foi de 38 % na Planta nº 2 e 9 % na Planta nº 3.

(5) Outras medidas estão sendo viabilizadas para melhorar o atual sistema de medição e espera – se redução ainda maior na variabilidade desses elementos químicos.

(6) No controle implantado , o ajuste é feito apenas de forma proporcional ao erro obtido na ultima análise . A literatura fala em ajustes proporcionais , integrais e derivativos em relação aos erros obtidos anteriormente. Será dada continuidade ao estudo para verificar a viabilidade e os resultados obtidos com técnicas mais refinadas.

(7) Com o sistema de controle por ajuste já implantado , será também adicionado o conceito de monitoramento através de Gráficos Shewhart ao processo já ajustado , em busca de causas especiais.

(8) O sistema foi implantado inicialmente na Planta nº 2 , que corresponde a cerca de 30 % da produção total de sinter e já está implantado há dois anos . Na planta nº 3 a implantação é mais recente , tendo apenas três meses de implantação e com resultados menos expressivos. Será estudada a necessidade de ajustes para tornar o desempenho do método igual nas duas plantas.

## Referencias Bibliográficas

1. Noh , J. Improvment of sinter quality and its effects on Blast Furnace operation . In : Seminar on Sinter and Pellets , IISI , June 1988 .
2. Tetti , Ulisses . Modelo matemático unidimensional do processo de sinterização de minérios de ferro . Rio de Janeiro : Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia , Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro , 1991 , 151 p. Tese ( Mestrado ) .
3. Ball , D.F. Dartnell , J., Davison J. , Grieve , A ., Wild , R . Agglomeration of iron ores , New York , American Elsevier Publishing Company , 1973 \_Cap .12- Sinter Quality\_\_\_\_\_, pp 141-148 .
4. Ferretti C. & Grattarolla , G.C. Sotckyard Blending .Bulks Solids Handling , Volume 11, number 1 , pp 211 – 225, March 1991.
5. Gy , Pierre M. A new theory of bed blending derived of the theory of sampling . International Journal of Mineral Processing , 8 , pp 201 – 238 , 1981 .
6. Reisner W. & Rothe M.V. Eisenhart . Bins and bunkers for handling bulk materials . Trans Tech Publications , 1978 \_Cap 8 , Treatment of Bulk Materials , pp 207 - 226 .
7. Gy , Pierre M. Sampling of particulate material – Theory and Practice – Elsevier Scientific Publishing Company , 1982 , Cap 2 , Logical Approach , pp 23-28.
8. Down , Michael H. , Lowe , Victor W. , Daugherty , B. Ray .Measurement Systems Analysis . Chrysler Corporation , Ford Motor Company , General Motors Corporation , 1988 , 120p.
9. Shewhart , W. A . , Economic control of quality of manufatured product . D. Van Nostrand Company , Inc. , New York , 1931 , Cap II , Scientific Basis for Control , pp 8 - 25.

10. Shewhart , W. A . & Deming , Edwards W. Statistical method from the viewpoint of quality control . The Department of Agriculture , 1939 , Cap. 1 , Statistical Control , pp 1 – 49.
11. Barnard , G.A. Control Charts and stochastic process . Journal of the Royal Statistical Society , Series B , Vol XXI , n° 2 , pp 239 – 271 , 1959.
12. Hunter , J. Stuart . The Exponentially Weighted Moving Average . Journal of Quality Tecchnology , vlo.18, n° 4, pp 203 – 210, october 1986.
13. Harris , Thomas J. & Ross , Willian H. Statistical process control procedures for correlated observations . The Canadian Journal of Chemical Engineering , volume 69 , pp 48 – 57, February 1991.
14. Maragah , Hazem D. & Woodall , Willian H. The effect of autocorrelation on the retrospective X – Chart . Journal of Statistical Computation Simulation , vol 40 , pp 29 – 42, 1992.
15. Alwan , Layth C. Effects of autocorrelation on control chart performance . Communications in Statistics – Theory and Methods , 21 ( 4 ), pp 1025 – 1049, 1992.
16. Alwan , Layth C. & Roberts , Harry V. Time series modelling for statistical process control. Journal of Business & Economic Statistics , vol 6 , n°1, pp 87 – 95, January 1988.
17. Alwan , Layth C. & Roberts , Harry V. The problem of misplaced control limits . Applied Statistics , 44, n° 3, pp 269 – 278, 1995.
18. Faltin , Frederick W. , Hahn , Gerald J. , Tucker , Willian T. , Vander Wiel , Scott A. Algorithmic statistical process control : Some pratical observations . International Statistical Review, 61 , 1, pp 67 – 80, 1993.
19. Faltin , Frederick W. , Tucker , Willian T. , Vander Wiel , Scott A. Technometrics , vol.35, n°4, pp 363 – 375, november 1993.
20. Faltin , Frederick W. , Tucker , Willian T. , Doganaksoy , N. , Vander Wiel , Scott A. Technometrics , vol.34, n°3, pp 286 – 297, august 1992.
21. Montgomery , Douglas C. & Mastrangelo , Christina M. Some statistical process control methods for autocorrelated data. , Journal of Quality Technology , vol. 23 , n°, pp 179 – 2043 , July 1991.
22. Baxley , Robert V. Statistical aplications in process control ., Marcel Dekker , Inc. 1996 , Cap.11 .Applications of the EWMA for Algorithmic Statistical Process Control., pp 215 – 238.

23. Box , George E. P. , Coleman , David E. , Baxley , Robert V. A comparison of statistical process control and engineering process control . Journal of Quality Technology , vol. 29 , nº 2, pp 128 – 130, April 1997.
24. Faltin , Frederick W. , , Christina M. , Runger , George C. , Ryan , Thomas P. Considerations in the Monitoring of autocorrelated and independent data. Journal of Quality Technology , vol 29 , nº 2, pp 131 – 133, April 1997.
25. Box, George E.P., Hunter , Willian G , Hunter , Stuart J. Statistics for Experimenters – An Introduction to Design , Data Analysis and Model Building , John Wiley & Sons, Cap.17, Study of Variation, pp. 556 – 583 , 1978.
26. Box George & Luceño Alberto . Statistical Control by Monitoring and Feedback Adjustment, New York , John Wiley & Sons , Inc. , 1997 , 327p.
27. McNeese , Willian H. & Klein , Robert A . Statistical Methods for the process industries . ASQC Quality Press, Cap. 28 , Measurement Systems , pp. 387 – 419, 1991.