

Monitoramento do Poluente MP_{2,5} por meio de Gráficos de Controle \bar{X} – R na Cidade de Taubaté – SP

O estudo teve como propósito aplicar o Controle Estatístico de Processos (CEP) para acompanhar a qualidade do ar em Taubaté – SP, com ênfase no poluente MP_{2,5}, reconhecido por seus impactos prejudiciais à saúde. São utilizados dados da CETESB referentes aos meses de janeiro, fevereiro e março de 2025. A análise é realizada por meio dos gráficos de controle da amplitude (R) e da média (\bar{X}). Na fase I, foram coletadas 59 amostras para estabelecer os limites de controle. Na fase II, o monitoramento dos dados do mês de março revelou cinco amostras acima do limite de controle, indicando momentos em que o processo esteve fora de controle estatístico. Dessa forma, os gráficos de controle mostraram-se eficazes na identificação de variações relevantes, reforçando a utilidade do CEP como ferramenta de monitoramento ambiental, sugerindo que fatores como tráfego intenso, atividades industriais e condições climáticas possam ter contribuído para os picos identificados. Para estudos futuros, sugere-se a utilização de outras ferramentas da qualidade como, o Diagrama de Causa e Efeito, o Gráfico de Dispersão e o Diagrama de Pareto, com objetivo de investigar mais profundamente os fatores que influenciam as variações nos níveis de poluição e auxiliar na priorização de ações corretivas.

Palavras-chave: Controle Estatísticos de Processos; Gráficos de Controle; MP_{2,5}; Qualidade do Ar; Poluição Atmosférica.

1. INTRODUÇÃO

Qualidade é um fator diferencial na entrega de bens de consumo e serviços. Para alcançar a qualidade essencial à sobrevivência no mercado de trabalho existem métodos estatísticos que auxiliam nesse controle. Um desses métodos é o Controle Estatístico de Processos (CEP), que, segundo Montgomery (2016) consiste em um conjunto de ferramentas cujo objetivo é estabilizar processos e reduzir a variabilidade. Uma das ferramentas do CEP é o gráfico de controle, desenvolvido por Walter A. Shewhart, do Bell Telephone Laboratories, em 1924. A eficácia dos gráficos de controle está relacionada à sua capacidade de detectar rapidamente alterações no processo (Costa et al. 2005).

Os gráficos de controle podem ser classificados em dois tipos: por variáveis ou por atributos. Para Samohyl (2009) uma característica da qualidade é uma variável quando pode ser medida, como o comprimento ou largura, temperatura e volume. Por outro lado, as características que não podem ser mensuradas numericamente são classificadas como conforme (não defeituoso) ou não conforme (defeituoso). Nesse caso, tais características de qualidade são chamadas de atributos.

Sabe-se que há muitas aplicações bem-sucedidas dos métodos de CEP no ambiente de manufatura. No entanto, é possível aplicá-lo em contextos não industriais como em empresas de transações, indústrias de serviços, na área da saúde e fatores ambientais incluindo o monitoramento de níveis de poluição atmosférica.

Percebe-se que com o avanço da industrialização para o interior do estado de São Paulo, a partir da década de 1990, houve um aumento nos níveis da poluição atmosférica e, conseqüentemente, efeitos negativos sobre a saúde da população de Taubaté (Corá et al. 2020).

O aumento desenfreado de poluentes como $MP_{2,5}$ pode trazer problemas irreversíveis para a sociedade. Isso porque, de acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS) o material particulado, especialmente o $MP_{2,5}$ tem a capacidade de penetrar profundamente nos pulmões e chegar à corrente sanguínea, causando efeitos negativos sobre o sistema cardiovascular, o cérebro e o sistema respiratório.

Além disso, estudos recentes mostram uma associação entre a exposição elevada a esse poluente e problemas psicológicos, como Transtorno do déficit de atenção com hiperatividade (TDAH), dificuldade de concentração e ansiedade (Dwilaksana et al. 2024).

Neste estudo, utiliza-se o Controle Estatístico de Processos (CEP) para monitorar a qualidade do ar na cidade de Taubaté – SP. A coleta de dados foi realizada por meio do site da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) que obtém seus dados com medições horárias realizadas diariamente. Um dos diversos poluentes monitorados é o Material Particulado MP_{2,5} também conhecido como partículas inaláveis finas. O Material Particulado (MP) é constituído por pequenas partículas, líquidas ou sólidas, que ficam suspensas no ar.

O poluente analisado pela pesquisa foi o MP_{2,5} composto por partículas com diâmetro inferior a 2,5 µm que atingem os alvéolos pulmonares e causam problemas respiratórios e cardiovasculares. A emissão do MP_{2,5} é causada principalmente pela queima de combustíveis fósseis.

Diante do exposto, este artigo tem por objetivo analisar a qualidade do ar na cidade de Taubaté. Com a utilização dos gráficos de controle, é possível monitorar a variabilidade dessa qualidade, uma vez que, com as medições horárias realizada pela CETESB é viável coletar os dados e, assim, acompanhar a média do processo por meio do gráfico de controle \bar{X} e a variabilidade do processo por meio do gráfico de controle R.

A pesquisa delimita-se aos gráficos de controle por variáveis, por meio da aplicação do Controle Estatístico de Processos (CEP). Para isso, foram coletados dados dos meses de janeiro a fevereiro de 2025 a fim de definir os limites e assim monitorar a qualidade do ar no mês de março de 2025. Os dados públicos foram obtidos na Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), referentes a poluição atmosférica causada pelo MP_{2,5} na cidade de Taubaté.

Nesta primeira seção, apresentou-se a introdução do trabalho. Nas seções seguintes, serão abordados a fundamentação teórica, o método de pesquisa, os resultados e a conclusão.

2. Fundamentação teórica

2.1. Gráficos de controle por variáveis

De acordo com Juran (1992), qualidade está relacionada à adequação ao uso, ou seja, à capacidade de um produto ou serviço atender às necessidades dos clientes. Para Deming (1990), o controle estatístico dos processos é essencial para compreender a variabilidade e, a partir disso, promover ações corretivas e preventivas que sustentem a melhoria contínua. Nesse

sentido, o gerenciamento eficaz dos processos constitui condição fundamental para assegurar a qualidade de bens e serviços.

Por mais que todo o processo esteja controlado, pode ocorrer exceções, o que é denominado variabilidade natural ou causas aleatórias, como, por exemplo: variações na temperatura de um processo. Quando ocorrem apenas causas aleatórias de variação, pode-se dizer que o processo está sob controle estatístico (Costa et al. 2005).

Os gráficos de controle podem ser classificados em dois tipos. Se a característica da qualidade for expressa quantitativamente, trata-se de uma variável. Caso seja avaliada pela presença ou ausência de determinadas propriedades, utiliza-se gráficos de controle para atributos.

O gráfico de controle contém uma linha central que é representada pelo valor médio das características da qualidade e outras duas linhas horizontais chamadas limite superior de controle (LSC) e limite inferior de controle (LIC). Para verificar se o processo está sob controle é preciso que todos os pontos amostrais estejam dentro dos limites. Entretanto, é necessário que todos os pontos apresentem um padrão essencialmente aleatório, caso contrário o processo está fora de controle. A figura 1 ilustra um gráfico de controle.

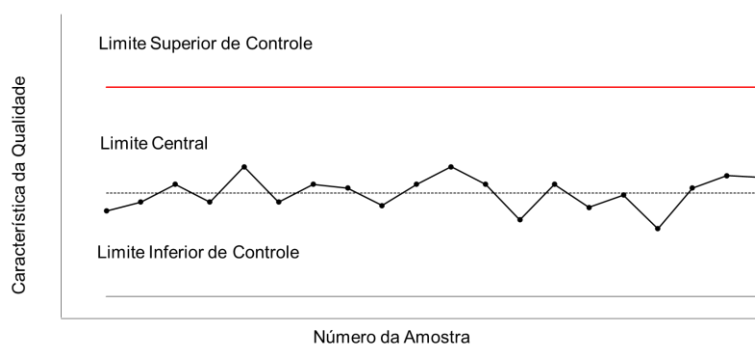


Figura 1. Gráfico de controle.
Fonte: Elaborado pelos autores.

O monitoramento de processos é composto pela fase I e fase II. Na fase I são coletados os dados e calculados os limites de controle; caso tenha algum ponto fora desses limites, ele é retirado e os limites de controle são recalculados. Ao definir o conjunto confiável de limites de

controle o processo passa para a fase II que consiste no monitoramento de produções futuras (Atalay et al. 2019).

O gráfico de controle utilizado neste estudo foi o gráfico por variáveis. O gráfico da média \bar{X} foi utilizado para monitorar a centralidade do processo e o da amplitude R para monitorar a variabilidade.

Sejam $\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_n$ as médias de cada uma das amostras. A média das médias pode ser dada por:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_n}{n} \quad (1)$$

O limite superior de controle, linha central e limite inferior de controle para o gráfico de controle \bar{X} são dados respectivamente pelas seguintes equações.

$$LSC = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R} \quad (2)$$

$$LC = \bar{\bar{x}} \quad (3)$$

$$LIC = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R} \quad (4)$$

Sendo \bar{R} a amplitude média dada pela equação (5):

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_n}{n}$$

onde:

$$R = X_{\text{máx}} - X_{\text{mín}}$$

O limite superior de controle, linha central e limite inferior de controle para o gráfico de controle R são dados respectivamente pelas seguintes equações.

$$LSC = D_4 \bar{R} \quad (6)$$

$$LC = \bar{R} \quad (7)$$

$$LIC = D_3 \bar{R} \quad (8)$$

O valor das constantes A_2 , D_3 e D_4 é obtido de acordo com o tamanho da amostra e podem ser encontrados em tabelas de controle, que foram desenvolvidas a partir de estudos estatísticos, a fim de tornar os resultados mais precisos (Montgomery 2016).

2.2. Monitoramento da poluição atmosférica

A poluição atmosférica ocorre quando agentes químicos, biológicos ou físico alteram as características naturais da atmosfera (OMS, 2025). De acordo com a OMS (Organização Mundial da Saúde) as indústrias, os automóveis, os incêndios florestais são disseminadores de poluentes, que incluem monóxido de carbono, ozônio, dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e material particulado os quais são nocivos à saúde da população. Os problemas de saúde mais frequentes causados pelos poluentes são doenças respiratórias, cardiovasculares e câncer. Contudo, foram identificadas relações com o aumento de alterações genéticas, doenças circulatórias e baixo peso ao nascer (Curado et al. 2022).

Existem inúmeros poluentes que trazem malefícios para a saúde da população. Entre eles está o material particulado, que são pequenos conjuntos de partículas sólidas e líquidas suspensas no ar, com diâmetro inferior a 100 μm , e contém variações no tamanho, composição química e nos processos de formação (Dourado, 2016). O material particulado fino ($\text{MP}_{2,5}$) destaca-se por ser uma fusão de partículas sólidas e líquidas suspensas no ar, sendo suficientemente pequeno para penetrar na corrente sanguínea e nos pulmões, alojando-se nos bronquíolos, o que corrobora a incidência de problemas de saúde, como complicações respiratórias, cardiovasculares e aumento da mortalidade (Lins et al. 2024). A origem do $\text{MP}_{2,5}$ pode ocorrer em fontes naturais, como a poeira que se levanta do solo com o vento, ou atividades antropogênicas, como a queima de combustíveis fósseis e a atividade industrial (Santos et al. 2018).

Além disso, há uma associação entre o material particulado fino ($\text{MP}_{2,5}$), mesmo em baixas concentrações, e a incidência de demência. Na Suécia foi identificada a relação entre a poluentes atmosférico e o aumento da incidência de demência e da doença de Alzheimer. A exposição prolongada aos poluentes do ar, como o material particulado, tem uma associação com o declínio cognitivo e maior incidência de demência. Isso porque, esses poluentes podem causar inflamação crônica e sistêmica e danos ao sistema nervoso (Silva et al. 2019).

A partir da Segunda Guerra Mundial, ocorreu o crescimento desordenado de indústrias de grande porte no estado de São Paulo, sem o cuidado necessário com o controle dos poluentes atmosféricos. Nesse sentido, em 1972 a qualidade do ar, com avaliação das concentrações dos poluentes, passou a ser monitorada pela CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) na região metropolitana (CETESB, 2025). Desde então, a Companhia conta com 62 estações de monitoramento da qualidade do ar na Região Metropolitana de São Paulo, interior e litoral do Estado (Santos e Hoinaski, 2021). Nesse contexto, para Mancha et al. (2024), a CETESB tem um compilado de informações minuciosas que permitem verificar a quantidade de poluentes no território paulista. Percebe-se que a CETESB realiza o monitoramento de diversos tipos de poluentes, entre os quais se destaca o material particulado fino (MP_{2,5}), devido à sua associação com efeitos nocivos à saúde humana.

De acordo com a CETESB (2025), o monitoramento do ar acontece por meio de estações medidoras que realizam as medições de forma contínua dos índices de poluição atmosférica. Os dados coletados são analisados com base nas médias estabelecidas por lei e publicados no site a cada hora.

3. Método de pesquisa

A pesquisa pode ser entendida como um processo racional, planejado e organizado, com o objetivo de obter respostas aos problemas observados. A realização da pesquisa envolve o uso dos conhecimentos disponíveis, bem como a aplicação de métodos e técnicas científicas (Gil, 2008).

Em um primeiro momento, foi analisada a literatura e a aplicação dos conceitos do controle estatístico de processos. Identificou-se o gráfico de controle mais adequado às variáveis do sistema de monitoramento da qualidade do ar. O desenvolvimento deste estudo foi estruturado em etapas, visando à construção dos gráficos de controle \bar{X} e R para o monitoramento do poluente MP_{2,5}.

Durante essa fase, foram coletados e analisados os dados referentes ao poluente MP_{2,5} nos meses de janeiro e fevereiro de 2025, e calculados os limites de controle (Fase I). Na etapa seguinte, foram coletados os dados do mês de março de 2025, e os limites de controle foram

aplicados (Fase II). Por fim, foi possível analisar os resultados e verificar se o processo estava sob controle.

A figura 2 ilustra as etapas do desenvolvimento da pesquisa.

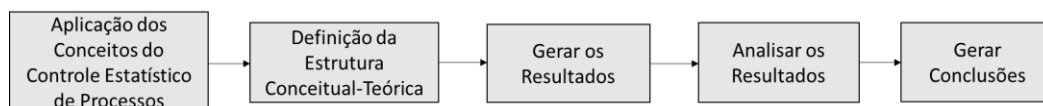


Figura 2. Etapas do desenvolvimento da pesquisa.
Fonte: Adaptado de Mendes, 2023.

3.1. Coleta e Tratamento dos Dados

Os dados foram coletados por meio do site da CETESB (2025). As informações podem ser localizadas na aba qualidade do ar, indicadores, dados horários e o poluente analisado foi o MP_{2,5} (partículas finas inaláveis).

A pesquisa foi realizada na estação de Taubaté no período de janeiro, fevereiro e março de 2025 no turno da manhã (7h às 12h). Foram coletados os dados da média horária de janeiro e fevereiro para criar os gráficos de controle e, dessa forma, monitorar os dados de março.

A figura 3 ilustra os dados horários disponíveis na página de monitoramento da CETESB.



Figura 3. Página da CETESB com dados horários do poluente MP_{2,5}.
Fonte: CETESB (2025).

3.2. Cálculo dos parâmetros e limites de controle

Para calcular os limites de controle foi necessária a consulta ao site da CETESB. Em um primeiro momento, os dados foram alocados em uma planilha com todas as informações referentes ao poluente MP_{2,5}, como a média horária, a média em 24 horas e o Índice/Qualidade. Dentre essas informações, optou-se por utilizar a média horária, por ser mais adequada ao tipo de gráfico de controle proposto. As colunas com as informações relacionadas a média horária foram transpostas na planilha, e foi definida uma amostra de tamanho 6, correspondente ao monitoramento realizado das 7h às 12h, totalizando seis horas. Esse intervalo foi escolhido por coincidir com o período da manhã, quando o fluxo de automóveis é maior e, conseqüentemente, a emissão do poluente MP_{2,5} tende a ser mais elevada. Nos dias em que o site não divulgou a média horária, a linha referente aquele dia foi excluída da análise. Esse procedimento foi realizado nos meses de janeiro e fevereiro de 2025 para se obter os parâmetros referentes a Fase I dos gráficos de controle.

A partir dos dados de janeiro e fevereiro de 2025 foram calculados as médias e as amplitudes das amostras. Em seguida, foi calculada a média das médias e a média das amplitudes, de acordo com as equações (1) e (5). Com essas informações, foi possível calcular os limites de controle para o gráfico \bar{X} e os limites de controle para o gráfico R, por meio das equações (2), (3), (4), (6), (7) e (8) e, posteriormente, construir os gráficos. Na sequência, observou-se que o gráfico da amplitude apresentava observações amostrais fora dos limites de controle. Dessa forma, tais amostras foram retiradas e um novo limite foi calculado para o gráfico de controle R fazendo com que o processo ficasse sob controle. O mesmo processo ocorreu com o gráfico \bar{X} , observou-se que havia amostras acima do limite de controle; essas amostras foram retiradas e o limite foi novamente calculado para o gráfico de controle da média tornando o processo sob controle.

A partir disso, foi iniciada a etapa da Fase II, que consiste no monitoramento das emissões futuras. Assim, os dados de março de 2025 foram coletados e adicionados à tabela de dados já existente. A média e a amplitude desse mês foram calculados e, em seguida, os dados foram plotados nos gráficos de controle.

Para melhor ilustrar o método, o fluxograma apresenta as etapas do cálculo dos parâmetros e limites de controle.

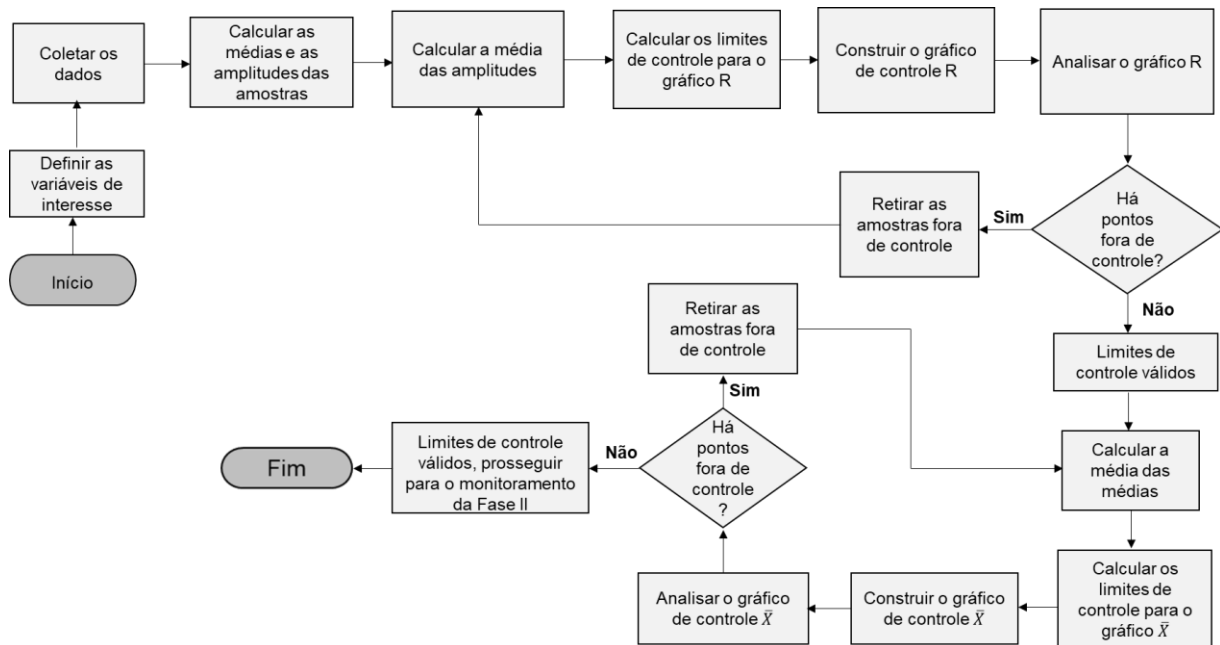


Figura 4. Fluxograma das etapas do cálculo dos parâmetros e limites de controle.
 Fonte: Elaborada pelos autores.

4. Resultados e discussão

Ao monitorar uma variável contínua – ou seja, quando é possível quantificar o processo – é indicada a supervisão das etapas por meio de dois tipos de gráficos de controle: um para monitorar a centralidade e o outro para observar a dispersão da variável (Wan & Zhu, 2021). Neste estudo, foi utilizado a média amostral \bar{X} para monitorar a centralidade e o da amplitude amostral R para monitorar a dispersão.

Para calcular os limites de controle e implementar os gráficos é fundamental determinar o número e o tamanho da amostra. Neste estudo, foram coletadas 59 amostras de tamanho 6 referentes a média horária do poluente $MP_{2,5}$ para o desenvolvimento da fase I do processo. A tabela 1 ilustra parte dos dados coletados.

Tabela 1. Parte dos dados coletados do poluente MP_{2,5} para fase I do estudo.

Número de amostra	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆
1	10	3	7	11	12	10
2	9	10	16	14	8	9
3	5	1	9	10	8	6
4	7	4	3	4	5	3
5	3	0	4	3	6	4
...
15	4	3	2	5	6	5
16	2	7	1	4	25	11
17	10	7	37	3	14	7
18	8	2	10	8	5	11
19	7	3	8	6	15	6
20	8	9	5	11	12	13
...
25	5	6	10	13	14	13
26	10	4	5	2	5	10
27	2	6	6	1	6	8
28	7	1	7	3	11	3
29	12	6	15	3	14	15
30	5	6	4	3	5	11
...
35	7	6	9	7	18	10
36	15	11	2	19	5	5
37	8	4	6	12	10	20
38	4	4	2	14	19	9
39	9	8	7	20	15	6
40	1	7	1	13	13	11
...
55	4	11	6	12	10	10
56	7	2	0	17	1	7
57	9	11	4	15	6	12
58	15	12	18	20	18	9
59	13	21	6	18	9	12

Fonte: Elaborado pelos autores

Para calcular os limites de controle é necessário determinar os resultados de $\bar{\bar{X}}$ e de \bar{R} . Logo, para obter o resultado da média das médias é preciso passar por duas etapas, a primeira consiste no cálculo da média de cada observação, ou seja, se $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ é uma amostra de tamanho n , então a média das observações é dada por:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (9)$$

Utilizando a equação (9), para o cálculo de cada uma das médias amostrais e, em seguida, a equação (1) é possível calcular a média das médias ($\bar{\bar{X}}$).

Por conseguinte, a amplitude é determinada pela subtração entre o maior e menor valor observado. Então, a média das amplitudes (\bar{R}) é resultante da equação (5). A tabela 2 representa os dados coletados com os resultados da média e da amplitude.

Tabela 2. Parte das médias e amplitudes das amostras coletadas de MP_{2,5}.

Número de amostra	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	\bar{X}	R
1	10	3	7	11	12	10	8,8	9
2	9	10	16	14	8	9	11	8
3	5	1	9	10	8	6	6,5	9
4	7	4	3	4	5	3	4,3	4
5	3	0	4	3	6	4	3,3	6
...
15	4	3	2	5	6	5	4,2	4
16	2	7	1	4	25	11	8,3	24
17	10	7	37	3	14	7	13	34
18	8	2	10	8	5	11	7,3	9
19	7	3	8	6	15	6	7,5	12
20	8	9	5	11	12	13	9,7	8
...
25	5	6	10	13	14	13	10,2	9
26	10	4	5	2	5	10	6	8
27	2	6	6	1	6	8	4,8	7
28	7	1	7	3	11	3	5,3	10
29	12	6	15	3	14	15	10,8	12
30	5	6	4	3	5	11	5,7	8
...
35	7	6	9	7	18	10	9,5	12
36	15	11	2	19	5	5	9,5	17
37	8	4	6	12	10	20	10	16
38	4	4	2	14	19	9	8,7	17
39	9	8	7	20	15	6	10,8	14
40	1	7	1	13	13	11	7,7	12
...
55	4	11	6	12	10	10	8,8	8
56	7	2	0	17	1	7	5,7	17
57	9	11	4	15	6	12	9,5	11
58	15	12	18	20	18	9	15,3	11
59	13	21	6	18	9	12	13,2	15

Fonte: Elaborado pelos autores

Com base nos dados da tabela 2, podemos determinar os valores de $\bar{\bar{X}}$ e \bar{R} . O valor da média das médias ($\bar{\bar{X}}$) é 7,67 e a média das amplitudes (\bar{R}) é 10,55.

Para calcular os limites de controle deve-se iniciar pelo gráfico R, uma vez que o gráfico \bar{X} sofre influência da estatística \bar{R} . Por meio das equações (6), (7) e (8), foi possível calcular os valores dos limites de controle gráfico R, como pode ser observado na figura 5.

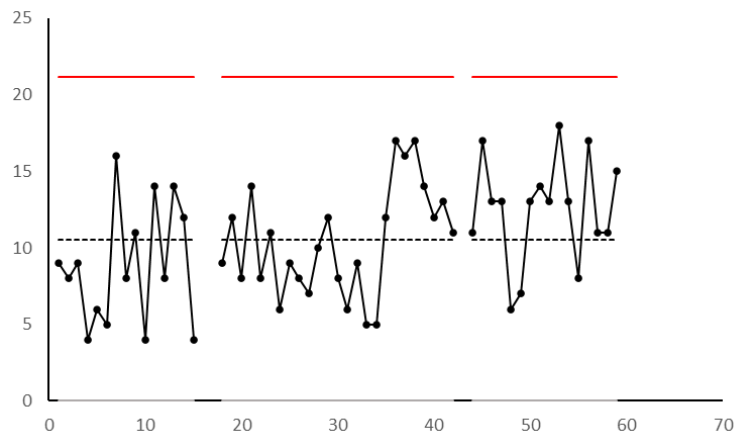


Figura 5. Gráfico de controle R.
Fonte: Elaborado pelos autores.

Para o processo em questão, as 16ª e a 17ª amostras foram retiradas, uma vez que estavam acima do limite de controle da amplitude e então os limites foram recalculados. Em seguida, ainda se observou que a 43ª amostra se encontrava acima dos limites de controle do gráfico R. Os limites de controle para amplitude foram novamente calculados com as restantes cinquenta e seis observações obtendo-se os seguintes valores para o limite superior de controle, limite central e limite inferior de controle, respectivamente: LSC = 21,15, LC = 10,55 e LIC = 0.

Uma vez que o gráfico R está sob controle pode-se prosseguir para o cálculo dos limites de controle do gráfico \bar{X} . Para isso, utilizou-se as seguintes equações (2), (3) e (4). Como ilustra a figura 6.

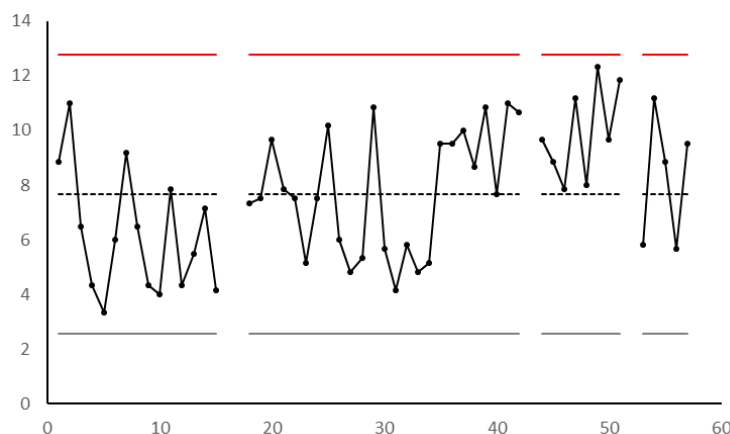


Figura 6. Gráfico de controle \bar{X} .
 Fonte: Elaborado pelos autores.

Após os cálculos verificou-se que as 52^a, 58^a e 59^a amostras encontravam-se acima dos limites de controle do gráfico da média. Os limites de controle do gráfico \bar{X} foram novamente calculados com as restantes cinquenta e três amostras obtendo-se os seguintes valores para o LSC = 12,77, LC = 7,67 e LIC = 2,57.

Ao analisar os gráficos da amplitude e da média e constatar que estavam sob controle, o próximo passo foi implementar a fase II do processo. Para tal, foram coletados no site da CETESB dados da média horária referentes ao poluente MP_{2,5} no mês de março de 2025. Verificou-se, no entanto, que as medições referentes ao dia 11 de março de 2025 estavam incompletas, o que exigiu a exclusão da amostra correspondente. Após essa etapa, foi implementado os limites de controle da fase I, para o monitoramento da fase II.

Foram coletadas trinta amostras adicionais da média horária do poluente MP_{2,5}, calculados a média (\bar{X}), a amplitude (R), a média das médias ($\bar{\bar{X}}$) e a média das amplitudes (\bar{R}) e em seguida os dados foram plotados no gráfico R e no gráfico \bar{X} . O gráfico de controle da amplitude é ilustrado pela figura 7.

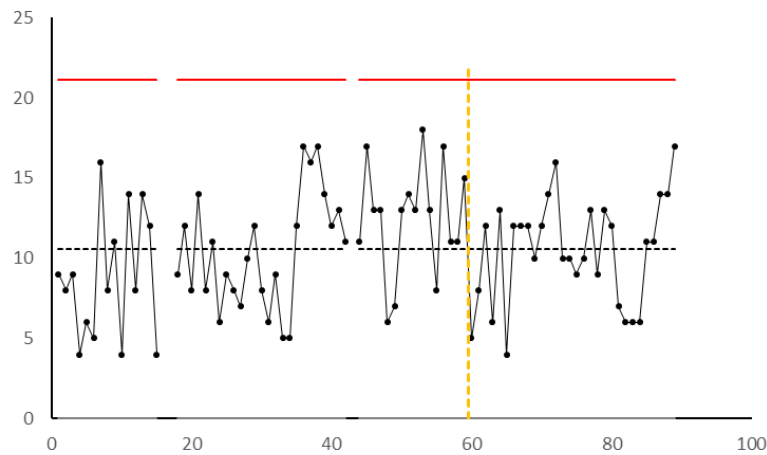


Figura 7. Gráfico de controle R para o monitoramento da fase II.
Fonte: Elaborado pelos autores.

O gráfico da amplitude, mostrado na figura 7, indica que o processo estava sob controle.

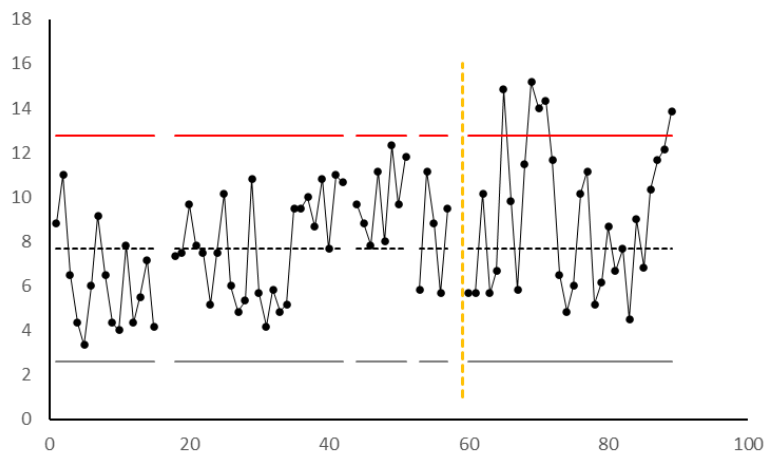


Figura 8. Gráfico de controle \bar{X} para o monitoramento da fase II.
Fonte: Elaborado pelos autores.

Entretanto, observou-se no gráfico de controle da média, figura 8, que as amostras 6ª, 10ª, 11ª, 12ª e 30ª estavam acima do limite de controle.

Verificou-se que os pontos acima do limite de controle correspondem aos dias 06, 10, 12, 13 e 31 de março de 2025. O dia 06 de março é uma quinta-feira, após o feriado de Carnaval, o que pode demonstrar uma relação com a movimentação de veículos retornando para a cidade de origem. Quanto ao intervalo de 10 a 13 de março, indica que ainda pode haver resquícios de $MP_{2,5}$ no ar, uma vez que não há um tempo fixo para sua dispersão e permanência. Mesmo não

havendo uma correlação direta, fatores como o tráfego de veículos, emissão de poluentes industriais, uma vez que a cidade de Taubaté possui muitas empresas de característica industrial ativas, queimadas de origem desconhecida, atividades agrícolas e construção civil elevam significativamente os índices de concentração do poluente.

Dado que o processo se encontra fora de controle, fica evidente a necessidade de os órgãos competentes realizarem uma investigação para identificar a causa do deslocamento da média e, desse modo, buscar medidas preventivas e corretivas.

5. Conclusões

Este estudo teve como objetivo a análise da qualidade do ar na cidade de Taubaté – SP, sob observação do poluente $MP_{2,5}$. Para monitorar o nível de poluição atmosférica causado por partículas inaláveis finas foi aplicada a ferramenta CEP (Controle Estatístico de Processos), por meio da utilização dos gráficos de controle.

Diante do estudo realizado, identificou-se que as concentrações do poluente $MP_{2,5}$ estiveram na maior parte do tempo dentro dos limites de controle, entretanto como é possível verificar na figura 8, o gráfico de controle da média apresentou cinco pontos acima do limite de controle. Essas observações correspondem aos dias 06, 10, 12, 13 e 31 de março de 2025. Com os gráficos de controle de \bar{X} e R foi possível identificar a presença de causas especiais que afetaram o comportamento do processo nesses dias.

Percebe-se que os gráficos de controle utilizados na pesquisa foram eficientes para detectar variações na emissão do poluente $MP_{2,5}$, na cidade de Taubaté. A aplicação dos gráficos de controle da amplitude (R) e da média (\bar{X}), durante o período analisado, possibilitou identificar amostras que estavam fora dos limites de controle estabelecidos. Essas variações indicaram momentos em que o processo esteve fora de controle estatístico, evidenciando a presença de causas especiais.

Na fase II, ao monitorar os dados do mês de março de 2025, foi possível verificar que cinco amostras (dias 06, 10, 12, 13 e 31 de março) estavam acima do limite de controle no gráfico da média, o que aponta que houve, de fato, emissão de poluentes acima do esperado. Essas observações podem estar associadas a possíveis fatores externos, como tráfego intenso

após o feriado de Carnaval, resquícios de poluentes acumulados, além de atividade industriais na cidade.

Apesar de os gráficos apontarem que, na maior parte do tempo, os níveis de MP_{2,5} estavam dentro dos padrões aceitáveis, a identificação clara de pontos fora dos limites demonstra a eficácia do Controle Estatístico de Processos (CEP) como ferramenta de monitoramento ambiental. Além disso, a análise pode contribuir para que os órgãos responsáveis tomem decisões rápidas e fundamentadas em dados.

Embora o estudo não tenha identificado diretamente as causas específicas dos picos nos dias em que o processo estava fora de controle, há indícios que o aumento na circulação de veículos, as atividades industriais possam ter contribuído para que os pontos ficassem acima do limite desejável. Diante disso, é importante que os órgãos públicos considerem o uso de ferramentas de qualidade para aprofundar essa análise.

Por exemplo, o Diagrama de Pareto (80/20) pode auxiliar na identificação das causas mais frequentes e impactantes na variação da qualidade do ar, facilitando a priorização de ações corretivas. Já o Diagrama de causa e efeito (Ishikawa) pode ajudar no mapeamento de possíveis causas que influenciam a emissão de MP_{2,5} categorizando-as em fatores como a grande circulação de veículos sem manutenção ou com alta emissão de poluentes, fiscalização ambiental deficiente e condições climáticas desfavoráveis. A visualização dessas possíveis causas pode contribuir para orientar nas ações corretivas e preventivas, auxiliando os gestores e órgãos públicos na elaboração de políticas mais eficazes para o controle da poluição atmosférica. Além disso, o Gráfico de Dispersão pode ser usado para verificar a correlação entre o nível de poluentes e variáveis como fluxo de veículos, atividade industrial, entre outros.

Referências

ATALAY, M.; TESTIK, M. C.; DURAN, S.; WEIß, C. H. Guidelines for automating Phase I of control charts by considering effects on Phase-II performance of individuals control chart. *Quality Engineering*, v. 32, n. 2, p. 223-243, 2019.

CETESB. 2025. Qualidade do Ar. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/>. Acesso em: 30 jul. de 2025.

CORÁ, B.; LEIRIÃO, L. F. L.; MIRAGLIA, S. G. K. Impacto da poluição do ar na saúde pública em municípios com elevada industrialização no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, Rio de Janeiro, v. 55, n. 4, p. 498–509, 2020

COSTA, A.F.B.; EPPRECHT E.K.; CARPINETTI, L.C.R. **Controle estatístico de qualidade**. 2. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2005.

CURADO, A. L.; SANTOS, C. E. D.; ANHÊ, A. C. B. M.; TAKAYANAGUI, A. M. M.; SENHUK, A. P. M. S. Impactos da exposição à poluição ambiental sobre a saúde dos brasileiros: uma revisão sistemática. **Ensino, Saúde e Ambiente**, v. 15, n. 2, p. 282–302, 2022.

DEMING, W. E. **Qualidade: a revolução da administração**. 2. ed. Rio de Janeiro: Marques Saraiva, 1990.

DOURADO, T. A. **Avaliação do teor de metais em material particulado MP2,5 e MP10 na cidade de Goiânia - GO e Rio Claro - SP empregando a técnica de fluorescência de raios X dispersiva em energia (EDXRF)**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro.

DWILAKSANA, A. D.; IRIAWAN, N.; MASHURI, M. On the Flexible Neo-Normal MSAR MSN-Burr Control Chart in Air Quality Monitoring. **Air, Soil and Water Research**, v. 17, p. 1–15, 2024.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6.ed. São Paulo: Atlas S.A, 2008.

JURAN, J. M. **Juran na liderança pela qualidade: um guia para executivos**. São Paulo: Pioneira, 1992.

LINS, E. A. M.; OLIVEIRA, E. N. G.; CARVALHO, A. P. O. P.; CAVALCATI, F. M.; GALINDO, L. C. L. Análise histórica e comparativa da qualidade do ar no complexo industrial de Suape - PE. *In: XV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental*, 2024.

MANCHA, A.; SERRÃO, L.; MENEZES-FILHO, N. A. When the streets have no men: urban traffic restrictions and air pollution. **Revista Brasileira de Economia**, Rio de Janeiro, v. 78, n. 2, 2024.

MENDES, A. S. **Gráficos de controle fuzzy intuicionistas: uma abordagem utilizando software R**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, SP, 2023.

MONTGOMERY, D.C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 7a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

OMS. Organização Mundial da Saúde 2025. Disponível em: <https://www.who.int/>. Acessado em: 30 jul. 2025.

SAMOHYL, Robert Wayne. **Controle estatístico de qualidade**. São Paulo: Elsevier, 2009.

SANTOS, F. S.; PINTO, J. A.; MACIEL, F. M.; HORTA, F. S.; ALBUQUERQUE, T. T. A.; ANDRADE, M. F. Avaliação da influência das condições meteorológicas na concentração de material particulado fino (MP_{2,5}) em Belo Horizonte, MG. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, p. 371–381, 2019.

SANTOS, O. N.; HOINASKI, L. Incorporating gridded concentration data in air pollution back trajectories analysis for source identification. **Atmospheric Research**, v. 263, art. 105820, 2021.

SILVA, D. R. R.; SUEMOTO, C. K.; GOUVEIA, N. Poluentes do ar como fator de risco para o desempenho cognitivo e demência. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 35, n. 9, 2019.

WAN, Q.; ZHUN, M. Optimal design of an improved X-bar and R control chart for joint monitoring of process location and dispersion. **Measurement and Control**, [S.l.], v. 54, n. 1, p. 1–15, 2021.