

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Instituto de Ciências Exatas

Programa de Pós-graduação em Estatística

Patryck Giovani da Silva

**USO DE FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS BÁSICAS
OBJETIVANDO A REDUÇÃO DO NÍVEL DE FLÚOR EM
RESERVAS DE CARVÃO MINERAL**

Belo Horizonte

2022

Patryck Giovani da Silva

**USO DE FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS BÁSICAS
OBJETIVANDO A REDUÇÃO DO NÍVEL DE FLÚOR EM
RESERVAS DE CARVÃO MINERAL**

Monografia apresentada ao Programa de Especialização em Estatística da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Estatística.

Orientador: Prof. Dr. Roberto da Costa Quinino

Belo Horizonte

2022

2022, Patryck Giovani da Silva.
Todos os direitos reservados

Silva, Patryck Giovani da.

S586u Uso de ferramentas estatísticas básicas objetivando a redução do nível de flúor em reservas de carvão mineral [manuscrito] / Patryck Giovani da Silva. — 2022.
89.f. il.

Orientador: Roberto da Costa Quinino.
Monografia (especialização) - Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Estatística.
Referências:83-87

1. Estatística. 2. Carta de controle X. 2. Controle estatístico de processo. 4. Teste t de Student. I. Quinino, Roberto da Costa. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Estatística. III. Título.

CDU 519.2 (043)

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Belkiz Inez Rezende Costa CRB 6/1510 Universidade Federal de Minas Gerais - ICEX



Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Estatística
Programa de Pós-Graduação / Especialização
Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha
31270-901 – Belo Horizonte – MG

E-mail: pgest@ufmg.br
Tel: 3409-5923 – FAX: 3409-5924

ATA DO 249ª. TRABALHO DE FIM DE CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTATÍSTICA DE PATRYCK GIOVANI DA SILVA.

Aos quatorze dias do mês de novembro de 2022, às 16:00 horas, com utilização de recursos de videoconferência a distância, reuniram-se os professores abaixo relacionados, formando a Comissão Examinadora homologada pela Comissão do Curso de Especialização em Estatística, para julgar a apresentação do trabalho de fim de curso do aluno **Patryck Giovani da Silva**, intitulado: “*Uso de ferramentas estatísticas básicas objetivando a redução do nível de flúor em reservas de carvão mineral*”, como requisito para obtenção do Grau de Especialista em Estatística. Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, Professor Roberto da Costa Quinino – Orientador, após dar conhecimento aos presentes do teor das normas regulamentares, passou a palavra ao candidato para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores com a respectiva defesa do candidato. Após a defesa, os membros da banca examinadora reuniram-se sem a presença do candidato e do público, para julgamento e expedição do resultado final. Foi atribuída a seguinte indicação: o candidato foi considerado Aprovado condicional às modificações sugeridas pela banca examinadora no prazo de 30 dias a partir da data de hoje por unanimidade. O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo Presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente Ata, que será assinada por todos os membros participantes da banca examinadora. Belo Horizonte, 14 de novembro de 2022.

Roberto da Costa
Quinino:8087129
1720

Assinado de forma digital
por Roberto da Costa
Quinino:80871291720
Dados: 2022.11.14 18:48:08
+03'00'

Prof. Roberto da Costa Quinino (Orientador)
Departamento de Estatística / ICEX / UFMG

ANDERSON LAECIO
GALINDO
TRINDADE00954199693

Assinado de forma digital por
ANDERSON LAECIO GALINDO
TRINDADE:00954199693
Dados: 2022.11.17 09:38:33 -03'00'

Prof. Anderson Laécio Galindo Trindade
DEP / UFMG



Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Estatística
Programa de Pós-Graduação / Especialização
Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha
31270-901 – Belo Horizonte – MG

E-mail: pgest@ufmg.br
Tel: 3409-5923 – FAX: 3409-5924

**DECLARAÇÃO DE CUMPRIMENTO DE REQUISITOS PARA CONCLUSÃO DO
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTATÍSTICA.**

Declaro para os devidos fins que Patryck Giovani da Silva, número de registro 2018697018, cumpriu todos os requisitos necessários para conclusão do curso de Especialização em Estatística e que me entregou a versão final corrigida. O trabalho foi apresentado no dia 14 de novembro de 2022 com o título “*Uso de ferramentas estatísticas básicas objetivando a redução do nível de flúor em reservas de carvão mineral*”.

Belo Horizonte, 02 de dezembro de 2022

Roberto da
Costa
Quinino:8087
1291720

Assinado de forma
digital por Roberto da
Costa
Quinino:80871291720
Dados: 2022.12.02
10:26:38 -03'00"

Prof. Roberto da Costa Quinino
Coordenador da Comissão
do Curso de Especialização
em Estatística

Prof. Roberto da Costa Quinino
Coordenador do curso de
Especialização em Estatística
Departamento de Estatística / UFMG

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar forças para viver, agradeço por me mostrar o caminho e por estar comigo a todo momento me dando força para continuar.

Agradeço aos meus pais, Giovani e Sandra, e a minha irmã Thaifani por sempre me apoiarem e acreditarem na minha capacidade, por entender o motivo de minha ausência nos momentos familiares.

Agradeço a minha família pelo apoio incondicional e pelas palavras amigas que sempre me incentivam a continuar.

Agradeço aos professores do Departamento de Estatística pela paciência e por todo conhecimento compartilhado.

Agradeço também ao Professor Roberto por todo suporte fornecido durante a orientação desta monografia e por entender tudo que passei, principalmente no período que morei na África.

“O único teste relevante da validade de uma hipótese (modelo) é a comparação de suas previsões com a experiência.”

Milton Friedman

RESUMO

Através da utilização coordenada e orientada de ferramentas estatísticas, combinado com um estudo detalhado do fluxo de disposição, homogeneização, transporte e carregamento do carvão produzido, foi possível reduzir o nível de fluor e otimizar a reserva de carvão mineral de uma grande mineradora brasileira em Moçambique. Para desenvolver esta mistura de diferentes carvões e assim gerar um novo produto, carvão de baixo teor de fluor a ser destinado ao mercado chinês, todos os processos após usina, precisaram ser alterados. Foi necessário fragmentar a produção dos carvões pré-selecionados para compor este novo produto, gerando grandes desafios devido ao espaço limitado no pátio de armazenamento das usinas, combinado com a necessidade de homogeneizar pilhas de níveis de fluor diferentes, buscando otimizar a reserva de carvão sem ultrapassar o limite exigido pelo cliente. Toda produção era amostrada e os resultados eram acompanhados através de carta de controle, visando aumentar a assertividade do projeto, as amostras eram enviadas para diferentes laboratórios de referência global e seus resultados foram validados através do teste t de Students. O processo de homogeneização foi necessário ser aplicado em várias etapas da formação dos navios, iniciando pelo carregamento dos trens que transportavam o carvão da cidade de Moatize até o porto na cidade de Nacala. No processo original, a locomotiva era composta por apenas um tipo de carvão derivado de apenas uma única pilha produzida. Porém para manter o nível abaixo de 200 ppm fez-se necessário alterar este processo, passando a carregar a locomotiva com pilhas de níveis de fluor opostos, formando uma locomotiva de fluor médio conhecido. Para formação dos navios no porto de Nacala, também se fez necessário alterar o processo de formação das pilhas e carregamento dos navios. No processo original, todas as locomotivas destinadas ao navio eram descarregadas formando apenas uma pilha, que seria retomada no processo de carregamento do navio. Porém, para formar um navio de baixo fluor com alto índice de homogeneização, dividimos as locomotivas em duas pilhas em pátios distintos, assim possibilitamos a retomada simultânea das pilhas, elevando de forma considerável a homogeneização do navio de baixo fluor destinado ao mercado chinês. O mercado chinês é bastante desafiador devido as restrições referentes ao nível de fluor nos carvões

importados, principalmente no sul do país onde a água já possui um valor elevado de flúor diluído. Os resultados obtidos na monografia demonstram o potencial que se pode alcançar com a aplicação da estatística em processos industriais, finalizou-se 2021 com 6 navios descarregados em portos chineses e um contrato exclusivo de carvão de baixo fluor para o ano de 2022.

Palavras-chave: Carta de controle; teste t de Student; Homogeneização; Flúor:

ABSTRACT

Through the coordinated and guided use of statistical tools, combined with a detailed study of the flow of disposal, homogenization, transport and loading of the coal produced, it was possible to reduce the level of fluor and optimize the mineral coal reserve of a large Brazilian mining company in Mozambique. To develop this mixture of different coals and thus generate a new product, low fluorine coal to be destined for the Chinese market, all the processes after the plant had to be changed. It was necessary to fragment the production of pre-selected coals to compose this new product, generating great challenges due to the limited space in the plants' storage yard, combined with the need to homogenize piles of different fluor levels, seeking to optimize the coal reserve without exceed the limit required by the customer. All production was sampled and the results were monitored through a control chart, aiming to increase the assertiveness of the project, the samples were sent to different laboratories of global reference and their results were validated through the Students t test. The homogenization process was necessary to be applied in several stages of the formation of the ships, starting with the loading of the trains that transported the coal from the city of Moatize to the port in the city of Nacala. In the original process, the locomotive was composed of only one type of coal derived from only a single pile produced. However, to keep the level below 200 ppm, it was necessary to change this process, starting to load the locomotive with stacks of opposite fluor levels, forming a locomotive of known average fluor.⁷ For the formation of ships in the port of Nacala, it was also necessary to change the process of formation of piles and loading of ships. In the original process, all locomotives destined for the ship were unloaded, forming only one pile, which would be taken up again in the ship's loading process. However, to form a low-fluor ship with a high homogenization index, we divided the locomotives into two piles in different yards, thus enabling the simultaneous resumption of piles, considerably increasing the homogenization of the low-fluor ship destined for the Chinese market. The Chinese market is quite challenging due to restrictions regarding the level of fluorine in imported coals, especially in the south of the country where the water already has a high value of diluted fluorine. The results obtained in the monograph demonstrate the potential that can be achieved with the application of

statistics in industrial processes, 2021 ended with 6 ships unloaded in Chinese ports and an exclusive low-fluor coal contract for the year 2022.

Keywords: Control chart; Student's t test; Homogenization; Fluorine:

Lista de figuras

FIGURA 1: CLASSIFICAÇÃO DAS BACIAS SEDIMENTARES DE MOÇAMBIQUE EM RELAÇÃO À DESAGREGAÇÃO DO SUPERCONTINENTE GONDWANA. LOCALIZAÇÃO DA BACIA DE CARVÃO DE MOATIZE MINJOVA.....	25
FIGURA 2: ADEQUAÇÃO DE PROCESSO AOS LIMITES DE ESPECIFICAÇÃO.....	33
FIGURA 3: CARTA DE CONTROLE PARA A MÉDIA.....	35
FIGURA 4: CARTA DE CONTROLE PARA A AMPLITUDE.....	35
FIGURA 5: CARTA DE CONTROLE CARVÃO BN2B - SECÇÃO 2B.....	37
FIGURA 6: CARTA DE CONTROLE CARVÃO CPS4 - SECÇÃO 4.....	38
FIGURA 7: CARTA DE CONTROLE CARVÃO CPS6 - SECÇÃO 6.....	39
FIGURA 8: CARTA DE CONTROLE CARVÃO BNS4 - SECÇÃO 4.....	40
FIGURA 9: CARTA DE CONTROLE CARVÃO UCS6 - SECÇÃO 6.....	41
FIGURA 10: CARTA DE CONTROLE CARVÃO TC2B - SECÇÃO 2B.....	42
FIGURA 11: EXEMPLOS DE FORMAS DE HETEROGENEIDADE PRESENTES EM LOTES (A) NÃO HOMOGENEIZADOS, (B) SEGREGADOS E (C) HOMOGENEIZADOS.....	57
FIGURA 12: PRINCIPAIS MÉTODOS DE EMPILHAR.....	58
FIGURA 13: MÉTODO CHEVRON.....	58
FIGURA 14: EMPILHAMENTO PELO MÉTODO CHEVRON.....	60
FIGURA 15: MÉTODO WINDROW.....	61
FIGURA 16: MÉTODO WINDROW E A PERDA NO VOLUME DE ESTOCAGEM.....	62
FIGURA 17: EMPILHAMENTO PELO MÉTODO WINDROW.....	63
FIGURA 18: MÉTODO CONE SHELL.....	63
FIGURA 19: PILHA CONE SHELL EM UM PÁTIO CIRCULAR.....	64
FIGURA 20: EMPILHAMENTO PELO MÉTODO CONE SHELL.....	65
FIGURA 21: RETOMADOR DE LANÇA COM RODA DE CAÇAMBAS.....	69
FIGURA 22: MÉTODOS DE RETOMADA DE MATERIAL.....	70
FIGURA 23: FLUXO PADRÃO DO PROCESSO PRODUTIVO DE CARVÃO EM MOATIZE.....	71
FIGURA 24: FLUXO PROPOSTO DO PROCESSO PRODUTIVO DE CARVÃO EM MOATIZE.....	72
FIGURA 25: NOVA CARTA DE CONTROLE CARVÃO BNS4 - SECÇÃO 4.....	73
FIGURA 26: NOVA CARTA DE CONTROLE CARVÃO BN2B - SECÇÃO 2B.....	74

FIGURA 27: NOVA CARTA DE CONTROLE CARVÃO CPS4 - SECÇÃO 4.....	75
FIGURA 28: NOVA CARTA DE CONTROLE CARVÃO TC2B - SECÇÃO 2B.....	76
FIGURA 29: TESTE T REALIZADO PARA COMPRARA AS AMOSTRAS DOS LABORATÓRIOS.....	77
FIGURA 29: REPRESENTAÇÃO PÁTIO NACALA.....	79
FIGURA 29: MÉTODOS DE EMPILHAMENTO CHEVRON.....	80
FIGURA 29: MÉTODO RECUPERAÇÃO DE PILHA EM BLOCOS.....	81
FIGURA 29: CARTA DE CONTROLE FINAL DOS NAVIOS VENDIDOS.....	82

Lista de tabelas

TABELA 1: INTERVALO DE REFERÊNCIA PARA ANÁLISE DO ÍNDICE CP.....	52
TABELA 2: COMPARAÇÃO ENTRE OS PRINCIPAIS MÉTODOS DE ESTOCAGEM.....	66
TABELA 3: AMOSTRAS DE NAVIOS, UTILIZADAS PARA VALIDAR O LABORATÓRIO.....	77

Lista de gráficos

GRÁFICO 1: DISTRIBUIÇÃO NORMAL COM MÉDIA 0 E DESVIO PADRÃO 1.....	43
GRÁFICO 2: APLICAÇÃO DO TEOREMA DO LIMITE CENTRAL EM DIFERENTES DISTRIBUIÇÕES.....	45
GRÁFICO 3: INTERVALOS FORMADOS POR DESVIOS PADRÕES.....	46
GRÁFICO 4: ANÁLISE DA CAPACIDADE DE UM PROCESSO.....	51

Lista de abreviaturas e siglas

CEP - Controle Estatístico de processo

CPK - Índice de Capabilidade

PPM - Partes por milhão

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	19
2 OBJETIVO.....	22
2.1 OBJETIVO GERAL.....	22
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	22
3 JUSTIFICATIVA.....	22
4 DELINEAMENTO DO TRABALHO.....	23
5 REFERENCIAL TEÓRICO.....	24
5.1 ORIGEM DO CARVÃO.....	24
5.2 CARTA DE CONTROLE.....	27
5.2.1 PROCESSO.....	29
5.2.2 DESEMPENHO.....	29
5.2.3 AÇÕES SOBRE O PROCESSO.....	30
5.2.4 AÇÕES SOBRE O RESULTADO.....	30
5.2.5 PASSO A PASSO DO CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO.....	31
5.3 CARTA X.....	34
5.4 TESTE T DE STUDENT.....	42
5.5 CPK.....	49
5.6 MÉTODOS DE HOMOGENEIZAÇÃO.....	53
5.6.1 HOMOGENEIDADE E HETEROGENEIDADE.....	54
5.6.2 MÉTODOS DE ARMAZENAGEM DE MINÉRIO.....	57
5.6.2.1 CHEVRON.....	58
5.6.2.2 WINDROW.....	60
5.6.2.3 CONE SHELL.....	63
5.6.3 COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE EMPILHAMENTO.....	65
5.6.4 PRÁTICA OPERACIONAL DA EMPILHAMENTO DE MATERIAL.....	67
5.6.5 PRÁTICA OPERACIONAL DA RETOMADA DE MATERIAL.....	67
6 APLICAÇÃO DA CARTA DE CONTROLE E TESTE T PARA OTIMIZAÇÃO DE RESERVA.....	71
7 DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	72

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
9 TRABALHOS FUTUROS.....	82
REFERÊNCIAS.....	83

1 INTRODUÇÃO

O Controle Estatístico do Processo, CEP, é composto de uma coleção de ferramentas extremamente focada na resolução de problemas. Os gráficos ou cartas de controle, especificamente, são utilizados com objetivo de obter estabilidade no processo produtivo, reduzindo custo e sua variabilidade. Além disso, a análise de capacidade do processo é realizada conjuntamente para avaliar se o processo é capaz de operar em conformidade com as especificações em que foram projetadas (Qiu, 2014; Montgomery, 2019). No entanto, para Oakland e Oakland (2019), o CEP não é só um conjunto de ferramentas, mas sim uma estratégia para redução e ou resolução dos maiores problemas de qualidade: variações nos materiais, nos métodos de produção, nos componentes dos produtos, no tempo de entrega de mercadorias, nas atitudes dos colaboradores, enfim, em diversas áreas.

Sabe-se que quanto maior o investimento em qualidade, obtêm maiores lucros, devido à eliminação ou redução de perdas nos processos produtivos decorrentes da globalização e da competitividade.

Além dos enormes prejuízos financeiros, as empresas também incorrem em multas por parte de clientes ou de certificadoras, reclamações, gastos milionários com campanhas de regularização, danos à imagem, e não podemos esquecer que produtos não conformes também podem representar riscos para o cliente e seus processos (Montgomery, 2019). Cada vez mais, as empresas investem em processos mais capazes, incluindo processos automáticos e semiautomatizados, bem como dispositivos que identificam e segregam produtos que não atendem às especificações.

É possível reduzir índices de produtos não conformes através da implementação de técnicas estatísticas, reduzir o número de inspeções no processo produtivo, eliminar desperdícios e reduzir a variabilidade no processo através da implementação de programas e ferramentas da qualidade. Para Montgomery, citado por Silveira e Werner (2011), a qualidade vai contra a variabilidade de um processo, sendo necessária uma redução na variação geral das características do processo e do produto para atingir uma qualidade aceitável. É importante atingir um alto nível de qualidade em um produto ou serviço se você deseja vencer no mercado (Montgomery, 2019).

Embora seja impossível eliminar completamente a variabilidade dos processos nas características de qualidade, é possível conhecê-la e controlá-la. No entanto, as estatísticas só podem explicar a variabilidade de um processo (Vieira, 2012). A utilização de técnicas estatísticas para melhoria da qualidade vem se consagrando desde a era de Walter A. Shewhart em 1924, quando o conceito de gráficos de controle foi criado (Montgomery, 2019). Buscando uma aplicação mais assertiva das técnicas e ferramentas estatísticas, é necessário conhecer o processo a ser estudado. Na produção de carvão mineral é muito comum o controle dos processos para redução do nível de cinza, pois impacta de forma considerável seu poder calorífico.

O carvão mineral é um mineral não renovável, encontrado no subsolo em vastos depósitos de origem orgânica, tratasse de uma rocha sedimentar originada há milhares de anos. O combustível fóssil foi uma das primeiras fontes de energia conhecidas e utilizadas pelo homem, além de ser o combustível com maior abundância no mundo. Porém somente passou a ser utilizado em grande escala no período histórico chamado de Revolução Industrial.

O carbono é o principal composto do carvão mineral, podendo apresentar teores que variam entre 55% a 95% do elemento em sua composição, tornando o carvão mineral classificável, fazendo que haja tipos de carvão mineral mais ou menos ricos em carbono. De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), o rank é a classificação do teor de carbono usado para definir sua maturidade geológica e valor de mercado. Também pode-se encontrar, neste combustível fóssil, elementos como, enxofre, flúor, nitrogênio, oxigênio entre outros.

Os estágios de formação do carvão mineral, correspondem à produção especialmente pela presença de carbono. Entre os principais tipo de carvão, podemos destacar os 4 principais, tendo como referência a concentração de carbono da menor para a maior conforme exemplifica a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM):

- 1- Turfa: onde em sua composição permite a identificação de restos vegetais, apresentando teor de carbono entre 55% e 60%. Poder calorífico inferior a 4.000 kcal.

- 2- Linhito: apresenta grandes características de rocha sedimentar, sua formação é derivada da compressão da turfa, apresentando teores de carbono entre 67% e 78%. Porém seu poder calorífico ainda é inferior a 4.000kcal.
- 3- Carvão betuminoso ou hulha: rocha completamente sedimentar derivada de mistura líquida de cor escura e alta viscosidade, ou conhecida como betume. Possui teor variando entre 80% e 90% e seu poder calorífico é entre 7.000 a 8.650 kcal.
- 4- Antracito: contendo pouco ou nenhum betume, corresponde à forma mais pura de carvão mineral, é um tipo de carvão compacto e sólido. Apresenta teor de carbono de 96%.

O mercado da mineração é bastante competitivo e desafiador, para atender as exigências dos clientes, muitas mineradoras precisam alterar seus processos produtivos ou simplesmente estão fora de certos nichos específicos de grande lucratividade. O carvão de baixo flúor vendido para China é um exemplo claro da competitividade e da necessidade de se moldar em prol de atender um mercado exigente.

Processos produtivos existem com o objetivo de extrair matéria-prima, concentrar e ou agregar valor ao mesmo. Embora a maioria dos processos sejam lineares, durante a produção é necessário o controle de variáveis a fim de garantir as especificações de cada produto final, garantindo assim uma qualidade efetiva.

Em busca de produzir com maior eficiência e de acordo com a definição de Taguchi, um serviço ou produto de qualidade é aquele que atende perfeitamente as às especificações, atingindo o valor alvo com a menor variabilidade possível.

O trabalho será apresentado incluindo o estudo dos tipos de carvões disponíveis na bacia de Moatize. Consecutivamente apresentaremos a metodologia aplicada no projeto, adaptações realizadas no processo produtivo e resultados alcançados, culminando na conclusão desta monografia.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um novo produto para a maior mineradora brasileira, atendendo as especificações de baixo fluor exigidas para o carvão ser comercializado no mercado chinês.

2.2 Objetivo Específicos

- Apresentar um projeto de grande impacto económico realizado no setor mineral.
- Aplicar os gráficos de controle como ferramenta de controle estatístico de processo.
- Avaliar a capacidade do processo de atingir a especificação técnica exigida pelo mercado chinês.

3 JUSTIFICATIVA

O carvão mineral fez parte de momentos decisivos da história mundial, sua ampla utilização ocorreu principalmente durante a primeira revolução industrial. Em 1880, o carvão se tornou o principal pilar para industrialização do planeta, tornando-se a maior fonte de energia utilizada no planeta. Porém ao passar dos anos a utilização do carvão perdeu forças graças ao petróleo, tornando-o responsável apenas por cerca de 12% da energia gerada.

Nos dias atuais, os impactos ambientais são bastante relevantes para a sociedade e para o mercado industrial, a utilização de carvão na usinas gera grandes impactos, não só pelas emissões atmosféricas, descarte de resíduos sólidos e poluição térmica, mas também no processo produtivo, além dos riscos inerentes à mineração.

Para se manter competitivo no mercado global, as grandes mineradoras precisam ofertar carvões de grande poder calorífico e que gere o mínimo de impacto ambiental, para isso é necessário o controle de contaminantes como enxofre, fosforo, fluor, etc.

Sendo assim, o presente trabalho é justificado pela importância de se controlar o nível de fluor do carvão ofertado para o mercado chinês, a fim de reduzir a variabilidade do processo produtivo, garantir a qualidade e atender as especificações técnicas do produto.

4 DELINEAMENTO DO TRABALHO

O presente trabalho foi estruturado de acordo com a seguinte divisão:

- Etapa 1: Apresenta o contexto no qual o caso é estudado, com informações relevantes sobre os tipos de carvões e a necessidade em se atender as demandas do mercado de forma integrada. Após situar o problema, são explicitados os principais objetivos a serem alcançados pela pesquisa, justificativa que sustentam o trabalho e o delineamento da dissertação;

- Etapa 2 – Pesquisa Bibliográfica: Revisa na literatura disponível, os principais conceitos utilizados no texto, que compreendem: Bacia carvoeira de Moatize, ferramentas estatísticas, estocagem e retomada da pilhas, buscando identificar em pesquisas correlatas argumentos que evidenciem a contribuição do trabalho;

- Etapa 3 – Caso estudado: Descreve detalhadamente o caso estudado e os princípios do método utilizado para solucionar o problema, definindo as premissas, limitações e regras assumidas nas modificações do processo produtivo;

- Etapa 4 – Resultados: Descreve a resolução do problema através do uso de ferramentas estatísticas, apresentando os resultados obtidos para o atendimento do produto proposto;

- Etapa 5 – Conclusão: Desenvolve uma conclusão sobre os resultados comparando os resultados dos navios vendidos;

- Etapa 6 – Trabalhos futuros: Define possíveis trabalhos que poderão preencher lacunas deixadas pelo presente trabalho;
- Etapa 7 – Bibliografia: Apresenta as referências bibliográficas utilizadas no trabalho;

5 REFERENCIAL TEÓRICO

5.1 Origem do carvão

A indústria mineira em Moçambique tem enfrentado um crescimento exponencial nos últimos anos impulsionado pela descoberta de enormes quantidades de recursos minerais, especialmente carvão e gás natural. As descobertas de carvão em Moçambique estão associadas ao Supergrupo Karoo (Fig. 1) do Carbonífero Superior ao Jurássico Inferior, sendo a mais relevante a Bacia Carvoeira de Moatize (MCB) com um comprimento aproximado NW-SE de 30 km e uma largura variando entre 2 e 8km.

Figura 1 - Classificação das bacias sedimentares de Moçambique em relação à desagregação do Supercontinente Gondwana. Localização da Bacia de Carvão de Moatize Minjova.

Atualmente, o MCB está licenciado para uma empresa brasileira em Moçambique, com o nome de Projeto Carvão Moatize, ocupando uma área de aproximadamente 25.000 ha. A licença é dividida em seções, limitadas por falhas ou características naturais. Atualmente a Seção 2A é a que está sendo explorada pela mineradora brasileira. Das outras seções, a Seção 4 e Seção 6 apresentam uma grande quantidade de informação disponível mostrando elevado potencial mineiro e, portanto, definida pela mineradora brasileira como as próximas a serem exploradas.

A formação carbonífera em MCB – Formação Moatize – tem 6 jazidas de carvão quais a Chipanga é a mais espessa e o principal alvo de exploração. A sequência mergulha suavemente para o centro da bacia com mergulhos de 8 a 15° (às vezes mais). Como consequência, essas camadas de carvão afloram ou subafloram na superfície, sendo, portanto, afetadas pela oxidação. Para melhor delimitar a área de pesquisa dentro da Seção 4 e 6, foram traçados polígonos onde afloram/subafloram carvão, doravante denominada Área de Interesse conforme Vasconcelos e Pedro (2004).

A Bacia de Carvão de Moatize (MCB) em Moçambique é um graben com sedimentos da idade Karoo com grossas camadas de carvão que estão em exploração pela empresa brasileira. Vasconcelos (2004) explica que atualmente, a exploração é a céu aberto e futuramente as obras se estenderão até a área onde antes eram exploradas minas subterrâneas. É sabido em todo o mundo que a bacia de Moatize é um depósito de classe mundial para coque e carvão térmico e por isso a empresa brasileira está a desenvolver estudos para racionalizar os recursos carboníferos da área.

Devido à sua história geológica e tectônica, a estrutura geral das camadas sedimentares (e carvão) mostra sinclinais e anticlinais amplamente abertos e, como consequência, em muitas áreas, os veios de carvão se aproximam da superfície ou mesmo afloram. Assim, as zonas de subafloramento/afloramento das camadas estão

sujeitas diretamente aos agentes intemperistas, submetendo o carvão a fenômenos de oxidação, que são considerados como um fator que altera negativamente as propriedades de coqueificação dos carvões Vasconcelos (2004).

5.2 Carta de controle

O CEP (Controle Estatístico de Processo) tem como principal objetivo estabilizar e padronizar o processo, de modo a sustentar as melhorias, otimizar recursos, reduzir erros de produção e melhorar a qualidade do produto final. Controle estatístico de processo é um método utilizado para gestão da qualidade, que utiliza métodos e ferramentas e dados estatísticos para identificar potenciais falhas de um determinado processo. De acordo com Ribeiro e Caten (2012), com a avaliação de indicadores, o CEP permite uma estabilidade no processo, garantindo previsibilidade aos gestores e eliminando riscos ou surpresas - exceto as causas comuns de variação.

Assim, as características finais desejadas em um determinado produto ou serviço, são mantidas de forma padronizada, gerando maior confiabilidade do processo e aumentando a satisfação dos clientes. Um processo estável garante a redução dos custos de produção, já que evita falhas, perdas de produtos ou reparações, otimizando tempo e recursos.

As causas de variação do processo podem ser classificadas em dois grupos:

- causas comuns: as causas comuns são aquelas aleatórias e inevitáveis, que não podem ser previstas, identificadas ou corrigidas. Quando somente causas comuns afetam o processo, sua variável se mantém dentro dos limites de controle, mantendo o fluxo sem complicações;
- causas especiais: as causas especiais são aquelas que acontecem por alguma falha ou motivo facilmente identificado, como um erro sistemático. Assim, pode ser corrigido assim que observado, impedindo que novas instabilidades aconteçam no processo após o ajuste.

O controle estatístico de processo, ou CEP, tem como principal objetivo reduzir ou, até mesmo, eliminar, possíveis causas de variações. Com isso, elas podem ser corrigidas ao observar o processo. Ramos (2007) afirma que as variações especiais são aquelas que geram falhas no resultado, em função de desvios sistemáticos, que possam ser evitados. Com isso, o CEP permite que os gestores identifiquem a raiz dos problemas e corrijam no seu fluxo de processo, impedindo que o mesmo erro aconteça novamente.

O objetivo principal do controle estatístico de processo é garantir um processo estável, de modo que seja possível, a partir de então, evoluir em busca de uma melhoria contínua. Sem estabilidade, o processo pode não conseguir manter as especificações exigidas, tornando-se imprevisível e impossível de antecipar riscos potenciais.

O controle estatístico de processo é essencial para que as empresas consigam previsibilidade, ou seja, tenham conhecimento do que vai acontecer no futuro. Se a empresa não tem nenhum controle, cada dia é uma novidade e o processo poderá ser realizado de inúmeras maneiras, oferecendo resultados completamente diferentes conforme Corrêa e Neto (2009). A padronização e a previsibilidade garantem mais segurança para os gestores, que precisarão lidar somente com as causas comuns de variações. Dessa forma, conseguem um processo estável e um padrão de qualidade mais próximo, com a meta desejada. Com isso, os clientes também são beneficiados.

Confira os principais benefícios do controle estatístico de processo:

- rápida identificação de falhas e instabilidades dos processos;
- redução dos custos de produção;
- melhora na qualidade, com a redução de erros;
- redução de perdas e retrabalho, otimizando o tempo e recursos;
- maior estabilidade do processo, permitindo um melhor conhecimento sobre ele e auxiliando na manutenção do controle;
- aumento da produtividade;
- maior percepção de valor e confiabilidade, por parte dos clientes;
- controle eficaz e em tempo real;

- oportunidade de mudanças, inclusive culturais, por meio do conceito de melhoria contínua;
- garante a padronização dos processos, independentemente da rotatividade da equipe.

O sistema de controle estatístico de processo tem quatro elementos importantes. Esses elementos auxiliam o entendimento do funcionamento do método, facilitando o uso das informações obtidas, de modo mais proveitoso para a empresa exemplifica Ramos (2007).

5.2.1 Processo

O processo é a combinação dos recursos que fazem parte da produção de um produto ou serviço como pessoas, máquinas, tecnologias, métodos e matéria-prima. Para a produção e alcance de um resultado que será sentido pelos clientes, o processo precisa de funcionários e fornecedores, associados a métodos, controles e ao ambiente. Os clientes não fazem parte do processo, mas servem como referência e proporcionam identificar novas necessidades e expectativas. Essas alterações de comportamento impactam o processo, exigindo renovações e adaptações.

5.2.2 Desempenho

Um elemento essencial para o controle estatístico de processo é a análise do desempenho do processo atual. Embasado no desempenho que se observa o resultado da produção (produto final) e se avalia sua qualidade. Portanto, ao olhar o resultado, não é possível obter informações suficientes se também não forem avaliados os detalhes do processo e o quanto esses detalhes impactam a qualidade do produto. Analisar informações como qualidade da matéria-prima, condições do ambiente de trabalho ou do clima, rotatividade de pessoal, tempo de cada linha de produção, absentismo, interrupções, maquinário em manutenção, entre outros, é fundamental para compreender os fatores que afetam as variações do processo no todo.

5.2.3 Ações sobre o processo

O terceiro elemento diz respeito às ações sobre o processo. Essas devem ser tomadas buscando evitar variações que distanciem as atividades de seus indicadores alvo. Um exemplo de ação tomada sobre o processo é o treinamento de funcionários para a operação de uma máquina específica. Ao capacitar os funcionários, a empresa garante que o maquinário será utilizado corretamente, oferecendo o mesmo resultado, independentemente do operador. Quando muitas não conformidades são observadas, são necessárias outras alterações no processo. Por exemplo, uma máquina que apresenta diversos problemas de interrupção, precisa ser substituída; a comunicação entre pessoas pode ser aprimorada; matéria-prima de baixa qualidade deve ser descartada, trocando-se de fornecedor. O processo, na totalidade, deve ser alvo de um redesenho completo, se necessário. Tomar medidas sobre o processo é mais econômico para a empresa, pois evita que novas falhas aconteçam.

5.2.4 Ações sobre o resultado

Ao contrário do item mencionado acima, todas as ações sobre o resultado fazem referência às medidas tomadas quando o erro já aconteceu. Neste caso, no momento em que corrigir aquele produto pontualmente, você correrá o risco de haver novas falhas. Seja como for, para evitar prejuízo de tempo e dinheiro e reconquistar a confiança dos clientes é recomendado que seja feita uma análise do processo para identificar a raiz do problema, corrigindo o processo, não o resultado.

O controle estatístico de processo utiliza diversas ferramentas para monitorar e analisar seus processos, através da vasta coleta de dados. A principal ferramenta, porém, é o gráfico de controle. Ele permite observar se o processo tem um desempenho estável ou previsível e possibilita identificar falhas e causas dessas não conformidades.

5.2.5 Passo a passo do controle estatístico de processo

Para começar a utilizar as ferramentas de controle estatístico de processo em uma empresa, é preciso:

- definir quais processos pretende controlar: escolha um processo importante para a empresa, que não esteja de acordo com a produtividade e qualidade esperada;
- escolher o gráfico mais apropriado: é preciso identificar características críticas do processo, que causam variações do resultado;
- analisar como serão os sistemas de medição: avalie se seu sistema está adequado para o controle estatístico de processo que você deseja. Isso garante sua confiabilidade quanto à estabilidade, tendência, linearidade, repetitividade e reprodutibilidade;
- planejar gráficos, variáveis e índices: defina quais dados serão coletados, a amostragem e periodicidade. Assim, os limites de controle do processo podem ser definidos (eles devem considerar o processo estável, descartando impactos por causas especiais);
- implantar o controle estatístico de processo: com a estabilidade definida, o controle estatístico de processo pode ser implementado;
- avaliar a capacidade dos processos: considerando o processo estável, é preciso analisar se ele atende às especificações e exigências do cliente. É ele quem vai consumir o resultado daquele processo;
- monitorar variáveis: considerando que o principal objetivo do controle estatístico de processo é a melhoria contínua, monitorar as variáveis do processo é essencial para identificar oportunidades de melhoria e riscos potenciais;
- executar ações de melhorias: com o monitoramento constante, causas de instabilidade serão identificadas. Será necessário que o processo — em parte ou inteiro — seja revisto. Assim, os responsáveis pela análise do controle de processo devem tomar medidas que reduzam ou eliminem as falhas observadas.

Campos (2019) afirma que uma inspeção visual, no curto prazo ela fornece mais resultados de unidades ao verificar anomalias nos produtos, porém a inspeção é uma ação corretiva, morosa e promove um alto índice de retrabalho. O CEP ao contrário da inspeção, opera numa escala de tempo maior e despende mais energia nas causas especiais, que vão sendo eliminadas aos poucos, ao longo do tempo, com paciência e persistência.

A correta aplicação do CEP atinge aquilo que aparentemente não é o seu objetivo, ou seja: um processo sem unidades que apresentam defeitos, possibilitando atender às especificações e seu desempenho independe das tradicionais inspeções. O emprego correto das cartas de controle permite que o monitoramento do processo possa ser realizado pelos próprios operadores, fornece uma distinção clara de entre causas comuns e causas especiais, serve de guia para ações locais ou gerenciais, fornece uma linguagem comum para discutir o desempenho do processo, possibilitando uma alocação rápida e otimizada dos investimentos para melhorar a qualidade, auxilia o processo à atingir alta qualidade e baixo custo unitário, consistência e previsibilidade.

Ramos (2007) define que para todo processo existe um nível de variabilidade que é necessário entender o que é aceitável ou não para um processo. A Figura 2 mostra o comportamento entre a variabilidade de um processo entre seus limites de controle; deve-se observar que nem todos os processos são capazes de atender as especificações esperadas, neste caso devesse implementar ações de otimização. A variabilidade pode ser provocada por causas comuns que não impactam os limites de controle, e as causas especiais que são danosas ao funcionamento do processo, sendo necessário intervenções segundo Ribeiro e Caten (2012).

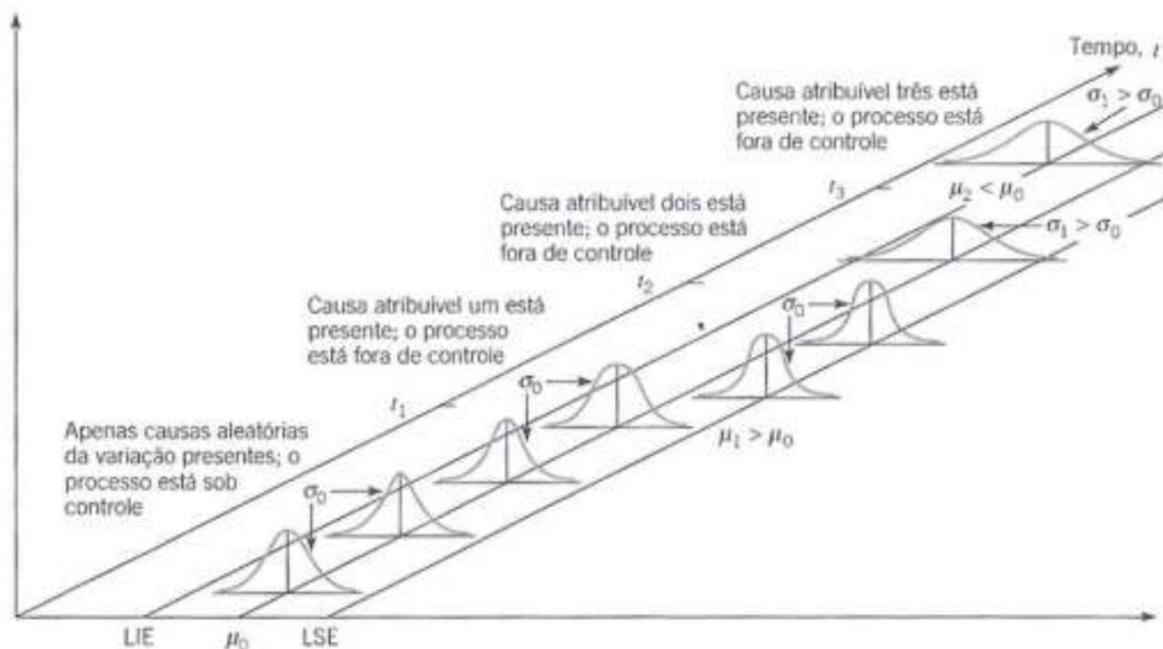


Figura 2 – Adequação de processo aos limites de especificação

Fonte: Corrêa e Neto (2009)

Buscando uma maneira simples de verificar a adequação do processo, nasceram as cartas de controle. Porém os dados podem se comportar de diferentes formas, fazendo-se necessário a existência de diferentes tipos de cartas e diferentes aplicações.

Campos (2019) listou e descreveu diferentes tipos de cartas e aplicações; cartas de controle de variáveis, média (Cartas \bar{x} -R e \bar{x} -S) e a de Zona (Carta Z). Buscando controle de atributos, existem cartas específicas como; (Carta P) para monitoramento de conformidades, (Carta U) para controle de conformidades por unidade, entre outras.

O foco deste trabalho será a utilização da carta de média (Carta \bar{x}), por ser a mais recomendada para esta aplicação e ser um dos modelos mais utilizados.

As cartas ou gráficos de controle são um conjunto de pontos que representam a amostras. São distribuídos conforme o tempo (eixo horizontal) e valor (eixo vertical). Sua interpretação ocorre principalmente através da análise da posição em relação às linhas

de controle, identificando o limite superior e o inferior. Por isso, para identificar alguma não conformidade no processo, existem cinco testes que devem ser observados. Através deles é possível perceber as potenciais causas, traçando uma estratégia de melhoria para este ponto do processo.

Os pontos posicionados dentro dos limites superiores e inferiores de controle mostram que o processo sofreu variações de causas comuns. Nesse sentido, se um ou mais pontos ultrapassam essas linhas, pode se concluir que as variações ocorreram por causas especiais. Neste caso, este fator merece atenção do gestor. Se o gráfico apresenta uma variação de valores para cima e para baixo, com uma frequência em intervalo semelhantes, apresentando algum tipo de padrão, significa que algum ponto do processo precisa ser ajustado. Quando sete ou mais pontos aparecem em um dos lados da linha média (acima ou abaixo), é um alerta para observar aquele ponto e, em seguida, buscar alguma melhoria em potencial. Ocorre quando sete ou mais pontos se apresentam de forma contínua, para cima ou para baixo, apresentando-se como uma linha de tendência. Por isso, é possível que uma causa especial esteja atuando nessa etapa do processo e precise ser avaliada. Se dois ou mais pontos estiverem muito próximas às linhas de controle, superior ou inferior, é sinal de instabilidade. Assim, quanto mais próximos os pontos estiverem da linha média, mais estável será o processo reforça Campos (2019).

5.3 Carta X

A carta a ser estudada conforme dito na seção anterior, refere-se ao controle da média dos dados e pode ser do tipo \bar{x} -R, onde avalia a média e a amplitude dos dados, e a \bar{x} -S, que mede a média e desvio padrão. Porém ambas as cartas compartilham com os mesmos dados de variáveis.

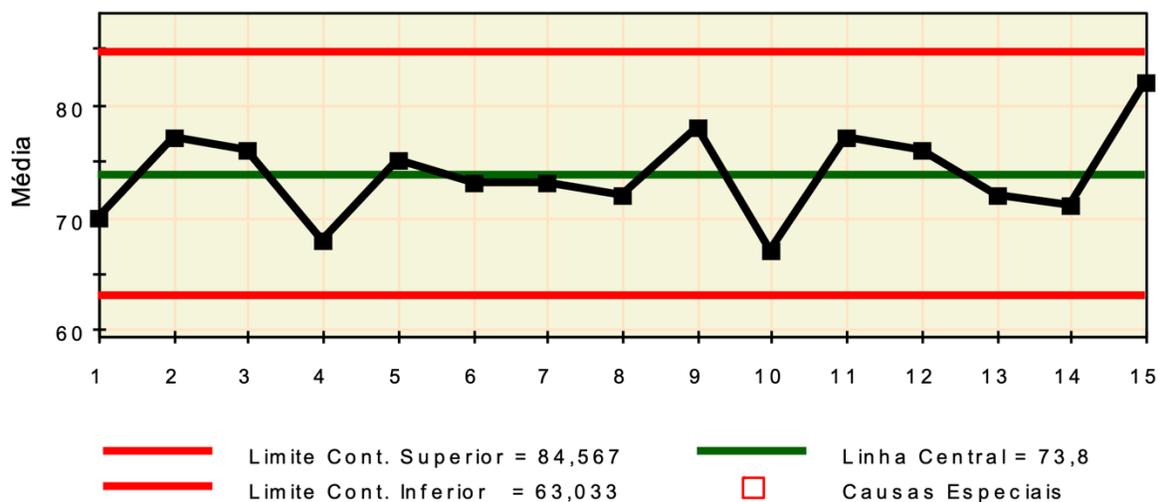


Figura 3 - Carta de controle para a média

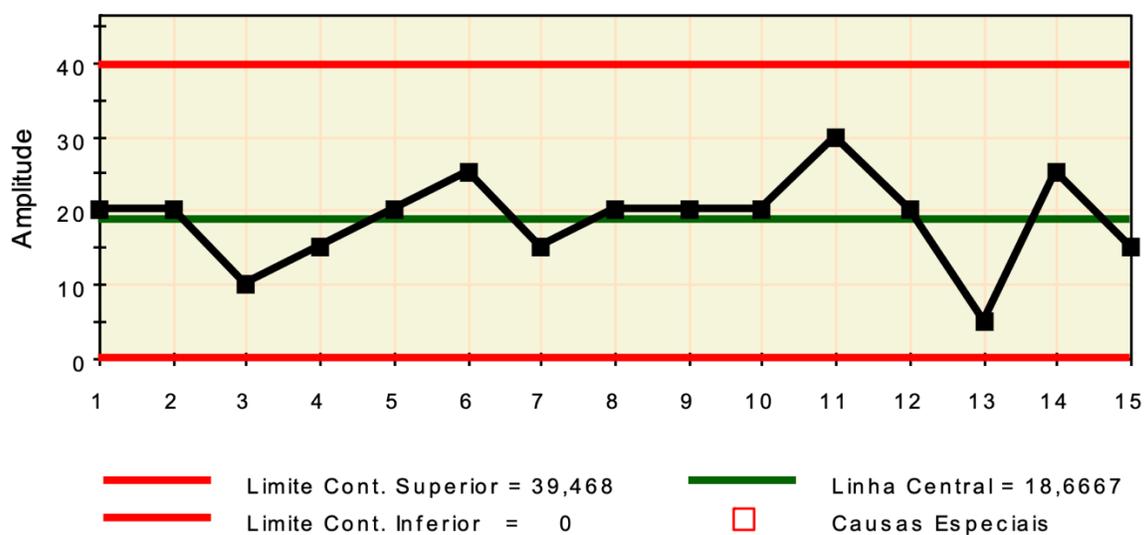


Figura 4 - Carta de controle para a amplitude

Fonte: José Luis Duarte Ribeiro & Carla ten Caten/PPGEP-UFRGS

As cartas de controle seguem o mesmo formato padrão (Figura 3), onde na abscissa encontra-se a unidade numérica do que está sendo observado pela carta. A linha central, representada na Figura 3 pela linha verde, é a média do processo, enquanto

as linhas vermelhas são os limites de controle superior e inferior. Por último, mas não menos importante, os pontos pretos tratam da representação dos dados obtidos.

O limite superior de controle (LSC) e o limite inferior de controle (LIC) são os limites estatísticos de tolerância da média dos valores de características de qualidade baseado em uma amostra aleatória de tamanho n . A linha central (LC) representa o valor médio da característica de qualidade monitorada (μ_0). Quando o processo está sob controle, os pontos (média amostral) cairão entre o LSC e LIC. Um modelo universal para se obter LSC, LC e LIC está descrito nas equações 1.1, 1.2 e 1.3 respectivamente:

$$LSC = \mu_0 + k \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1.1)$$

$$LC = \mu_0 \quad (1.2)$$

$$LIC = \mu_0 - k \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (1.3)$$

onde que μ_0 deve ser entendido como a média do processo sob controle, k é a constante indicativa da largura do intervalo, σ é o desvio padrão do processo sob controle e n o fator de construção do gráfico de controle para variáveis. Sendo que $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ intervalo que engloba 99,7% dos valores de X .

A figura 5 apresenta o comportamento do carvão BN2B derivado da secção 2B, carvão de elevado poder calorífico e baixo nível de flúor. Excelente carvão para compor o novo produto, porém a secção 2B está no final de sua vida útil. Sendo necessário otimizar sua reserva.

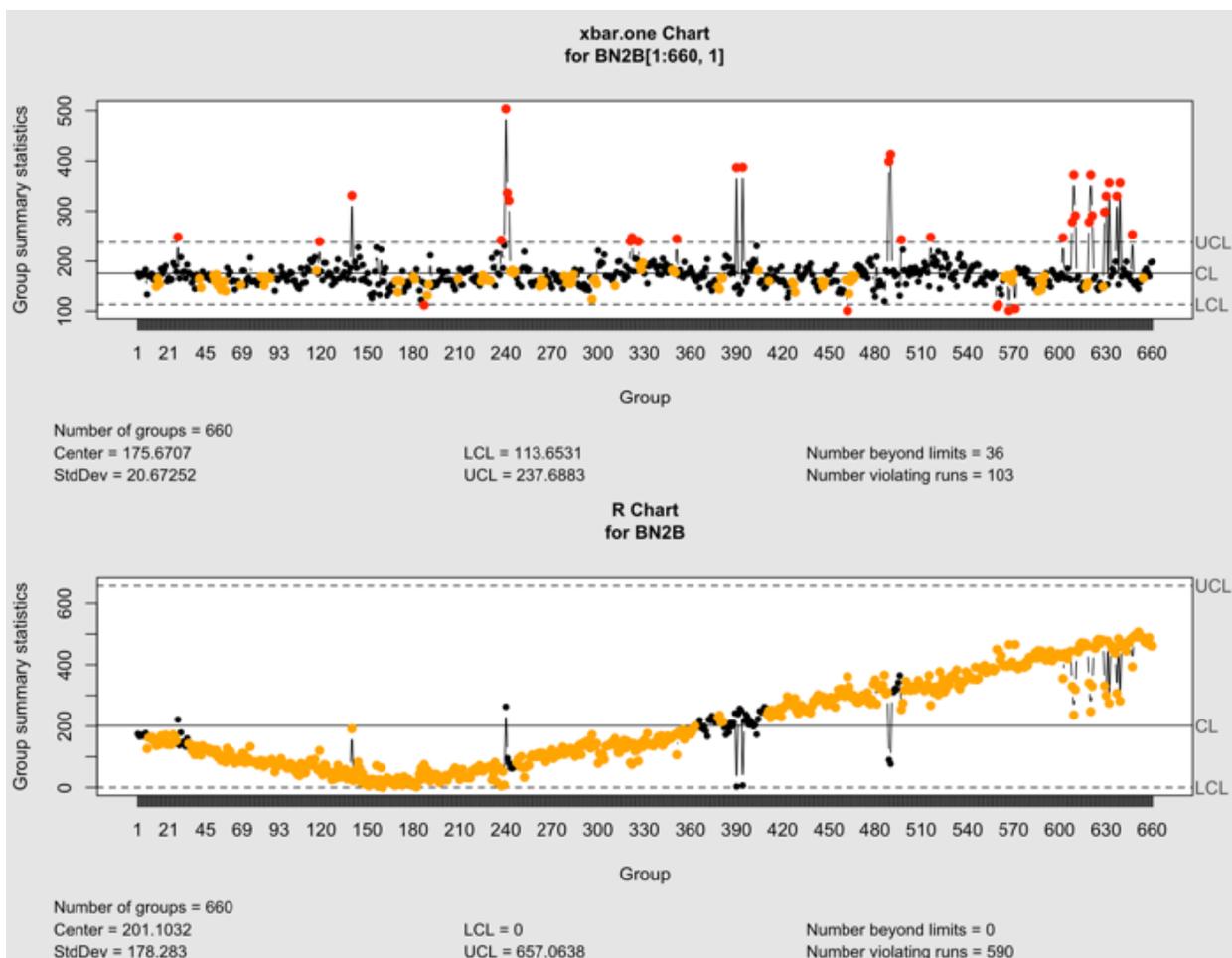


Figura 5 - Carta de controle carvão BN2B - Secção 2B

A figura 6 apresenta o carvão CPS4 derivado da secção 4, grande poder calorífico, porém, apresenta um nível de flúor próximo ao limite de especificação do mercado chinês.

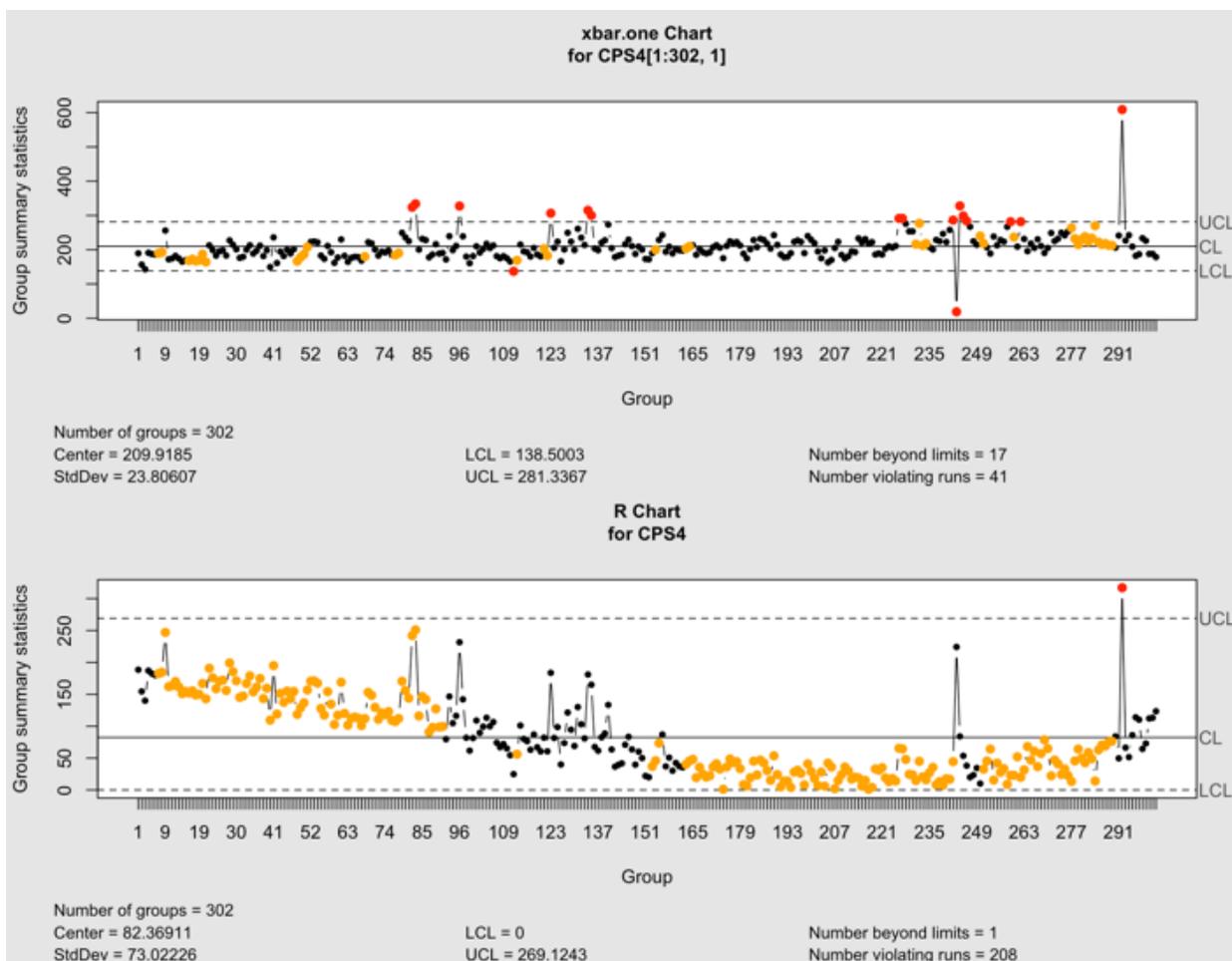


Figura 6 - Carta de controle carvão CPS4 - Secção 4

A figura 7, apresenta o comportamento do carvão CPS6, carvão esse originado da secção 6, este carvão apresenta grande poder calorífico, alto nível de flúor e elevado índice de enxofre em sua composição.

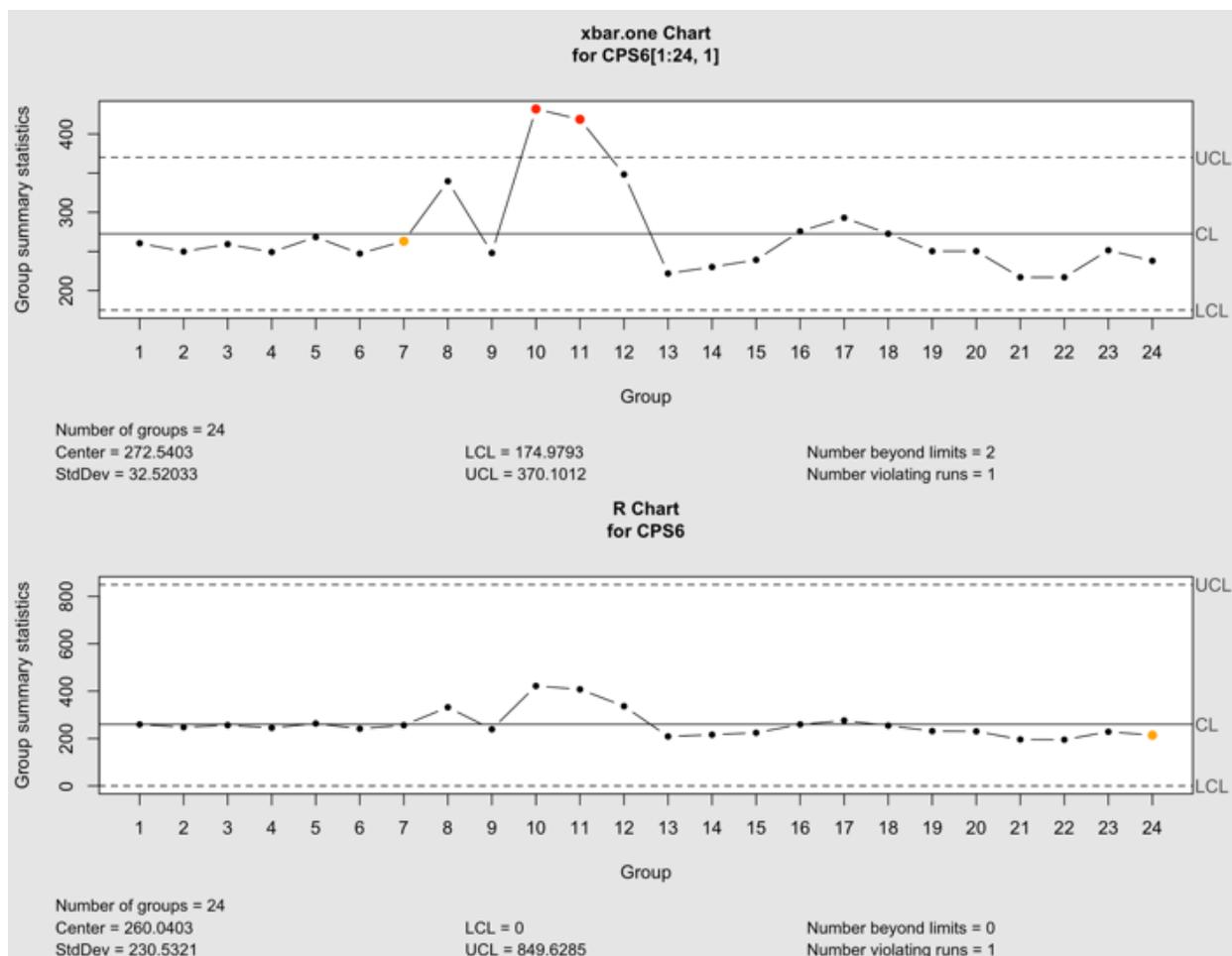


Figura 7 - Carta de controle carvão CPS6 - Secção 6

A figura 8 apresenta o comportamento do BNS4, carvão derivado da secção 4 que apresenta grande poder calorífico e um nível medio de flúor, próximo à 165 ppm, sendo possível sua utilização para otimizar a formação do novo produto de baixo flúor.

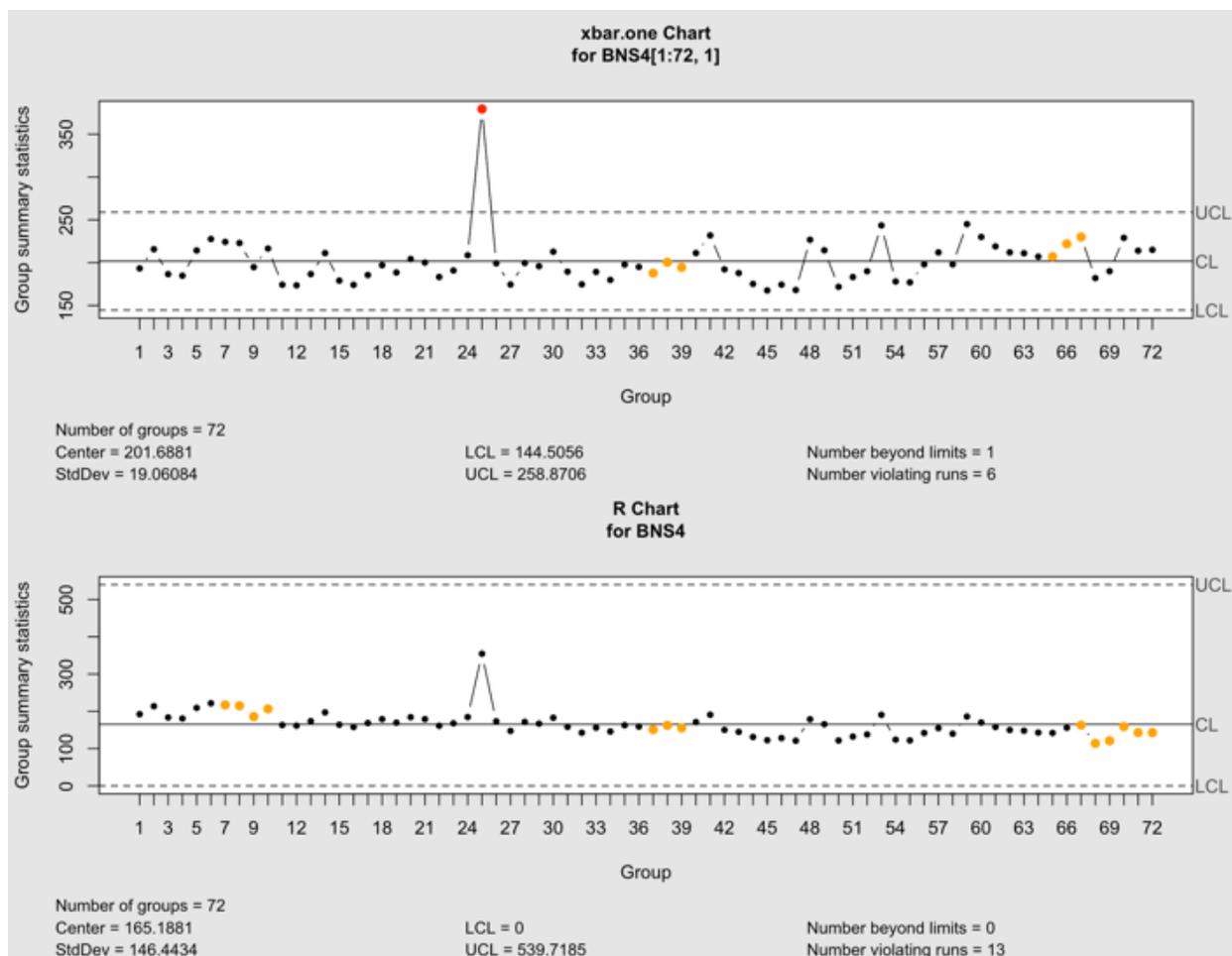


Figura 8 - Carta de controle carvão BNS4 - Secção 4

A figura 9 apresenta o comportamento do carvão UCS6, derivado da secção 6, apresentando elevado nível de flúor e enxofre.

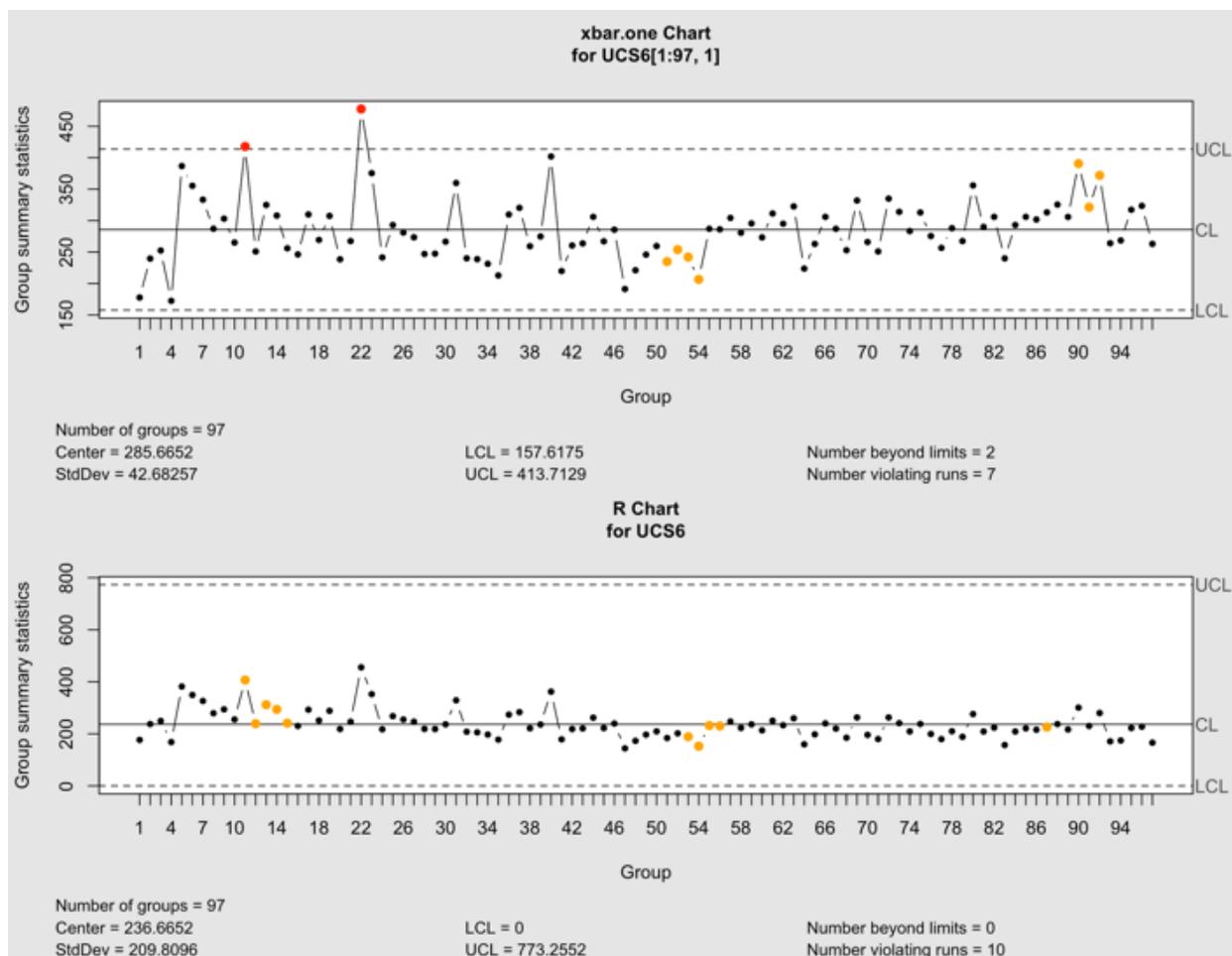


Figura 9 - Carta de controle carvão UCS6 - Secção 6

A figura 10 apresenta o comportamento do carvão TC2B, derivado da secção 2B, este carvão apresenta baixo nível de flúor e baixo poder calorífico, dificultando sua utilização em grande escala.

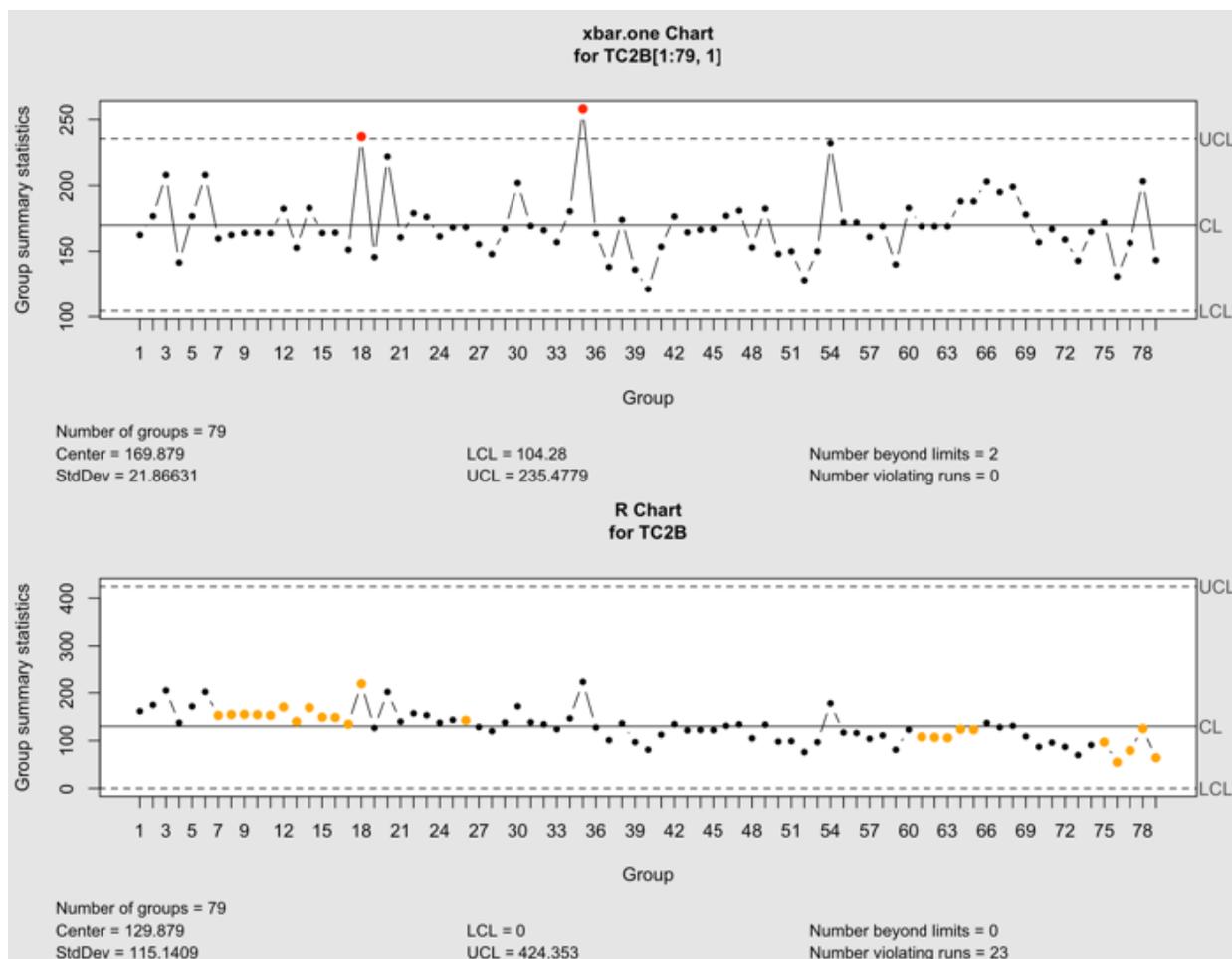


Figura 10 - Carta de controle carvão TC2B - Secção 2B

5.4 Teste t de Student

Um cervejeiro inglês chamado William Sealy Gosset sugeriu em 1908 uma solução que ficou conhecida como teste de hipótese t de Student. Gosset, mais conhecido pelo homônimo Student, trabalhava na cervejaria Guinness e lidava com o seguinte problema: como avaliar a qualidade das toneladas e toneladas de grãos utilizados na cerveja com base em apenas uma pequena amostra. Para dificultar sua vida, o problema deveria ser resolvido utilizando a menor quantidade possível de grãos, afinal de contas, quanto mais cerveja é testada, menos cerveja é produzida.

A solução adotada foi, essencialmente, comparar as médias entre os grãos, avaliando especificamente a qualidade média desejada para todo o lote e a qualidade

média presente na pequena amostra. A genialidade da solução, contudo, é que Gosset criou uma maneira de estimar a probabilidade de os grãos da amostra serem comparáveis ao seu lote inteiro, utilizando-se de estatística.

O racional do teste t consiste nas seguintes etapas:

- Desejamos identificar a característica (por exemplo, qualidade) de uma população (como, lote de grãos), porém possuo apenas uma amostra (por exemplo, punhado de grãos).
- Conheço as características de uma população ideal (por exemplo, qualidade ideal).
- Conheço o perfil das diferentes amostras retiradas da população ideal.
- Comparo a probabilidade da amostra em mãos ser uma das muitas amostras possíveis originadas a partir de uma população ideal.
- Caso a probabilidade for baixa, concluo que a amostra não foi originada de uma população ideal.

Em diversas situações e aplicações, se faz necessário comparar as médias de duas amostras (grupos) independentes, com o objetivo de avaliar se elas são oriundas de populações com médias iguais ou diferentes. O teste t de Student, proposto em 1908 por William Sealy Gosset, é umas das ferramentas mais utilizadas para este tipo de análise.

Na estatística é possível avaliar um fenômeno e sua ocorrência através de um gráfico chamado distribuição de probabilidade. Ele registra os possíveis resultados de um fenômeno e sua frequência, sendo ilustrada em uma curva. Dentre os diferentes tipos de curvas resultantes da natureza, uma das mais comuns é a **distribuição normal**. A capacidade de dedução do teste t é garantida pela distribuição normal, pois ela garante propriedades valiosas sobre a frequência, média e dispersão (isto é, variância) de um conjunto de dados. O histograma apresenta um exemplo, ilustrando no eixo horizontal

os elementos do conjunto, e no eixo vertical estão a frequência que cada elemento se repete:

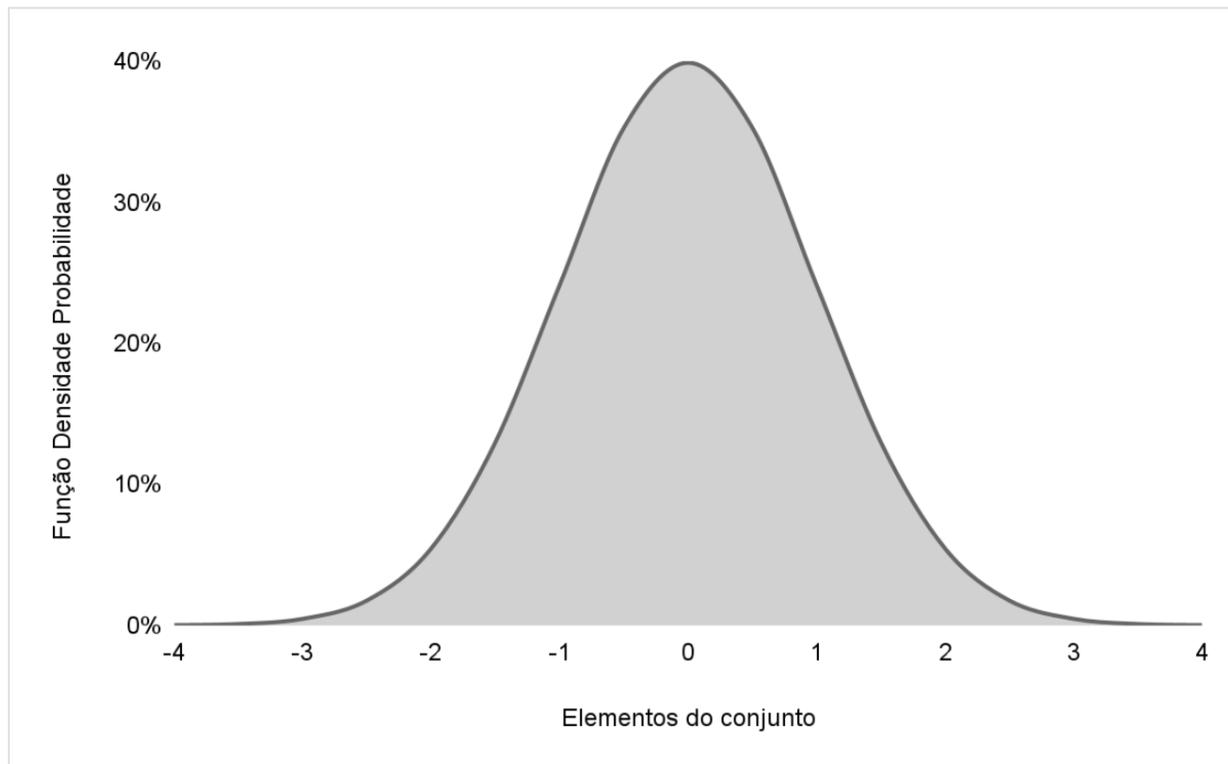
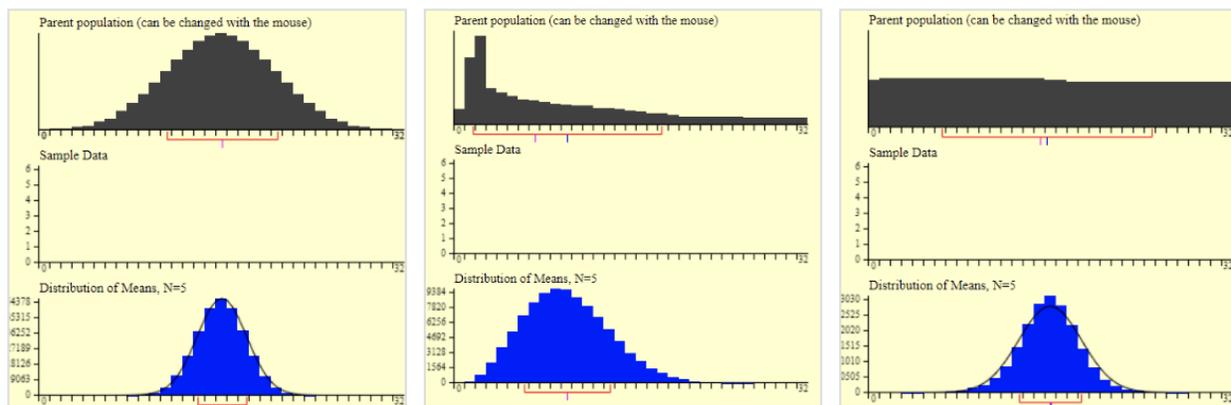


Gráfico 1 – Distribuição Normal com média 0 e desvio padrão 1.

Observe no gráfico 1 que as maiores frequências estão próximas à média 0, diminuindo na medida que se afastam e nunca chegando a uma frequência nula. Essas são duas propriedades importantes da distribuição normal: (1) maior frequência dos resultados próximos ao centro e (2) uma constante dispersão. Na imagem acima, observamos que o resultado 0 ocorre para aproximadamente 40% da amostra Montgomery (2004).

De fato, como não temos acesso a base de dados completa, não sabemos inicialmente com que tipo de distribuição estamos lidando. Apesar disso, ressalta Montgomery (1997) existe uma maneira de transformar praticamente todos os tipos de distribuição em normal. Para isso, utilizaremos o Teorema do Limite Central. O teorema central do limite afirma que a média de uma amostra de n elementos de uma população tende a uma distribuição normal.

Em outras palavras, não importa qual distribuição estamos falando, caso considerássemos uma população qualquer e coletássemos diferentes amostras de um mesmo tamanho, poderíamos calcular a média de cada amostra e o conjunto dessas médias se comportaria como uma distribuição normal. O processo de criar várias amostras diferentes de uma mesma população chama-se amostragem aleatória.



Gráficos 2 - Aplicação do Teorema do Limite Central em diferentes distribuições.

A sequência de gráficos acima, apresenta a aplicação do Teorema do Limite Central. As três imagens mostram em cinza diferentes tipos de curvas de distribuição. Logo abaixo, em azul, estão as distribuições resultantes da aplicação do Teorema do Limite Central. Repare que independente do formato inicial da curva, as distribuições convergem em um único formato explica Rotondaro (2002).

Utilizando-se do Teorema do Limite Central, o conjunto das médias amostrais apresenta uma distribuição normal em torno da mesma média original. Dessa forma, garantimos a normalidade ao mesmo tempo que a média da distribuição resultante é a mesma da média original. Apesar de simples na teoria, existe uma limitação para o Teorema do Limite Central. A principal dificuldade do teorema é que o tamanho das diferentes amostras retiradas da população deve ser grande. Em contrapartida, conforme Montgomery (2004) é consenso na literatura que, quanto mais parecida a distribuição original for de uma normal, menor é o tamanho amostral necessário para a aplicação do Teorema do Limite Central. Adicionalmente, existem outros testes estatísticos que avaliam se uma determinada amostra pertence a uma população com distribuição normal.

Uma vez que garantimos a normalidade, utilizaremos uma nova propriedade da distribuição normal o volume de dados contidos nos intervalos determinados pela distância entre a média e os desvios padrões. Segundo a regra 68-95-99, os intervalos formados por:

- um desvio padrão contém 68% dos dados;
- dois desvios padrões contém 95% dos dados;
- três desvios padrões contém 99% dos dados;

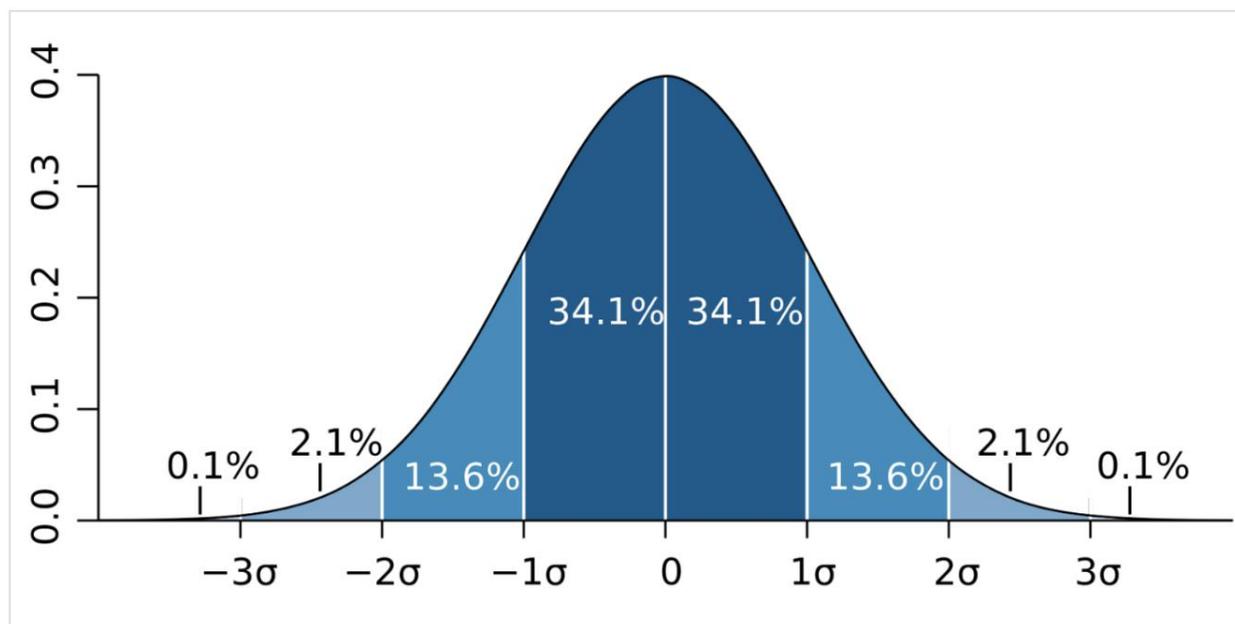


Gráfico 3 – Intervalos formados por desvios padrões.

O gráfico 3 ilustra os intervalos e como eles concentram grandes volumes dos dados da população. Na imagem, o símbolo σ representa desvio padrão, como exemplo, podemos ver que o intervalo formado pela distância de dois desvios padrões em relação a média, ou seja, as quatro fatias centrais do gráfico, somam 95%. Isso significa que caso sorteássemos um elemento dessa população 100 vezes, em média, 95 vezes o elemento estaria contido dentro desse intervalo.

Considerando o cenário original da cerveja, segundo William Sealy Gosset o próximo passo é escolher um tamanho amostral grande o suficiente para que o Teorema do Limite Central seja aplicável, o que, por sua vez, garantiria a normalidade da distribuição. Uma vez que os intervalos formados pelos desvios padrões concentram a maioria dos possíveis valores da amostra. Dessa forma, o que nos resta é entender se a média amostral está dentro desse intervalo ou não:

Caso 1 – a média amostral está dentro do intervalo

Caso a média amostral esteja dentro do intervalo, ela faz parte de 95% das possíveis amostras criadas a partir da população ideal. Como a probabilidade é alta, não é possível rejeitar a possibilidade da amostra ter sido originada a partir da uma população de referência.

No cenário da cerveja, esse resultado significa que não há indícios estatísticos de que o lote inteiro de grãos testados seja de qualidade diferente da qualidade ideal.

Caso 2 – a média amostral está fora do intervalo

Caso a média amostral esteja fora do intervalo, ela faz parte dos 5% das possíveis amostras aleatórias. Como essa probabilidade é muito pequena, consideramos que o lote inteiro que deu origem ao punhado de grãos testados não tem a mesma qualidade ideal necessária para a produção, ou seja, rejeitamos a igualdade entre a população testada e a população de referência.

Uma outra maneira de explicar o resultado seria indicar que a amostra de grãos testada apresenta uma qualidade tão diferente do ideal, que a única explicação estatística é que o lote inteiro provavelmente também apresenta um nível diferente de qualidade. É importante ressaltar que a escolha da quantidade de desvios padrões fica a critério do freguês. A utilização de 1,96 (aproximadamente dois) desvios padrões é a prática mais comum em artigos científicos. Na prática, o aumento da quantidade de desvios padrões aumenta o rigor do teste, pois se com dois desvios padrões nós

rejeitamos apenas 5% dos casos, quando aumentamos o número de desvios padrões para três, passamos a rejeitar apenas 1% dos casos.

As médias obtidas de amostras (\bar{x}) são estimativas de parâmetros populacionais (μ) que são desconhecidos; além disso, estão sujeitas a variação² em decorrência do efeito do acaso na seleção dos sujeitos. Portanto, inferir sobre a diferença entre médias populacionais com base em médias de duas amostras é uma situação especial.

¹ Student. The probable error of a mean. *Biometrika*, 1908; 6:1-25.

² Teorema Central do Limite ou Teorema do limite Central: $\bar{x} \cong N(\mu, \frac{\sigma}{\sqrt{n}})$

Quando duas amostras independentes são tomadas ao acaso e a variável tem distribuição normal, a comparação de suas médias pode ser realizada usando o teste t de Student.

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{EP(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)} \quad (2.1)$$

O numerador representa a diferença entre as médias dos dois grupos ($\bar{x}_1 - \bar{x}_2$), enquanto o denominador é o erro padrão da diferença entre as duas médias “EP($\bar{x}_1 - \bar{x}_2$)”.

Quando as variâncias são iguais, o erro padrão da diferença é calculado a partir da média ponderada das variâncias dos grupos, também chamada de variância ponderada (s_p^2):

$$s_p^2 = \frac{s_1^2 \cdot (n_1 - 1) + s_2^2 \cdot (n_2 - 1)}{n_1 + n_2 - 2} \quad (2.2)$$

Onde s_1^2 e n_1 representam a variância e número de casos do grupo 1 e s_2^2 e n_2 , a variância e número de casos do grupo 2. A seguir, calcula-se o erro padrão da diferença [EP($\bar{x}_1 - \bar{x}_2$)] usando a variância (s_p^2):

$$EP(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) = \sqrt{\frac{s_p^2}{n_1} + \frac{s_p^2}{n_2}} \quad (2.3)$$

Quando as variâncias são diferentes, o erro padrão da diferença é determinado diretamente, a partir das variâncias dos grupos:

$$EP(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) = \sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}} \quad (2.4)$$

O valor da estatística t calculada será comparado com o valor t crítico obtido na tabela de t de Student, considerando os graus de liberdade, o nível de significância (α) e o tipo de teste de hipótese (unilateral ou bilateral).

Calculando os graus de liberdade:

- a) Para variâncias iguais: $gl = n_1 + n_2 - 2$
- b) Para variâncias diferentes:

Calcula-se $a = \frac{s_1^2}{n_1}$ e $b = \frac{s_2^2}{n_2}$ e aplica-se na fórmula abaixo para se obter os graus de liberdade corrigidos.

$$gl \text{ corrigido} = \frac{(a+b)^2}{\frac{a^2}{n_1-1} + \frac{b^2}{n_2-1}} \quad (2.5)$$

5.5 CPK

Para Rotondaro (2002), o controle estatístico tem por objetivo conhecer a estabilidade do processo estudado, monitorando seus parâmetros ao longo do tempo. No estudo de capacidade do processo, a questão colocada é bem mais específica. Para um processo cujo comportamento seja conhecido, pode-se dizer que ele é capaz de produzir itens ou prestar o serviço segundo as especificações determinadas pelo cliente?

De acordo com Werkema (1995) é possível que mesmo um processo com variabilidade controlada e previsível produza itens defeituosos, devendo-se avaliar a capacidade do processo em atender às especificações estabelecidas. Capacidade é a

medida da variabilidade de um processo estável em relação às especificações de projeto. Esse conceito está associado à capacidade de um processo de produzir produtos cujos resultados atendam as especificações de projeto. Como definido intrinsecamente no conceito, não faz sentido avaliar a capacidade de processos fora do estado de controle estatístico. Assim a capacidade de um processo só deve ser avaliada se a variação do processo for devida apenas às causas comuns.

Para Rotondaro (2002) para estudar capacidade do processo é preciso conhecer as especificações. Especificações são parâmetros técnicos definidos pela Engenharia de processos ou de Produto. Geralmente, quando se trata de uma empresa de manufatura, boa parte das especificações é fornecida pelo pessoal de engenharia para as áreas de produção e alterada somente quando houver um novo projeto.

Produzir de acordo com essas especificações é o principal foco do estudo da capacidade do processo e também uma garantia da qualidade do processo e do produto de qualquer empresa. Os limites de especificação são as áreas em ambos os lados da linha central, ou média, de dados traçados em um gráfico de controle que atende aos requisitos do cliente para um produto ou serviço. Essa área pode ser maior ou menor que a área definida pelos limites de controle.

Para Montgomery (2004) três técnicas fundamentais são utilizadas na análise da capacidade do processo: histogramas ou gráficos de probabilidade, gráficos de controle e experimentos planejados. O foco deste trabalho é a análise da capacidade através da técnica de histogramas. Nesse sentido, Montgomery (1997) recomenda dispor de pelo menos 100 observações para que o histograma seja moderadamente estável, a fim de se obter uma estimativa confiável da capacidade do processo. A figura 1 mostra o exemplo da capacidade de um processo analisada por meio de histograma.

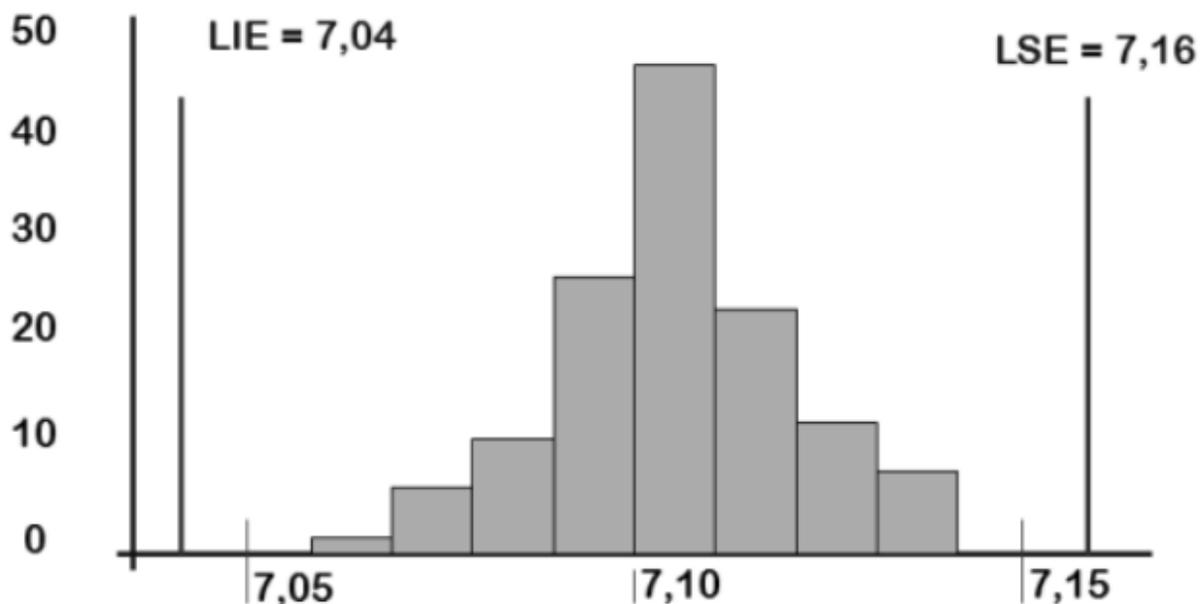


Gráfico 4 – Análise da Capacidade de um processo. Fonte: Werkema (1995).

O histograma, juntamente com a média amostral (\bar{X}) e o desvio padrão amostral (S) proporcionam informações sobre a capacidade do processo. Uma vantagem de usar o histograma para estimar a capacidade do processo é que ele dá uma impressão visual e imediata do desempenho do processo. Ele pode também mostrar imediatamente a razão do fraco desempenho do processo.

Os índices de capacidade processam as informações de forma que seja possível avaliar se um processo é capaz de gerar produtos que possam atender as especificações provenientes dos clientes externos e internos. Para utilizar os índices de capacidade é necessário que o processo esteja sob o controle estatístico e que a variável de interesse tenha distribuição próxima da normal. Conforme Montgomery (1997) e Deleryd (1999), quatro são os índices de capacidade para dados normalmente distribuídos. Estes índices são números adimensionais que permitem uma quantificação do desempenho de processos, sendo eles: C_p , C_{pk} , C_{om} e C_{pmk} . Para esta aplicação, o índice utilizado será o C_{pk} .

O índice C_p , chamado de índice de capacidade potencial do processo, considera que o processo está centrado no valor nominal da especificação. Caso a característica

de qualidade em estudo tenha distribuição bilateral, o índice C_p é definido pela Equação (1). LSE é o limite superior de especificação; LIE é o limite inferior de especificação e σ é o desvio-padrão do processo.

$$C_p = \frac{LSE-LIE}{6\sigma} \quad (3.1)$$

Este índice relaciona a variabilidade permitida ao processo (especificada no projeto) com a variabilidade natural do processo. Com isso tem-se que quanto maior for o valor de C_p , maior será a capacidade do processo em satisfazer às especificações, desde que a média esteja centrada no valor nominal. Uma regra prática, conforme Montgomery (2004) para analisar este índice é definir três intervalos de referência, mostrados na Tabela 1.

C_p	Itens não conformes (PPM)	Interpretação
$C_p < 1$	Acima de 2700	Processo incapaz
$1 \leq C_p \leq 1,33$	64 a 2700	Processo aceitável
$C_p \geq 1,33$	Abaixo de 64	Processo potencialmente capaz

Tabela 1 – Intervalo de referência para análise do índice C_p .

O índice C_p , não considera a localização do processo, estando embasado apenas na relação entre a amplitude do intervalo de especificação e da variabilidade natural do processo para o seu cálculo. Como consequência disto, para um determinado valor de C_p , pode-se ter qualquer percentual de itens fora das especificações. Este percentual vai depender apenas de onde está localizada a média do processo. Por isso, o índice C_p dá apenas uma ideia de quanto o processo é potencialmente capaz de produzir dentro do intervalo especificado no projeto.

Como na prática nem sempre o processo está centralizado no valor nominal da especificação então, o uso do índice Cp pode levar a conclusões erradas. Kane (1986) propôs o índice de desempenho Cpk, que leva em consideração a distância da média do processo em relação aos limites de especificação. Este índice é dado pela equação (3.1).

LSE é o limite superior de especificação; LIE é o limite inferior de especificação; μ é a média do processo e σ é o desvio-padrão do processo.

$$Cpk = \text{MIN} \left(\frac{LSE - \mu}{3\sigma}; \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \right) \quad (3.1)$$

Se o processo estiver centrado no valor nominal de especificação, $Cp=Cpk$. Então, caso Cp seja diferente de Cpk, sabe-se que o processo está descentrado, isto é, que a média não coincide com o valor nominal das especificações. As interpretações do índice Cpk pode ser feita pela regra do índice Cp, já que a análise de capacidade do processo é feita usando estes dois índices em conjunto. Há algumas situações em que existe apenas um limite de especificação. Nestes casos, os índices são calculados da seguinte forma: quando existe apenas o limite inferior de especificação, $Cpi = \mu - LIE / 3\sigma$ e quando existe somente o limite superior de especificação: $Cps = LSE - \mu / 3\sigma$. Nesta aplicação utilizaremos apenas o Cps, por que quanto menor o valor de fluor melhor para o processo.

5.6 Métodos de homogeneização

Todos os depósitos minerais são compostos de uma combinação de minério e rocha estéril com variabilidade de teores em sua composição, o que pode levar o ROM (Run of Mine) proveniente da lavra apresentar variações nas suas características ao longo do tempo. Dependendo do tipo de mineralização, existem diferentes escalas de variabilidade dos teores. Vários métodos de lavra podem ser utilizados para controlar essa variabilidade na tentativa de reduzir a diluição que ocorre ao se tentar separar seletivamente o estéril do minério e manter os teores que alimentam a planta de beneficiamento tão constantes quanto possível.

Obviamente, para cada tipo de depósito mineral existe um método de lavra ideal capaz de produzir um produto com o teor médio requerido para a planta de

beneficiamento ou para o produto final, a um custo razoável e uma taxa de produção adequada (Parker, 1979). No entanto, existem alguns casos em que um método de lavra apropriado não é suficiente para assegurar que o ROM tenha as características desejadas.

A heterogeneidade do material também pode ser afetada pelos métodos de carregamento e transporte e os tipos de procedimentos empregados na manipulação e preparação do minério. Segundo Schofield (1980), as etapas de carregamento, transporte, britagem, moagem, armazenamento e manipulação contribuem de alguma forma na variabilidade do material, já que introduzem certa quantidade de reestruturação da distribuição espacial da mineralização natural.

Comum a todos os métodos de lavra é a noção do Selective Mining Unit (SMU), ou seja, menor unidade seletiva de lavra prática que pode ser extraído separadamente o minério ou estéril. Considerando um SMU de pequeno volume, é natural que existam alguns com altos teores e outros com baixos teores. Essas diferenças nos teores dos SMUs em torno de um valor médio podem ser medida pela sua variância. À medida que o tamanho do SMU aumenta, ele tenderá a incluir uma mistura de partes com teores elevados e baixos, reduzindo a variância dos teores dos diversos SMUs com volume maior (convergindo para a média da população).

5.6.1 Homogeneidade e heterogeneidade

Para entender adequadamente o funcionamento de sistemas homogeneizadores, é necessária uma pequena introdução sobre a noção fundamental de heterogeneidade. A dualidade entre a homogeneidade e heterogeneidade não é simples, e não pode ser comparado com o tipo simples da dualidade que costumamos observar entre preto e branco (Pitard, 1993). De uma maneira simplista, podemos descrever o conceito de heterogeneidade como uma função escalar, onde a homogeneidade equivale ao zero. Portanto, a homogeneidade é um caso limite.

Segundo Pitard (1993), a homogeneidade também pode ser encarada como um conceito relativo. Por exemplo, uma pilha de areia fina, a uma certa distância, pode parecer homogênea; entretanto, a medida em que a escala de observação (proximidade) da pilha aumentar, a ponto de ser observada com uma lupa, pode-se notar que a

homogeneidade observada foi uma ilusão, pois os grãos presentes possuem características diferentes. Quando cada grão for examinado, serão verificados diferentes tamanhos, cores, composições, formatos, densidades, durezas, porosidades, etc. Ou seja, a homogeneização perfeita é um caso limite raramente encontrado.

Podemos afirmar que uma grande quantidade de material tem uma distribuição homogênea, quando todos os grupos de um determinado tamanho, que podem ser selecionadas dentro do domínio do lote, têm uma composição média rigorosamente idêntica, ou seja, cada amostra do lote representa o todo, não sendo necessária aleatoriedade na escolha.

Como citado anteriormente, todos os materiais minerais presentes na indústria mineira são essencialmente heterogêneos. Dessa maneira, a prevenção de perdas de minério é o problema mais grave presente em plantas de beneficiamento como consequência de heterogeneidade. Para manter o processo em adequada produtividade em quantidade e qualidade, as equipes que lidam com esse problema possuem duas opções:

- a aceitação da heterogeneidade, dependendo do tipo de mineralização;
- a utilização de algum processo de homogeneização, como a utilização de pilhas de homogeneização.

Os processos de homogeneização são usados na tentativa de reduzir a heterogeneidade dos materiais, mesmo sabendo que nunca se conseguirá gerar um material completamente homogêneo.

A heterogeneidade é uma propriedade estrutural primária de toda a matéria, ou seja, todos os sólidos particulados, secos, molhados, em suspensão na água ou no ar são heterogêneos. Segundo Gy (1998), quando as porções formadoras de um material não forem estritamente idênticas, esse material é tido como heterogêneo.

A heterogeneidade pode ser analisada sob dois aspectos diferentes, sendo eles referentes à constituição e a distribuição do material. A heterogeneidade de constituição refere-se às características intrínsecas do material, ou seja, consiste nas diferenças que se verificam entre as partículas ou fragmentos constituintes de um lote L, 52 quando é efetuada a comparação de uma determinada propriedade. A mistura ou homogeneização das partículas constituintes do lote não apresenta nenhuma influência sobre a

heterogeneidade de constituição. Esta heterogeneidade é responsável pela ocorrência do Erro Fundamental da amostragem. A blendagem de materiais de diferentes características pode afetar a heterogeneidade de constituição.

A heterogeneidade de distribuição, que depende heterogeneidade de constituição, mas também, como o próprio nome sugere, sobre a distribuição espacial das unidades dentro do volume ocupado pelo lote. Esse tipo de heterogeneidade pode ser observado quando olhamos para os vários grupos de unidades vizinhas, tais como fragmentos dentro do domínio de um determinado lote de material. Logo que o material consolidado é extraído e cominuído, estes minerais se tornam parcial ou totalmente livres, dependendo do seu grau de liberação. Por conseguinte, estes minerais podem reconfigurar sua distribuição na busca de uma configuração mais estável, quando submetido às forças gravitacionais ou outras forças que se destinam a promover a segregação ou de homogeneização no processamento mineral.

Para ilustrar os diferentes tipos de heterogeneidade, considere a Figura 11-1, o qual representa um lote de material a ser analisado. Inicialmente, havia dois lotes de material, um com 18 esferas na cor azul e o outro com 18 esferas na cor vermelha, homogêneos em sua constituição e distribuição. Quando os lotes foram blendados, foi obtido a um novo lote de material heterogêneo (em constituição e distribuição) representado na Figura 11-1(a). Ao círculo azul será atribuído o valor 1 e ao círculo vermelho será atribuído o valor 2, gerando um teor médio do lote de 1,5. Ao coletar 3 amostras, contendo 4 esferas cada, foi obtido o teor médio de 1,33. Após sofrer um processo de segregação (Figura 11-1(b)), o material foi novamente amostrado e o novo teor médio foi de 1,33. Após passar por um processo de homogeneização, o material foi novamente amostrado (Figura 11-1(c)) e o teor médio obtido foi de 1.5

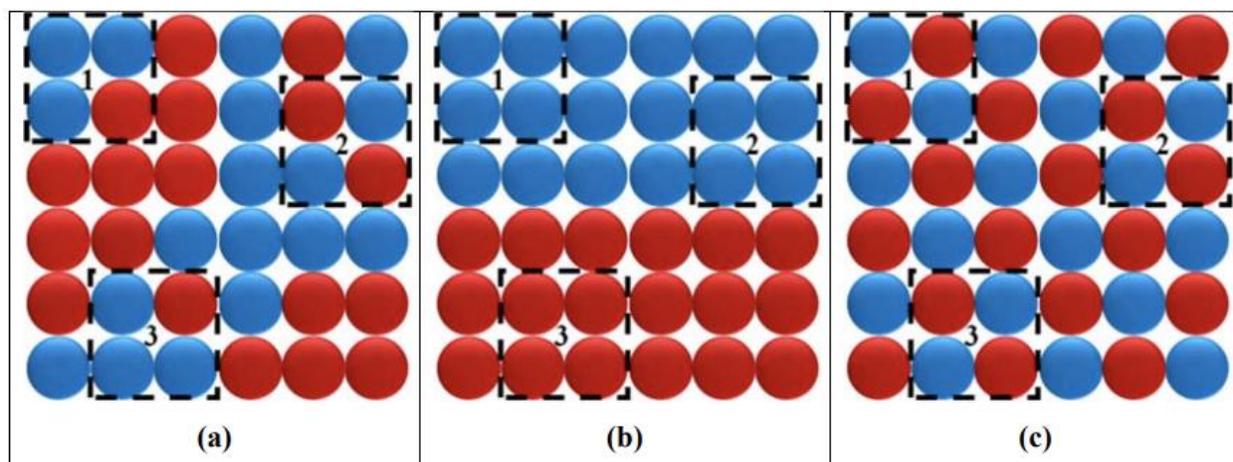


Figura 11: Exemplos de formas de heterogeneidade presentes em lotes (a) não homogeneizados, (b) segregados e (c) homogeneizados

Esse exemplo é muito semelhante ao que acontece na lavra. O ROM pode sofrer blendagem de materiais provenientes de diferentes frentes, com diferentes características. Entretanto, se o mesmo não passar por um processo de homogeneização, pode ocorrer problemas na alimentação da planta de beneficiamento com flutuações nos teores médios da alimentação.

5.6.2 Métodos de armazenagem de minério

Os métodos de armazenagem são apresentados por FLSMIDTH (2008), que começa pelas pilhas longitudinais, onde as mais comuns são chevron, windrow e cone shell. Localmente as empresas criam métodos próprios de maior ou menor efetividade, como os “multichevron”, “conevron”, “multicone”, entre outros.

Nem todos os métodos objetivam a homogeneização. Dentre os métodos de empilhamento que se aplicam a pilhas cujo propósito principal seja a mera estocagem, pode-se destacar: o método Cone Shell (Fischer, 1981).

Basicamente esses métodos consistem em um empilhamento em grande número de camadas em cima uns dos outros sentido longitudinal da pilha, representados na Figura 12:

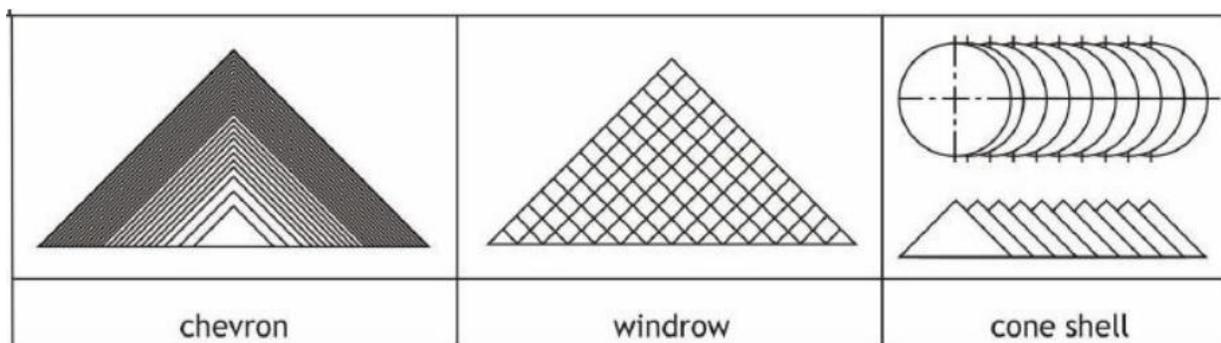


Figura 12: Principais métodos de empilhar (adaptado de CHAVES E FERREIRA, 2006).

5.6.2.1 Chevron

No método chevron, mostrado na figura 13 e 14, o material é depositado pela empilhadeira em movimento da esquerda para a direita, sobre a linha central da pilha. O método chevron de empilhamento causa segregação do material fino com finas partículas na parte central da pilha e partículas grossas na superfície e no fundo da pilha. Para garantir a boa mistura da pilha chevron deve, -se portanto, a mesma ser recuperada a partir da face, trabalhando toda a seção transversal (FLSMIDTH, 2008).

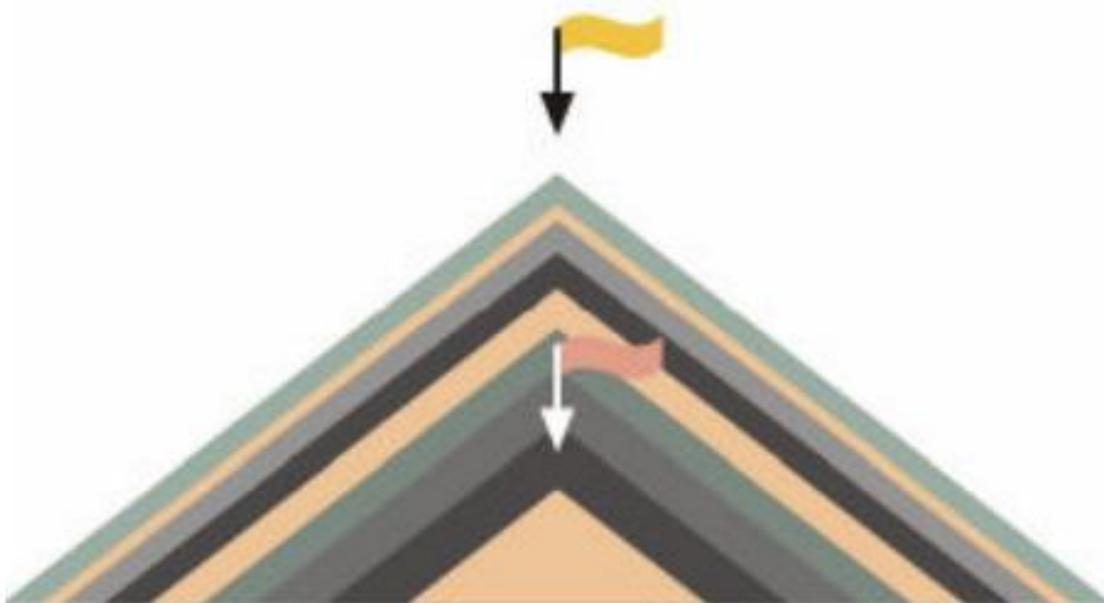


Figura 13: Método chevron (adaptado de FLSMIDTH, 2008).

Segundo Chaves e Ferreira (1996), é método mais comumente empregado, devido às seguintes vantagens:

- a) o stacker pode ter torre fixa, e sua lança, menor comprimento, resultando numa empilhadeira de peso relativamente menor, com um custo total de instalação mais baixo;
- b) a automação dos movimentos da máquina de empilhamento é mais simples que nos demais métodos. Basta uma chave de reversão em cada extremidade da pilha;
- c) possibilita a adição de materiais corretivos em qualquer instante (até nas últimas camadas empilhadas, de forma a manter o produto sempre dentro das especificações desejadas). Ou seja, a correção da qualidade do lote é mais fácil que nos outros métodos. Se a camada corretiva for a última camada (superior), o material corretivo espalhar-se-á sobre toda a secção da pilha;
- d) a retomada dos cones extremos é mais simples do que nos demais métodos. Em princípio, é o método básico de empilhamento, por ser satisfatório em termos de homogeneização e o mais barato.

A sua desvantagem é a segregação granulométrica na secção transversal da pilha, eventualmente não controlável, dependendo do tipo de equipamento utilizado na retomada da pilha. Se a segregação for, por alguma razão, um aspecto crítico para o processo posterior, e o método de retomada apresentar variações inaceitáveis, então outro método de empilhamento deve ser adotado.

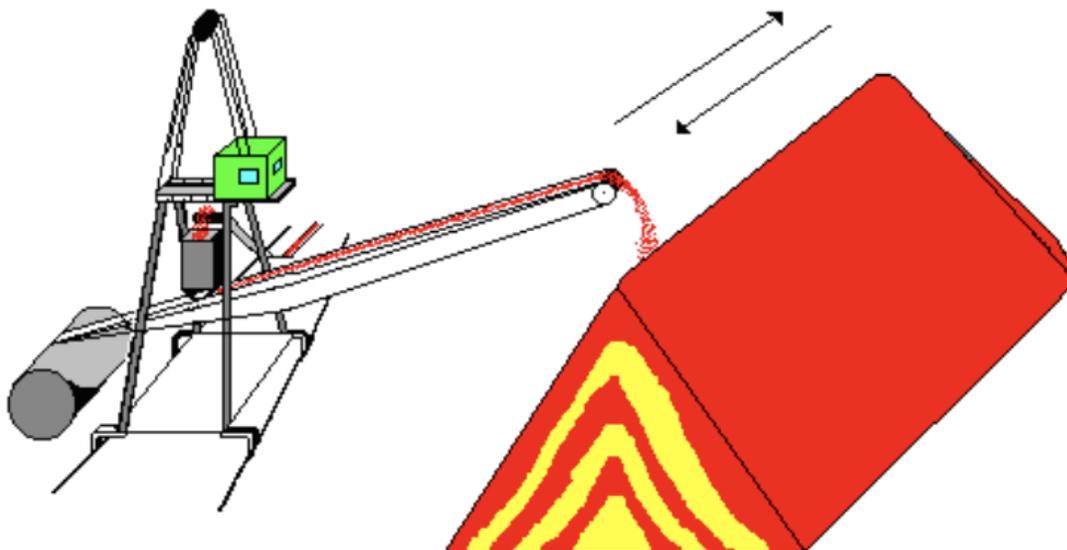


Figura 14 – Empilhamento pelo método Chevrom.

5.6.2.2 Windrow

Segundo Flsmidth (2008), o método windrow, (figura 15) consiste no empilhamento de cordões elementares sucessivos ao lado e sobre os anteriormente construídos, na direção longitudinal da pilha. O método windrow evita segregação e garante ainda mais distribuição de partículas finas e grossas em toda a pilha, pois fica a segregação distribuída dentro dos cordões.



Figura 15: Método windrow (adaptado de FLSMIDTH, 2008).

O método windrow é preferido em casos em que a recuperadora é somente operada em uma parte da seção transversal por vez ou em casos onde a segregação faria uma abertura inaceitável na base (FLSMIDTH, 2008).

Chaves e Ferreira (1996) dizem que suas outras grandes vantagens são a melhor homogeneização e maior densidade. Este último aspecto é tão nítido, que a Ferteco (hoje Vale) costumava empilhar seus minérios pelo método chevron, passando para o método windrow, na estação das chuvas, quando a estabilidade das pilhas ficava afetada.

As desvantagens citadas por Chaves e Ferreira (1996) são:

a) se houver necessidade de adição de material corretivo, este ficará localizado somente em partes específicas da seção transversal. Se essa correção for efetuada no final do empilhamento, o corretivo estará presente somente no centro da seção transversal da pilha. Dependendo do método de retomada, a correção pode se tornar ineficiente, ou pior ainda, agravar a variabilidade cíclica da qualidade do material retomado;

b) é necessária uma empilhadeira com lança giratória, ou telescópica, e dotada também de movimento de elevação vertical. A lança precisa ser mais longa, para atingir a extremidade oposta da pilha, portanto, um equipamento mais caro que o utilizável no método chevron.

c) caso a área disponível para a instalação de homogeneização seja limitada, ocorre perda no volume de estocagem, como pode se visto na Figura 16.

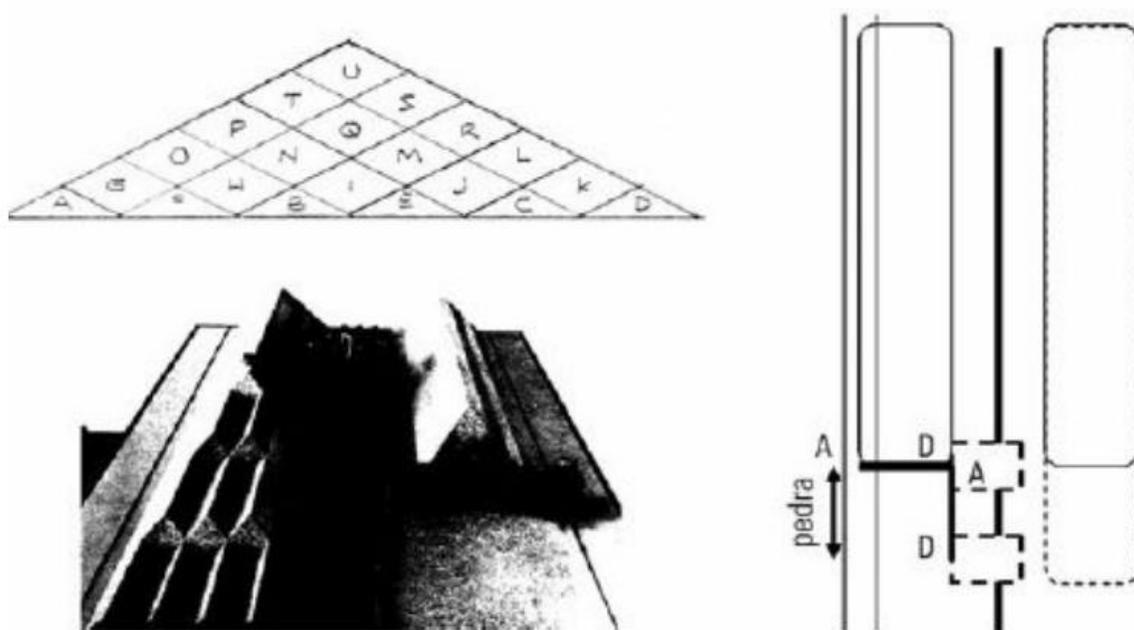


Figura 16: Método windrow e a perda no volume de estocagem (adaptado de CHAVES E FERREIRA, 2006).

d) a utilização dos cones extremos é bem mais difícil (se não impossível), sendo necessário recirculá-los.

e) a automação dos movimentos do stacker é bem mais complexa, requerendo computador ou controlador programável, capaz de acionar conforme necessário a reversão do movimento, a elevação da lança e a sua movimentação lateral ao fim de cada passada.

f) se acontecer a necessidade de retomar uma pilha incompleta podem ocorrer dificuldades operacionais Figura 17.

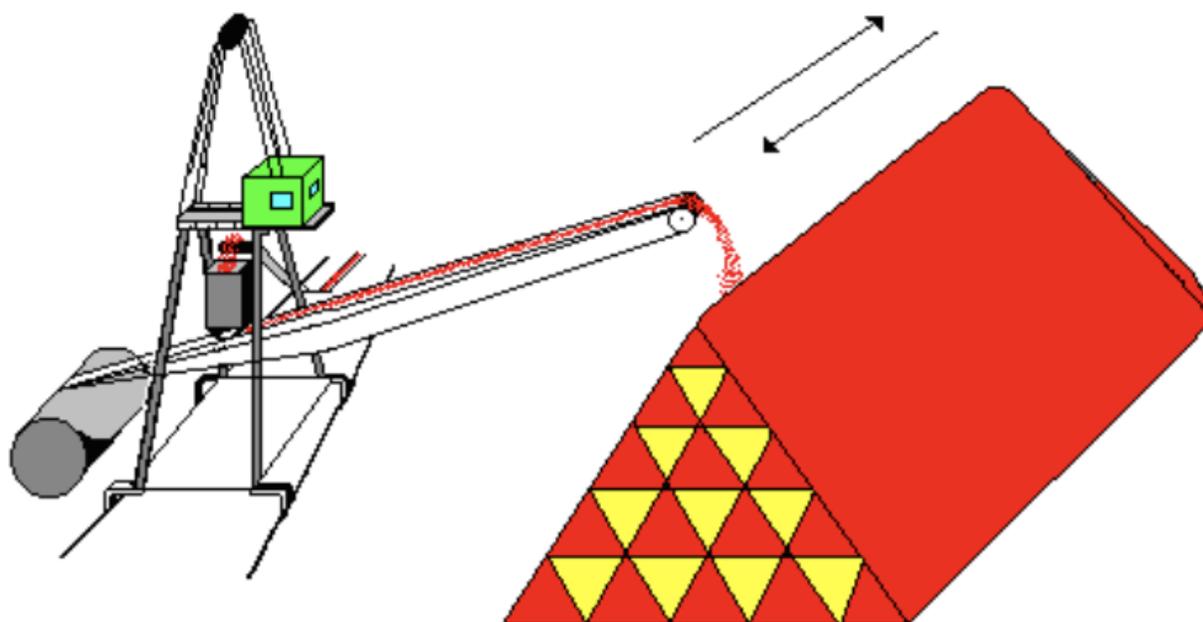


Figura 17 – Empilhamento pelo método windrow

5.6.2.3 Cone shell

Segundo Flsmidth (2008) o método cone shell é geralmente usado em casos em que a homogeneização não é necessária. A pilha é formada pelo depósito material em um único cone de posição fixa. Quando esta pilha cônica está cheia, o depósito de material se move para uma nova posição e um novo cone é formado contra a primeira pilha. Este processo continua na direção longitudinal da pilha até o estoque ser completado, conforme Figuras 18 e 19.

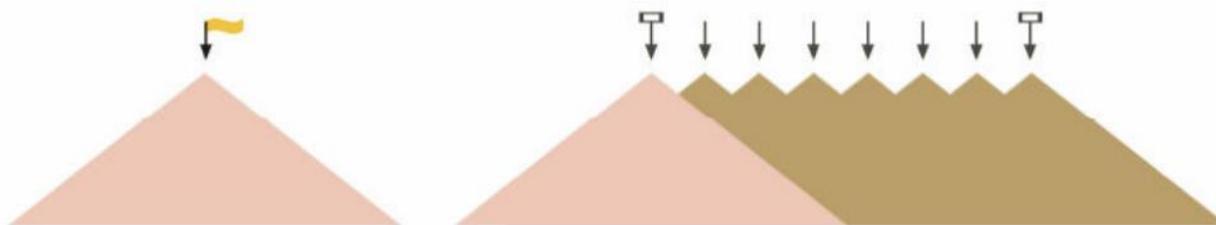


Figura 18: Método cone shell (adaptado de FLSMIDTH, 2008).

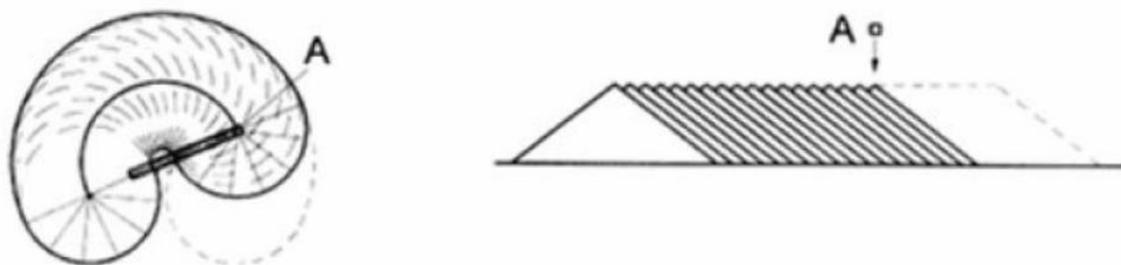


Figura 19: Pilha cone shell em um pátio circular (adaptado de CHAVES E FERREIRA, 2006).

Em compensação, o stacker fica parado a maior parte do tempo e a degradação granulométrica só é sensível no cone inicial. O equipamento é o mais simples possível, com a lança completamente fixa, sem movimento nem sequer vertical (FLSMIDTH 2008).

Chaves e Ferreira (2006) alegam que este procedimento diminui o desgaste dos equipamentos, trilhos e cabos elétricos. A degradação granulométrica, analogamente ao que ocorre na strata, é minorada Figura 20. Quando a retomada é feita por baixo e existem vários alimentadores, acionando-se vários deles ao mesmo tempo, ocorre a mistura do material retomado e a heterogeneidade diminui.

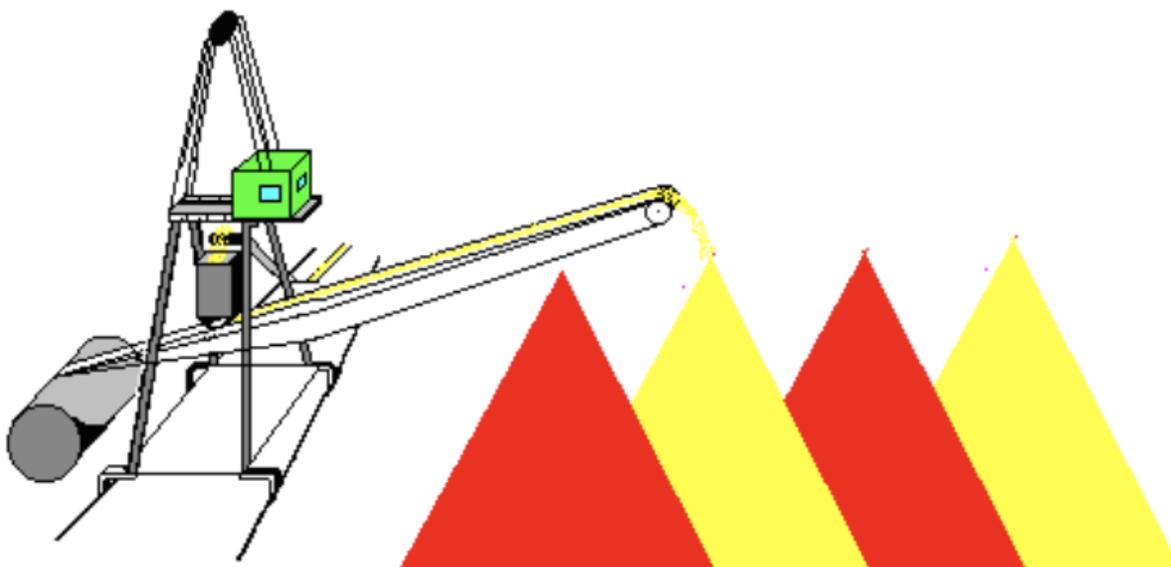


Figura 20 – Empilhamento pelo método Cone Shell.

Neste método não se busca homogeneização embora se consiga alguma à custa de complicações no manuseio e de uma seqüencia caprichosa de construção dos cones.

A grande vantagem deste método é que a empilhadeira fica parada a maior parte do tempo e a degradação granulométrica só é sensível no cone inicial. Sendo assim este método diminui o desgaste dos equipamentos, trilhos e cabos elétricos.

5.6.3 Comparação entre métodos de empilhamento

Conforme o que foi relatado sobre os principais métodos de estocagem, segue comparação na Tabela 2:

	CHEVRON	WINDROW	CONE SHELL
Formação da pilha	Depositado em movimento de vai e vem sobre a linha central da pilha	Empilhamento de cordões elementares sucessivos ao lado e sobre os anteriormente construídos na direção longitudinal da pilha.	A pilha é formada pelo depósito de material em um único cone de posição fixa. Quando esta pilha cônica está cheia, um novo cone é formado contra a primeira pilha. O processo continua na direção longitudinal.
Quando são utilizados	É o mais comumente utilizado	(Informação não disponibilizada na literatura)	Geralmente usado em casos em que a homogeneização não é necessária
Custo de instalação	Mais baixo	Mais caro que no Chevron	(Informação não disponibilizada na literatura)
O método causa segregação do material?	Sim. Do material fino com as finas partículas na parte central da pilha e partículas grossas na superfície e no fundo da pilha	Evita. E garante a distribuição de partículas finas e grossas em toda a pilha, pois a segregação fica dentro dos cordões.	Sensível ao cone inicial
Recuperação	A partir da face da pilha trabalhando toda a seção transversal para garantir a boa mistura.	Preferido em casos em que a recuperadora é operada em uma parte da seção transversal por vez ou em casos onde a segregação faria uma abertura inaceitável na base.	É feita por baixo e existem vários alimentadores acionando-se vários deles ao mesmo tempo ocorre a mistura do material retomado e a heterogeneidade diminui.
Equipamento - Stacker	Pode ter torre fixa	Movimentação de elevação vertical	O equipamento é o mais simples possível. O stacker fica parado a maior parte do tempo.
Equipamento - Lança	Pode ter menor comprimento	Mais longa - Giratória ou Telescópica	Completamente fixa, sem movimento nem sequer vertical.
Automação do equipamento	Mais simples que outros métodos. Basta chave de reversão em cada extremidade da pilha.	Complexa e requer controlador programável capaz de acionar a reversão do movimento, elevação da lança e sua movimentação lateral ao fim de cada passada.	Esse procedimento do Stacker e lança diminui o desgaste dos equipamentos e cabos elétricos.
Correção da qualidade dos lotes adição de material corretivo	Possibilidade em qualquer instante até nas últimas camadas empilhadas, de forma a manter o produto sempre dentro das especificações desejadas. (Correção da qualidade dos lotes mais fácil que nos outros métodos)	Dificuldade para adição. Caso de necessidade ficará localizado somente em partes específicas da seção transversal. Se a correção for feita no final do empilhamento, o corretivo estará somente no centro da seção transversal da pilha.	(Informação não disponibilizada na literatura)
Homogeneização	Satisfatório	Melhor homogeneização e densidade.	(Informação não disponibilizada na literatura)

Tabela 2 – Comparação entre os principais métodos de estocagem.

5.6.4 Prática operacional de empilhamento de material

Segundo Schofield (1980), o empilhamento de materiais granéis minerais pode ser realizado através de diversos equipamentos, a seguir serão descritos os equipamentos existentes na empresa alvo deste estudo de caso:

- Empilhadeira com lança fixa e única: é a configuração mais comum quando o empilhamento é feito através do sistema chevron e o material não causa o levantamento de pó.
- Empilhadeira com lança única, com torre fixa, movimento apenas no plano vertical. Basicamente o mesmo campo de atuação do equipamento descrito acima, só que aplicável para materiais onde o levantamento de pó ou a degradação granulométrica, são críticas.
- Empilhadeira com lança única e torre giratória: É mais versátil do que os equipamentos descritos acima, no entanto, possui maior custo de aquisição. Geralmente são utilizados no método Windrow de empilhamento.

Além das máquinas apoiadas sobre trilhos, existem máquinas apoiadas sobre esteiras. Para o manuseio em pátios, a maior parte delas apoia-se sobre trilhos, a não ser nas situações em que a pilha seja extremamente larga ou que a adoção de máquinas sobre trilhos não se justifique. Essas máquinas, entretanto são mais lentas e pesadas e a operação torna-se mais complexa e não serão tratadas neste trabalho uma vez que na empresa alvo deste estudo de caso todas as máquinas do pátio são apoiadas sobre trilhos.

5.6.5 Prática operacional da retomada de material

Segundo Worsley (2009), podem-se dividir os equipamentos de retomada em duas categorias principais: Scrapers e Bucket Wheel. Ambos têm vantagens e desvantagens que os fazem preferíveis uns sobre os outros dependendo do tipo de aplicação necessária.

Nesta etapa do processo também são disponíveis máquinas apoiadas sobre trilhos e máquinas apoiadas sobre esteiras. Comparando-se os retomadores montados sobre trilhos e aqueles montados sobre esteiras, pesando as vantagens e desvantagens de cada um, a tendência é adotar máquinas apoiadas sobre trilhos, pois apesar do seu maior custo de aquisição, exibem maior facilidade de operação, menor desgaste, e possibilidade de automação. (Worsley, 2009).

A maioria das instalações onde há necessidade de grandes reduções na heterogeneidade do material são utilizadas máquinas de retomada que trabalham na face transversal da pilha (Worsley, 2009). Na empresa alvo deste estudo de caso são utilizados apenas equipamentos do tipo retomador de lança com roda de caçambas apoiado sobre trilhos, que será descrito a seguir.

- Retomador de lança com roda de caçambas: É um equipamento composto por uma lança com um disco que possui um sistema giratório em sua extremidade, sendo que este disco possui vários ancinhos, para que com seu movimento, consiga desagregar o material jogando-o para o sistema de correia existente na lança e transportando o material desagregado para o navio, conforme mostra a figura 21.



Figura 21 – Retomador de lança com roda de caçambas (Flender, 2009)

É possível variar a prática da retomada, escavando toda a seção transversal, escavando blocos discretos da pilha, ou então, percorrendo-a em bancadas. Sendo que, cada uma destas práticas tem diferentes produtividades que impactam diretamente na taxa de carregamento.

Além de falar dos métodos de empilhamento e dos equipamentos de retomada do material das pilhas é de grande importância a análise dos métodos de retomada de material. Um dos métodos de retomada é a retomada por fatias, onde o stacker reclaimer retira uma fatia da extremidade superior da pilha, em seguida o stacker reclaimer continua o processo de retomada de material avançando o comprimento equivalente a pilha. Ao terminar a retomada desta fatia, dá-se início a retomada de outra fatia, procedendo assim até zerar a pilha. Existem dois outros procedimentos, como mostra a Figura 22.

O outro tipo de retomada é a retomada em bancadas. É um método fácil de ser efetuado operacionalmente falando, pois as bancadas são retiradas da pilha e a medida

da bancada é compatível com o diâmetro da roda de caçambas. Então a lança da retomadora é levantada e a roda de caçambas vai retomando apenas a parte superior da pilha, começando numa extremidade e percorrendo-a até a outra. Sendo assim a quantidade a ser retomada aumenta do topo da pilha para a base, onde pelo formato da pilha, nota-se que as quantidades retomadas em cada bancada diferem.

Na retomada em blocos, a lança da retomadora é levantada e a roda de caçambas vai retomando apenas a parte superior da pilha, até o limite do bloco, conforme estabelecido no programa de retomada. Também nesse procedimento, os blocos são tomados com a mesma altura compatível com o diâmetro da roda de caçambas. Terminado o primeiro bloco, a retomadora retrocede e começa a retomar o segundo bloco, e assim sucessivamente (CHAVES, 2012).



Figura 22: Métodos de retomada de material. Fonte: CHAVES (2012).

Ainda sobre os métodos de retomada, Chaves (2012) cita como deve ser feita a retomada de material. A extremidade esquerda da Figura 22 mostra a seção que é retomada por fatias. Estatisticamente, cada seção é igual às demais. Nas Figuras centrais é mostrada a sequencia que é retomada por bancadas: a qualidade de cada bancada é evidenciada pelas diferenças de tonalidades. Verifica-se que cada uma das quatro bancadas terá uma composição diferente. [...] Veja pela Figura 18 na retomada por bancadas, a bancada superior será retomada do começo ao fim da pilha. Na retomada por blocos, será retomado o bloco 1, depois os blocos 2, 3 e 4 [...]. Em sequencia serão retomados os blocos 5, 6, 7 e 8. Suas composições são, respectivamente, idênticas aos blocos 1, 2, 3 e 4. Isso significa que, numa certa extensão, haverá mistura dessas composições no produto da retomada, ou seja, a homogeneização será menos afetada do que na retomada por bancadas.

6 METODOLOGIA – Aplicação da carta de controle e teste t para otimização de reserva.

As seções anteriores deste trabalho destinaram-se a pesquisa bibliográfica para a construção do conhecimento teórico que permitiu o desenvolvimento de um produto e validação de seu processo produtivo. A aplicação da carta de controle de \bar{x} foi utilizada para conhecimento do comportamento dos níveis de flúor de cada carvão disponível ao longo do processo produtivo, permitindo identificar os tipos de carvões de maior potencial para se tornarem o novo produto de baixo flúor destinado ao mercado chinês.

Todo o processo produtivo foi amostrado a cada 2 horas, essas amostras são trabalhadas e analisadas no laboratório próprio, porém devido a importância do processo de desenvolvimento de um novo produto, decidiu-se enviar amostras para os mais renomados laboratórios do ramo, localizados na África do Sul, Austrália e Alemanha.

O processo produtivo foi modificado visando extrair o maior potencial dos intervalos produtivos de menor nível de flúor, passando de processo contínuo geralmente com formação de pilhas de 40.000 a 60.000 toneladas, para um processo fragmentado de formação de pilhas de no máximo 15.000 tons. Os carregamentos dos navios também foram alterados, fazendo-se necessário o bloqueio de duas áreas no porto destinadas ao novo produto, portanto após a pilha ser validada, inicia-se o novo processo de homogeneização, onde duas novas pilhas serão formadas no porto. Cada composição de trem leva aproximadamente 7.500 tons, fazendo se necessário duas composições para levar cada pilha validada. No porto cada composição era destinada para a pilha de flúor correspondente, que durante o carregamento do navio são retomadas de forma simultânea, aumentando assim a homogeneização de todo o processo conforme fluxos baixo:

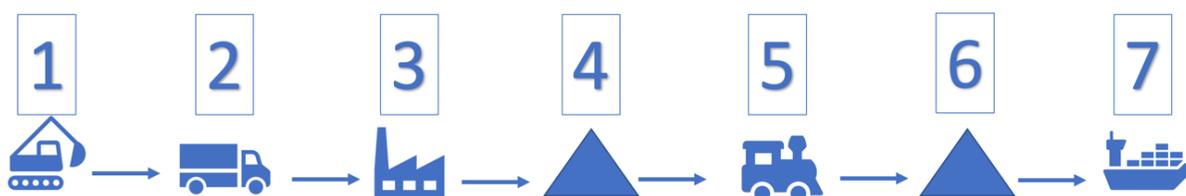


Figura 23 – Fluxo padrão do processo produtivo de carvão em Moatize.

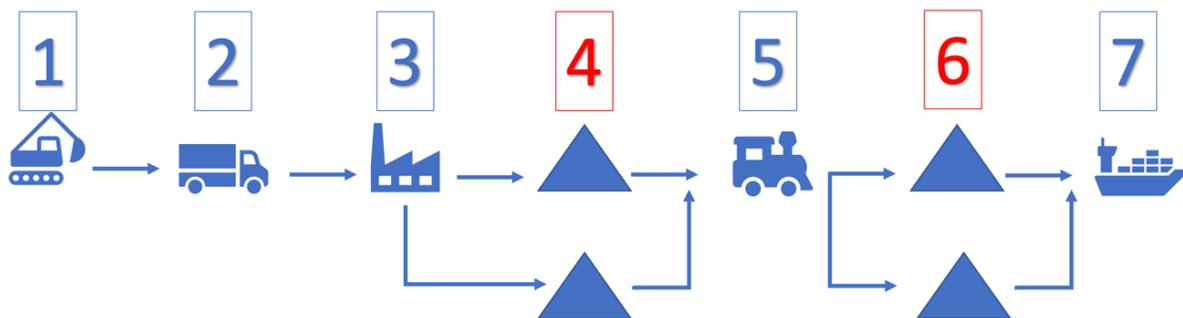


Figura 24 – Fluxo proposto do processo produtivo de carvão em Moatize.

Etapas do processo:

- | | |
|--------------------------------|---------------------------------|
| ✕ 1 – Lavra / Carregamento | ✕ 5 – Transporte (Ferrovia) |
| ✕ 2 – Transporte (Mina) | ✕ 6 – Empilhamento |
| ✕ 3 – Britagem / Processamento | ✕ 7 – Carregamento / Transporte |
| ✕ 4 – Empilhamento | (Marítimo) |

7 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Inicialmente selecionou-se 4 tipos de carvões para compor o novo produto, carvão de baixo flúor destinado ao mercado chinês; BN2B como carvão principal, TC2B dosado cuidadosamente, pois apresenta como efeito colateral, redução do poder calorífico do carvão, BNS4 e CPS4 buscando otimizar a reserva de BN2B.

Devido a redução do tamanho das pilhas produzidas, obtivemos resultados significativos nos controles de produção, como observado nas figuras abaixo:

A figura 25 apresenta o carvão BNS4 após a redução do tamanho das pilhas produzidas, porém pode-se observar que não tivemos melhoras significativas neste carvão de origem da secção 4.

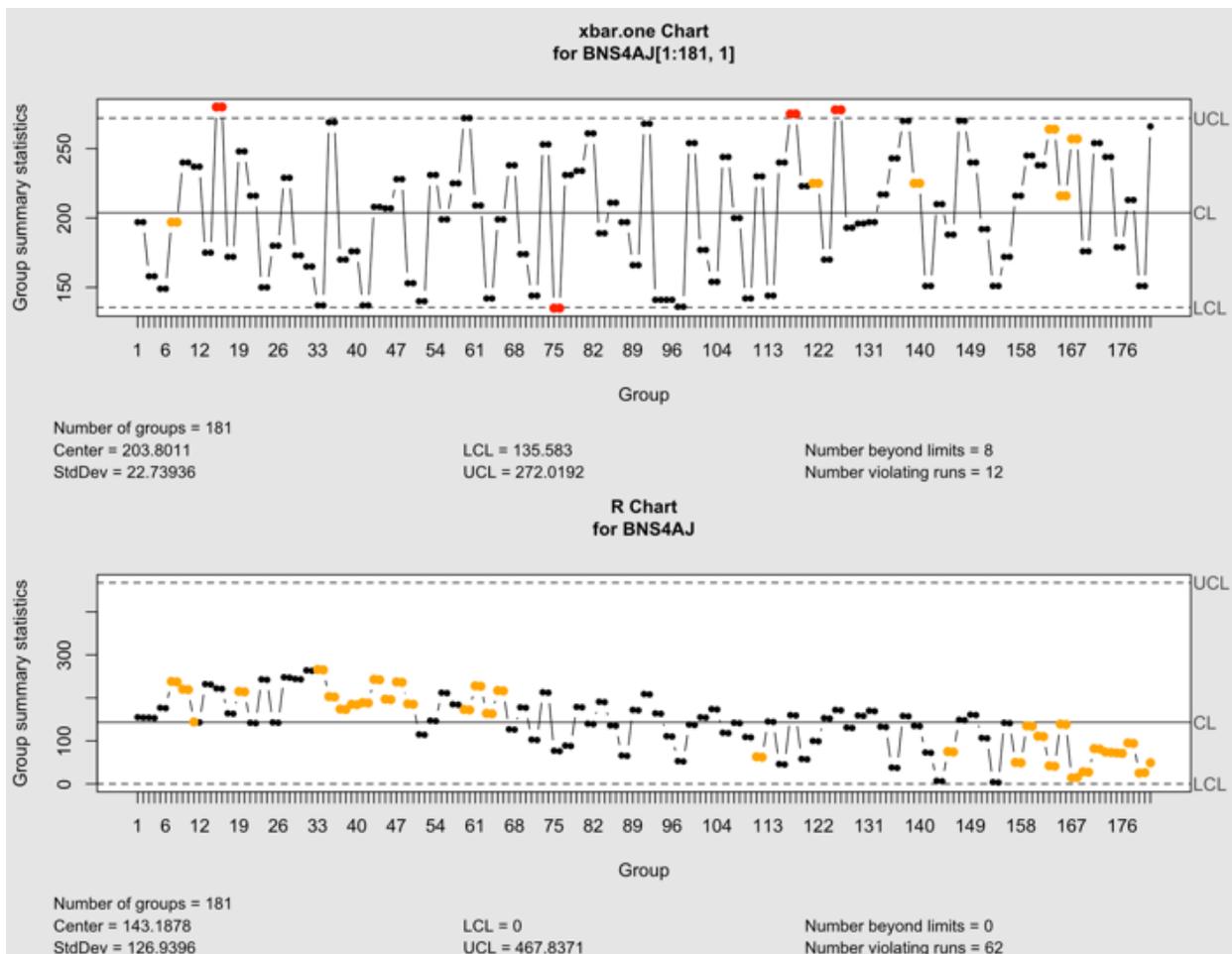


Figura 25 – Nova carta de controle carvão BNS4 - Secção 4

A figura 26 apresenta o comportamento do carvão BN2B, após reduzimos o tamanho da pilha produzida.

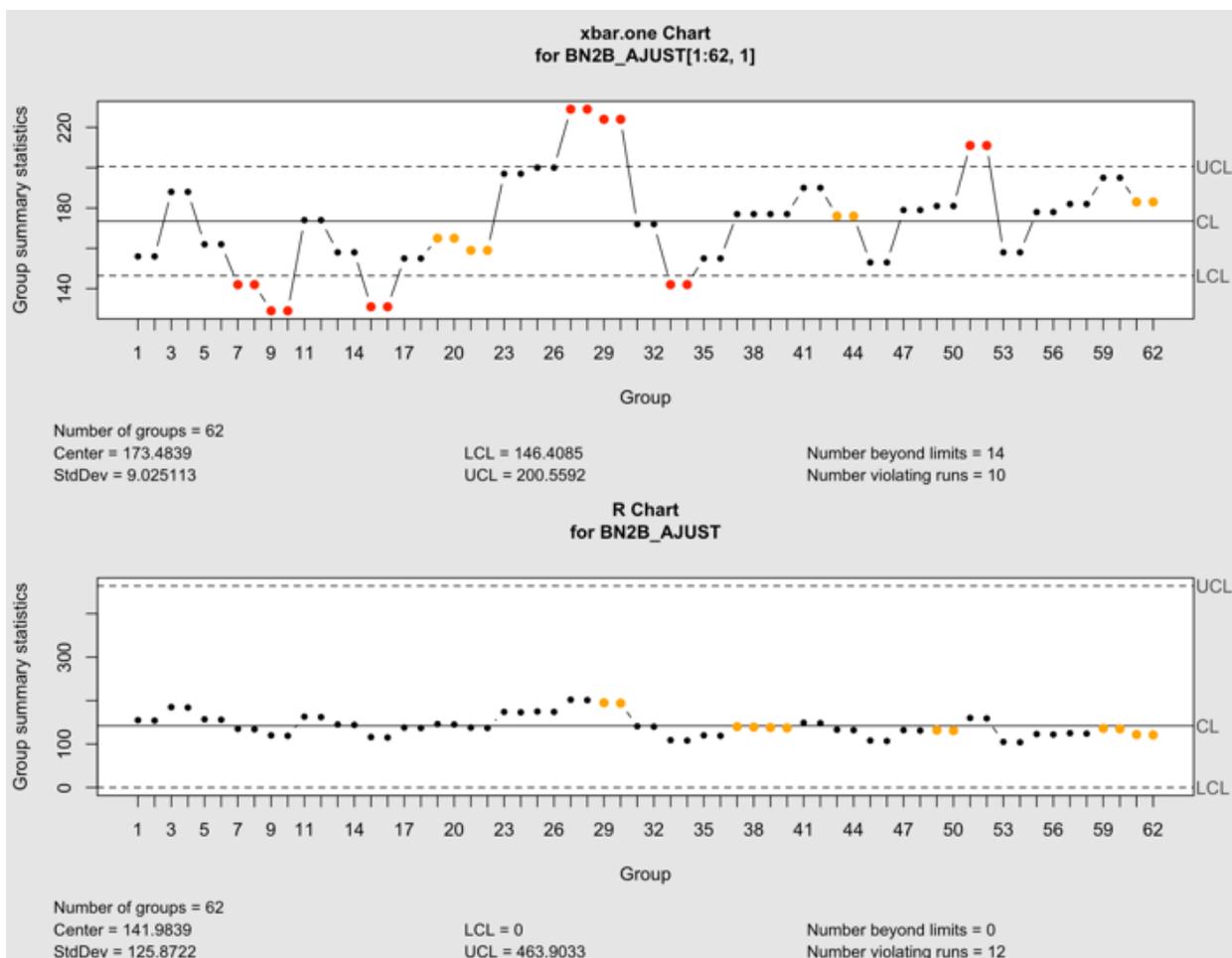


Figura 26 – Nova carta de controle carvão BN2B - Secção 2B

A figura 27 apresenta o comportamento do carvão CPS4, saindo de 210 ppm conforme figura 6, para 178 ppm, consolidado assim sua participação na formação do novo produto.

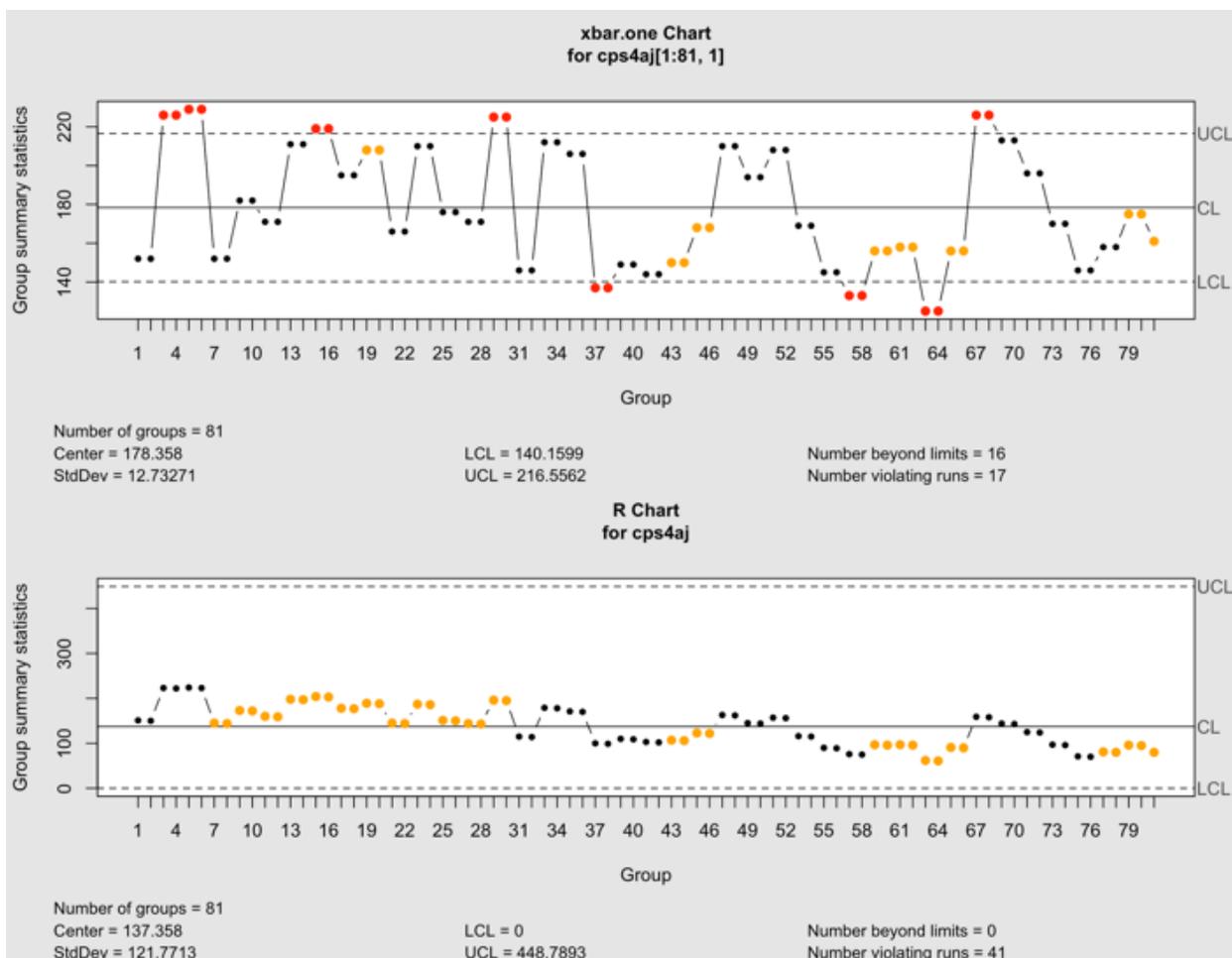


Figura 27 – Nova carta de controle carvão CPS4 - Seção 4

A figura 28 demonstra o comportamento do carvão TC2B, que por sua vez também apresentou uma redução significativa, saindo de 170ppm para 160ppm.

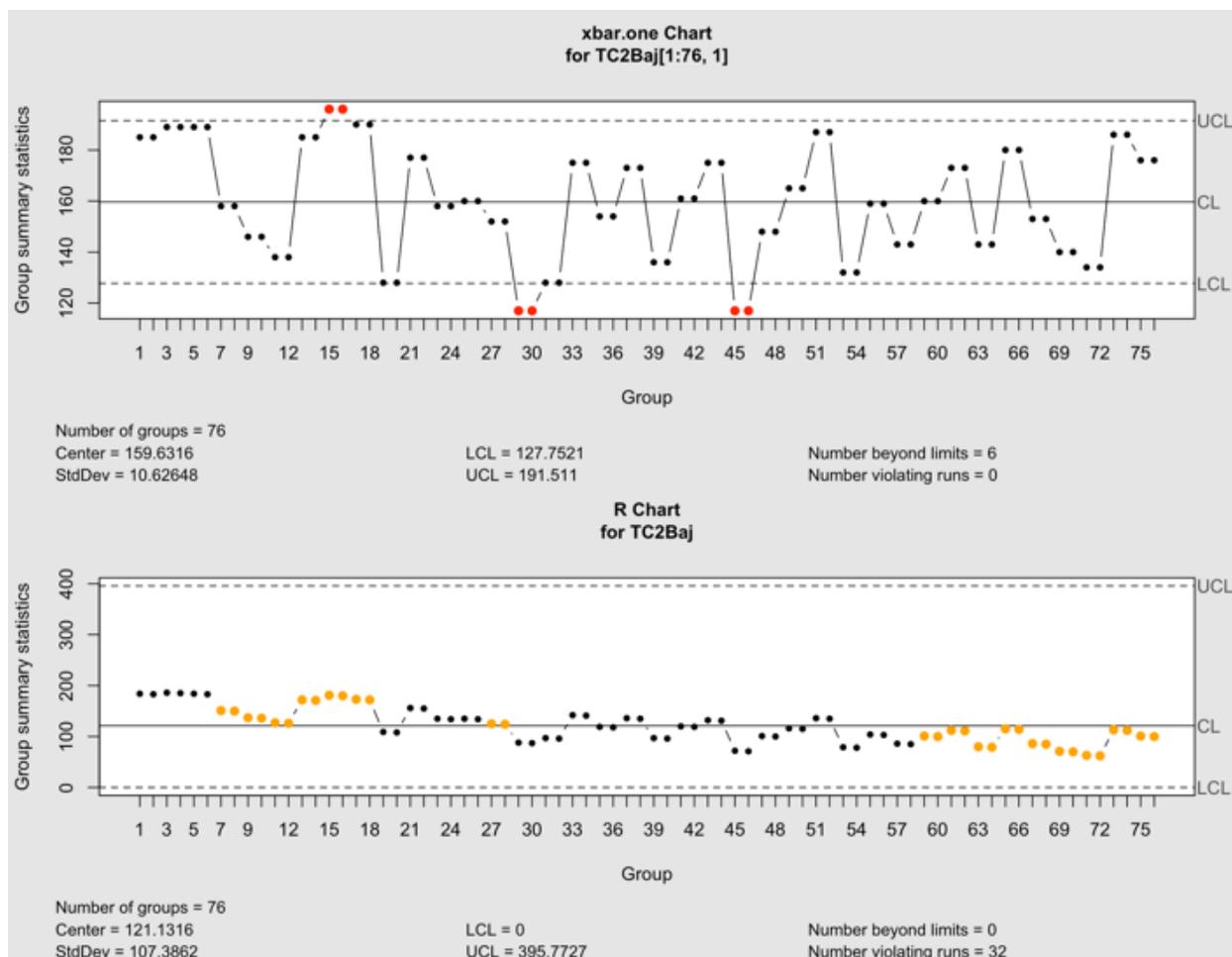


Figura 28 – Nova carta de controle carvão TC2B - Secção 2B

Após a análise das novas amostras e redução do volume das pilhas produzidas, ficou mais claro quais carvões poderiam compor o novo produto; BN2B manteria como a base do novo produto, TC2B dosado ainda em níveis baixos devido a redução do poder calorífico e por último CPS4 para otimizar a reserva de BN2B. O BNS4 foi retirado devido a sua instabilidade no teor de flúor, vindo a apresentar oscilações consideráveis e difícil reversão.

Para análise das amostras utilizamos 4 laboratórios, o laboratório interno e 3 laboratórios externos de reconhecimento global. Porém devido a localização geográfica e precaridade dos correios de Moçambique, houve a necessidade de validar o laboratório interno para que todas as amostras fossem analisadas a tempo hábil de carregarmos

para formar o navio de baixo flúor. Para validarmos utilizamos o teste t de student visando comparar a média das amostras entre laboratórios figura 29.

t-Test: Paired Two Sample for Means

	<i>Variable</i>	<i>Variable</i>
	1	2
Mean	200,4241	203,5273
Variance	2245,878	2130,035
Observations	30	30
Pearson		
Correlation	0,975549	
Hypothesized		
Mean Difference	0	
df	29	
t Stat	-1,6318	
P(T<=t) one-tail	0,056767	
t Critical one-tail	1,699127	
P(T<=t) two-tail	0,113534	
t Critical two-tail	2,04523	

Figura 29 – Teste t realizado para comprara as amostras dos laboratórios.

Produto	ID	A	B	Dif
		30	30	D (A-B)
Padrão	2860264	240	244	-4
BN2B	2856794	169	173	-3
BN2B	2856095	159	165	-6
BN2B	2856797	159	168	-9
CPS4	2858305	162	173	-11
CPS4	2856801	169	187	-18
CPS4	2857769	233	244	-11
GF2B	2905874	168	168	
GF2B	2908481	127	133	-6
GF2B	2908482	165	157	8
TC2B	2883182	170	173	-4
TC2B	2883183	187	179	8
TC2B	2884208	158	185	-28
TC2B	2928876	178	174	4
MABU	2925184	172	197	-25
MABU	2925113	179	188	-9
MZ8C	2925114	183	180	3
MZ8C	2925115	185	180	5
MLVC	2925116	267	267	
MLVC	2925117	244	234	10
CPS1	2861894	275	275	1
CPS1	2877585	233	257	-25
BNS6	2935271	219	208	12
BNS6	2937723	181	174	7
BNS6	2940033	192	184	8
BNS4	2970676	188	187	1
BNS4	2971613	216	211	5
UCS6	2988896	269	275	-7
LCS6	2973061	218	224	-7
LCS6	2974139	354	348	6

Tabela 3 – Amostras de navios, utilizadas para validar o laboratório.

O processo de carregamento sofreu alterações significativas e de difícil implantação. Após o processo produtivo e depósito no pátio de carvão, inicia-se dois processos fundamentais para otimização da reserva, toda pilha produzida era carregada por completa, apenas havia adição de outra pilha em casos de término da pilha selecionada. O novo processo a homogeneização da pilha final, começa no carregamento, onde a composição de vagões leva percentuais de cada pilha validada. No porto tinha destino definido entre as duas ou mais pilhas destinadas ao navio de baixo flúor figura 30.

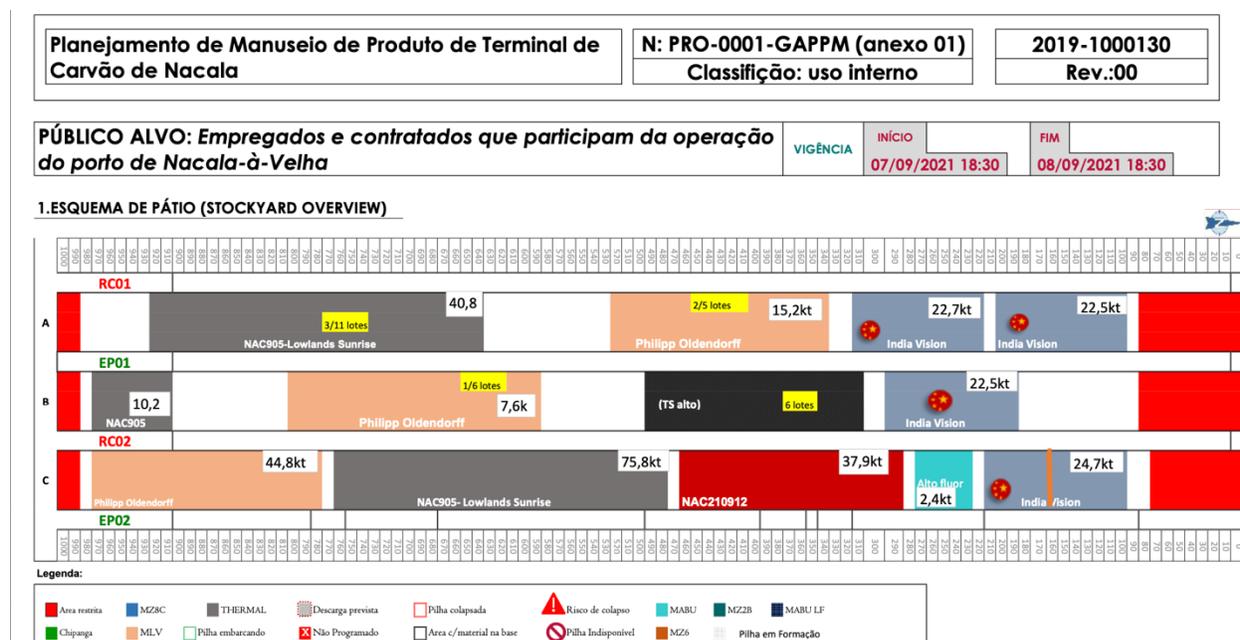


Figura 30 – Representação pátio Nacala.

A homogeneização do produto final é fundamental para o bom resultado do projeto, devido a amostragem na China ser manual, qualquer falha no processo de homogeneização pode gerar baias de fluor alto, proporcionando enormes perdas financeiras e inviabilizando o projeto. No empilhamento no pátio optamos por utilizar a metodologia CHEVROM (figura 31), que consiste em empilhar de forma contínua e sobrepostas, conforme imagem abaixo:

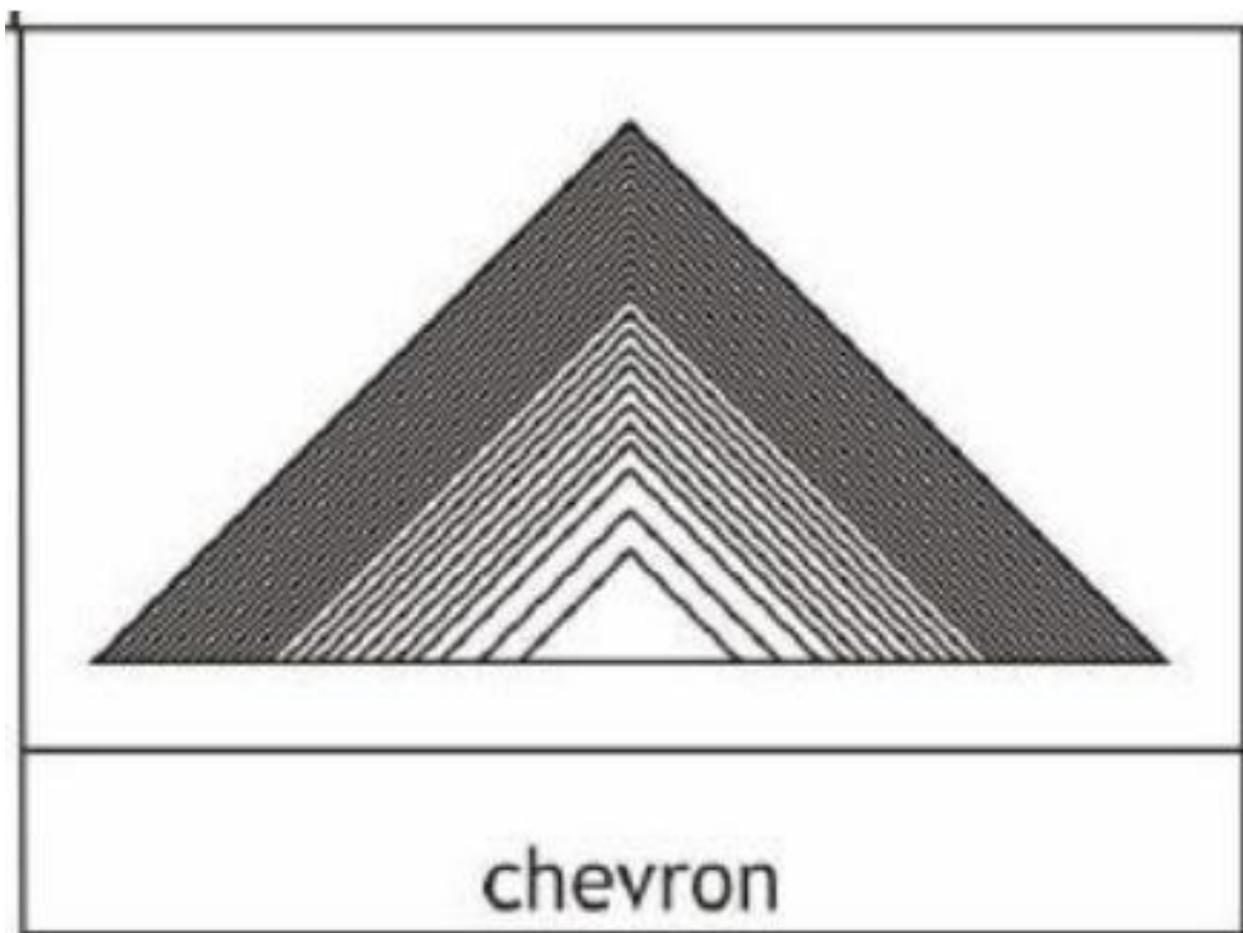


Figura 31 – Métodos de empilhamento Chevron.

Para carregar os navios e aumentar a homogeneização da carga, utilizou-se como método de retomada das pilhas, o método de recuperação em blocos (figura 32), que possibilita durante cada passada a recuperação de todas as camadas de material depositado através do método Chevron, de forma gradativa e inversamente ao método Chevron, aumentando a homogeneização do processo.

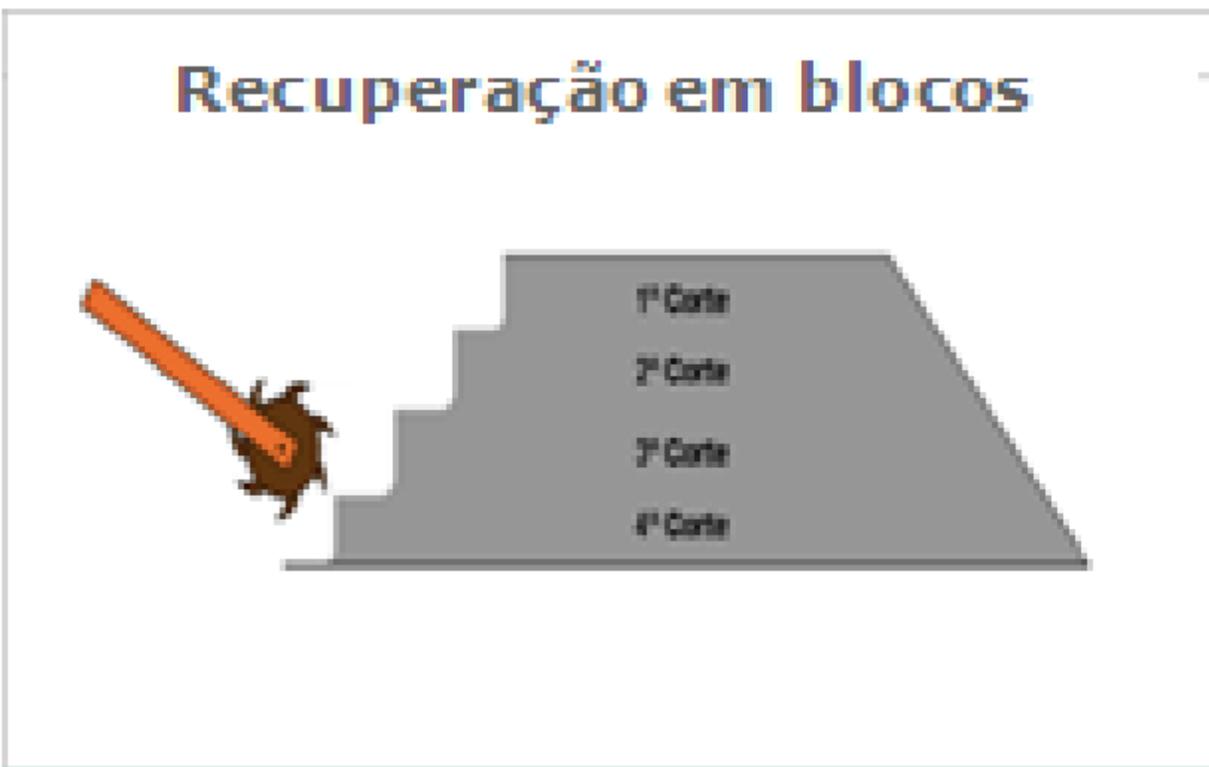


Figura 32 – Método recuperação de pilha em blocos.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este projeto foi bastante desafiador ao mesmo tempo que satisfatório. Através do desenvolvimento deste produto de baixo flúor destinado ao mercado chinês, foi possível aplicar diversos conhecimentos adquiridos durante a especialização, gerando resultados significativos para empresa em questão. Os conceitos e a aplicação das ferramentas estatísticas foram fundamentais para o sucesso do projeto, principalmente na validação do laboratório interno, que proporcionou maior agilidade nos resultados e gestão das pilhas produzidas. No ano de 2021 o mercado chinês pagou pelo carvão de baixo flúor 100% a mais que o carvão tradicional, onde alcançou-se o feito de 6 navios vendidos de forma spot e conquistou-se um contrato de exclusividade para 2022, já representado na figura 33 após a barra pontilhada (New data).

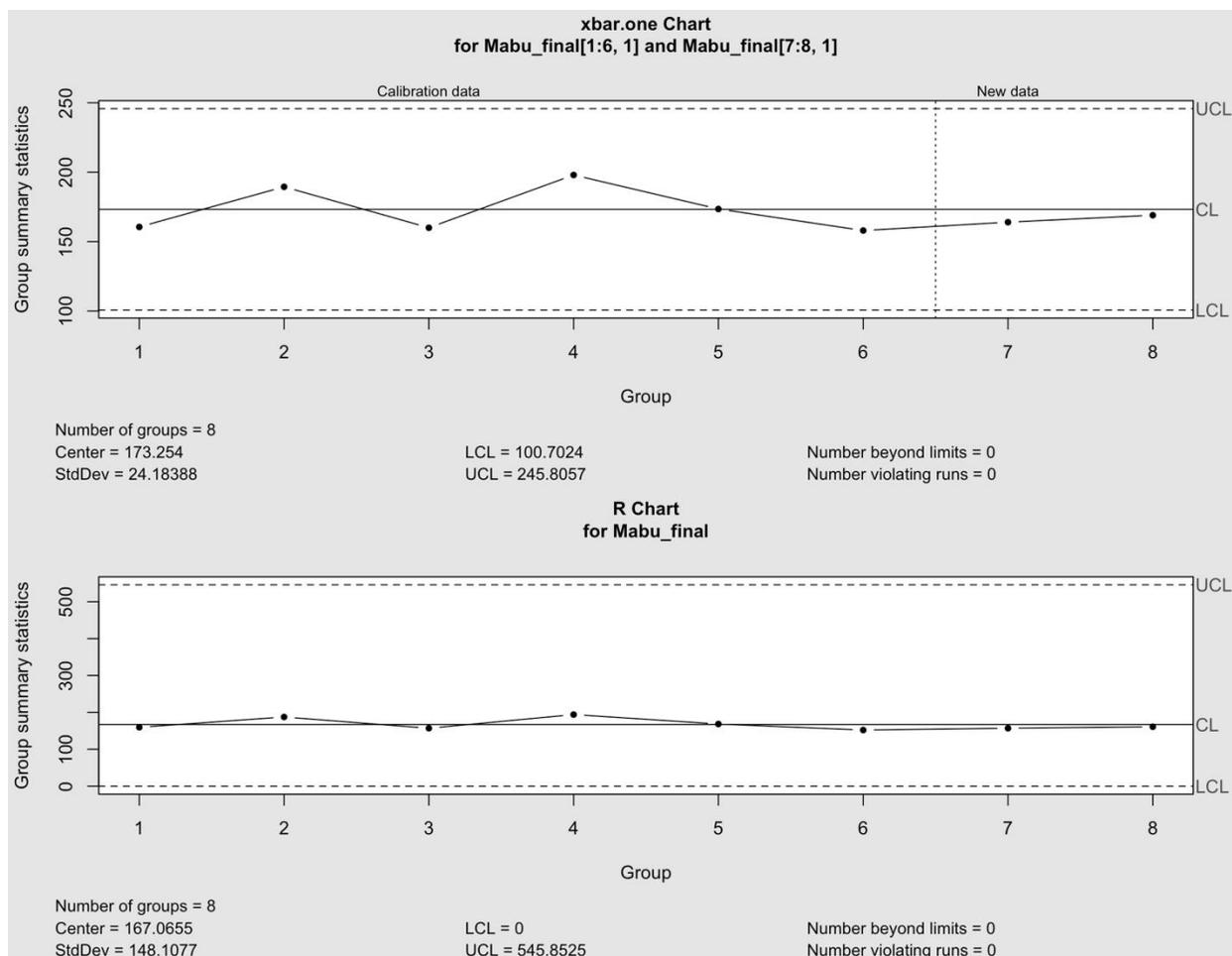


Figura 33 – Carta de controle final dos navios vendidos.

9 TRABALHOS FUTUROS

- Revisão da disposição dos demais produtos nos pátios de Moatize e Nacala, com intuito de otimizar a utilização dos pátios.
- Revisar o processo de amostragem da linha de produção, avaliando a viabilidade económica de aumentar a frequência de amostragem para 1 hora.
- Estudo de viabilidade para construção de um novo pátio, buscando viabilizar o desenvolvimento de novos produtos.

REFERÊNCIAS

CAMPOS, Magno Silvério. **Controle Estatístico de Processos: Cartas de Controle**. Departamento de Engenharia de Produção, Administração e Economia, Universidade Federal de Ouro Preto. 77p. 2019. Disponível em: http://professor.ufop.br/sites/default/files/magno/files/capitulo_3_-_cep_0.pdf.

CORRÊA, Jairo Marlon; NETO, Anselmo Chaves. **Estudo do controle e análise da capacidade do processo de produção de água potável**. XLI SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, n. 106, set., p. 1414-1424. ISSN 1808-4435. 2009.

GOMES, Fabrício Maciel. **Cartas de Controle: dados contínuos**. S.d. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4145169/mod_resource/content/1/CEP%20-%20cartas%20de%20controle.pdf.

HENNING, Elisa; WALTER, Olga Maria Carvalho Formigoni; SOUZA, Nadine Santos de; SAMOHYL, Robert Wayne. **Um estudo para a aplicação de gráficos de controle estatístico de processo em indicadores de qualidade da água potável**. VII Congresso Nacional de Excelência em Gestão, ISSN 1984-9354. 2011. Disponível em: <https://www.inovarse.org/filebrowser/download/8481>.

KHOO, Michael Boon Chong; ARIFFIN, Khotrun Nada bt. **Two Improved Runs Rules for the Shewhart \bar{X} Control Chart**. Quality Engineering, v. 18, n. 2, 2006.

KLEIN, Morton. **Two Alternatives to the Shewhart \bar{X} Control Chart**. Journal of Quality Technology, v. 32, n. 4, p. 427-431, 2000.

MARTINS, Felipe; RIBEIRO, Jaciane do Carmo; ALMEIDA, Silvia dos Santos; RAMOS, Edson Marcos Leal Soares. **ARL para o gráfico de controle da mediana quando o estimador do desvio padrão é baseado nos quartis amostrais**. SPOLM - Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha, 2006, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.marinha.mil.br/spolm/sites/www.marinha.mil.br.spolm/files/arq0048.pdf>.

MAZOCCO, Flavio Luiz; ROSA, Germano Mendes; LOURENCO, Guilherme Dandrade; RADICCHI, Lucas Augusto; OPRIME, Pedro Carlos. **Comparação do desempenho entre gráficos de controle X-barra e *t-student* variando-se o número e o tamanho das amostras.** XXXIV Congresso Nacional de Engenharia de Produção, 2014. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2014_TN_STO_196_109_25044.pdf.

NASSER, Rafael Barbosa. **McCloud service framework: arcabouço para desenvolvimento de serviços baseados na simulação de Monte Carlo na Cloud.** Pós-graduação em Informática da PUC-Rio. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Rio de Janeiro, 2012.

OLIVEIRA, Camila Cardoso de; GRANATO, Daniel; CARUSO, Miriam Solange Fernandes; SAKUMA, Alice Momoyo. **Manual para elaboração de cartas de controle para monitoramento de processos de medição quantitativos em laboratórios de ensaio.** Instituto Adolfo Lutz, Secretaria de Estado de Saúde, 76p. São Paulo, 2013. Disponível em: http://redsang.ial.sp.gov.br/site/docs_leis/pd/pd11.pdf.

RAMOS, Alberto Wunderler. Controle Estatístico do Processo. *In*: CONTADOR, José Celso. **Gestão de Operações: A Engenharia de Produção a Serviço da Modernização da Empresa.** São Paulo: Edgard Blücher, p. 169-179. 2007.

RIBEIRO, José Luis Duarte; CATEN, Carla Schwengber ten. **Controle Estatístico do Processo.** Série monográfica Qualidade. Porto Alegre: Fundação Empresa Escola de Engenharia da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - FEENG/ UFRGS, 2012. Disponível em: http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/388_apostilacep_2012.pdf.

PINHEIRO, João Ismael D.; CARVAJAL, Santiago S. Ramírez; CUNHA, Sonia Baptista da; GOMES, Gastão Coelho. **Probabilidade e Estatística: Quantificando a Incerteza.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

PIRES, Verônica Tassinari. **Implantação do Controle Estatístico de Processo em uma empresa de manufatura de óleo de arroz** – Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Porto Alegre: UFRGS, 2000.

QIU, Peihua. **Introduction to Statistical Process Control**. Boca Raton: CRC Press, 2014.

SAMOHYL, Robert Wayne. **Controle Estatístico de Qualidade**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

SLACK, Nigel; HARRISON, Alan; JOHNSTON, Robert. **Administração da Produção**. São Paulo: Atlas, 2009.

KOTZ, Samuel; JOHNSON, Norman L. **Process capability indices**. 1. ed. London: Chapman & Hall, 1993.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Atualizada – Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

MINGOTI, Sueli A., YASUKAWA, Fabiane R. S. **Uma comparação de gráficos de controle para a média de processos autocorrelacionados**. SISTEMAS & GESTÃO, v.3, n. 1, p.55-73, 2008.

MIOT, Hélio Amante. **Avaliação da normalidade dos dados em estudos clínicos e Experimentais**. J Vasc Bras, v.16, n.2, p. 88-91 UNESP - Faculdade de Medicina de Botucatu - Departamento de Dermatologia e Radioterapia – São Paulo, 2017.

MITRA, Amitava. **Fundamentals of quality control and improvement**. 4. Ed. New Jersey: Wiley, 2016.

MODENESI, Paulo José. **Soldagem I: Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldas**. Notas de aula – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFMG, Belo Horizonte. 2001.

MONTGOMERY, Douglas C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. Tradução e revisão técnica Ana Maria Lima de Farias, Vera Regina Lima de Farias e Flores. 7. ed. – [Reimpr]. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

SILVEIRA, Eduardo Freitas da; WERNER, Liane. **Proposta de método de priorização de processos a serem monitorados no controle estatístico de processo: uma aplicação em trocador de calor**. Revista Produção Online, v.11, n.1, p. 116-135, mar. 2011.

SIMON, Fabiana Camila; LORIS, Marcelo; PERIN, Tiago; ALVES, Valtair de Jesus. **Análise prática de penetração de solda em aço 1045**. 2o SIEF – Semana Internacional das Engenharias da FAHOR. Horizontina – RS, 2012.

SOWER, Victor E. **Statistical Process Control for Managers**. 1. ed. New York: Business Expert Press, 2014.

VIEIRA, Sônia. **Estatística para a Qualidade**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

WETHERILL, G. Barrie; BROWN, Don W. **Statistical Process Control: Theory and practice**. 1. ed. Springer Science+Business Media, 1991.

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

CHAVES, Arthur Pinto; FERREIRA, Flávio Moreira. **Apostila Estocagem e homogeneização**. São Paulo, 2006.

CORREA, H. L. **Planejamento programação e controle da produção: MRP II / ERP, conceitos, uso e implantação**. São Paulo: Atlas, 2000.

CRUZ, André Vargas Abs da. **Otimização de planejamento com restrições de precedência usando algoritmos genéticos e co-evolução cooperativa**. Dissertação. DEE, PUC-RJ, Rio de Janeiro, 2003.

FLSMIDTH®. **Catálogo**. Copenhagen/Dinamarca, 2008.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.

MARTINS, Petrônio Garcia; LAUGENI, Fernando Piero. **Administração da Produção**. 2. ed. rev., aum. e atual. São Paulo: Saraiva, 2005.

THYSSENKRUPP®. **Catálogo**. Beckum/Alemanha.

VIEIRA NETO, E.; FREIRE, M.G.M. **Manual de elaboração de trabalhos acadêmicos e monografia**. Revistas Perspectivas online, Campos dos Goytacazes, 2008.

Flender Brasil. Disponível em: <http://www.flenderbrasil.com/>

CHAVES A.P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: Manuseio de Sólidos Granulados**, 2ª edição. São Paulo, SP: Editora: Oficina de Textos, 2012.

CHERMONT, G. S. **A Qualidade na Gestão de Projetos de Sistemas de Informação**. Tese de Mestrado. Rio de Janeiro, 2001.

CROSBY, P. **Qualidade é investimento**. Rio de Janeiro: José Olympio, 1986.

DEMING, W.E. **Qualidade: A Revolução da Administração**. Rio de Janeiro, 1990, Marques Saraiva.

ETZIONI, A. **Sociologia industrial: o estudo das organizações econômicas**. Organizações complexas. São Paulo : Atlas, 1981.

WORSLEY, School. Disponível em: <http://www.worsleyschool.net>

BARBETTA, P. A. - **Estatística aplicada às Ciências Sociais**. 7 ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2010

Anexo B – Tabela de distribuição t de Student

p \ n	0.75	0.8	0.85	0.9	0.925	0.95	0.975	0.99	0.995	0.999	0.9995
1	1.000	1.376	1.963	3.078	4.165	6.314	12.706	31.821	63.657	318.31	636.62
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.282	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.599
3	0.765	0.978	1.250	1.638	1.924	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215	12.924
4	0.741	0.941	1.190	1.533	1.778	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5	0.727	0.920	1.156	1.476	1.699	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
6	0.718	0.906	1.134	1.440	1.650	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.617	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	5.408
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.592	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9	0.703	0.883	1.100	1.383	1.574	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10	0.700	0.879	1.093	1.372	1.559	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587
11	0.697	0.876	1.088	1.363	1.548	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	4.437
12	0.695	0.873	1.083	1.356	1.538	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	4.318
13	0.694	0.870	1.079	1.350	1.530	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	4.221
14	0.692	0.868	1.076	1.345	1.523	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	4.140
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.517	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	4.073
16	0.690	0.865	1.071	1.337	1.512	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686	4.015
17	0.689	0.863	1.069	1.333	1.508	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646	3.965
18	0.688	0.862	1.067	1.330	1.504	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610	3.922
19	0.688	0.861	1.066	1.328	1.500	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579	3.883
20	0.687	0.860	1.064	1.325	1.497	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552	3.850
21	0.686	0.859	1.063	1.323	1.494	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527	3.819
22	0.686	0.858	1.061	1.321	1.492	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505	3.792
23	0.685	0.858	1.060	1.319	1.489	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485	3.768
24	0.685	0.857	1.059	1.318	1.487	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467	3.745
25	0.684	0.856	1.058	1.316	1.485	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450	3.725
26	0.684	0.856	1.058	1.315	1.483	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435	3.707
27	0.684	0.855	1.057	1.314	1.482	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421	3.690
28	0.683	0.855	1.056	1.313	1.480	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408	3.674
29	0.683	0.854	1.055	1.311	1.479	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396	3.659
30	0.683	0.854	1.055	1.310	1.477	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385	3.646
35	0.682	0.852	1.052	1.306	1.472	1.690	2.030	2.438	2.724	3.340	3.591
40	0.681	0.851	1.050	1.303	1.468	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307	3.551
45	0.680	0.850	1.049	1.301	1.465	1.679	2.014	2.412	2.690	3.281	3.520
50	0.679	0.849	1.047	1.299	1.462	1.676	2.009	2.403	2.678	3.261	3.496
55	0.679	0.848	1.046	1.297	1.460	1.673	2.004	2.396	2.668	3.245	3.476
60	0.679	0.848	1.045	1.296	1.458	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232	3.460
65	0.678	0.847	1.045	1.295	1.457	1.669	1.997	2.385	2.654	3.220	3.447
70	0.678	0.847	1.044	1.294	1.456	1.667	1.994	2.381	2.648	3.211	3.435
75	0.678	0.846	1.044	1.293	1.454	1.665	1.992	2.377	2.643	3.202	3.425
80	0.678	0.846	1.043	1.292	1.453	1.664	1.990	2.374	2.639	3.195	3.416
85	0.677	0.846	1.043	1.292	1.453	1.663	1.988	2.371	2.635	3.189	3.409
90	0.677	0.846	1.042	1.291	1.452	1.662	1.987	2.368	2.632	3.183	3.402
95	0.677	0.845	1.042	1.291	1.451	1.661	1.985	2.366	2.629	3.178	3.396
100	0.677	0.845	1.042	1.290	1.451	1.660	1.984	2.364	2.626	3.174	3.390
120	0.677	0.845	1.041	1.289	1.449	1.658	1.980	2.358	2.617	3.160	3.373
150	0.676	0.844	1.040	1.287	1.447	1.655	1.976	2.351	2.609	3.145	3.357
200	0.676	0.843	1.039	1.286	1.445	1.653	1.972	2.345	2.601	3.131	3.340
q_p	0.674	0.842	1.036	1.282	1.440	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090	3.291

T_n - Variável aleatória com distribuição t de Student com n graus de liberdade

q_p - Quantil de probabilidade p da distribuição normal padrão