

Tese apresentada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, Área de Infraestrutura Aeroportuária.

José Carlos de Moura Xavier

**ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE DA REDE
AUTOMÁTICA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE
DO AR E SEUS REFLEXOS NO LICENCIAMENTO
AMBIENTAL REALIZADO EM SÃO PAULO**

Tese aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:



Prof. Dr. Wilson Cabral de Sousa Junior
Orientador

Prof. Dr. Celso Massaki Hirata
Pró-Reitor de Pós-Graduação e Pesquisa

Campo Montenegro
São José dos Campos, SP – Brasil
2011

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

Xavier, José Carlos de Moura

Análise da disponibilidade da rede automática de monitoramento da qualidade do ar e seus reflexos no licenciamento ambiental realizado em São Paulo / José Carlos de Moura Xavier

São José dos Campos, 2011.

123f.

Tese de mestrado – Curso de Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, Área de Infraestrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2011. Orientador: Dr. Wilson Cabral de Sousa Junior.

1. monitoramento da qualidade do ar. 2. sistema reparável. 3. taxa de ocorrência de falhas. 4. número esperado de falhas. 5. disponibilidade. I. Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Análise da disponibilidade da rede automática de monitoramento da qualidade do ar e seus reflexos no licenciamento ambiental realizado em São Paulo.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA –

XAVIER, José Carlos de Moura. **Análise da disponibilidade da rede automática de monitoramento da qualidade do ar e seus reflexos no licenciamento ambiental realizado em São Paulo.** 2011. 123f. Tese de mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS –

NOME DO AUTOR: José Carlos de Moura Xavier

TÍTULO DO TRABALHO: Análise da disponibilidade da rede automática de monitoramento da qualidade do ar e seus reflexos no licenciamento ambiental realizado em São Paulo.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Tese / 2011

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta tese e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese pode ser reproduzida sem a sua autorização.

José Carlos de Moura Xavier

Rua Alfredo Zunkeller, 117, apto. 41, CEP: 02421-070. Parque Mandaqui, São Paulo, SP

**ANÁLISE DA DISPONIBILIDADE DA REDE
AUTOMÁTICA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE
DO AR E SEUS REFLEXOS NO LICENCIAMENTO
AMBIENTAL REALIZADO EM SÃO PAULO**

José Carlos de Moura Xavier

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr.	Marcelo De Julio	Presidente	ITA
Prof. Dr.	Wilson Cabral de Sousa Junior	Orientador	ITA
Prof. Dr.	Irany de Andrade Azevedo	Membro interno	ITA
Prof. Dr.	João Vicente de Assunção	Membro externo	USP

ITA

Dedicatória

À Laís, minha filha, meu encanto. A você ...

Agradecimentos

Certamente há muitos a quem agradecer: amigos, colegas, professores, mestres ... os daqui da Terra e aqueles lá do Céu. Mesmo sem mencionar nomes, sou profundamente agradecido por cada palavra, gesto, olhar em apoio ou crítica.

Contudo, há pessoas que tem “responsabilidade” direta pelo final deste ciclo. A eles, meu agradecimento especial, respeitoso e ciente de que contribuíram significativamente para este trabalho.

Inicialmente agradeço ao Professor Irany de Andrade Azevedo, que, lá pelo início de 2007, respondeu a uma mensagem eletrônica na qual eu procurava orientação sobre suas disciplinas de confiabilidade ministradas no ITA. Além das informações de visão e conteúdo das disciplinas, recebi as primeiras dicas sobre como cursar disciplinas isoladas e, no futuro, incorporá-las ao Mestrado. A porta tinha se aberto naquele momento.

Quando decidi que me candidataria a uma vaga no Mestrado, procurei o Professor Wilson Cabral de Sousa Junior e pedi que me orientasse. Conversamos muito e, tenho certeza, o Professor Wilson encarou a orientação como um desafio. Meu profundo agradecimento por tê-lo aceitado.

Por fim, já durante o trabalho de campo, tive o privilégio de contar com o apoio do engenheiro Augusto Nishikawa, do Setor de Telemetria da CETESB, sempre disposto a responder minhas perguntas sobre a rede de monitoramento da qualidade do ar, seus equipamentos, resultados, registros de manutenção, entre outros. Seria impossível, em tão pouco tempo, conhecer o mínimo necessário para desenvolver esta dissertação sem a contribuição do Augusto, a quem sinceramente agradeço.

Resumo

A qualidade do ar no estado de São Paulo é acompanhada pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) por meio de uma rede de monitoramento das concentrações de CO, SO₂, NO_x, O₃ e material particulado, com o objetivo primordial de proteger a saúde humana. Falhas nesse acompanhamento podem reduzir a disponibilidade da rede e comprometer as estratégias da CETESB associadas à preservação da qualidade ambiental, entre elas a qualificação de municípios quanto ao grau de saturação da qualidade do ar. Este trabalho realiza um estudo analítico sobre a disponibilidade rede automática de monitoramento e seus reflexos no licenciamento ambiental realizado pela CETESB, bem como discute a possibilidade de melhoria da informação prestada à sociedade baseada no aumento dessa disponibilidade. Encontrou-se entre 1998 a 2008 valores de disponibilidade média próximos a 80%, sendo que esse nível possivelmente influenciou na qualificação de alguns municípios, classificados como *saturado* quando o plausível seria *em vias de saturação*, ou classificados como *em vias de saturação* ao invés de *não saturado*. Os reflexos dessa qualificação poderão ser observados no licenciamento ambiental de fontes de poluentes atmosféricos pela necessidade da compensação das emissões em municípios qualificados como *saturado* ou *em vias de saturação*. A disponibilidade média encontrada decorre predominantemente de falhas dos monitores de SO₂, NO_x e MP₁₀ e de falhas de infraestrutura da rede automática, razão pela qual aperfeiçoar o programa de manutenção dos monitores e implantar um programa para os equipamentos de infraestrutura são algumas das recomendações que objetivam aumentar a disponibilidade para cerca de 88% e minimizar sua interferência na qualificação dos municípios quanto ao grau de saturação da qualidade do ar.

Palavras – chave: monitoramento da qualidade do ar, sistema reparável, taxa de ocorrência de falhas, número esperado de falhas, disponibilidade

Abstract

In São Paulo State, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) is responsible for monitoring air quality, based on network keeping continuous track of CO, SO₂, NO_x, O₃ and particulate matter concentrations, primarily in order to protect human health. CETESB's network availability may be reduced by equipment failures and its environmental quality preservation strategies, amongst them qualification of municipalities with regard to air quality saturation degree, may be jeopardized. An analytical study about the monitoring automatic network and its consequences on CETESB's environmental licensing process is conducted, as well as a discussion about information improvements offered to society based on its availability increasing. During the period from 1998 to 2008, this study found that network average availability is about 80% and, based on this availability level, some municipalities were probably classified as *saturated* when the plausible would be *almost saturated*. Others were classified as *almost saturated* instead of *unsaturated*. Consequences of this qualification may be observed in the licensing process of atmospheric pollutant emission sources with respect to emission compensations requirements for industries located in municipalities qualified as *saturated* and *almost saturated*. Since results of average availability are based on failures in SO₂, NO_x and PM₁₀'s monitors, as well as in the automatic network's infrastructure, improvements in the monitoring equipment maintenance program and the implementation of an infrastructure equipment maintenance program are some recommendations which intend both to increase network availability up to 88% and to minimize its interference in the municipalities' air quality saturation degree qualifications.

Keywords: air quality monitoring, repairable system, rate of occurrence of failures, expected number of failures, availability

Lista de Figuras e Quadros

Figura 1.1	(a) MP_{10} – Médias diárias máximas da RMSP, rede automática, 2006; (b) MP_{10} – Médias diárias máximas no interior e Cubatão, redes automática e manual, 2006	23
Figura 1.2	Fumaça – Evolução das concentrações médias nos municípios de Araraquara, Ribeirão Preto, São Carlos e Franca	24
Figura 2.1	Representação de um processo estocástico pontual com (a) número de falhas $N(t)$, (b) tempo de ocorrências das falhas $T(t)$ e (c) intervalo entre falhas $X(t)$	29
Figura 2.2	Composição dos tempos de um sistema reparável	30
Figura 3.1	Localização das estações da rede automática em 2008	55
Figura 3.2	Estação automática de monitoramento da qualidade do ar instalada em Presidente Prudente	56
Figura 3.3	Configuração de uma estação automática	57
Figura 3.4	Equipamentos de monitoramento de (a) ozônio, (b) óxidos de nitrogênio ..	57
Figura 3.5	Equipamentos de apoio: (a) microcomputador, (b) ar condicionado	57
Figura 3.6	Representação esquemática do monitores de dióxido de enxofre 43B e 43C	59
Figura 3.7	Representação esquemática dos monitores de partículas inaláveis Kr-85 e C14	60
Figura 3.8	Representação esquemática dos monitores de monóxido de carbono 48B e 48C	61
Figura 3.9	Representação esquemática dos monitores de ozônio 49B e 49C	62
Figura 3.10	Representação esquemática dos monitores de óxidos de nitrogênio 42B e 42C	63
Figura 3.11	Representação esquemática dos multicalibradores 146B e 146C	64
Figura 3.12	Representação esquemática dos purificadores de ar Philips, API e 111	65
Figura 3.13	Sequência de etapas para análise dos dados de falha dos monitores	72
Figura 4.1	Sequência de etapas para análise da (in)disponibilidade da rede automática, a influência na qualificação de municípios quanto à saturação da qualidade do ar e o reflexo no licenciamento ambiental	73

Figura 4.2	Comparação entre os dados das Tabelas 4.2, 4.3 e 4.7 para MP_{10}	79
Figura 4.3	Comparação entre os dados das Tabelas 4.2, 4.3 e 4.7 para NO_2	80
Figura 4.4	Comparação entre os dados das Tabelas 4.2, 4.3 e 4.7 para O_3	80
Figura 4.5	Comparação entre os dados das Tabelas 4.2, 4.3 e 4.7 para CO	80
Figura 4.6	Comparação entre os dados das Tabelas 4.2, 4.3 e 4.7 para SO_2	81
Figura C.1.1	Disposição das falhas do analisador $NO_x - 1703$ ao longo do tempo de operação	113
Figura C.1.2	Plotagem do teste TTT para o analisador $NO_x - 1703$	114
Figura C.2.1	Disposição das falhas do analisador $CO - 1314$ ao longo do tempo de operação	115
Figura C.2.2	Plotagem do teste TTT para o analisador $CO - 1314$	117
Figura C.3.1	Disposição das falhas do analisador $O_3 - 1513$ ao longo do tempo de operação	118
Figura C.3.2	Comportamento de $v_1(t)$ e $v_2(t)$ ao longo do período de operação	120
Figura C.3.3	Estimação de β_0 e β_1 para o sub-período 1	121
Figura C.3.4	Estimação de γ e δ para o sub-período 1	121
Figura C.3.5	Estimação de β_0 e β_1 para o sub-período 2	121
Figura C.3.6	Estimação de γ e δ para o sub-período 2	122
Figura C.3.7	Estimação de β_0 e β_1 para o sub-período 3	122
Figura C.3.8	Estimação de γ e δ para o sub-período 3	123
Quadro 1.1	Poluentes atmosféricos legislados na Resolução CONAMA 03/90	16
Quadro 3.1	Estações que compõem a rede automática em 2008 e os parâmetros monitorados	58
Quadro 3.2	Monitores considerados neste trabalho. Destaque (em azul) para os equipamentos com número de falhas $n \geq 5$ durante o período de observação	71
Quadro 4.1	Critério de representatividade das medições	86

Lista de Tabelas

Tabela 4.1	Porcentagem das estações que não atenderam ao critério de representatividade, por parâmetro monitorado	74
Tabela 4.2	Porcentagem de não atendimento ao critério de representatividade devido às falhas dos monitores	75
Tabela 4.3	Porcentagem de não atendimento ao critério de representatividade devido às falhas de infraestrutura	76
Tabela 4.4	Porcentagem de não atendimento ao critério de representatividade devido às falhas dos monitores e de infraestrutura	76
Tabela 4.5	Porcentagem de não atendimento ao critério de representatividade devido à desqualificação “a posteriori” da medição	77
Tabela 4.6	Porcentagem de não atendimento ao critério de representatividade devido à ausência de operação da estação em parte do ano	78
Tabela 4.7	Porcentagem das estações que estiveram operacionais e que não atenderam ao critério de representatividade	79
Tabela 4.8	Indisponibilidade da rede automática devida às falhas dos monitores – dados agrupados	83
Tabela 4.9	Indisponibilidade da rede automática devida às falhas de infraestrutura – dados agrupados	83
Tabela 4.10	Valores mínimo, médio e máximo da indisponibilidade da rede automática da CETESB, por parâmetro	83
Tabela 4.11	Indisponibilidade da rede automática do Environment Canada	84
Tabela 4.12	Indisponibilidade da rede automática no Reino Unido	85
Tabela 4.13	Valores mínimo, médio e máximo da indisponibilidade da rede automática do Environment Canada, por parâmetro	86
Tabela 4.14	Valores mínimo, médio e máximo da indisponibilidade da rede automática dos Órgãos Ambientais do Reino Unido, por parâmetro	86
Tabela 4.15	Estimativa ROCOF no período de observação $[0, t_0)$ e do $E\{N(t)\}$ no período $(t_0, t_0+8760h)$ para monitores com $n \geq 5$	88
Tabela 4.16	Saturação para os poluentes legislados com monitoramento automático	93
Tabela 4.17	Classificação de saturação da sub-região por MP_{10} (longo prazo)	94
Tabela 4.18	Classificação de saturação da sub-região por O_3 (curto prazo)	95

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
OMS	Organização Mundial da Saúde
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
UGRHI	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
USEPA	United States Environmental Protection Agency ou Agência Ambiental Norte Americana
WHO	World Health Organization

Sumário

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 O PROBLEMA E A HIPÓTESE DE TRABALHO	17
1.1.1 Medições da qualidade do ar e reflexos nas ações da CETESB	17
1.2 OBJETIVOS	24
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	24
2 DISCUSSÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 SISTEMAS REPARÁVEIS E PROCESSOS ESTOCÁSTICOS PONTUAIS	27
2.2 O PROCESSO DE POISSON	32
2.2.1 Propriedades do processo de Poisson	36
2.3 ESTIMATIVA PARAMÉTRICA POR MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA	37
2.3.1 Função verossimilhança	38
2.4 PROCESSO DE POISSON HOMOGÊNEO (HPP)	38
2.4.1 Estimação dos parâmetros do HPP	39
2.5 PROCESSO DE RENOVAÇÃO (RP)	40
2.5.1 Estimação dos parâmetros da distribuição de Weibull	40
2.6 PROCESSO DE POISSON NÃO HOMOGÊNEO (NHPP)	41
2.6.1 Estimação dos parâmetros do NHPP	42
2.6.2 Escolha do modelo para ROCOF	44
2.7 ANÁLISE DA TENDÊNCIA DOS INTERVALOS ENTRE FALHAS	46
2.8 PREVISÃO DO NÚMERO FUTURO DE FALHAS COM HPP, RP OU NHPP ...	49
2.9 DISPONIBILIDADE (DE SISTEMAS REPARÁVEIS)	49
3 MATERIAL E MÉTODOS	52
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO	52
3.1.1 Rede de estações automáticas	53

3.2 MÉTODOS	65
3.2.1 Representatividade das medições	65
3.2.2 Atributos de confiabilidade da rede automática	67
3.2.3 Influências decorrentes da ausência de medições	69
3.2.4 Reflexos no processo de decisão	69
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
4.1 DISPONIBILIDADE E O CRITÉRIO DE REPRESENTATIVIDADE	73
4.2 TAXA DE OCORRÊNCIA DE FALHAS E NÚMERO ESPERADO DE FALHAS	86
4.3 A DISPONIBILIDADE E O LICENCIAMENTO AMBIENTAL	91
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	97
REFERÊNCIAS	99
APÊNDICE A – Estações que não atenderam ao critério de representatividade, por parâmetro, no período de 1998 a 2008	104
APÊNDICE B – Exemplo de planilha para registrar as causas de interrupção das medições, por estação e parâmetro, 2006	108
APÊNDICE C – Estimativa da ROCOF e do $E\{N(t)\}$ a partir dos tempos de falha dos monitores	112

1 INTRODUÇÃO

Na atmosfera estão presentes elementos essenciais à vida dos homens, animais, plantas e outros organismos como o oxigênio, o gás carbônico, o nitrogênio e a água. Estão presentes também substâncias indesejadas, em geral provenientes da atividade antrópica, sobretudo originárias da queima de combustíveis fósseis, cujo objetivo primordial é oferecer energia para diversos fins, entre eles o aquecimento doméstico, a atividade industrial e a movimentação de veículos automotores.

Álvares Jr., O. M.; Lacava, C. I. V.; Fernandes, P. S. (2002, p. 23) mencionam o uso do carvão como fonte de energia e iniciativas de minimização da poluição atmosférica oriunda da sua queima já no século XIII. Também mencionam relatos de efeitos adversos à saúde a partir da inalação de alcatrão presente nas emissões desse combustível, no século XVIII, na Europa. Daí por diante, fruto da evidente relação de causa e efeito entre as emissões de poluentes atmosféricos e os efeitos deletérios à saúde humana, observou-se iniciativas governamentais no sentido de estabelecer regulamentações associadas ao controle e à minimização dessas emissões.

A Organização Mundial da Saúde (OMS) atribui à poluição atmosférica externa e interna às residências – aquela causada pela queima de combustíveis sólidos – mais de dois milhões de mortes prematuras a cada ano, sendo que mais da metade em populações de países em desenvolvimento (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2002).

Nos Estados Unidos da América os efeitos adversos decorrentes do intenso processo de industrialização na saúde da população e na estética das cidades motivou regulamentações para o controle das emissões desde o final do século XIX, que se estenderam até a atualidade, com marcos como a promulgação do Ato do Ar Limpo (*Clean Air Act*), em 1963, o qual estipulou padrões de emissão para veículos automotores (ÁLVARES JR., O. M.; LACAVA, C. I. V.; FERNANDES, P. S., 2002).

Emendas ao Ato, promulgadas nos anos seguintes, estabeleceram, entre outros, alguns poluentes de referência (*criteria air pollutants*) e seus padrões de qualidade. Para o dióxido de enxofre (SO₂), ozônio (O₃), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO), material particulado (MP) e chumbo (Pb), poluentes que podem provocar efeitos adversos à saúde humana e ao bem estar social, foram estabelecidos limites de concentrações, com o objetivo da proteção da vida (ÁLVARES JR., O. M.; LACAVAL, C. I. V.; FERNANDES, P. S., 2002).

No Brasil, padrões de qualidade do ar e os respectivos métodos de referência foram estabelecidos pela Portaria Normativa nº 348, de 14.03.1990 do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), que os submeteu ao Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), tendo sido fixados em legislação de abrangência nacional pela Resolução CONAMA 03/90. O Quadro 1.1 apresenta os poluentes, os padrões e os métodos de medição citados na Resolução, bem como aqueles atualmente adotados pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo¹ (CETESB), órgão ambiental paulista.

Quadro 1.1 Poluentes atmosféricos legislados na Resolução CONAMA 03/90

Poluente	Padrão primário (^a) (µg/m³)	Método de medição (Resolução CONAMA 03/90)	Método de medição (CETESB)
Partículas totais em suspensão (PTS)	80	Amostrador de grandes volumes	Gravimétrico/amostrador de grandes volumes
Partículas inaláveis (MP ₁₀)	50	Separação inercial/filtração	Radiação beta
Fumaça (FMC)	60	Refletância	Refletância
Dióxido de enxofre (SO ₂)	80	Pararosanilina	Fluorescência de pulso (ultravioleta)
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	100	Quimiluminescência	Quimiluminescência
Monóxido de carbono (CO)	40000 (1h de amostragem) ^{(b), (c)} 10000 (8h de amostragem) ^{(b), (d)}	Infravermelho não dispersivo	Infravermelho não dispersivo
Ozônio (O ₃)	160 ^(b)	Quimiluminescência	Ultravioleta

Fonte: modificada de CETESB, 2009

(a) refere-se à concentração que, se ultrapassada, pode afetar a saúde da população

(b) refere-se ao padrão de curto prazo; (c) equivale a 35 ppm; (d) equivale a 9 ppm

¹ Denominação vigente a partir de 07.08.2009, determinada por meio da Lei nº 13.542, de 08.05.2009. A denominação anterior era Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB).

No estado de São Paulo, a medição da qualidade do ar e a interpretação dos resultados, consideradas conjuntamente como sinônimo de monitoramento, são realizadas desde 1973 pela CETESB, por meio de redes manual e automática que acompanham regularmente as concentrações de poluentes atmosféricos, predominantemente nas regiões urbanizadas dos municípios com mais de 500.000 habitantes, ou ainda em municípios altamente industrializados como Cubatão e Paulínia.

A divulgação dos resultados do monitoramento se dá por meio da disponibilização na rede internacional de comunicação (internet) das medições em tempo real e de boletins diários, também enviados aos órgãos de comunicação, com o resumo das condições da poluição atmosférica nas últimas 24 horas. Também é emitido anualmente um relatório que reflete a evolução da qualidade do ar no Estado, além de relatórios que retratam diagnósticos individualizados, por município.

O monitoramento permite ao Órgão Ambiental: (a) informar a população sobre a qualidade do ar que ela respira e adotar, quando for o caso, medidas de proteção à saúde; (b) conscientizar a população sobre medidas que ajudem a reduzir a poluição do ar; (c) fornecer informações que possam auxiliar na implantação de programas de controle das principais fontes de emissão; (d) tomar decisões no licenciamento de fontes emissoras de poluentes atmosféricos e na fiscalização e controle de fontes de poluição, em especial em regiões industrializadas; (e) prover os órgãos públicos, sobretudo os de saúde, de informações de qualidade do ar que permitam avaliar os efeitos na saúde da população; (f) avaliar a tendência de aumento ou diminuição dos poluentes a longo prazo e (g) fornecer informações para o planejamento do uso do solo e planejamento urbano (CETESB, 2009).

Entretanto, falhas no funcionamento das redes de monitoramento, quando em número significativo, diminuem a quantidade de dados medidos, com possível interferência nos resultados das ações (a) a (g) anteriormente citadas. Em particular, decisões associadas às

regiões saturadas por poluentes atmosféricos e as restrições ao licenciamento de novas fontes de poluição – objeto de regulamentação por meio dos Decretos Estaduais nº 48.523/04, nº 50.753/06 e nº 52.469/07 – podem ser influenciadas pela quantidade de medições.

1.1 O PROBLEMA E A HIPÓTESE DE TRABALHO

Anteriormente indicou-se possíveis ações do Órgão Ambiental de São Paulo decorrentes do monitoramento da qualidade do ar. Dessas, este trabalho destaca aquela referente às decisões no licenciamento de fontes emissoras de poluentes atmosféricos e na fiscalização e controle de fontes de poluição, sobretudo em regiões industrializadas, e como esta ação pode ser influenciada pela disponibilidade da rede de monitoramento, particularmente a automática. Trata-se, pois, de examinar com maior detalhe como a redução na quantidade de medições – cuja geração é de responsabilidade do Órgão – pode interferir no licenciamento ambiental de um empreendimento, em geral industrial.

1.1.1 Medição da qualidade do ar e reflexos nas ações da CETESB

A informação sobre a qualidade do ar, disponibilizada diariamente, decorre do monitoramento das concentrações ambientais dos poluentes e parâmetros meteorológicos medidos na atmosfera por equipamentos presentes em estações instaladas em regiões urbanizadas como a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), Campinas, Sorocaba e São José dos Campos, regiões industrializadas de Cubatão e Paulínia, além de regiões de expansão agroindustrial como Araçatuba, Presidente Prudente ou São José do Rio Preto.

Fumaça (FMC), partículas inaláveis (MP_{10}), partículas totais em suspensão (PTS), ozônio (O_3), dióxido de enxofre (SO_2), monóxido de carbono (CO) e dióxido de nitrogênio (NO_2) são os poluentes regulamentados monitorados, cujo comportamento das concentrações é apresentado anualmente em relatório publicado pela CETESB. A informação correta é dependente do funcionamento adequado das estações e, em particular, dos equipamentos de medição desses poluentes.

Minimizar interrupções no funcionamento das estações e equipamentos pode interferir positivamente na qualidade dessa informação, oferecendo melhores subsídios para decisões do Órgão Ambiental quando do licenciamento de fontes potencialmente poluidoras da atmosfera. Esse enfoque será melhor explorado na sequência.

1.1.1.1 A legislação sobre saturação da qualidade do ar

Os Decretos Estaduais nº 48.523, de 02.03.2004, nº 50.753, de 28.04.2006, e nº 52.469, de 12.12.2007, estabelecem critério para a determinação do grau de saturação da qualidade do ar dos municípios abrangidos pela rede de monitoramento da CETESB e a qualificação desses em termos de severidade. Aplicado o critério, o município pode ser classificado como *não saturado (NS)*, *em vias de saturação (EVS)* ou *saturado (SAT)*. O objetivo é estabelecer regramento para o licenciamento ambiental de fontes de poluição, “[...] com base nas metas, planos e programas de prevenção e controle da poluição”, tendo por base a classificação mencionada (CETESB, 2008, p. 189). De forma geral, pode-se dizer que para que uma nova fonte se estabeleça em região SAT ou EVS é necessário comprovar que o empreendedor promoverá a redução das emissões em quantidade minimamente igual àquela emitida pela nova fonte (CETESB, 2008).

A título de exemplo, evidenciando o critério citado, transcreve-se a seguir a nova redação do artigo 23 e parte do parágrafo primeiro do regulamento da Lei Estadual nº 997, de 31.05.1976, aprovado pelo Decreto Estadual nº 8468, de 08.09.1976, dada pelo Decreto Estadual nº 52.469.

Artigo 23 - Determina-se o grau de saturação da qualidade do ar de uma subregião quanto a um poluente específico, cotejando-se concentrações verificadas nos últimos 3(três) anos com os Padrões de Qualidade do Ar (PQAR) estabelecidos no artigo 29 deste regulamento e na Resolução CONAMA nº 3/90 ou regulamentação correlata superveniente.

§ 1º - As sub-regiões a que se refere este artigo serão classificadas de acordo com os seguintes critérios:

1. Para exposição de longo prazo:

a) sub-regiões com 3 (três) anos representativos:

1. saturada (SAT): média aritmética das médias anuais dos últimos 3 (três) anos maior que o PQAR;
 2. em Vias de Saturação (EVS): média aritmética das médias anuais dos últimos 3 (três) anos maior que 90% (noventa por cento) do PQAR;
 3. não Saturada (NS): média aritmética das médias anuais dos últimos 3 (três) anos menor ou igual a 90% (noventa por cento) do PQAR.
- b) sub-regiões com 2 (dois) anos representativos:
1. SAT: média aritmética das médias anuais dos 2 (dois) anos maior que 90% (noventa por cento) do PQAR;
 2. EVS: média aritmética das médias anuais dos 2 (dois) anos maior que 80% (oitenta por cento) do PQAR;
 3. NS: média aritmética das médias anuais dos 2 (dois) anos menor ou igual a 80% (oitenta por cento) do PQAR.
- c) sub-regiões com 1 (um) ano representativo:
1. SAT: média anual maior que 90% (noventa por cento) do PQAR;
 2. EVS: média anual maior que 80% (oitenta por cento) do PQAR;
 3. NS: média anual menor ou igual a 80% (oitenta por cento) do PQAR.
2. **Para exposição de curto prazo:**
- a) sub-regiões com 3 (três) anos representativos:
1. SAT: 4º maior valor diário dos últimos 3 (três) anos maior que o PQAR;
 2. EVS: 3º maior valor diário dos últimos 3 (três) anos maior que 90% (noventa por cento) do PQAR;
 3. NS: 3º maior valor diário dos últimos 3 (três) anos menor ou igual a 90% (noventa por cento) do PQAR.
- b) sub-regiões com 2 (dois) anos representativos:
1. SAT: 3º maior valor diário dos últimos 3 (três) anos maior que o PQAR;
 2. EVS: 2º maior valor diário dos últimos 3 (três) anos maior que 90% (noventa por cento) do PQAR;
 3. NS: 2º maior valor diário dos últimos 3 (três) anos menor ou igual a 90% (noventa por cento) do PQAR.
- c) sub-regiões com 1 (um) ano representativo:
1. SAT: 2º maior valor diário dos últimos 3 (três) anos maior que o PQAR;
 2. EVS: 1º maior valor diário dos últimos 3 (três) anos maior que 90% (noventa por cento) do PQAR;
 3. NS: 1º maior valor diário dos últimos 3 (três) anos menor ou igual a 90% (noventa por cento) do PQAR.
- d) sub-regiões com nenhum ano representativo:
1. SAT: 2º maior valor diário dos últimos 3 (três) anos maior que o PQAR;
 2. EVS: 1º maior valor diário dos últimos 3 (três) anos maior que 90% (noventa por cento) do PQAR;
 3. Onde não se aplicarem as disposições anteriores por ausência de dados de monitoramento, a CETESB poderá propor a classificação das sub-regiões quanto ao grau de saturação com base nos dados disponíveis sobre as fontes fixas já instaladas e as fontes móveis em circulação nas características da região e, se necessário, no uso de modelos de dispersão (SÃO PAULO, 2007).

Observa-se que o critério é fortemente dependente da disponibilidade dos dados (ou medições) gerados pelas estações de monitoramento manuais e automáticas, requerendo períodos de medição de três anos sucessivos para o estabelecimento dos graus de saturação. Caso as medições estejam disponíveis por períodos menores, o critério prevê valores mais restritivos para o estabelecimento do grau de saturação.

Portanto, dispor de medições válidas para os três anos subsequentemente anteriores ao ano de referência de divulgação da classificação de saturação permite enquadrar a sub-região e seus municípios na faixa menos restritiva do critério (itens a) do citado artigo, minimizando as restrições no licenciamento ambiental de fontes de poluição.

1.1.1.2 A ausência de medições

Ao se analisar os boletins diários de qualidade do ar emitidos pela CETESB no ano de 2008, disponíveis em http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar_boletim_mensal.asp, observa-se que as estações automáticas não operaram de 10 a 15% do tempo, com causas diversas, apontadas no próprio boletim, entre elas falhas nos equipamentos de medição. Consulta pessoal ao Setor de Telemetria da CETESB indicou que alguns equipamentos permaneceram inoperantes por tempo significativo por ausência de peças de reposição e, em alguns casos, por obsolescência.

Como mencionado no item 1.1.1, a informação correta de qualidade do ar é dependente do funcionamento adequado das estações e dos equipamentos de medição. Por funcionamento adequado entende-se: (i) primeiramente funcionar quando necessário, depois (ii) funcionar corretamente e, por fim, (iii) funcionar pelo tempo desejado ou suficiente para manter o dado gerado dentro do critério de representatividade, a seguir apresentado.

CETESB (2007) – relatório anualmente publicado que compila e interpreta informação de qualidade do ar do estado de São Paulo – na página 30, destaca a necessidade de avaliar a representatividade das medições coletadas, indicando que “[...] o não atendimento ao critério [...] para uma determinada estação, em um determinado período, significa que as falhas de medição ocorridas comprometem significativamente o resultado obtido”.

Para as medições realizadas pela rede automática, CETESB (2009) informa o seguinte critério de representatividade dessas medições:

- Média horária válida quando 3/4 das medidas são consideradas válidas na hora;

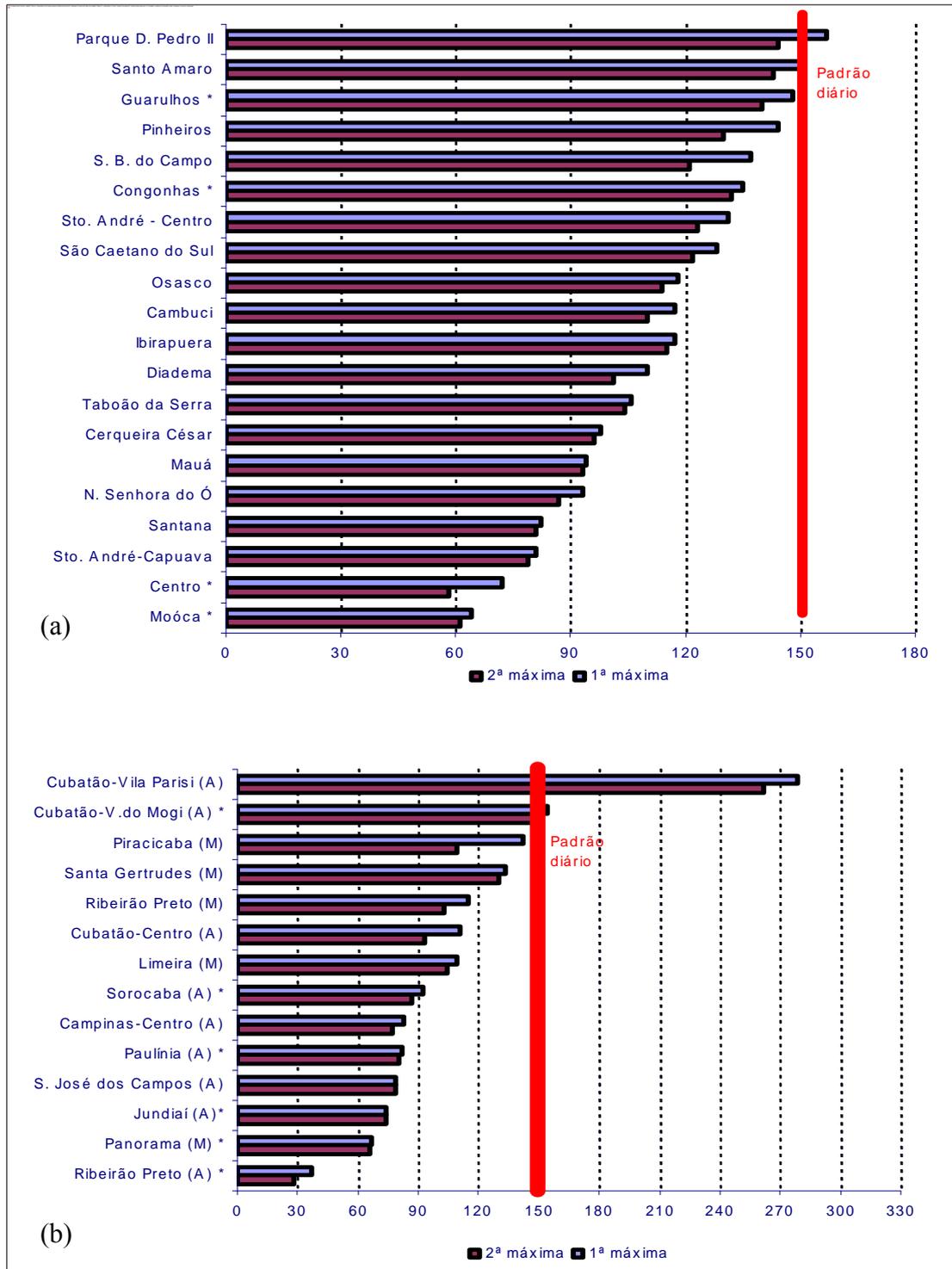
- Média diária válida quando 2/3 das médias horárias são consideradas válidas no dia;
- Média mensal válida quando 2/3 das médias diárias são consideradas válidas no mês;
- Média anual válida quando 1/2 das médias diárias são consideradas válidas para os quadrimestres janeiro-abril, maio-agosto e setembro-dezembro.

O funcionamento intermitente de uma estação e, em particular, de um equipamento de medição pode desqualificar seus dados, com base no critério anterior. Como consequência, processos de decisão como o licenciamento ambiental de um novo empreendimento ou ações de controle das fontes de poluição podem ser comprometidos em razão desta ausência de dados, situação exemplificada e melhor discutida a seguir.

1.1.1.3 A informação no processo de decisão do licenciamento ambiental de fontes

As Figuras 1.1 (a) e 1.1(b) mostram as médias diárias máximas de partículas inaláveis (MP_{10}) na RMSP (rede automática) e no interior e Cubatão (redes automática e manual), respectivamente, em 2006. O padrão de curto prazo é de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em 24h. Na Figura 1.1(a) o padrão foi excedido na estação do Parque Dom Pedro II. As estações automáticas de Guarulhos, Congonhas, Centro e Moóca – destacadas na Figura 1.1(a) com asterisco – não atenderam ao critério de representatividade, ou seja durante o ano houve menos medições representativas (ou válidas) que o mínimo necessário. O valor informado no gráfico, por exemplo para Guarulhos, é a máxima concentração entre aquelas medidas, contudo não se pode afirmar que não haveria outras medições com valores maiores, que eventualmente ultrapassassem o padrão. A Figura 1.1(b), com medições do interior e de Cubatão, também mostra que cinco das nove estações automáticas não atenderam ao critério de representatividade das medições.

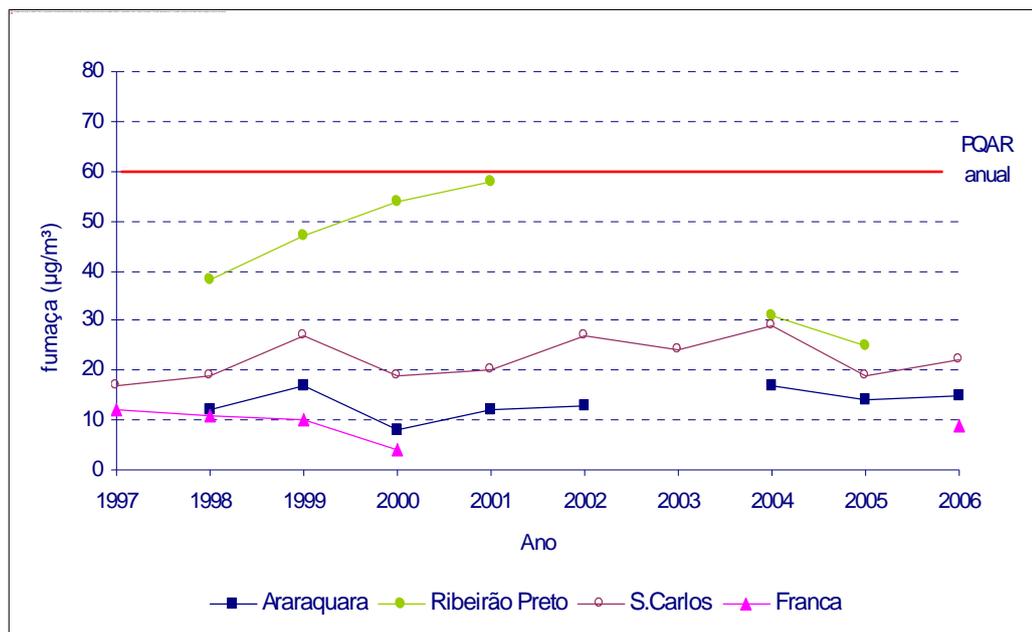
A ausência de medições pode comprometer a informação de poluição levada diariamente à sociedade, sendo que no interior do Estado o efeito pode ser pior, visto haver, na maioria dos casos, apenas uma estação por município monitorado, como mostrado a seguir.



Fonte: CETESB, 2007

Figura 1.1 (a) MP_{10} – Médias diárias máximas da RMSP, rede automática, 2006; (b) MP_{10} – Médias diárias máximas no interior e Cubatão, redes automática e manual, 2006

A Figura 1.2, também proveniente de CETESB (2007), permite discorrer sobre uma hipotética análise de tendência realizada em 2002 para o município de Ribeirão Preto. O comportamento do parâmetro fumaça até o ano de 2001 indicava uma tendência acentuada de alta, com possível ultrapassagem do padrão nos anos de 2002 e 2003. A ausência de medições válidas nesses anos pode ter interferido na tomada de decisões de ações de controle naquele município. Aceitando-se a análise de tendência crescente no processo de tomada de decisão nos anos de 2002 e 2003, provavelmente adotou-se ações restritivas, como, por exemplo, a exigência de maior controle das fontes em licenciamento. As medições validadas em 2004 e 2005 mostraram uma inflexão da curva, agora com tendência decrescente. Assim, no período de 2002 a 2004, com a inversão da tendência observada, decisões equivocadas podem ter sido tomadas decorrentes da ausência da informação sobre o parâmetro Fumaça.



Fonte: CETESB, 2007

Figura 1.2 Fumaça – Evolução das concentrações médias nos municípios de Araraquara, Ribeirão Preto, São Carlos e Franca

Depreende-se dos exemplos anteriores que há uma evidente oportunidade de melhoria das informações de qualidade do ar oferecidas pela CETESB associada à busca para aumentar o tempo em que as estações de monitoramento permanecem em operação.

Sendo assim, pergunta-se:

A informação da qualidade do ar oferecida pela CETESB no período de 1998 a 2008 à população e ao público em geral foi influenciada pela quantidade de medições válidas obtidas a partir da rede automática de monitoramento?

A hipótese apresentada neste trabalho de dissertação é que a disponibilidade da rede automática influenciou na informação prestada no período.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo realizar estudo analítico sobre a disponibilidade da rede automática de monitoramento da qualidade do ar e seus reflexos no licenciamento ambiental realizado pela CETESB. Com base nestes, discutir a possibilidade de melhoria da informação oferecida pelo Órgão Ambiental, tendo por base o aumento dessa disponibilidade.

Objetivos específicos serão alcançados a partir da consecução das etapas do trabalho:

(a) estudar temporalmente os registros de monitoramento da qualidade do ar com foco nos parâmetros e/ou estações em que houve ausência de atendimento do critério de representatividade das medições, (b) buscar evidências de que essa ausência influenciou nos processos de tomada de decisão do Órgão Ambiental quando do licenciamento ambiental de fontes emissoras de poluentes atmosféricos, (c) avaliar a participação dos monitores na disponibilidade da rede automática e (d) correlacionar a disponibilidade encontrada com a qualidade da informação oferecida pelo Órgão Ambiental.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 2 apresenta a base teórica que suportou a realização das etapas (c) e (d) do item 1.2. Nesse capítulo discorre-se sobre (i) análise da tendência dos tempos de falha, (ii) modelos probabilísticos para tratar sistemas reparáveis [tais como o processo de Poisson homogêneo (HPP), o processo de renovação (RP) e o processo de Poisson não homogêneo

(NHPP)], (iii) estimativa da taxa de ocorrência de falhas (ROCOF), (iv) número esperado de falhas e (v) disponibilidade.

No capítulo 3 há a delimitação e a caracterização do objeto de estudo, com a descrição da rede automática quanto à configuração das estações, parâmetros monitorados, equipamentos que as compõem e localização, entre outros. Também se descrevem os métodos empregados para a consecução das etapas (a) a (d) do item 1.2, incluindo a coleta e tratamento dos dados utilizados no estudo de falhas dos monitores e na identificação das estações automáticas e parâmetros que não atenderam o critério de representatividade e que, portanto, tiveram as medições invalidadas ao longo do período de observação.

O capítulo 4 inicialmente aborda o atendimento ao critério de representatividade para os parâmetros monitorados pela rede automática da CETESB, ou, em termos práticos, a disponibilidade dessa rede. A seguir apresenta a estimativa dos atributos de confiabilidade *taxa de ocorrência de falhas e número esperado de falhas* dos equipamentos de medição e calibração que equipam cada estação da rede e discute a influência das falhas dos mesmos na disponibilidade da rede. Ao final, discute-se a influência da disponibilidade estimada da rede nas informações de monitoramento da qualidade do ar e os reflexos na qualificação dos municípios do estado de São Paulo referente à saturação da qualidade do ar e no processo de tomada de decisão envolvendo o licenciamento ambiental de fontes de poluição atmosférica.

Encerra-se o trabalho no capítulo 5 com conclusões e recomendações. Fazem ainda parte as referências consultadas e os apêndices.

2 DISCUSSÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica utilizada na abordagem probabilística de falhas aplicada a sistemas reparáveis para a determinação dos atributos de confiabilidade *taxa de ocorrência de falhas e número esperado de falhas*.

A fundamentação se baseia nos modelos processo de Poisson homogêneo (HPP), processo de renovação (RP) e processo de Poisson não homogêneo (NHPP), que vêm sendo aplicados há pelos menos 40 anos no tratamento estatístico dos tempos de falha de sistemas reparáveis, tal como já discutido na década de 1960 por Cox e Lewis (1966) e Ascher (1968). Com o passar dos anos a literatura mostrou o uso desses modelos em diversas aplicações, além de propostas de modelos híbridos, que incorporam o RP, o NHPP e outros modelos.

Krivtsov (2007) assinou o editorial do periódico *Reliability Engineering & System Safety*, cuja edição especial abordou diversos trabalhos relativos à aplicação de modelos do processo estocástico pontual à análise de confiabilidade, especialmente para sistemas reparáveis. Destacou os avanços no tema, como o modelo processo de renovação generalizado (GRP), que trata os RP e NHPP como casos especiais. Não obstante os avanços encontrados na literatura e, em especial, os destacados por Krivtsov, os modelos HPP e NHPP permanecem como opções de interesse devido “[...] à existência de procedimentos estatísticos bem estabelecidos para a estimação dos parâmetros que os caracterizam com base em dados reais” (KRIVTSOV, 2007, p. 550, i. 3, tradução nossa). Krivtsov também destacou Ascher e Feingold (1984) e Ridgon e Basu (2000) – frequentemente citados neste trabalho – como textos fundamentais na aplicação de modelos de processos pontuais.

Dada a facilidade dos procedimentos estatísticos e a evidente atualidade na aplicação destes, este trabalho utiliza os HPP, RP e NHPP como possíveis modelos do comportamento dos tempos de falha dos monitores.

Neste capítulo também se apresenta outro atributo de confiabilidade denominado *disponibilidade*. Adéqua-se sua definição à aplicação na rede automática de monitoramento.

2.1 SISTEMAS REPARÁVEIS E PROCESSOS ESTOCÁSTICOS PONTUAIS

Monitores (vide nota 13) são reparados corretivamente quando falham, ou preventivamente, baseados em programa que prevê a substituição periódica de alguns de seus componentes. Daqui para frente serão chamados de sistemas reparáveis.

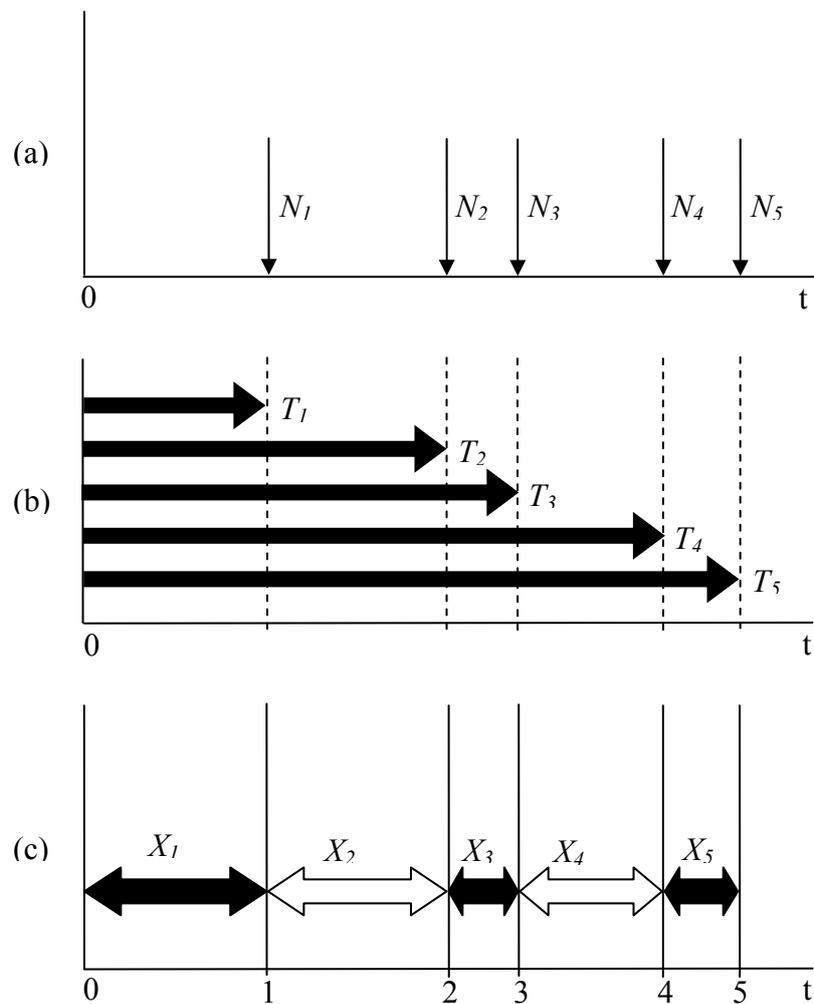
Ascher e Feingold (1984) definem um sistema reparável como aquele que após falhar em realizar satisfatoriamente uma ou mais de suas funções pode ser recuperado a uma performance totalmente satisfatória por algum método distinto da substituição total do sistema. Também destacam a importância de se diferenciar entre o tratamento estatístico de um sistema reparável e aquele dado a componentes não reparáveis.

Um sistema reparável pode ser matematicamente modelado por meio de processos estocásticos² pontuais, sendo que o interesse maior está (i) na determinação de uma taxa de ocorrência de eventos (aqui podemos pensar em falhas) e (ii) na previsão de novos eventos no futuro tendo como base os dados pretéritos do sistema.

Processo estocástico pontual é um modelo matemático que pode representar um fenômeno físico caracterizado por uma sequência de eventos altamente localizados, distribuídos no contínuo, de acordo com algum mecanismo probabilístico. Se tomarmos o contínuo como sendo tempo e os eventos como falhas, então este é um modelo possível para sistemas reparáveis (ASCHER, 1987; CROWDER et al., 1991). Em geral os intervalos de tempo entre esses eventos nem são independentes, nem pertencem a uma mesma distribuição de probabilidades (RIDGON; BASU, 2000), condições estas que serão importantes na escolha de modelos para representar um sistema reparável. Falemos um pouco sobre esse processo.

² Feller (1957, p. 368) esclarece que os termos “processo estocástico” e “processo aleatório”, do inglês *stochastic process* e *random process*, são sinônimos, indicando que o primeiro é usado predominantemente quando se considera o parâmetro tempo.

A ideia de eventos ocorrendo num contínuo pode ser ajustada quando se trata de falhas ocorrendo no tempo. A Figura 2.1 traz possíveis representações do processo e a notação utilizada. Utiliza-se $N(t)$ para a variável aleatória que representa o processo de contagem, neste caso, número de falhas ocorrendo no intervalo $[0, t)$. O processo também pode ser representado pelo tempo de ocorrência das falhas $T(t)$ ou o intervalo entre falhas $X(t)$.



Fonte: adaptado e modificado de O'CONNOR, 2002, p. 72

Figura 2.1 Representação de um processo estocástico pontual com (a) número de falhas $N(t)$, (b) tempo de ocorrências das falhas $T(t)$ e (c) intervalo entre falhas $X(t)$

Na prática, após a interrupção do funcionamento do sistema em T_i decorre o período de reparo que engloba a detecção da falha e os procedimentos de reparo e teste, até que o sistema seja colocado novamente em operação. A Figura 2.2 representa o tempo calendário e

o tempo operacional de um sistema reparável. O final de cada período de operação coincide com a ocorrência da falha.

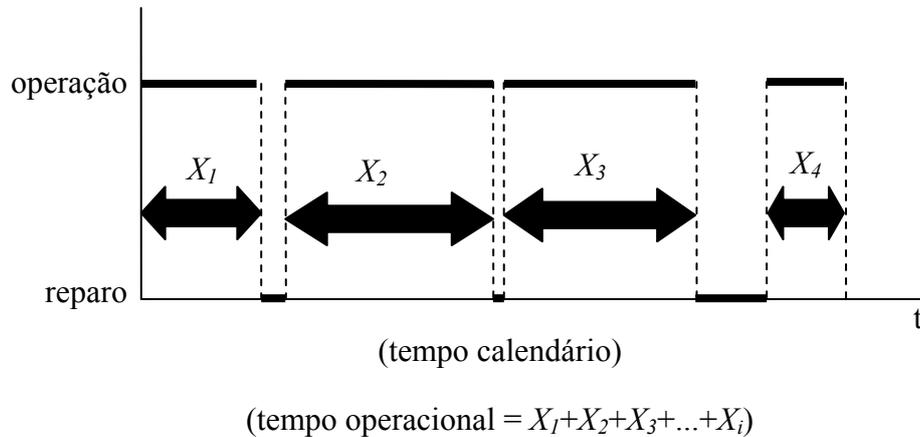


Figura 2.2 Composição dos tempos de um sistema reparável

Crowder et al. (1991) e Ascher (2007) alertam para a necessidade de definir o tempo de observação cuidadosamente. Para equipamentos que operam continuamente, por longos períodos, o tempo para o reparo é significativamente menor que o tempo de operação e pode ser considerado como instantâneo. Contudo, há situações em que o tempo de reparo é elevado, decorrente, em geral, de aspectos ligados à manutenção, tais como ausência de componentes para a substituição e falta de mão de obra qualificada. Neste caso, Crowder et al. (1991, p. 158) indicam a correção do tempo de análise do sistema considerando o tempo operacional ao invés do tempo calendário.

Assim, para efeito da análise do comportamento temporal das falhas, este trabalho considera o tempo operacional, como visto na Figura 2.2. Entretanto, considera que se a substituição do componente e o retorno do equipamento à operação satisfatória ocorrerem em período inferior a 48h, desconsiderou-se o tempo de reparo, ou seja, considerou-se o reparo como instantâneo. Igualmente adotou-se esse procedimento para as manutenções preventivas, como previsto por Lee (1980, Tabela I), que informa que a análise dos tempos de falha de motores de submarinos desconsiderou os tempos em que foram feitas manutenções

programadas [*scheduled engine overhaul*], e ratificado por Ascher e Feingold (1984, p. 76). Quando a interrupção se deu por período superior a 48h, as horas foram descontadas do citado intervalo, sendo adotado o conceito de tempo operacional ao invés de tempo calendário.

Ridgon e Basu (2000, p. 23-24) informam que é possível definir a função média de um processo pontual como o valor esperado:

$$\Lambda(t) = E\{N(t)\} \quad (2.1)$$

onde $N(t)$ é a variável aleatória que denota o número de falhas no intervalo $[0, t)$. Pode-se definir uma taxa média de ocorrência de falhas $v(t)$, a qual denomina-se ROCOF, do inglês *rate of occurrence of failures*. Quando Λ é diferenciável, define-se ROCOF como

$$v(t) = \frac{d}{dt} \Lambda(t) = \frac{d}{dt} E\{N(t)\} \quad (2.2)$$

sendo que a ROCOF pode ser interpretada como uma taxa instantânea de mudanças no número esperado de falhas.

Paralelamente, Ridgon e Basu (2000, p. 27) também discutem a função intensidade $\lambda(t)$ de um processo pontual, definindo-a como:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(N(t, t+\Delta t) \geq 1)}{\Delta t} \quad (2.3)$$

e informam que esta representa a probabilidade do sistema falhar em um intervalo de tempo bastante pequeno dividido pela extensão do intervalo. Pela definição, $\lambda(t)$ é uma probabilidade não condicional de pelo menos uma falha (não necessariamente a primeira) num pequeno intervalo de tempo dividida pela extensão desse intervalo.

A ROCOF $v(t)$ e a função intensidade $\lambda(t)$ são medidas da confiabilidade de um sistema reparável, sendo possível afirmar que essas duas funções são iguais quando não se considera a ocorrência de falhas simultâneas³ (RIDGON; BASU, 2000).

³ Por facilidade de notação, deste ponto em diante utiliza-se ROCOF $v(t)$, exceto quando for necessário destacar a função intensidade $\lambda(t)$.

Ascher e Feingold (1984) discorrem sobre a sequência de falhas de um sistema reparável e os intervalos entre elas. A diminuição desses intervalos entre falhas (X_i) ao longo da vida do sistema indica a sua deterioração – os autores o denominam sistema triste [*sad system*]. O aumento dos intervalos (X_i), por sua vez, indica a sua melhoria ou sistema feliz [*happy system*]. Já a ocorrência de falhas em intervalos relativamente iguais indica ausência de tendência de melhoria ou deterioração. O comportamento de X_i pode ser representado por meio da ROCOF, sendo que a literatura propõe diversas equações para representá-la. Sua escolha constitui parte da escolha do modelo que representa as falhas do sistema.

Ascher e Feingold (1984), Ridgon e Basu (2000) abordam as ideias de reparo mínimo e de reparo perfeito, para as quais são propostos modelos distintos. Como reparo mínimo entende-se aquele que deixa o sistema nas mesmas condições que estava imediatamente antes da falha. Já o reparo perfeito (ou renovação) deixa o sistema como novo após o reparo.

Como exemplo de modelo de processo estocástico pontual, o processo de Poisson é bastante discutido na literatura. O pressuposto de reparo mínimo leva ao processo de Poisson não homogêneo (NHPP). O NHPP é um bom modelo para um sistema reparável, pois pode modelar adequadamente sua deterioração [*deteriorating*] ou melhoria [*improving*]. Se o reparo é perfeito então os tempos entre falhas (X_i) são independentes e identicamente distribuídos e o processo de renovação [*renewal process*] é um modelo apropriado para o sistema, (RIDGON; BASU, 2000), em particular o processo de Poisson homogêneo (HPP).

Portanto, a base teórica brevemente introduzida e a seguir detalhada permite estimar taxas de ocorrência de falhas (ROCOFs) e prever novas falhas em um intervalo de interesse, a partir dos registros de manutenção dos tempos de falha dos monitores e de alguns pressupostos quanto à coleta desses tempos.

2.2 O PROCESSO DE POISSON

Neste item apresenta-se o processo de Poisson como um modelo para se tratar falhas de um sistema reparável. Feller (1957, p. 400) discorre sobre um sistema sujeito a mudanças instantâneas devido à ocorrência de eventos aleatórios (pode-se pensar em falhas do sistema). Todas as mudanças são consideradas do mesmo tipo e pensa-se no número de mudanças. Cada mudança é representada por um ponto no eixo do tempo, de forma que procura-se estudar algumas distribuições aleatórias dos pontos nesse eixo.

Feller (1957, p. 400) imagina processos físicos caracterizados por duas propriedades: são homogêneos no tempo e independentes, de forma que o comportamento futuro do sistema não é afetado pelo seu comportamento passado. Pode-se dizer que as forças e influências que determinam o processo permanecem totalmente imutáveis, de forma que a probabilidade de qualquer particular evento é a mesma para todo intervalo de tempo h , independentemente de onde esse intervalo estiver situado e da história pregressa do sistema. Por homogeneidade entende-se o processo cuja distribuição do intervalo $T(s+h) - T(s)$ depende apenas de h , isto é, apenas da extensão do intervalo, independentemente da posição deste.

Do ponto de vista matemático, pode-se descrever o processo em termos da probabilidade $P_n(t)$ de que exatamente n mudanças ocorram durante o intervalo de tempo de extensão h . Em particular, $P_0(t)$ é a probabilidade de nenhuma mudança e $1 - P_0(t)$ é a probabilidade de uma ou mais mudanças. Então podemos assumir que à medida que $t \rightarrow 0$

$$\frac{1 - P_0(t)}{t} \rightarrow v$$

onde v é uma constante positiva. Então, para pequenos intervalos de extensão h a probabilidade de uma ou mais mudanças é $1 - P_0(h) = vh + o(h)$, onde o termo $o(h)$ denota qualquer quantidade que tende a zero mais rapidamente que h à medida que $h \rightarrow 0$ (outra notação seria $\lim\{f(h)/h\}=0$ quando $h \rightarrow 0$). Feller (1957, p. 401) então postula que qualquer que seja o número de mudanças durante $[0, t)$, a probabilidade que uma mudança

ocorra durante o intervalo $(t, t+h)$ é $vh + o(h)$ e a probabilidade de que mais de uma mudança ocorra é $o(h)$.

Feller (1957, p. 401-402) aponta que essas condições levam a um sistema de equações diferenciais para $P_n(t)$. Considere dois intervalos contíguos $[0, t)$ e $(t, t+h)$, onde h é pequeno. Se $n \geq 1$, então exatas n mudanças ocorrem no intervalo $[0, t+h)$ em três formas mutuamente excludentes:

$$\begin{cases} (i) 0 \text{ em } (t, t+h) \text{ e } n \text{ em } [0, t) \\ (ii) 1 \text{ em } (t, t+h) \text{ e } n-1 \text{ em } [0, t) \\ (iii) x \geq 2 \text{ em } (t, t+h) \text{ e } n-x \text{ em } [0, t) \end{cases}$$

Dado que uma das propriedades do processo estudado é ser independente, a probabilidade da primeira contingência é:

$$P_n(t+h) = P_0(t, t+h)P_n(t) = [1 - vh - o(h)]P_n(t) \quad (2.4)$$

De forma similar a segunda contingência tem probabilidade:

$$P_n(t+h) = P_1(t, t+h)P_{n-1}(t) = [vh + o(h)]P_{n-1}(t) \quad (2.5)$$

A terceira:

$$P_n(t+h) = P_{x \geq 2}(t, t+h)P_{n-x}(t) = [o(h)]P_{n-x}(t) \quad (2.6)$$

Dado que as contingências são mutuamente excludentes:

$$P_n(t+h) = [1 - vh - o(h)]P_n(t) + [vh + o(h)]P_{n-1}(t) + [o(h)]P_{n-x}(t)$$

$$P_n(t+h) = P_n(t) - vhP_n(t) - [o(h)]P_n(t) + vhP_{n-1}(t) + [o(h)]P_{n-1}(t) + [o(h)]P_{n-x}(t)$$

$$P_n(t+h) - P_n(t) = -vhP_n(t) + vhP_{n-1}(t) + [o(h)]\{-P_n(t) + P_{n-1}(t) + P_{n-x}(t)\}$$

ou

$$\frac{P_n(t+h) - P_n(t)}{h} = -vP_n(t) + vP_{n-1}(t) + \frac{o(h)}{h}\{-P_n(t) + P_{n-1}(t) + P_{n-x}(t)\} \quad (2.7)$$

Com $h \rightarrow 0$, o último termo da Equação 2.7 tende a zero. Portanto o limite do lado esquerdo existe e

$$\frac{dP_n}{dt} = -vP_n(t) + vP_{n-1}(t), \quad n \geq 1 \quad (2.8)$$

Para $n = 0$ as contingências (ii) e (iii) mencionadas anteriormente não acontecem e, sendo assim, a Equação 2.8 pode ser substituída pela Equação 2.9, mais simples.

$$P_0(t + h) = [1 - vh]P_0(t) + o(h) \quad (2.9)$$

que leva a

$$\frac{dP_0}{dt} = -vP_0(t) \quad (2.10)$$

Da Equação 2.10 e da condição de $P_0(0) = 1$ temos

$$\int_1^{P_0} \frac{dP_0}{P_0} = -v \int_0^t dt$$

$$P_0(t) = e^{-vt} \quad (2.11)$$

Para $n = 1$, parte-se da Equação 2.8, substitui-se a Equação 2.11 em 2.8 e obtém-se

$$\frac{dP_1}{dt} = -vP_1(t) + ve^{-vt} \quad (2.12)$$

Dado que $P_1(0) = 0$ encontra-se $P_1(t) = vte^{-vt}$, em concordância com a distribuição de Poisson. Feller (1957, p. 402) destaca que a aplicação da Equação 2.8 para $n = 2, 3, \dots$ resultará nos demais termos da distribuição de Poisson, resultado esperado e que caracteriza o processo de Poisson, como visto a seguir.

Ridgon e Basu (2000, p. 33) destacam que um processo de contagem $N(t)$ é dito de Poisson quando:

- i. $N(0) = 0$
- ii. Para qualquer $a < b \leq c < d$ as variáveis aleatórias $N[a,b)$ e $N[c,d)$ são independentes. Diz-se propriedade dos incrementos independentes.
- iii. Há uma função v denominada função intensidade do processo de Poisson, tal que

$$v(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(N(t, t + \Delta t) = 1)}{\Delta t}$$

- iv.

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(N(t, t + \Delta t) \geq 2)}{\Delta t} = 0$$

A propriedade iv elimina a possibilidade de falhas simultâneas.

Ridgon e Basu (2000, p. 36-41) também informam que a partir das propriedades (i) a (iv) é possível deduzir que o número de falhas em um intervalo é uma variável aleatória $N(t)$ com pmf⁴ da distribuição de Poisson

$$P(N(t) = n) = \frac{1}{n!} \left(\int_0^t v(x) dx \right)^n \exp \left(- \int_0^t v(x) dx \right), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.13)$$

ou seja, a variável aleatória discreta $N[a, b)$ segue uma distribuição de Poisson com média $E(X)$ e variância $V(X)$ iguais a $\int_a^b v(x) dx$.

Segundo Ridgon e Basu (2000, p. 43), pode-se ainda definir o processo de Poisson da seguinte forma:

- i. $N(0) = 0$
- ii. O processo tem a propriedade de incrementos independentes
- iii. Para qualquer $a < b$, $N[a, b) \sim POI\left(\int_a^b v(x) dx\right)$.

Pelo fato da variável $N(t)$ no processo de Poisson ser caracterizada por uma distribuição de Poisson é possível obter a distribuição dos tempos até a primeira falha. Seja X o intervalo entre a origem e o primeiro evento. Podemos obter a distribuição de X a partir da distribuição de Poisson. Para que não ocorra evento entre $[0, x)$ é preciso que $X > x$. Portanto, $\text{prob}(X > x) = \text{prob}(N_X = 0) = e^{-vx}$, obtido a partir da Equação 2.13, com $v(x) = v$.

Então a PDF⁵ e a pdf⁶ de X são, respectivamente

$$F_X(x) = 1 - e^{-vx} \quad (x \geq 0) \quad (2.14)$$

$$f_X(x) = F'_X(x) = ve^{-vx} \quad (x \geq 0) \quad (2.15)$$

⁴ Do inglês *probability mass function*, pmf indica a distribuição de probabilidades de uma variável aleatória discreta.

⁵ Do inglês *probability distribution function*, PDF indica a probabilidade de uma variável aleatória X assumir valores menores que x (valor de interesse). A notação tradicional é $F_X(x) = P(X \leq x)$.

⁶ Do inglês *probability density function*, pdf indica a distribuição de probabilidades de uma variável aleatória contínua.

que caracterizam a distribuição exponencial, com ν constante, $E(X) = 1/\nu$ e $V(X) = 1/\nu^2$ (COX; LEWIS, 1966, p. 22).

2.2.1 Propriedades do processo de Poisson

Cox e Lewis (1966), Crowder et al. (1991) destacam algumas propriedades do processo de Poisson, entre elas: o número de eventos segue uma distribuição de Poisson e os tempos X_i entre eventos são distribuídos exponencialmente e são mutuamente independentes.

A despeito do amplo uso do modelo, Cox e Lewis (1966) reafirmam que o processo de Poisson é um conceito matemático e que não se pode esperar que algum fenômeno real comporte-se como tal. Crowder et al. (1991) ainda destacam a dificuldade prática de se alcançar uma taxa de falha constante, independentemente do intervalo examinado. Apontam que muitos sistemas na prática estão deteriorando ou melhorando com o tempo, razão pela qual são necessários modelos mais gerais, como o mais simples deles: o processo de Poisson não homogêneo (NHPP), no qual a taxa de falhas não é constante.

O desenvolvimento proposto por Feller, mostrado no item 2.2, aborda o processo (de contagem) de Poisson em que a taxa de ocorrência de falhas (ROCOF) é constante. Diz-se então que o processo é homogêneo ou HPP, do inglês *homogeneous Poisson process*. Para o caso em que há evidência estatística contra a ROCOF constante, o NHPP pode contemplar essa taxa variando no tempo. Ascher e Feingold (1984) e Ascher e Hansen (1998) destacam a necessidade de observar os dados de falha de um sistema reparável respeitando a sua ordem cronológica de ocorrências. Com isso é possível observar tendência de crescimento ou de diminuição da ROCOF. Destacam ainda a falsa impressão de exponencialidade quando, equivocadamente, se reordenam os tempos de falha por magnitude. Citam exemplos de sistemas em evidente envelhecimento, evidenciado por um teste de tendência como o de Laplace, cujo modelo HPP adotado partiu do reordenamento dos tempos de falha. Nos itens 2.4, 2.6 e 2.7 ver-se-á mais sobre os HPP, NHPP e testes de tendência, respectivamente.

2.3 ESTIMAÇÃO PARAMÉTRICA POR MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA

Tomar decisões ou tirar conclusões acerca de uma população com base em uma amostra dessa população é tratado na estatística no campo da inferência (estatística). Montgomery e Runger (2009) destacam a estimação de parâmetros e o teste de hipóteses como as áreas de interesse da inferência.

A estimação de parâmetros, de interesse para a aplicação dos modelos HPP, NHPP e RP, tradicionalmente é feita pelo método dos momentos e pelo método da máxima verossimilhança. Montgomery e Runger (2009, p. 147) informam que “[...] estimativas de máxima verossimilhança são geralmente preferidas [...] porque elas têm melhores propriedades de eficiência”. A seguir aborda-se esse método, adotado neste trabalho.

Inicialmente desenvolve-se a ideia do intervalo em que as falhas são observadas. Uma forma é fixar o final do intervalo no momento da ocorrência da i -ésima falha, de forma que o período de observação das falhas seja $[0, t_i)$. Neste caso, a variável aleatória de interesse é T (tempo de ocorrência das falhas). A outra forma é fixar o final do período de observação, por exemplo, ao final de um determinado ano, de forma que o intervalo é $[0, t_0)$. Aqui, as variáveis aleatórias de interesse são N (número de falhas) e T . A diferença na estratégia de coleta de dados leva a procedimentos estatísticos de inferência levemente diferentes. Neste trabalho fixou-se o final do período de observação das falhas, ou seja os intervalos têm a forma $[0, t_0)$ e se diz que os dados são truncados no tempo.

Seja $T_1 < T_2 < \dots < T_N < t_0$ o tempo de cada falha antes do final do intervalo t_0 . Para os dados truncados no tempo, o método de verossimilhança deve levar em conta a aleatoriedade de N e dos tempos de falha $t_1 < t_2 < \dots < t_N$. (RIDGON; BASU, 2000, p. 135).

2.3.1 Função verossimilhança

Montgomery e Runger (2009) apontam que o método de máxima verossimilhança desenvolvido pelo estatístico britânico R. A. Fisher nos anos de 1920 pressupõe uma variável

aleatória X com distribuição de probabilidade $f(x, \theta)$, sendo θ o parâmetro de interesse a ser estimado, por exemplo a média ou o desvio padrão da população. Se x_1, x_2, \dots, x_n são os valores da amostra de tamanho n , o estimador de máxima verossimilhança (EMV) de θ será o valor que maximiza a função verossimilhança $L(\theta)$, definida como

$$L(\theta) = f(x_1; \theta) \cdot f(x_2; \theta) \dots f(x_n; \theta)$$

cujas únicas variáveis a conhecer é θ . Obtém-se o ponto de máximo da função verossimilhança partindo-se de

$$\frac{dL(\theta)}{d\theta} = 0$$

Visto que $L(\theta)$ é um produto, utiliza-se o artifício matemático de tomar o logaritmo da função, de maneira a facilitar os cálculos, obtendo-se estimativas de máxima log-verossimilhança para parâmetros de interesse.

Montgomery e Runger (2009, p. 149) ainda informam que pode-se utilizar o método para estimar vários parâmetros $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$, tomando-se as derivadas parciais $\partial L(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) / \partial \theta_i, i = 1, 2, \dots, k$ e igualando-as a zero, resolvendo o sistema de equações resultante.

2.4 PROCESSO DE POISSON HOMOGÊNIO (HPP)

De acordo com Ridgon e Basu (2000, p. 45-49), o processo de Poisson homogêneo (HPP) pressupõe que os tempos entre falhas X_i sejam variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas (iid) segundo distribuição exponencial, com média $1/\nu$, o que leva a uma ROCOF $\nu(t)$ constante. O tempo até a n -ésima falha segue uma distribuição gama, com parâmetros n e $1/\nu$. Diz-se $GAM(n, 1/\nu)$. Os autores apontam-no como o modelo mais simples para sistemas reparáveis, porém alertam para que não seja aplicado a sistemas que estão deteriorando ou melhorando, em vista das limitações associadas ao pressuposto da ROCOF.

O HPP implica que o sistema (i) não envelhece, isto é, não se deteriora, nem exhibe melhora na sua confiabilidade no tempo global (desde o início da operação) e (ii) não se

desgasta no tempo local, isto é, durante o tempo entre falhas (RIDGON; BASU, 2000). No HPP a condição do sistema é a mesma a qualquer momento no tempo e essa condição é independente da sequência prévia de falhas (propriedade de ausência de memória), significando que após o reparo o sistema está exatamente na mesma condição de novo.

Segundo Ridgon e Basu (2000, p. 106), métodos gráficos são adequados para verificar a aplicabilidade do HPP. Se a plotagem de $N(t_i)/t_i$ versus t_i é linear, o HPP pode ser um modelo apropriado. Também apontam a necessidade de observar X_i e verificar se eles podem ser modelados por uma distribuição exponencial. Se puderem, o HPP é um modelo adequado. Se não, o processo de renovação [*renewal process*] com uma distribuição diferente da exponencial seria apropriado. O teste TTT, apresentado no item 2.7, auxilia na verificação da aderência de X_i à distribuição exponencial.

Além da visualização gráfica, testes estatísticos têm sido propostos para verificar a hipótese nula de que o processo é um HPP (ROCOF constante) contra a alternativa de que há uma tendência monotônica nessa taxa. Os testes de Laplace e da norma MIL-HDBK 189 se adequam a essa verificação e serão abordados no item 2.7.

2.4.1 Estimação dos parâmetros do HPP

Se não há evidência de que os dados apresentam tendência de deterioração ou de melhoria, pode-se inferir sobre a ROCOF constante (RIDGON; BASU, 2000, p. 112).

Seja então um HPP com ROCOF $v(t) = 1/\mu$, $t > 0$. Os tempos entre falhas X_i são variáveis aleatórias independentes e distribuídas identicamente segundo uma EXP (μ). Para o processo truncado no tempo, ou seja, quando o teste é interrompido num tempo t_0 , o número de falhas N observadas é uma variável aleatória distribuída segundo Poisson, com média t/μ . Além disso N é estatística suficiente para μ , de forma que os tempos de falha não entram nas expressões na estimativa de máxima verossimilhança de μ .

Ridgon e Basu (2000, p. 114) desenvolvem, a partir da pmf da distribuição de Poisson, a função verossimilhança⁷ $L(\mu)$

$$L(\mu) = c \left(\frac{1}{\mu^N} \right) \exp \left(-\frac{t}{\mu} \right)$$

onde c é uma constante. O estimador de máxima verossimilhança (MLE) para μ é $\hat{\mu} = t/N$ ⁸ ou

$$\hat{v}(t) = N/t \quad (2.16)$$

2.5 PROCESSO DE RENOVAÇÃO (RP)

Ascher e Hansen (1998) apontam o processo de renovação (RP) como uma generalização do processo de Poisson homogêneo (HPP). A razão são os mesmos pressupostos, exceto pelo fato de que o RP não requer que os tempos entre falhas (X_i) sejam distribuídos segundo uma mesma distribuição exponencial. Ascher e Feingold (1984, p. 59) informam que a distribuição apropriada para X_i pode ser obtida a partir da distribuição de Weibull, biparamétrica (λ, β), onde a PDF é

$$F_X(x) = 1 - e^{-\lambda x^\beta}$$

com FOM⁹

$$h_X(x) = \lambda \beta x^{\beta-1} \quad (2.17)$$

2.5.1 Estimação dos parâmetros da distribuição de Weibull

Ascher e Feingold (1984, p. 95) indicam a necessidade da ordenação crescente de X_i motivada pela definição da função distribuição de probabilidade (PDF): $F_X(x) = P(X \leq x)$. Também afirmam que usando estatística de ordem, a PDF para $X_{(1)} \leq X_{(2)} \leq \dots \leq X_{(n)}$ pode ser

⁷ Definida no item 2.3.1.

⁸ Equação modificada por este autor. A equação referenciada em Ridgon e Basu (2000, p. 114) é $\hat{\mu} = N/t$.

⁹ Force of mortality (FOM), $h_X(x)$, definida em Ascher e Feingold (1984, p.11). Citam que FOM pode ser melhor compreendida a partir da expressão $h_X(x)dx = Pr\{x < X \leq x + dx \mid X > x\}$, ou seja, $h_X(x)dx$ é a probabilidade condicional que o componente de uma população com distribuição F_X colocado em serviço em $x = 0$ e que tenha sobrevivido até x falhe em $(x, x + dx)$.

estimada para qualquer x . A distribuição de Weibull abaixo, com parâmetros λ e β , é ajustada aos dados ordenados.

$$F_X(x) = 1 - e^{-\lambda x^\beta}$$

Ascher e Feingold (1984, p. 95-96) mostraram que sob a condição de que todas as partes sejam testadas até a falha, os estimadores de máxima verossimilhança para λ e β são obtidos a partir das Equações 2.18 e 2.19.

$$\frac{\sum_{i=1}^p X_{(i)}^\beta \ln X_{(i)}}{\sum_{i=1}^p X_{(i)}^\beta} - \frac{1}{\beta} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \ln X_{(i)} \quad (2.18)$$

e

$$\hat{\lambda} = \frac{p}{\sum_{i=1}^p X_{(i)}^\beta} \quad (2.19)$$

onde $\hat{\beta}$ é o valor de β que satisfaz a Equação 2.18.

2.6 PROCESSO DE POISSON NÃO HOMOGÊNIO (NHPP)

O processo de Poisson não homogêneo segue os mesmos pressupostos do HPP, exceto pela ROCOF $\nu(t)$ que é variável no tempo. É um modelo conceitualmente simples e pode modelar sistemas que estão deteriorando ou melhorando. Os métodos estatísticos para estimar seus parâmetros são bem desenvolvidos e fáceis de aplicar (CROWDER et al., 1991, cap 8).

Saldanha, de Simone e Frutuoso e Melo (2001) destacam a possibilidade de eventos ocorrerem com probabilidades diferentes em intervalos distintos em razão do NHPP não exigir a necessidade de incrementos estacionários. Portanto afirmam que o NHPP tem memória, razão pela qual o modelo é apropriado para estudar falhas de sistemas que deterioram ou que melhoram.

Seja um NHPP com ROCOF $\nu(t)$ variando no tempo. O número de falhas no intervalo de tempo $[t_1, t_2]$ tem uma distribuição de Poisson com média $\int_{t_1}^{t_2} \nu(t) dt$ (ver Equação 2.13).

A probabilidade de zero falhas em $[t_1, t_2]$ é $\exp\{-\int_{t_1}^{t_2} \nu(t) dt\}$.

2.6.1 Estimação dos parâmetros do NHPP

Suponha que se observe um sistema num intervalo $[0, t_0)$, com falhas ocorrendo em $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$, com $t_n < t_0$. Crowder et al. (1991, p. 164-166) desenvolvem a função de verossimilhança como segue. A probabilidade de se observar zero falha em $[0, t_1)$, uma falha em $(t_1, t_1+\delta t_1)$, zero falha em $(t_1+\delta t_1, t_2)$, uma falha em $(t_2, t_2+\delta t_2)$ e assim por diante até zero falha em $(t_n+\delta t_n, t_0)$, quando $\delta t_1, \delta t_2, \dots, \delta t_n$ são pequenos, é:

$$\left\{ \exp\left(-\int_0^{t_1} v(t)dt\right) \right\} v(t_1)\delta t_1 \left\{ \exp\left(-\int_{t_1+\delta t_1}^{t_2} v(t)dt\right) \right\} v(t_2)\delta t_2 \dots \left\{ \exp\left(-\int_{t_n+\delta t_n}^{t_0} v(t)dt\right) \right\}$$

Dividindo-se a expressão por $\delta t_1, \delta t_2, \dots, \delta t_n$ e fazendo-se $\delta t_i \rightarrow 0$ ($i=1, 2, \dots, n$), tem-se a função verossimilhança

$$L = \left\{ \prod_{i=1}^n v(t_i) \exp\left(-\int_0^{t_0} v(t)dt\right) \right\}$$

e a função log-verossimilhança

$$l = \sum_{i=1}^n \ln v(t_i) - \int_0^{t_0} v(t)dt \quad (2.20)$$

A especificação de $v(t)$ permite estimar os parâmetros inerentes a $v(t)$.

Os modelos $v_1(t)$ e $v_2(t)$ a seguir mostrados são amplamente citados na bibliografia quando se deseja modelar ROCOFs com variações monotônicas. As razões para o amplo uso são os procedimentos de inferência claramente estabelecidos, além de se adequarem para modelar sistemas que estão deteriorando ou melhorando (ASCHER; FEINGOLD, 1984, p. 83; CROWDER et al., 1991, p. 166; RIDGON; BASU, 2000, p. 88).

$$v_1(t) = \exp(\beta_0 + \beta_1 t) \quad (2.21)$$

$$v_2(t) = \gamma \delta t^{\delta-1} \quad (2.22)$$

com $\gamma > 0$ e $\delta > 0$.

Cox e Lewis (1966) discutem em detalhes o NHPP com ROCOF $v_1(t)$, denominado modelo exponencial linear. Trata-se de um modelo simples para descrever um sistema que

está melhorando ($\beta_1 < 0$) ou deteriorando ($\beta_1 > 0$). Se β_1 se aproxima de zero, $v_1(t)$ aproxima uma tendência linear da ROCOF sobre pequenos períodos de tempo.

A função log-verossimilhança para o NHPP com ROCOF $v_1(t)$ é obtida a partir da substituição da Equação 2.21 na Equação 2.20 (CROWDER et al., 1991, p. 167). Obtém-se

$$l_1 = n\beta_0 + \beta_1 \sum_{i=1}^n t_i - \frac{e^{\beta_0\{e^{\beta_1 t_0} - 1\}}}{\beta_1} \quad (2.23)$$

Para se obter os estimadores de máxima log-verossimilhança para β_0 e β_1 , pode-se diferenciar a Equação 2.23 em relação a β_0 e β_1 e impor as derivadas iguais a zero. Inicialmente obtém-se $\hat{\beta}_0$ expressado em termos de $\hat{\beta}_1$ que, em seguida, pode ser eliminado partindo-se de $\partial l_1 / \partial \beta_1 = 0$, resultando na Equação 2.24, da qual se obtém $\hat{\beta}_1$.

$$\sum_{i=1}^n t_i + n\beta_1^{-1} - nt_0\{1 - e^{(-\beta_1 t_0)}\}^{-1} = 0 \quad (2.24)$$

Então se obtém $\hat{\beta}_0$ partindo-se de

$$\hat{\beta}_0 = \ln \left\{ \frac{n\hat{\beta}_1}{e^{(\hat{\beta}_1 t_0)} - 1} \right\} \quad (2.25)$$

Uma hipótese natural para testar a confiabilidade em sistemas reparáveis é a ROCOF constante, isto é $\beta_1 = 0$. O teste comumente usado para verificar essa hipótese é o de Laplace, que será apresentado no item 2.7.

Ridgon e Basu (2000) informam que o modelo $v_2(t)$, denominado lei das potências, tornou-se popular pois os procedimentos de inferência estatística são bem desenvolvidos, além do fato do modelo se adequar para sistemas que estão melhorando ou que estão deteriorando. O parâmetro δ indica como o sistema melhora ou deteriora ao longo do tempo. Se $\delta > 1$, a ROCOF $v_2(t)$ está aumentando, isto é, há tendência a um número maior de falhas a medida que o tempo passa. Se $\delta < 1$, a ROCOF está diminuindo e o sistema está melhorando. Se $\delta = 1$, a ROCOF $v(t) = v$, ou seja, temos um HPP.

A função log-verossimilhança para o NHPP com ROCOF $v_2(t)$ é obtida a partir da substituição da Equação 2.22 na Equação 2.20. Obtém-se

$$l_2 = n \ln \gamma + n \ln \delta + (\delta - 1) \sum_{i=1}^n \ln t_i - \gamma t_0^\delta \quad (2.26)$$

Para obter os estimadores de máxima log-verossimilhança de γ e δ , deve-se diferenciar a Equação 2.26 em relação a γ e δ e impor $\partial l_2 / \partial \gamma = 0$ e $\partial l_2 / \partial \delta = 0$ (CROWDER et al., 1991, p. 171; RIDGON; BASU, 2000, p. 116-118). Obtém-se

$$\frac{\partial l_2}{\partial \gamma} = -\frac{n\delta}{\gamma} + \frac{\delta}{\gamma} \left(\frac{t_0}{\gamma}\right)^\delta = 0$$

e

$$\frac{\partial l_2}{\partial \delta} = \frac{n}{\delta} - n \ln \gamma + \sum_{i=1}^n \ln t_i - \left(\frac{t_0}{\gamma}\right)^\delta \ln \left(\frac{t_0}{\gamma}\right) = 0$$

E, conseqüentemente:

$$\hat{\delta} = \frac{n}{n \ln t_0 - \sum_{i=1}^n \ln t_i} \quad (2.27)$$

e

$$\hat{\gamma} = \frac{n}{t_0^{\hat{\delta}}} \quad (2.28)$$

A questão que se coloca é qual dos modelos [$v_1(t)$ ou $v_2(t)$] da ROCOF melhor se ajusta aos dados de falha registrados? Crowder et al. (1991, p. 174) sugerem o uso de métodos gráficos para a estimativa dos parâmetros β_0 , β_1 , γ e δ e a comparação destes com a estimativa proveniente do método de log-verossimilhança. A seguir, discute-se essa abordagem.

2.6.2 Escolha do modelo para ROCOF

Métodos gráficos são baseados tanto em plotagens de i versus t_i quanto de i versus $\hat{v}(t)$. Desvios da linearidade num gráfico de i versus t_i são indicativos de ROCOF não constante, embora não seja possível discorrer sobre a forma exata da ROCOF. Então, da Equação 2.2:

$$E\{N(t)\} = \int_0^t v(y) dy$$

Quando $v(t) = v_1(t) = \exp(\beta_0 + \beta_1 t)$

$$E\{N(t)\} = \frac{e^{\beta_0}}{\beta_1} \{exp(\beta_1 t) - 1\} \quad (2.29)$$

e quando $v(t) = v_2(t) = \gamma \delta t^{\delta-1}$

$$E\{N(t)\} = \gamma t^\delta \quad (2.30)$$

Um estimador natural para $v(t)$ é:

$$\hat{v}(t) = \frac{\text{número de falhas em } (t, t+\Delta t]}{\Delta t} \quad (2.31)$$

A aplicação de método gráfico pressupõe a divisão do intervalo de observação $[0, t_0]$ em k intervalos $[0, a_1), [a_1, a_2), \dots, [a_{k-1}, t_0)$. Uma estimativa de $v\left\{\frac{1}{2}(a_{j-1} + a_j)\right\}$ é

$$\hat{v}\left\{\frac{1}{2}(a_{j-1} + a_j)\right\} = \frac{N(a_j) - N(a_{j-1})}{a_j - a_{j-1}} \quad (2.32)$$

para $j = 1, 2, 3, \dots, k$, onde $a_0 = 0$ e $a_k = t_0$. Então a plotagem de $\hat{v}(b_j)$ versus $b_j = \frac{1}{2}(a_{j-1} + a_j)$ oferece uma razoável indicação da forma da ROCOF. A escolha de k e a_j é facultada ao usuário, tal como na construção de um histograma, sendo aconselhável experimentar várias subdivisões a fim de verificar se a impressão visual dada pela plotagem não é muito dependente do agrupamento usado.

A plotagem de $\ln \hat{v}(b_j)$ versus b_j deve ser razoavelmente linear, com coeficiente angular β_1 e coeficiente linear β_0 se $v_1(t)$ é a escolha apropriada. A plotagem de $\ln \hat{v}(b_j)$ versus $\ln b_j$ deve ser razoavelmente linear, com coeficiente angular $\delta - 1$ e coeficiente linear $\ln \gamma + \ln \delta$ se $v_2(t)$ é a escolha apropriada (CROWDER et al., 1991, p. 174-176).

Se o ajuste dos pontos é feito por regressão linear, a observação do coeficiente de determinação R^2 pode auxiliar na escolha do número e do tamanho dos intervalos.

O passo seguinte é comparar β_0, β_1, γ e δ obtidos por regressão linear e por log-verossimilhança. Escolhe-se entre $v_1(t)$ ou $v_2(t)$ a partir da maior proximidade dos seus parâmetros obtidos pelos métodos citados.

2.7 ANÁLISE DA TENDÊNCIA DOS INTERVALOS ENTRE FALHAS

A disposição em gráfico do número acumulado de falhas e do tempo acumulado dessas falhas fornece uma visão inicial da possível tendência de melhoria ou deterioração da ROCOF (ASCHER; FEINGOLD, 1984; RIGDON; BASU, 2000).

Testes estatísticos formais permitem afirmações mais categóricas sobre essa tendência, como destacado por Ascher e Feingold (1984). Estes, além de Crowder et al. (1991), Ascher e Hansen (1998) e Rigdon e Basu (2000) sugerem procedimentos baseados em plotagem gráfica e testes de tendência para avaliar o comportamento dos dados e auxiliar na proposição do modelo os representará. A seguir são apresentados os testes (i) de Laplace, (ii) da norma MIL-HDBK 189 e (iii) TTT (*Total Time on Test*).

O teste de Laplace, aplicado à análise da tendência dos tempos de falha, tem a forma mostrada na Equação 2.33, quando o período de observação é estipulado $[0, t_0)$. Decorre do fato das variáveis aleatórias $T_1 < T_2 < \dots < T_n$ serem distribuídas como n estatísticas de ordem de uma distribuição que é uniforme no citado intervalo (RIGDON; BASU, 2000, p. 111).

$$U = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n t_i - t_0}{n} - \frac{t_0}{2}}{t_0 \sqrt{\frac{1}{12n}}} \quad (2.33)$$

onde t_i = tempo da i -ésima falha; n = número de falhas; t_0 = final do intervalo de observação.

A ideia do teste de Laplace é comparar o centroide dos tempos observados com o ponto médio do período de observação. Valores positivos de U indicam que o centroide está à direita do ponto médio do intervalo, ou seja, há um número maior de falhas à direita, sugerindo uma ROCOF aumentando com o tempo (COX; LEWIS, 1966).

Ridgon e Basu (2000) indicam que a variável U tem distribuição aproximadamente normal, com média 0 e desvio padrão 1. Então a hipótese nula (H_0) que prevê que o processo é um HPP (ROCOF constante) é rejeitada se $U < -u_{\alpha/2}$ ou $U > u_{\alpha/2}$, onde $u_{\alpha/2}$ é o valor tal que a área a sua direita é $\alpha/2$ na distribuição normal padrão.

Em engenharia, um nível de significância estatística α menor que 5% usualmente pode ser considerado de evidência suficiente para rejeitar H_0 . Um nível maior que 10% normalmente não constitui evidência suficiente e pode-se tanto rejeitar H_0 quanto realizar mais triagens para obter mais dados (O'CONNOR, 2002). Rigdon e Basu (2000, p. 112) destacam ainda a importância de informar o valor-p (*P-value*) do teste estatístico ao invés de apenas aceitar ou rejeitar H_0 .

O valor-p é uma probabilidade e informa sobre o menor nível de significância que levaria à rejeição de H_0 , com base no tamanho da amostra. Para testes baseados na distribuição normal, obtém-se o valor-p a partir da probabilidade $P = 2[1 - \Phi(|z_0|)]$, teste bicaudal, onde $\Phi(|z|)$ é a função distribuição de probabilidade (PDF) normal padrão. A hipótese H_0 é aceita se $\alpha < \text{valor-p}$ e rejeitada se $\alpha \geq \text{valor-p}$ (MONTGOMERY; RUNGER, 2003). No teste de Laplace (Equação 2.33), o valor-p é obtido a partir da verificação da probabilidade $P\{|U| > z_{\alpha/2}\}$ ou da expressão equivalente $2P\{U > z_{\alpha/2}\}$.

Bates (1955 apud ASCHER; FEINGOLD, 1984) e O'Connor (2002) indicam que a estatística U rapidamente se aproxima da distribuição normal padrão, sendo adequada ao nível de significância de 5% para $n \geq 3$ quando o intervalo se encerra num tempo pré-determinado.

Cox e Lewis (1966) indicam o teste de Laplace como eficaz para verificar a hipótese de ausência de tendência quando o modelo proposto é o NHPP da Equação 2.21. Ascher e Feingold (1984), Crowder et al. (1991) e Rigdon e Basu (2000) destacam a simplicidade do teste (fácil de aplicar e interpretar), bem como sua eficácia para outros modelos de NHPP distintos de $\nu_1(t)$ (ASCHER; FEINGOLD, 1984).

Um teste alternativo ao de Laplace para verificar a tendência dos tempos entre falhas foi apresentado na norma MIL-HDBK 189 (UNITED STATES, 1981), sendo destacado por Ascher e Feingold (1984, p. 79), Crowder et al. (1991, p. 172-173) e Ridgon e Basu (2000, p. 111). Quando se estipula o período de observação $[0, t_0)$, o teste estatístico é

$$\hat{\beta} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \ln(t_0/t_i)} \quad (2.34)$$

onde t_i = tempo da i -ésima falha; n = número de falhas; t_0 = final do intervalo de observação.

Sob a hipótese nula (H_0) de HPP, ou ausência de tendência da ROCOF, a estatística $2n/\hat{\beta}$ tem distribuição chi-quadrada com $2n$ graus de liberdade. Rejeita-se H_0 se $\frac{2n}{\hat{\beta}} < \chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(2n)$ ou $\frac{2n}{\hat{\beta}} > \chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(2n)$.

Bain and Engelhardt (1991 apud RIDGON; BASU, 2000, p. 111) mostraram que o teste é ótimo se a hipótese alternativa de falha é o NHPP com ROCOF da Equação 2.22.

O teste TTT (*Total Time on Test*) foi proposto por Barlow e Campo (1975 apud RIDGON; BASU, 2000, p. 96). Estes, além de Ascher e Hansen (1998, p. 454), o indicam para verificar a aderência dos dados à distribuição exponencial. O teste se aplica a intervalos entre falhas X_1, X_2, \dots, X_n dispostos em ordem crescente, de forma que $x_{(1)} < x_{(2)} < \dots < x_{(n)}$.

Define-se

$$S_j = \begin{cases} 0, & \text{se } j = 0 \\ \sum_{j=1}^i (n-j+1)[X_{(j)} - X_{(j-1)}], & \text{se } j \geq 1 \end{cases}$$

O teste TTT prevê a plotagem de pares ordenados $(j/n, u_j)$, para $j = 0, 1, 2, \dots, n$, onde a estatística $u_j = S_j/S_n$. Ridgon e Basu (2000, p. 96) e Ascher e Hansen (1998, p. 454) mencionam que se a distribuição dos intervalos entre falhas é exponencial, o teste TTT converge para a diagonal de um quadrado de lado unitário. Sendo assim, o teste TTT pode ser utilizado como teste gráfico de aderência para a distribuição exponencial.

Ascher e Hansen (1998, p. 454) ainda mencionam que a estatística acumulada e normalizada W pode ser utilizada para testar a hipótese nula (H_0) de ajuste exponencial.

$$W = \frac{(\sum_{j=1}^{n-1} u_j) - \frac{n-1}{2}}{\sqrt{\frac{n-1}{12}}} \quad (2.35)$$

Há evidência contrária a H_0 se $W > z_{\alpha/2}$, indicando aumento da FOM, ou $W < -z_{\alpha/2}$, indicando diminuição da FOM.

2.8 PREVISÃO DO NÚMERO FUTURO DE FALHAS COM HPP, RP OU NHPP

Para o NHPP, o número esperado de falhas em um intervalo (a, b) de interesse pode ser obtido a partir da Equação 2.2 e das equações que representam a ROCOF $v(t)$. Para o NHPP com ROCOF $v_1(t) = \exp(\beta_0 + \beta_1 t)$, Equação 2.21, tem-se

$$E\{N(t)\} = \frac{e^{\beta_0}}{\beta_1} \{e^{b\beta_1} - e^{a\beta_1}\} \quad (2.36)$$

com β_0 e β_1 estimados a partir das Equações 2.24 e 2.25.

Para o HPP, visto que X_i têm distribuição exponencial, com média $1/v$ e a ROCOF $v(t) = v$, constante, tem-se

$$E\{N(t)\} = v\Delta t = v(b - a) \quad (2.37)$$

com v estimado a partir da Equação 2.16.

Para o RP, com X_i distribuídos segundo Weibull com parâmetros λ, β , tem-se

$$E\{N(x)\} = \lambda\beta \int_0^t (x^{\beta-1}) dx \quad (2.38)$$

2.9 DISPONIBILIDADE (DE SISTEMAS REPARÁVEIS)

Na linguagem coloquial (não técnica), entende-se disponibilidade como uma qualidade ou estado do que é disponível (FERREIRA, 1975). A Norma NBR 5462, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), define disponibilidade como

“a capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade¹⁰ e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados” (ABNT, 1994).

Adequando a citada definição a sistemas reparáveis, usa-se a ideia desenvolvida por Ross (2007) de um sistema composto por n componentes, cada qual com tempos de falha

¹⁰ Definida na mesma referência como “a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos”.

exponencialmente distribuídos, de forma que é possível expressar o comportamento desses tempos por meio de taxas v_i constantes. Os tempos de reparo também são exponencialmente distribuídos com taxas μ_i . Além disso, todos os componentes agem independentemente. Supondo que esses componentes estejam operantes em $t = 0$, Ross define disponibilidade $A(t)$ como a probabilidade de que o sistema esteja funcionando no tempo t e demonstra que

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = r \left(\frac{\mu}{\mu + v} \right)$$

onde r representa a função confiabilidade do sistema.

A confiabilidade r de sistemas reparáveis pode ser expressa por meio da confiabilidade dos seus componentes. Do pressuposto de independência dos componentes, Ross (2007, p. 578) informa que

$$r = r(p_1, p_2, \dots, p_n)$$

onde p_i representa a probabilidade do componente i estar funcionando, ou seja, a confiabilidade do sistema é função da confiabilidade dos seus componentes. Quando esses componentes estão associados em série, $r(\mathbf{p}) = \prod_{i=1}^n p_i$ e

$$A(t) = \prod_{i=1}^n \left[\frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i} + \frac{v_i}{\mu_i + v_i} e^{-(v_i + \mu_i)t} \right] \quad (2.39)$$

Para um sistema cujos componentes estejam associados em paralelo, a confiabilidade é dada por $r(\mathbf{p}) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i)$ e

$$A(t) = 1 - \prod_{i=1}^n \left[\frac{v_i}{\mu_i + v_i} (1 - e^{-(v_i + \mu_i)t}) \right] \quad (2.40)$$

A despeito dos pressupostos de exponencialidade para as distribuições dos tempos de falha e de reparo, que significam taxas de falha e reparo constantes, nem sempre verificáveis em um sistema reparável, as Equações 2.39 e 2.40 evidenciam a participação do reparo na disponibilidade do sistema, sendo que pode-se expressar a indisponibilidade por $1 - A(t)$.

Adaptando o conceito de disponibilidade ao objetivo deste trabalho, necessita-se conhecer a disponibilidade (e a indisponibilidade) da rede automática de monitoramento da

qualidade do ar ou, mais propriamente, das estações que a compõem, lembrando que cada estação é composta por monitores, equipamentos de calibração e outros de apoio (aos quais denominou-se genericamente de infraestrutura). Adotando-se a nomenclatura desenvolvida neste capítulo, pode-se chamar a rede automática de sistema reparável ou simplesmente sistema, composto por vários subsistemas (estações), que, por sua vez, também podem ser discretizados (monitores e demais equipamentos), até os componentes que os compõem.

Expressar a disponibilidade desse sistema por meio de modelos matemáticos é tarefa complexa, que está além do objetivo deste trabalho. Por sua vez, entendendo-se a definição da norma NBR 5462 como a parcela das estações que operam anualmente e geram dados válidos, daqui por diante denomina-se indisponibilidade da rede automática, por parâmetro monitorado, a porcentagem das estações que não atenderam ao critério de representatividade.

Pode-se entender o contexto da aplicação desta definição por meio de um exemplo. Supõe-se que a estação Pinheiros operou e gerou medições válidas por 275 dias em 2008, ou seja, não operou 90 dias no ano. Se a interrupção ocorreu predominantemente num quadrimestre, por exemplo durante 70 dias no primeiro, pelo critério de representatividade mostrado no item 1.1.1.2, as medições para o cálculo das concentrações de longo prazo não são consideradas válidas no ano. Em outra situação, se os mesmos 90 dias estão distribuídos igualmente ao longo do ano, o critério é atendido e as medições são consideradas válidas. Assim, o conceito de disponibilidade adotado não está associado diretamente ao tempo de funcionamento das estações, mas ao atendimento ao critério de representatividade das medições, que depende das interrupções no funcionamento destas e da distribuição dessas interrupções ao longo do ano.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A seguir caracteriza-se o objeto e apresenta-se os métodos adotados no estudo.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

A rede de monitoramento da qualidade do ar conta com estações manuais e automáticas distribuídas pelo estado de São Paulo, que medem a concentração de poluentes de interesse para a caracterização dessa qualidade.

O objeto de estudo deste trabalho é a rede composta pelas estações automáticas. A razão decorre do seu elevado volume de dados gerado diariamente, significativamente maior que os da rede manual, e que suportam com predominância o conjunto de informações disponibilizadas pela CETESB à população. Outra razão é que a rede automática é composta por grande número de equipamentos eletrônicos (monitores de poluentes e equipamentos de calibração) similares, tornando-se, portanto, uma amostra de tamanho significativo, a partir da qual se pode discutir o comportamento das suas falhas e propor medidas que as minimizem.

Temporalmente, este trabalho aborda o período de 1998 a 2008, visto que em 1998 iniciou-se o registro sistemático da manutenção corretiva e preventiva de cada monitor. Até 1998, os registros eram esporádicos, feitos em documentos que não puderam ser resgatados.

De acordo com CETESB (2009), ao longo do seu funcionamento a rede passou por modificações em alguns métodos de amostragem e análise de poluentes, de modo a acompanhar as mudanças tecnológicas ocorridas. Também ocorreram mudanças na sua configuração, de forma a acompanhar as alterações no perfil das fontes de emissão dos poluentes e atender melhor alguns dos objetivos de monitoramento. Sabe-se que os equipamentos são mudados entre as estações, de acordo com necessidades operacionais ou de manutenção. Por essa razão este trabalho não faz uma associação direta entre equipamentos de medição e de calibração e a localização destes nas estações.

A seguir apresenta-se uma descrição da rede de estações automáticas, com a localização das estações e os poluentes medidos nestas.

3.1.1 Rede de estações automáticas

A rede de estações automáticas¹¹ funciona desde 1981 na RMSP e Cubatão e, desde 2000, nos municípios de Campinas, Paulínia, São José dos Campos e Sorocaba (CETESB, 2007). Em 1996 foi modernizada com a renovação dos monitores de qualidade do ar, boa parte deles ainda em operação. Em 2008 era composta por quatro estações móveis e 41 estações fixas, responsáveis pelo monitoramento de onze Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI). A RMSP, inserida na UGRHI 6, conta com 22 estações fixas. As demais estações estão distribuídas pelo interior e no município de Cubatão, sendo que as estações móveis monitoraram Jaú e Ribeirão Preto, no interior, além dos bairros de Itaquera e Horto Florestal, no município de São Paulo. A Figura 3.1 apresenta o mapa do Estado com a localização dessas estações em 2008 (CETESB, 2009).

Diz-se que a rede é automática porque cada estação é composta por equipamentos de calibração e de medição da concentração de poluentes que operam continuamente, coletando amostras a cada cinco segundos, analisando-as e calculando a concentração desses poluentes, além de realizarem médias horárias das concentrações, as quais são retransmitidas para uma central de monitoramento, na sede da CETESB, por linha telefônica (CETESB, 2008, p. 31).

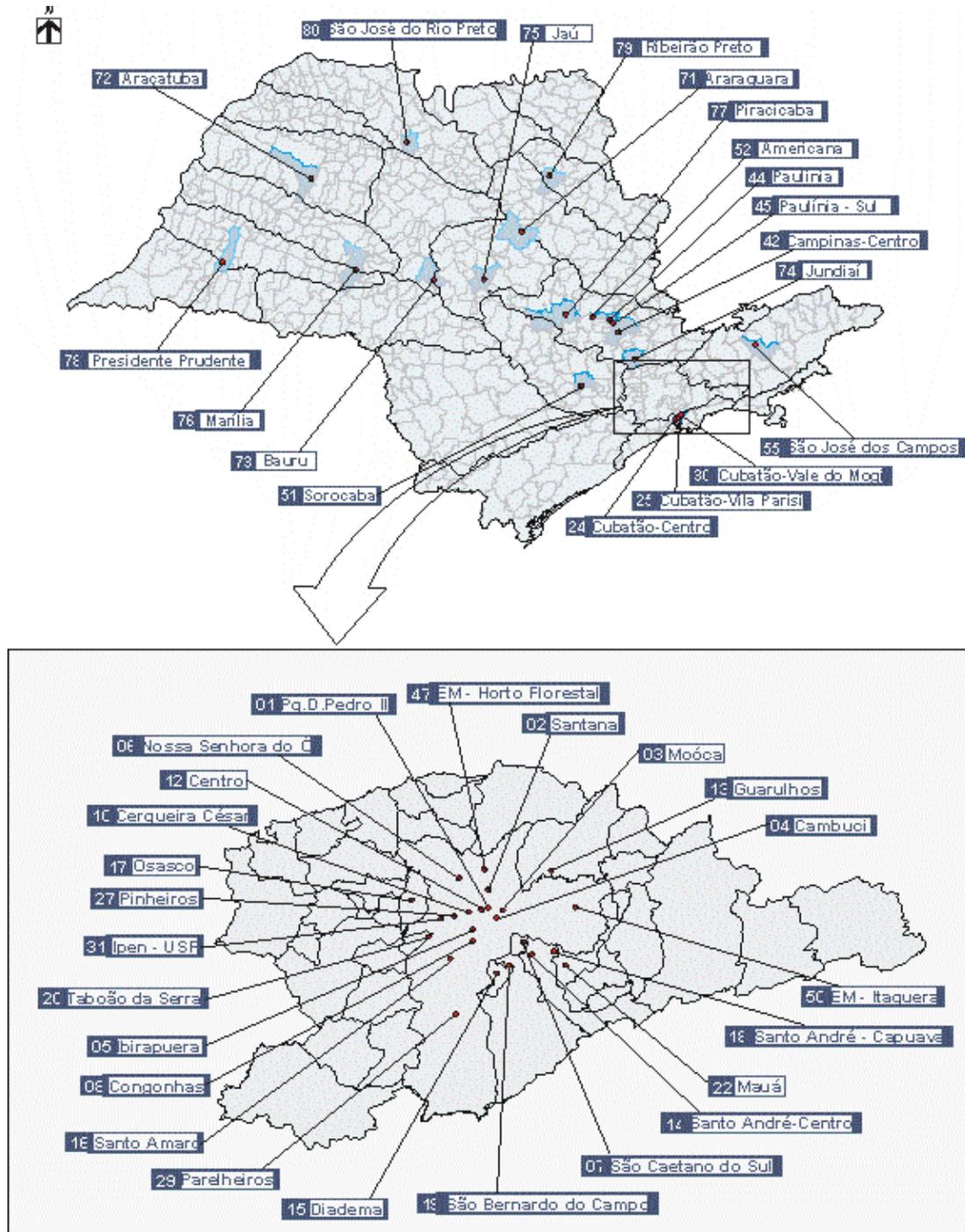
A seguir, se detalha os constituintes dessa rede, começando pelas estações e, posteriormente, os monitores e equipamentos de calibração.

3.1.1.1 Estação automática

A Figura 3.2 exemplifica uma estação automática e a Figura 3.3 a sua configuração típica, composta por monitores eletrônicos que medem partículas inaláveis (MP₁₀), dióxido de

¹¹ Por facilidade, deste ponto em diante a rede de estações automáticas será chamada de rede automática.

enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x)¹², monóxido de carbono (CO) e ozônio (O₃), conforme apresentado no Quadro 3.1 e na Figura 3.4, além dos equipamentos de calibração¹³ como o multicalibrador e o purificador de ar.



Fonte: CETESB, 2009

Figura 3.1 Localização das estações da rede automática em 2008

¹²Denominação para representar óxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂).

¹³Por facilidade, deste ponto em diante, monitores eletrônicos de poluentes e equipamentos de calibração serão chamados genericamente de monitores, exceto quando for necessário destacá-los isoladamente.

Parte das estações também dispõe de equipamentos que medem parâmetros meteorológicos como umidade relativa, temperatura, velocidade do vento, direção do vento, pressão atmosférica e radiação global e ultravioleta. Fazem ainda parte da estação equipamentos de apoio como aparelho de ar condicionado e microcomputador, exemplificados na Figura 3.5 (CETESB, 2009).

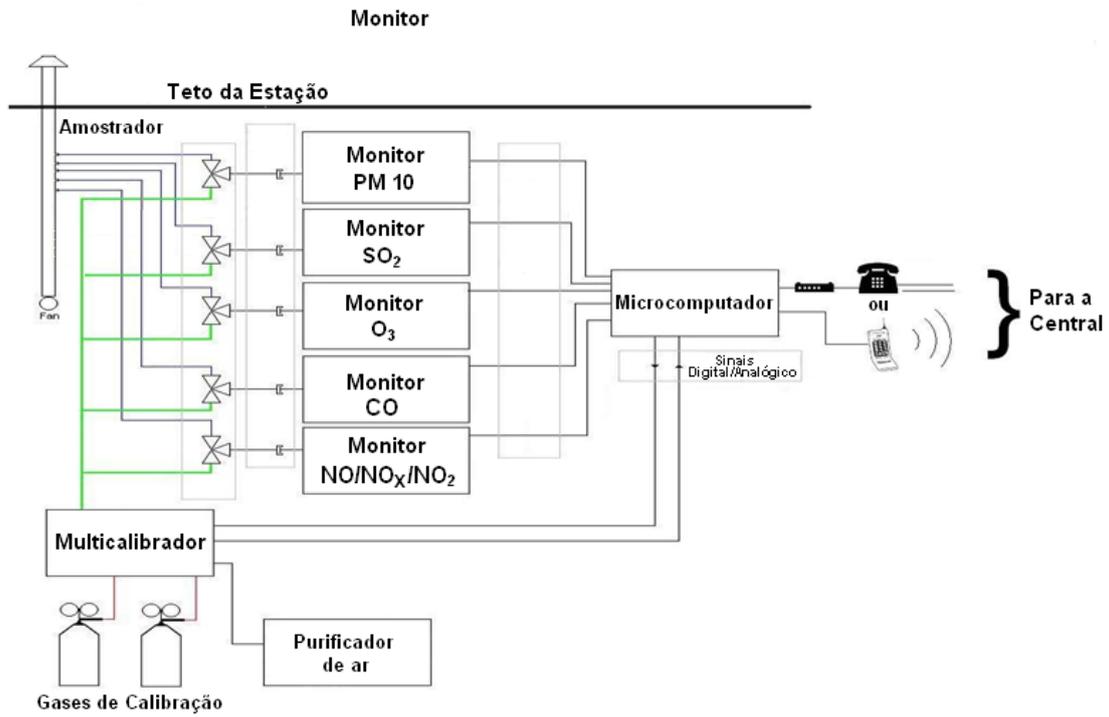


Fonte: < <http://java.cetesb.sp.gov.br/qualar/relConfiguracaoEstacao.do?method=gerarRelatorioArquivoFotografico&nestcaMonto=114>>

Figura 3.2 Estação automática de monitoramento da qualidade do ar instalada em Presidente Prudente

A temperatura de operação no interior da estação é 25°C, único parâmetro ambiental controlado¹⁴.

¹⁴Informação verbal fornecida pelo Setor de Telemetria da CETESB.



Fonte: modificado de NISHIKAWA, 2007

Figura 3.3 Configuração de uma estação automática



Fonte: arquivo pessoal de JOSÉ CARLOS DE MOURA XAVIER

Figura 3.4 Equipamentos de monitoramento de (a) ozônio, (b) óxidos de nitrogênio



Fonte: arquivo pessoal de JOSÉ CARLOS DE MOURA XAVIER

Figura 3.5 Equipamentos de apoio: (a) microcomputador, (b) ar condicionado

Quadro 3.1 Estações da rede automática em 2008 e os parâmetros monitorados

UGRHI	Número e denominação da estação	Parâmetro				
		MP ₁₀	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃
2	55 São José dos Campos	x	x			x
4	79 Ribeirão Preto	x		x		x
5	52 Americana					x
	42 Campinas - Centro	x			x	
	74 Jundiaí	x		x		x
	44 Paulínia	x	x	x		x
	45 Paulínia - Sul	x		x		x
	77 Piracicaba	x		x		x
6	4 Cambuci	x				
	12 Centro	x			x	
	10 Cerqueira César	x	x	x	x	
	8 Congonhas	x	x	x	x	
	5 Ibirapuera	x		x	x	x
	31 IPEN - USP			x	x	x
	3 Moóca	x			x	x
	6 Nossa Senhora do Ó	x				x
	29 Parelheiros	x			x	x
	1 Parque D. Pedro II	x		x	x	x
	27 Pinheiros	x		x	x	x
	2 Santana	x				x
	16 Santo Amaro	x			x	x
	15 Diadema	x				x
	13 Guarulhos	x	x			
	22 Mauá	x		x		x
	17 Osasco	x	x	x	x	
	18 Santo André - Capuava	x				x
	14 Santo André - Centro	x			x	
	19 São Bernardo do Campo	x				
7	7 São Caetano do Sul	x	x	x	x	x
	20 Taboão da Serra	x		x	x	
7	24 Cubatão - Centro	x	x	x		x
	25 Cubatão - Vila Parisi	x	x	x		x
	30 Cubatão - Vale do Mogi	x	x	x		x
10	51 Sorocaba	x		x		x
13	71 Araraquara	x		x		x
	73 Bauru	x		x		x
	75 Jaú	x		x		x
15	80 São José do Rio Preto	x		x		x
19	72 Araçatuba	x		x		x
21	76 Marília	x		x		x
22	78 Presidente Prudente	x		x		x
	49 Estação móvel I (a)	x	x	x	x	x
	50 Estação móvel II (b)	x		x		x
	47 Estação móvel III (c)			x		x
	61 Estação móvel IV (d)					x

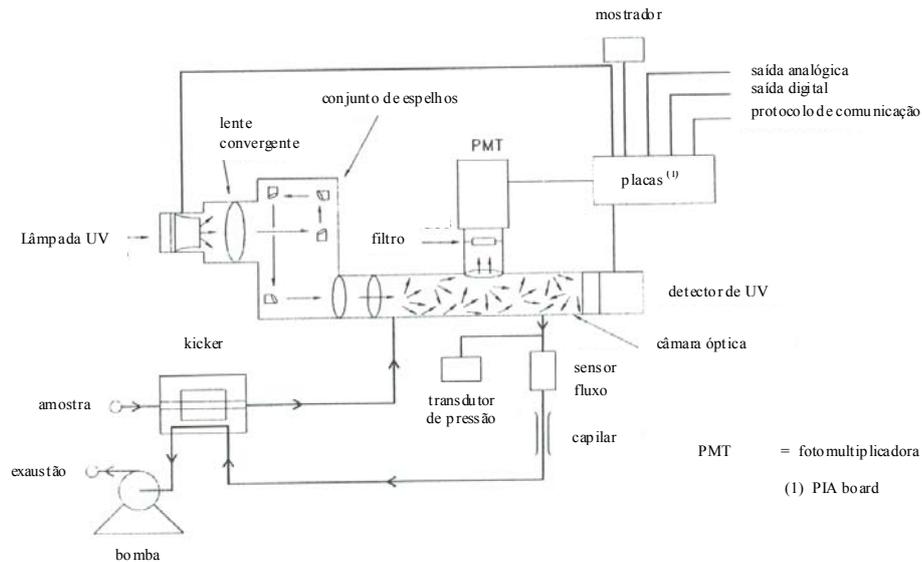
Fonte: CETESB, 2009

Em 2008 as estações móveis monitoraram (a) Ribeirão Preto; (b) Itaquera, São Paulo; (c) Horto Florestal, São Paulo; (d) Jaú

A seguir, detalha-se os monitores, princípio de funcionamento e seus principais componentes.

Monitor de dióxido de enxofre (SO₂)

Os modelos em operação são os 43B e 43C, representados pela Figura 3.6.



Fonte: modificado de THERMO ENVIRONMENTAL INSTRUMENTS INC., 1995a

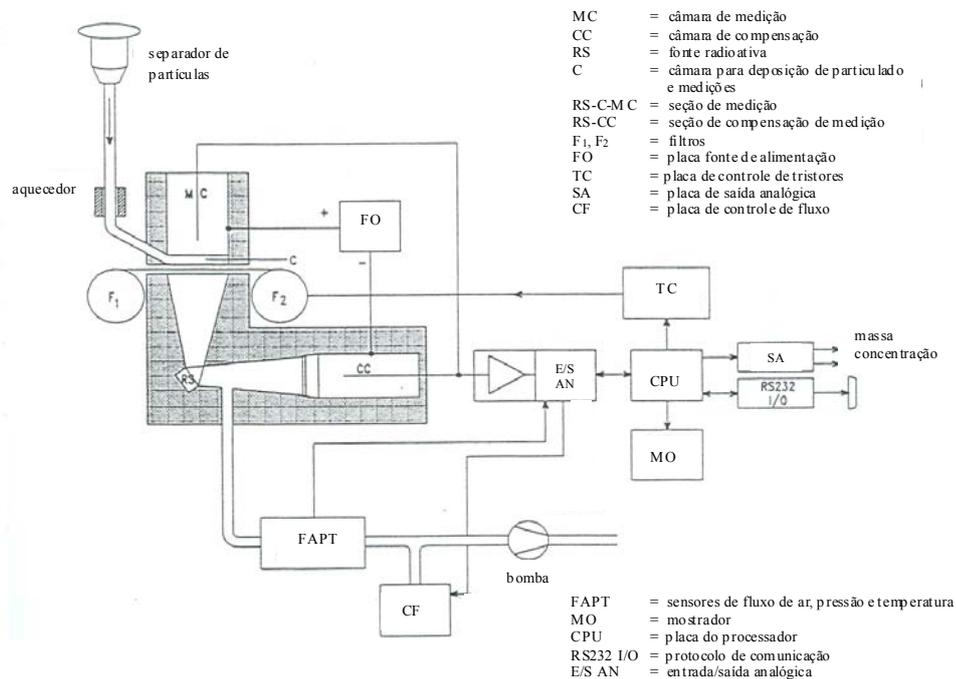
Figura 3.6 Representação esquemática do monitores de dióxido de enxofre 43B e 43C

Dióxido de enxofre é medido pelo método de fluorescência de pulso (ultravioleta). Uma luz ultravioleta pulsante é filtrada e direcionada para o interior de uma câmara de fluorescência. O ar ambiente amostrado entra na câmara, onde ocorre a excitação das moléculas de SO₂ para um estado de energia mais elevado. Conforme esse estado decresce as moléculas de SO₂ excitadas emitem uma radiação característica. Um tubo fotomultiplicador converte essa radiação em sinais eletrônicos linearmente proporcionais à concentração de SO₂, que são devidamente filtrados e amplificados pelo microcontrolador do equipamento que, por sua vez, apresenta em seu visor e na sua saída analógica (utilizada para armazenar os dados em microcomputador) a concentração instantânea.

O método é designado equivalente pela Agência Ambiental Norte Americana (USEPA) para medir a concentração ambiente de SO₂, de acordo com os requisitos do “Code of Federal Regulations, Title 40, Part 53”.

Monitor de partículas inaláveis (MP₁₀)

Os modelos em operação são os Kr-85 e C14, representados pela Figura 3.7.



Fonte: modificado de ANDERSEN INSTRUMENTS INC., s/d

Figura 3.7 Representação esquemática dos monitores de partículas inaláveis Kr-85 e C14

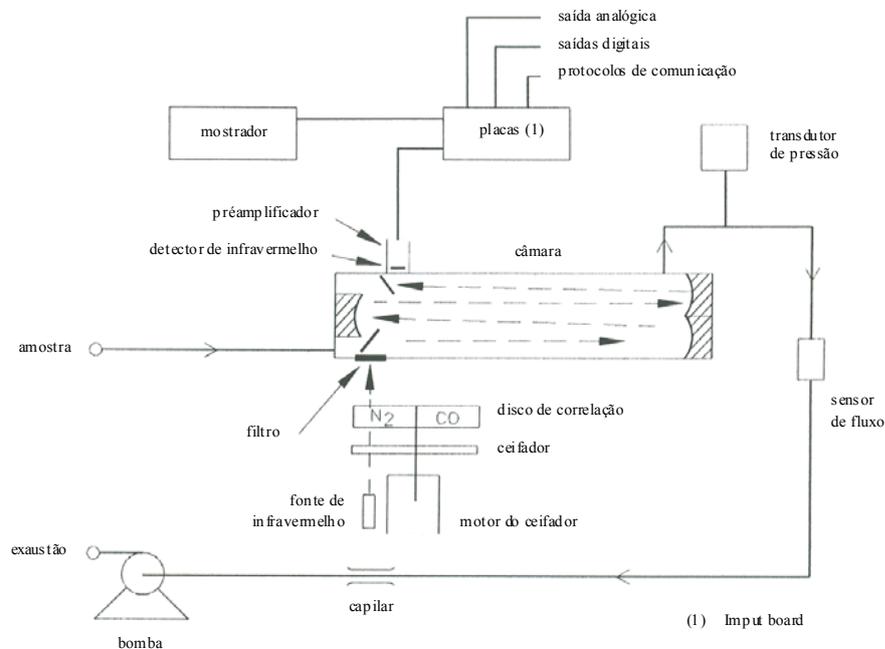
Partículas inaláveis com diâmetro $\leq 10 \mu\text{m}$ são medidas pelo método radiação beta. O ar ambiente é succionado por uma bomba a um fluxo constante e o material particulado nele presente é depositado sobre uma fita. Uma fonte instalada no instrumento emite radiação beta (Kr-85 ou C14) que passa através das partículas depositadas na fita. A atenuação desse fluxo de radiação, cuja intensidade é medida com a ajuda de uma câmara de ionização, constitui uma medição de massa através da qual a radiação passou. O valor dessa massa medida é amplificado, convertido para sinal digital e processado pelo microcontrolador do instrumento,

que, baseado nos valores de vazão (a qual é eletronicamente controlada) e nos valores de massa mensurados, calcula o valor da concentração em $\mu\text{g}/\text{m}^3$, exibido no display e atualizado na saída analógica para conexão com microcomputador.

O método é designado equivalente pela USEPA para medir a concentração ambiente de ozônio, de acordo com os requisitos do “Code of Federal Regulations, Title 40, Part 53”.

Monitor de monóxido de carbono (CO)

Os modelos em operação são os 48B e 48C, representados pela Figura 3.8.



Fonte: modificado de THERMO ENVIRONMENTAL INSTRUMENTS INC., 1996

Figura 3.8 Representação esquemática dos monitores de monóxido de carbono 48B e 48C

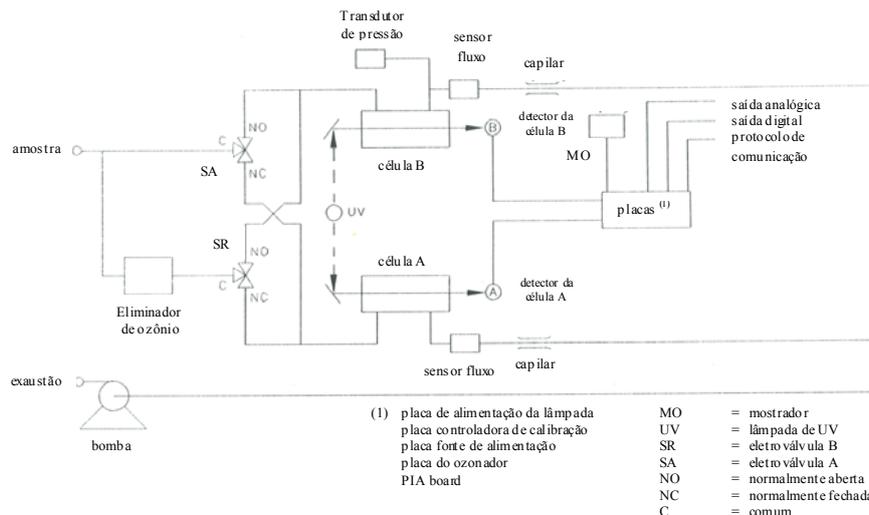
Monóxido de carbono é medido pelo método infravermelho não dispersivo. As moléculas do CO absorvem radiação infravermelha. O instrumento consiste de um banco óptico no qual em uma das extremidades tem-se uma fonte de infravermelho não dispersivo e na outra um detector de infravermelho. O ar ambiente amostrado entra no banco óptico e a concentração de CO é determinada de acordo com a intensidade de infravermelho absorvida.

Um filtro de correlação garante que toda absorção considerada na determinação da concentração é devida à presença do CO. Um microcontrolador trata o sinal de saída do detector e apresenta em seu visor e na sua saída analógica (utilizada para armazenar os dados em microcomputador) a concentração instantânea.

O método é designado de referência pela USEPA para medir a concentração ambiente de monóxido de carbono, de acordo com os requisitos do “Code of Federal Regulations, Title 40, Part 53”.

Monitor de ozônio (O₃)

Os modelos em operação são os 49B e 49C, representados pela Figura 3.9.



Fonte: modificado de THERMO ENVIRONMENTAL INSTRUMENTS INC., 1995b

Figura 3.9 Representação esquemática dos monitores de ozônio 49B e 49C

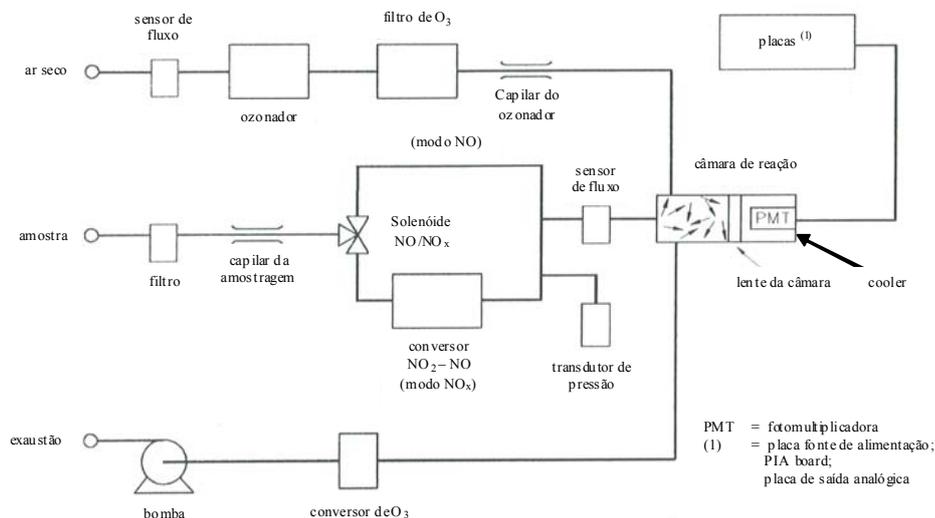
O monitor é um fotômetro ultravioleta que determina a concentração medindo a atenuação de luz ultravioleta em virtude do O₃ dentro de uma célula de absorção. A sua concentração é relacionada com a magnitude da absorção. Um gás de referência passa através de uma das células de absorção (são duas no total) enquanto o ar amostrado passa pela outra. Portanto têm-se a leitura de intensidade de luz para uma concentração de “zero” ppb de O₃ (gás de referência) e a leitura de intensidade de luz para a concentração ambiente

do poluente. A relação dessas duas leituras é a medida de luz absorvida pelo O_3 e está diretamente relacionada à concentração do mesmo no ar ambiente. Um microcontrolador trata o sinal de saída do fotômetro e apresenta em seu visor e na sua saída analógica (utilizada para armazenar os dados em microcomputador) a concentração instantânea.

O método é designado equivalente pela USEPA para medir a concentração ambiente de ozônio, de acordo com os requisitos do “Code of Federal Regulations, Title 40, Part 53”.

Monitor de óxidos de nitrogênio (NO_x)

Os modelos em operação são os 42B e 42C, representados pela Figura 3.10.



Fonte: modificado de THERMO ENVIRONMENTAL INSTRUMENTS INC., 2000

Figura 3.10 Representação esquemática dos monitores de óxidos de nitrogênio 42B e 42C

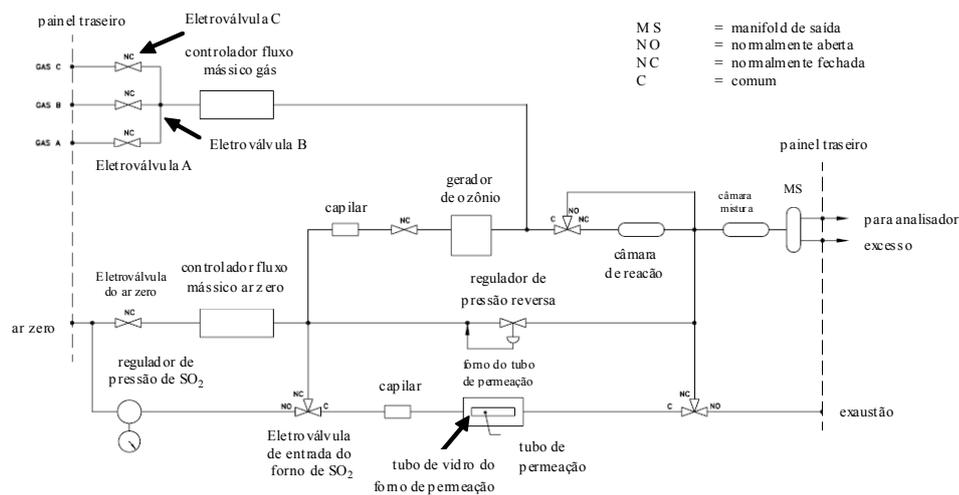
Óxidos de nitrogênio são medidos pelo método quimiluminescência. A reação entre as moléculas de óxido de nitrogênio (NO) da amostra e ozônio (O_3) gerado no monitor produz quimiluminescência característica, com intensidade linearmente proporcional à concentração de NO . Essa característica quimiluminescente é medida por um tubo fotomultiplicador que a converte em sinais eletrônicos analógicos, que são tratados pelo microcontrolador do monitor. O dióxido de nitrogênio (NO_2) da amostra é convertido em NO antes de ser medido pela reação quimiluminescente. Assim o instrumento mede inicialmente a concentração de NO e

armazena o resultado na memória do microcontrolador, direciona o fluxo para o conversor, onde ocorre a reação de conversão de NO_2 em NO , retorna para a câmara de reação, onde ocorre reação quimiluminescente de toda a amostra (NO da amostra e da conversão), e armazena o resultado. A diferença entre medições dá a concentração de NO_2 .

O método é designado de referência pela USEPA para medir a concentração ambiente de NO_x , de acordo com os requisitos do “Code of Federal Regulations, Title 40, Part 53”.

Multicalibrador

Os modelos em operação são os 146B e 146C, representados pela Figura 3.11.



Fonte: modificado de THERMO ENVIRONMENTAL INSTRUMENTS INC., 1995c

Figura 3.11 Representação esquemática dos multicalibradores 146B e 146C

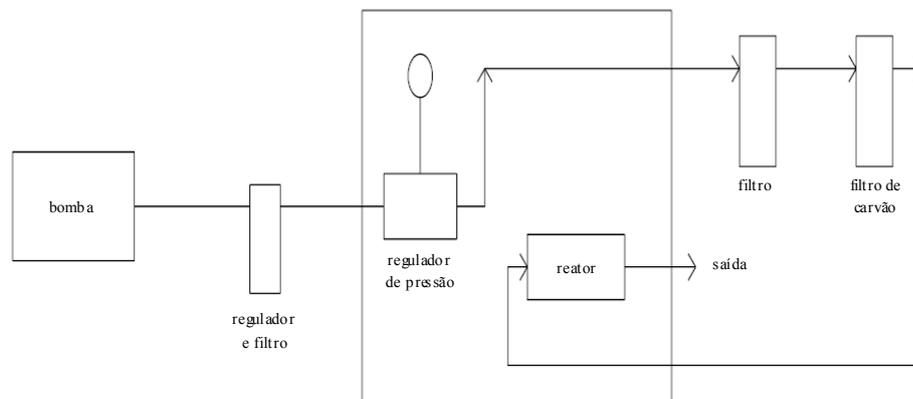
O papel do multicalibrador é diluir os gases de calibração (NO e CO), armazenados em cilindros, com ar proveniente do purificador de ar até concentrações predeterminadas, com precisão, e enviar as misturas aos analisadores que as utilizam para calibração.

A admissão do ar e de cada gás de calibração na câmara de mistura é controlada por válvulas solenoides de admissão e controladores de fluxo. Após a mistura, o gás diluído é enviado ao respectivo monitor para o procedimento de calibração, realizado diariamente.

O equipamento também dispõe de gerador de ozônio, o qual é misturado na câmara com ar proveniente do purificador e enviado ao monitor de O_3 da estação para o procedimento de calibração. Ainda dispõe de forno que aquece uma fonte de permeação (tubo preenchido com SO_2 em estado líquido). O gás permeia a fonte a taxa constante, sendo posteriormente misturado ao ar e enviado ao monitor de SO_2 para o procedimento de calibração.

Purificador de ar

Os modelos em operação são os Philips, API e 111, representados pela Figura 3.12.



Fonte: modificado de THERMO ENVIRONMENTAL INSTRUMENTS INC., s/d

Figura 3.12 Representação esquemática dos purificadores de ar Philips, API e 111

O papel do equipamento é fornecer ar isento de hidrocarbonetos e dos gases NO , NO_2 , O_3 , SO_2 , CO . Esse ar é utilizado no multicalibrador para diluir os gases de calibração, que serão posteriormente enviados aos analisadores. Para isso utiliza um compressor externo, reguladores de pressão, filtros químicos, reator e controlador de temperatura.

O ar ambiente que entra no compressor é comprimido a 80-90 psi, filtrado e liberado na pressão de 70 psig. No equipamento, a pressão do ar é reduzida para 10-30psi. O ar entra no reator, onde é aquecido até $350\text{ }^{\circ}C$ sobre uma superfície catalítica, que converte CO em CO_2 e hidrocarbonetos, incluindo metano, em CO_2 e H_2O . Em seguida, o ar passa por uma coluna composta por alumina e permanganato de potássio, que oxida NO a NO_2 e, por fim,

por uma coluna de carvão ativado, que remove O₃, NO₂, SO₂ e hidrocarbonetos, resultando num fluxo de ar livre desses poluentes.

3.2 MÉTODOS

A seguir apresenta-se os métodos adotados para a execução das etapas (a) a (d) do item 1.2 *objetivos*.

3.2.1 Representatividade das medições

Para atender ao objetivo estabelecido no item 1.2, etapa (a), pesquisou-se os relatórios anuais e os boletins diários de qualidade do ar emitidos para o período de 1998 a 2008, com resultados apresentados no capítulo 4.

Os relatórios estão disponíveis em meio eletrônico a partir de 2001 no endereço eletrônico <http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/publicacoes.asp> e sua coleção completa, em meio impresso, na biblioteca da CETESB. Os boletins estão disponíveis no endereço eletrônico http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar_boletim_mensal.asp a partir de 2003 e em meio impresso, até 2002, no Setor de Telemetria da CETESB.

O método adotado foi composto pela leitura dos relatórios e boletins e o registro em planilhas como as disponibilizadas nos apêndices A e B. A seguir detalha-se o método.

Os relatórios são divididos em capítulos, sendo que o de interesse para este trabalho refere-se à informação e análise da qualidade do ar, pois nele estão presentes as informações acerca das estações que não atenderam ao critério de representatividade para cada um dos cinco parâmetros monitorados pela rede automática. Esse capítulo é, em geral, dividido com base nos parâmetros monitorados, com gráficos e tabelas com os principais resultados do monitoramento. A ausência de representatividade das medições, por parâmetro informado, é sinalizada por meio de asterisco junto ao nome da estação (CETESB, 2009). Os relatórios ainda apresentam tabelas detalhadas das medidas anuais, as quais também informam acerca da ausência de representatividade das medições, por estação e parâmetro.

Então, tomando-se por base cada relatório, coletou-se informações sobre as estações em que houve ausência de representatividade e o número de estações que mediram o parâmetro. Essas informações estão registradas na tabela do apêndice A, que também traz o ano, o parâmetro, a estação, a indicação de ausência de representatividade (x) e a referência de localização desses dados no relatório de qualidade do ar.

A pesquisa prosseguiu nos boletins diários de qualidade do ar. Deles foi possível extrair as diversas causas que levaram à invalidação da medição diária de um parâmetro, por estação. São causas recorrentes: falha do monitor, ausência de energia elétrica, falha no aparelho de ar condicionado, entre outras. Para o registro das causas foram criadas planilhas, como a apresentada no apêndice B. Cada uma traz o diagnóstico diário da falha, por parâmetro e por estação, sendo que as falhas dos monitores são indicadas por (x) e as demais por numeração sequencial, com legenda indicada na mesma tabela.

Neste ponto cabe um esclarecimento sobre a validação da medição¹⁵. Como informado no item 3.1.1, o critério de validação pressupõe medições do parâmetro de interesse em intervalos regulares – segundos em algumas situações – que constituirão médias horárias, diárias, mensais e anual. As médias horárias e diárias são realizadas por meio de software e disponibilizadas no boletim diário de qualidade do ar, sem prévia análise da equipe que acompanha a rede automática. As médias mensais e anual são obtidas manualmente pela equipe, que, com base nos valores das medições, pode invalidar “a posteriori” essas médias¹⁶.

Assim, para efeito deste trabalho, discrepâncias observadas entre os dados apresentados nos boletins diários e no relatório anual de qualidade do ar foram tratadas com a

¹⁵Informação verbal fornecida pelo Setor de Telemetria da CETESB.

¹⁶A situação descrita foi observada durante a coleta dos dados e evidenciada nas tabelas do apêndice B, por meio da aparente inconsistência entre o número de dias em que não se atingiu o critério de representatividade e o critério citado há pouco. A título de exemplo, pode-se observar no ano de 2006 a ausência de representatividade das medições de Ozônio (O₃) realizadas pela estação de São Caetano do Sul. Ao se computar os dias não representativos encontra-se 64, informação essa proveniente dos boletins diários. Contudo, o relatório de qualidade do ar (CETESB, 2007), na Tabela G do anexo 4, informa N = 235, portanto 130 dias com dados não representativos. A diferença no número de dias com dados não representativos (64 e 130) foi esclarecida com a informação acerca da análise e invalidação “a posteriori”.

equipe técnica do Setor de Telemetria, ficando evidente que o dado apresentado no relatório anual é o que melhor representa o processo de sua validação.

3.2.2 Atributos de confiabilidade da rede automática

Para atender ao objetivo estabelecido no item 1.2, etapa (c), buscou-se inicialmente abordar os tempos de falha dos monitores (MP₁₀, SO₂, CO, NO_x, O₃, purificador de ar e multicalibrador) que compõem a rede. O resultado da pesquisa é apresentado no capítulo 4.

Parte significativa dos monitores iniciou a operação em 1996, quando a rede foi modernizada (CETESB, 2008), porém o registro sistemático das manutenções corretiva e preventiva se deu a partir de 1998, por meio de livros registro¹⁷, instituídos como ferramenta de acompanhamento das manutenções. Até então, 1998, os registros eram esporádicos, feitos em documentos que não puderam ser resgatados.

As implicações pela ausência dos registros no período de 1996 a 1998 são: (i) possíveis falhas entre 1996 e 1998 não foram computadas e (ii) impossibilidade da análise da confiabilidade até a ocorrência da primeira falha, abordagem essa que, embora não importante para a análise de sistemas reparáveis, poderia ter interesse no estudo da distribuição dos tempos até a primeira falha.

Em cada livro registro constam a data de abertura, uma planilha de orientação para manutenção preventiva e os registros de ocorrências, entre eles falhas e trocas de componentes. O registro das falhas (componentes e tempos) e dos reparos é manual, realizado pelo técnico responsável pelo acompanhamento e manutenção da estação, estando, portanto, implícitas pequenas variações a maior nos registros dos tempos de falha.

As falhas coletadas foram as catastróficas¹⁸, portanto requerendo a substituição desse item (neste trabalho denominado componente). Também foram registradas as substituições de

¹⁷Os livros registro são documentos afetos ao gerenciamento de manutenção da rede automática, tendo sido consultados mediante solicitação junto ao Setor de Telemetria da CETESB.

¹⁸Definidas em ABNT (1994) como “[...] repentinas, que resultam na incapacidade completa de um item desempenhar todas as funções requeridas”.

componentes previstas no programa de manutenção preventiva vigente, mesmo quando estes não estavam em estado de falha.

O método adotado foi composto pela leitura sistemática dos livros registro e a anotação em planilhas como as que introduzem o apêndice C. A seguir detalha-se o método.

A coleta de dados considerou o período de 1998 a 31.12.2008 para equipamentos cuja operação foi iniciada até 1998 e o período compreendido entre o início de funcionamento do equipamento e 31.12.2008 para equipamentos cuja operação foi iniciada após 1998, exceto para aqueles casos em que o encerramento ocorreu antes dessa data. Para cada monitor montou-se uma planilha, tal como a observada no apêndice C. Nela constam as identificações do monitor, a data do início da operação, a data da detecção da falha (em geral também correspondendo à data da substituição do componente) o componente em falha, o tempo de operação até a falha (t_i), o intervalo entre falhas (x_i), as interrupções no funcionamento e o final do período de observação (t_0).

Dos 167 monitores inicialmente considerados, constantes do Quadro 3.2, por opção deste autor escolheu-se aqueles com cinco ou mais falhas (44 monitores) para realizar a análise dos dados de falha e as estimativas da taxa de ocorrência de falhas e do número esperado de falhas, seguindo a sequência proposta na Figura 3.13, cuja base conceitual baseou-se predominantemente em livros textos de confiabilidade de sistemas reparáveis. O capítulo 2 apresenta essa base e o capítulo 4 a sua aplicação aos dados mencionados.

Os passos iniciais previstos na Figura 3.13, até *exame visual dos dados*, foram realizados à medida que os dados foram coletados. Verificou-se a hipótese nula (H_0) de que os intervalos entre falhas (X_i) não apresentam tendência de crescimento ou diminuição utilizando os testes da norma MIL-HDBK 189 e de Laplace para o nível de significância α de 5%. Para os casos em que H_0 foi rejeitada, verificou-se adicionalmente o valor-p, de forma a confirmar o resultado do respectivo teste. Para os monitores cujos dados de falha não apresentaram

evidência estatística suficiente para rejeitar H_0 (ausência de tendência), aplicou-se o teste TTT, que tem como hipótese nula (H_0) intervalos entre falhas (X_i) seguindo uma distribuição exponencial e que, portanto, seguem o modelo processo de Poisson homogêneo (HPP). Aqui também se adotou o nível de significância α de 5%. Quando houve evidência suficiente para rejeitar H_0 , adotou-se o modelo processo de renovação (RP), com ROCOF baseada na distribuição de Weibull. Para os monitores que apresentaram tendência de diminuição dos X_i s, tratou-se os dados pelo processo de Poisson não homogêneo (NHPP), com a escolha entre os modelos exponencial linear $v_1(t)$ e lei das potências $v_2(t)$ para representar a taxa de ocorrência de falhas (ROCOF).

No tocante à disponibilidade da rede, procurou-se comparar seus índices com os de outras redes. Para isso, fez-se pesquisa na rede mundial de computadores em sítios das agências ambientais do Canadá, do Reino Unido, dos Estados Unidos da América e da União Européia, com resultados de interesse deste trabalho nos sítios das duas primeiras, apresentados no capítulo 4.

3.2.3 Influências decorrentes da ausência de medições

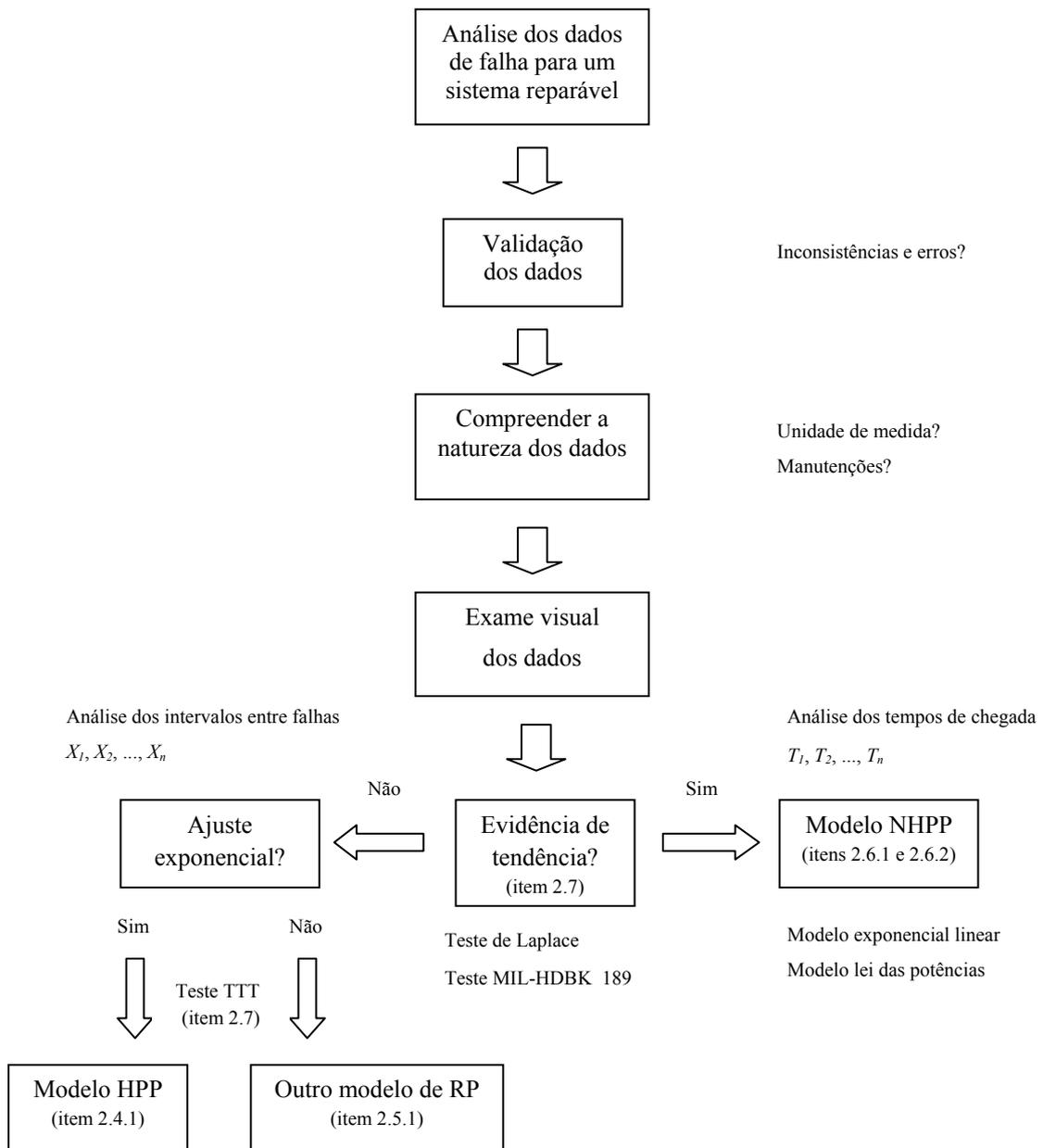
Para atender ao objetivo estabelecido no item 1.2, etapa (b), analisou-se o relatório de qualidade do ar referente a 2008. Em CETESB (2009), seu anexo 6 apresenta a relação dos municípios classificados quanto à saturação do ar, por parâmetro, de acordo com o Decreto Estadual 52.469/07. Os achados fazem parte da estrutura de discussão dos resultados da pesquisa, apresentada no capítulo 4.

3.2.4 Reflexos no processo de decisão

Para atender ao objetivo estabelecido no item 1.2, etapa (d), etapa final do trabalho, comparou-se no capítulo 4 os resultados dos itens 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3.

Quadro 3.2 Monitores considerados neste trabalho. Destaque (em azul) para os equipamentos com número de falhas $n \geq 5$ durante o período de observação

Dióxido de enxofre (SO₂)	Material particulado (MP₁₀)	Monóxido de carbono (CO)	Óxidos de nitrogênio (NO_x)	Ozônio (O₃)	Multicalibrador	Purificador
SO ₂ - 1101	PI - 2201	CO - 1301	NO _x - 1701	O ₃ - 1501	MCL - 3101	PUR - 3301
SO ₂ - 1102	PI - 2202	CO - 1302	NO _x - 1702	O ₃ - 1502	MCL - 3102	PUR - 3302
SO ₂ - 1103	PI - 2203	CO - 1303	NO _x - 1703	O ₃ - 1503	MCL - 3103	PUR - 3303
SO ₂ - 1104	PI - 2204	CO - 1304	NO _x - 1704	O ₃ - 1504	MCL - 3104	PUR - 3304
SO ₂ - 1105	PI - 2205	CO - 1305	NO _x - 1705	O ₃ - 1505	MCL - 3105	PUR - 3306
SO ₂ - 1106	PI - 2206	CO - 1306	NO _x - 1706	O ₃ - 1506	MCL - 3106	PUR - 3307
SO ₂ - 1107	PI - 2207	CO - 1307	NO _x - 1707	O ₃ - 1507	MCL - 3107	PUR - 3308
SO ₂ - 1108	PI - 2208	CO - 1308	NO _x - 1708	O ₃ - 1508	MCL - 3108	PUR - 3310
SO ₂ - 1109	PI - 2209	CO - 1309	NO _x - 1709	O ₃ - 1509	MCL - 3109	PUR - 3311
SO ₂ - 1110	PI - 2210	CO - 1310	NO _x - 1710	O ₃ - 1510	MCL - 3110	PUR - 3313
SO ₂ - 1111	PI - 2211	CO - 1311	NO _x - 1712	O ₃ - 1511	MCL - 3111	PUR - 3314
SO ₂ - 1112	PI - 2212	CO - 1312	NO _x - 1713	O ₃ - 1512	MCL - 3112	PUR - 3315
SO ₂ - 1113	PI - 2213	CO - 1313	NO _x - 1714	O ₃ - 1513	MCL - 3113	PUR - 3316
SO ₂ - 1114	PI - 2214	CO - 1314	NO _x - 1716	O ₃ - 1514	MCL - 3114	PUR - 3317
SO ₂ - 1115	PI - 2215	CO - 1315	NO _x - 1717	O ₃ - 1515	MCL - 3115	PUR - 3318
	PI - 2216	CO - 1316	NO _x - 1718	O ₃ - 1516	MCL - 3116	PUR - 3319
	PI - 2217	CO - 1317	NO _x - 1719	O ₃ - 1517	MCL - 3117	PUR - 3320
	PI - 2218		NO _x - 1720	O ₃ - 1518	MCL - 3118	PUR - 3321
	PI - 2219		NO _x - 1721	O ₃ - 1519	MCL - 3119	PUR - 3322
	PI - 2220		NO _x - 1725	O ₃ - 1520	MCL - 3120	PUR - 3323
	PI - 2221			O ₃ - 1521	MCL - 3121	PUR - 3324
	PI - 2222			O ₃ - 1522	MCL - 3122	PUR - 3325
	PI - 2223			O ₃ - 1523	MCL - 3123	PUR - 3326
	PI - 2224			O ₃ - 1525	MCL - 3125	PUR - 3327
	PI - 2225				MCL - 3126	PUR - 3328
	PI - 2226				MCL - 3127	PUR - 3330
	PI - 2227				MCL - 3128	
	PI - 2228				MCL - 3129	
	PI - 2229				MCL - 3130	
	PI - 2230				MCL - 3132	
	PI - 2231					
	PI - 2232					
	PI - 2233					
	PI - 2234					
	PI - 2235					
15	35	17	20	24	30	26



Fonte: adaptado e modificado de ASCHER e HANSEN, 1998

Figura 3.13 Sequência de etapas para análise dos dados de falha dos monitores

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir apresenta-se os resultados da disponibilidade da rede automática, o detalhamento sobre os aspectos da confiabilidade dos monitores e, ao final, a influência dessa disponibilidade no licenciamento ambiental de fontes de emissão de poluentes atmosféricos, sequência essa indicada por meio da Figura 4.1.

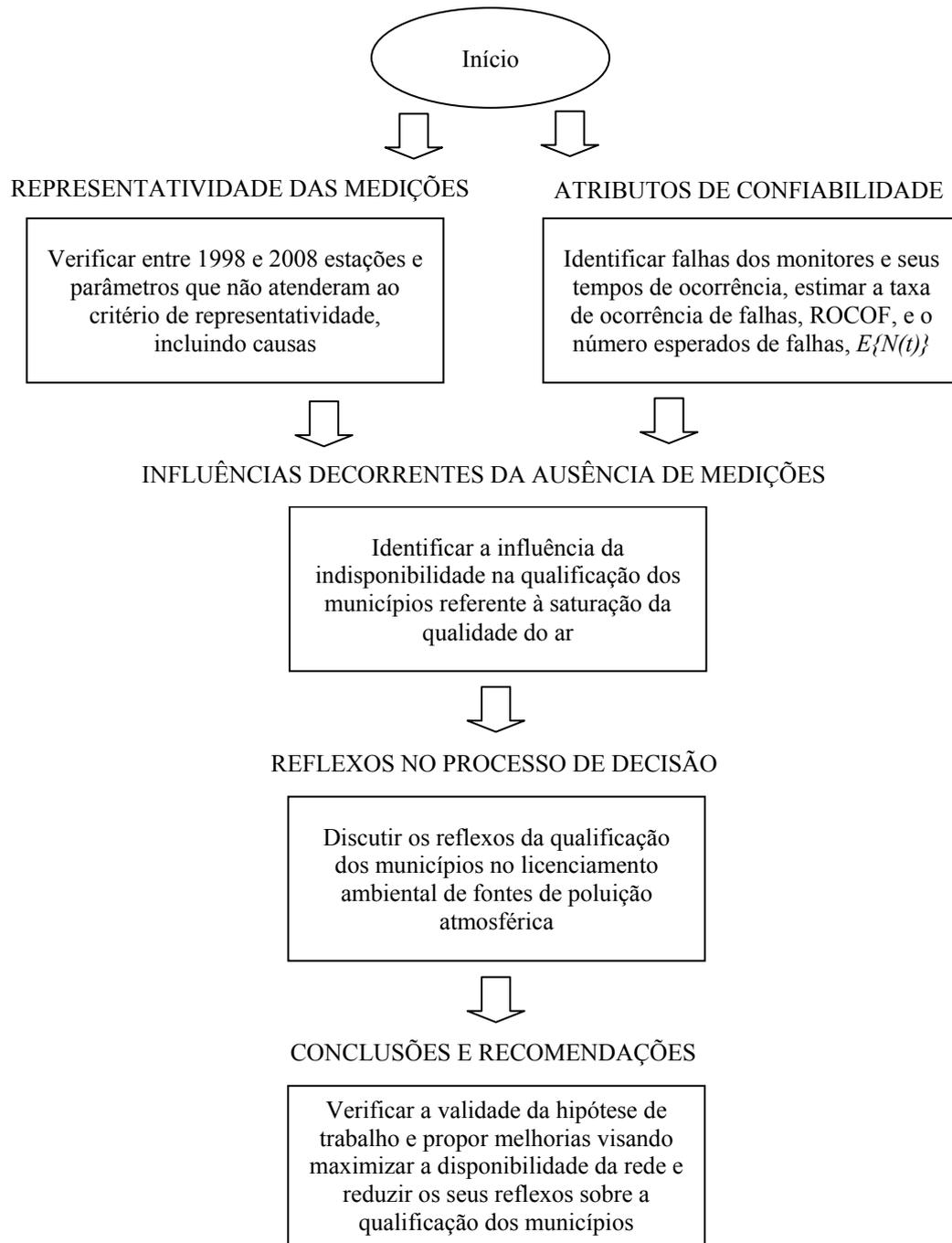


Figura 4.1 Sequência de etapas para análise da (in)disponibilidade da rede automática, a influência na qualificação de municípios quanto à saturação da qualidade do ar e o reflexo no licenciamento ambiental

4.1 DISPONIBILIDADE E O CRITÉRIO DE REPRESENTATIVIDADE

As Tabelas 4.1 a 4.7, a seguir apresentadas, foram produzidas a partir dos dados primários que constam dos apêndices A e B e permitem melhor entendimento dos mesmos.

A Tabela 4.1 apresenta as porcentagens anuais das estações que não atenderam ao critério de representatividade das medições¹⁹ para os parâmetros monitorados. Foram obtidas pela divisão entre o número de estações que não atingiram o critério e o número de estações que mediram o parâmetro. Dados detalhados por estação e por ano encontram-se no apêndice A.

Tabela 4.1 Porcentagem das estações que não atenderam ao critério de representatividade, por parâmetro monitorado

Ano	MP ₁₀	NO ₂	O ₃	CO	SO ₂
2008	0,462	0,609	0,451	0,134	0,333
2007	0,466	0,533	0,347	0,294	0,666
2006	0,310	0,600	0,474	0,200	0,637
2005	0,299	0,571	0,167	0,333	0,249
2004	0,266	0,714	0,316	0,231	0,539
2003	0,142	0,417	0,187	0,154	0,091
2002	0,153	0,182	0,124	0	0,308
2001	0,115	0,385	0	0,077	0
2000	0,413	0,500	0,187	0,083	0,231
1999	0,240	0,272	0,231	0	0,200
1998	0,291	0,100	0	0,100	0,444

A interpretação dos valores da Tabela 4.1 fica mais clara com o exemplo a seguir: em 2007, 14 das 30 (ou 46,6%) estações que mediram partículas inaláveis (MP₁₀) não alcançaram representatividade nas suas medições.

Pode-se entendê-la como um conjunto de dados brutos, que oferece um indicativo da disponibilidade da rede, bem como o limite superior para a ausência de representatividade dos parâmetros medidos, por ano, significando, pois, o equivalente numérico ao total das causas associadas à citada ausência. Embora importantes como limitantes superiores, os valores

¹⁹O critério foi apresentado no capítulo 1, item 1.1.1.2.

apresentados, se detalhados, podem ajudar a entender melhor tais causas. Por exemplo, pode-se querer saber que parcela corresponde às falhas dos monitores, de particular interesse para este trabalho. A Tabela 4.2 fornece essa informação.

Tabela 4.2 Porcentagem de não atendimento ao critério de representatividade devido às falhas dos monitores

Ano	MP₁₀	NO₂	O₃	CO	SO₂
2008	0,077	0,087	0,032	0	0,333
2007	0,100	0,133	0,043	0	0,222
2006	0,103	0,333	0,158	0	0,364
2005	0,100	0,429	0	0,133	0,083
2004	0,133	0,214	0	0	0,385
2003	0,071	0,417	0,125	0,154	0,091
2002	0,115	0,091	0	0	0,231
2001	0,115	0,231	0	0	0
2000	0,310	0,417	0	0	0,077
1999	0,200	0,181	0,077	0	0,100
1998	0,083	0,100	0	0	0,444

A Tabela 4.2 indica a cada ano a parcela das estações que não atenderam ao critério de representatividade quando a causa foi a falha do monitor que mede o referido parâmetro. Trata-se, pois, de um desmembramento da Tabela 4.1, cabendo observar que, como já mencionado, os valores apontados são limitados superiormente pelos da Tabela 4.1.

Exemplificadamente, em 2007 14 das 30 (ou 46,6%) estações que mediram partículas inaláveis (MP₁₀) não alcançaram representatividade. Dessas, três estações não atenderam ao critério de representatividade em razão de falhas nos monitores (3 em 30 ou 10%).

As Tabelas 4.3 a 4.6 indicam a cada ano a parcela das estações que não atenderam ao critério de representatividade em razão de outras causas. Os dados detalhados, por ano e estação, para a elaboração das Tabelas 4.2 a 4.6 encontram-se no apêndice B. Seguem então comentários acerca dos resultados apresentados em cada tabela.

A Tabela 4.3 indica a cada ano a parcela das estações que não atenderam ao critério quando as causas estão associadas às falhas da infraestrutura necessária para manter uma estação em operação, entre elas energia elétrica, aparelho de ar condicionado e descargas

elétricas, além de falhas associadas à informática como em microprocessadores, no servidor central e no sistema de aquisição de dados da estação.

Tabela 4.3 Porcentagem de não atendimento ao critério de representatividade devido às falhas de infraestrutura

Ano	MP ₁₀	NO ₂	O ₃	CO	SO ₂
2008	0,128	0,087	0,097	0	0
2007	0,233	0,200	0,174	0,176	0,444
2006	0,138	0,067	0,158	0	0,091
2005	0,133	0,071	0,056	0,200	0,083
2004	0,100	0,143	0,158	0,154	0,077
2003	0,071	0	0,062	0	0
2002	0,038	0,091	0,062	0	0
2001	0	0	0	0	0
2000	0	0	0	0	0
1999	0	0	0	0	0
1998	0,125	0	0	0,100	0

Poucas vezes não foi possível distinguir claramente entre as falhas dos monitores e as falhas de infraestrutura como a causa pelo não atendimento ao critério. A Tabela 4.4 apresenta esses casos.

Tabela 4.4 Porcentagem de não atendimento ao critério de representatividade devido às falhas dos monitores e de infraestrutura

Ano	MP ₁₀	NO ₂	O ₃	CO	SO ₂
2008	0	0	0,032	0,067	0
2007	0,033	0	0	0	0
2006	0	0	0	0	0
2005	0,033	0	0	0	0
2004	0	0,071	0	0	0
2003	0	0	0	0	0
2002	0	0	0	0	0
2001	0	0	0	0	0
2000	0	0	0	0	0
1999	0	0	0	0	0
1998	0	0	0	0	0

Em outras poucas situações o não atendimento ao critério deveu-se à avaliação e desqualificação da medição “a posteriori”, realizadas pela equipe técnica que acompanha a rede automática. Evidenciou-se essa situação ao se comparar o levantamento realizado a partir dos boletins diários, apresentado no apêndice B, e a indicação do número de dias

considerados válidos (N) dos relatórios anuais de qualidade do ar. Para estes casos, o levantamento realizado a partir dos boletins diários não permitiu concluir pela causa do não atendimento ao critério. Ao se consultar o relatório de qualidade, este indicou um número de dias válido menor que o apontado no apêndice B. Em consulta aos representantes da equipe que operacionaliza a rede foi informado acerca da desqualificação “a posteriori” da medição, que pode ter diversas causas, entre elas falhas na calibração dos monitores. A Tabela 4.5 apresenta esses casos.

Tabela 4.5 Porcentagem de não atendimento ao critério de representatividade devido à desqualificação “a posteriori” da medição

Ano	MP ₁₀	NO ₂	O ₃	CO	SO ₂
2008	0	0	0	0	0
2007	0	0	0	0	0
2006	0	0,067	0,105	0	0
2005	0	0	0	0	0
2004	0	0	0	0	0
2003	0	0	0	0	0
2002	0	0	0	0	0
2001	0	0,077	0	0	0
2000	0,034	0	0	0	0
1999	0	0	0	0	0
1998	0,083	0	0	0	0

Parte importante do não atendimento ao critério se deve ao início ou à interrupção do funcionamento das estações durante o ano, visto que o critério requer que anualmente ao menos 50% das medições sejam validadas a cada quadrimestre (janeiro-abril, maio-agosto e setembro-dezembro) para que as médias anuais sejam consideradas válidas.

A Tabela 4.6 indica a cada ano a parcela das estações que não atenderam ao critério de representatividade devido à entrada ou à saída de operação das estações ou dos monitores por razões que não estão associadas às causas até aqui apresentadas (Tabelas 4.2 a 4.5). Por exemplo, em 2008 10 das 39 (ou 25,6%) estações que mediram partículas inaláveis (MP₁₀) não alcançaram representatividade pelo motivo exposto, entre elas oito novas estações que

iniciaram a operação a partir de maio (CETESB, 2009, p. 28), ou seja, no segundo quadrimestre, razão pela qual a média anual não foi considerada representativa.

Tabela 4.6 Porcentagem de não atendimento ao critério de representatividade devido à ausência de operação da estação em parte do ano

Ano	MP ₁₀	NO ₂	O ₃	CO	SO ₂
2008	0,256	0,435	0,290	0,067	0
2007	0,100	0,200	0,130	0,118	0
2006	0,069	0,133	0,053	0,200	0,182
2005	0,033	0,071	0,111	0	0,083
2004	0,033	0,286	0,158	0,077	0,077
2003	0	0	0	0	0
2002	0	0	0,062	0	0,077
2001	0	0,077	0	0,077	0
2000	0,069	0,083	0,187	0,083	0,154
1999	0,040	0,091	0,154	0	0,100
1998	0	0	0	0	0

Observação visual da distribuição dessas medições permite inferir a predominância de medições invalidadas a partir de 2004. A causa principal é a entrada em operação de novas estações, significativamente em 2008, quando 11 novas estações iniciaram a operação, sendo que oito delas a partir de maio, como já mencionado.

A fim de eliminar da estimativa a parcela das estações que não atendeu ao critério devido (i) à avaliação e desqualificação do dado “a posteriori” e (ii) à ausência de operação da estação durante parte do ano, subtraiu-se da Tabela 4.1 os valores das Tabelas 4.5 e 4.6, respectivamente. Com isso, os valores da Tabela 4.7 representam por parâmetro e por ano a parcela das estações que estiveram operacionais²⁰ e que não atenderam ao critério de representatividade em decorrência de falhas dos monitores e de infraestrutura, sendo estes os dados de efetivo interesse para efeito de avaliação da disponibilidade da rede automática. Essa discussão será aprofundada na sequência.

²⁰Ou seja, operaram em parte significativa do ano, de forma que a eventual ausência de operação em alguns períodos não foi a causa do não atendimento ao critério de representatividade.

Tabela 4.7 Porcentagem das estações que estiveram operacionais e que não atenderam ao critério de representatividade

Ano	MP ₁₀	NO ₂	O ₃	CO	SO ₂
2008	0,205	0,174	0,161	0,067	0,333
2007	0,366	0,333	0,217	0,176	0,666
2006	0,241	0,400	0,316	0	0,455
2005	0,266	0,500	0,056	0,333	0,166
2004	0,233	0,428	0,158	0,154	0,462
2003	0,142	0,417	0,187	0,154	0,091
2002	0,153	0,182	0,062	0	0,231
2001	0,115	0,231	0	0	0
2000	0,310	0,417	0	0	0,077
1999	0,200	0,181	0,077	0	0,100
1998	0,208	0,100	0	0,100	0,444

As Tabelas 4.2 e 4.3 indicam, por parâmetro e por ano, a porcentagem das estações que não atenderam ao critério de representatividade devido às falhas dos monitores e de infraestrutura, respectivamente ²¹. As Figuras 4.2 a 4.6 permitem visualizar a comparação entre os dados das Tabelas 4.2, 4.3 e 4.7 para os parâmetros monitorados

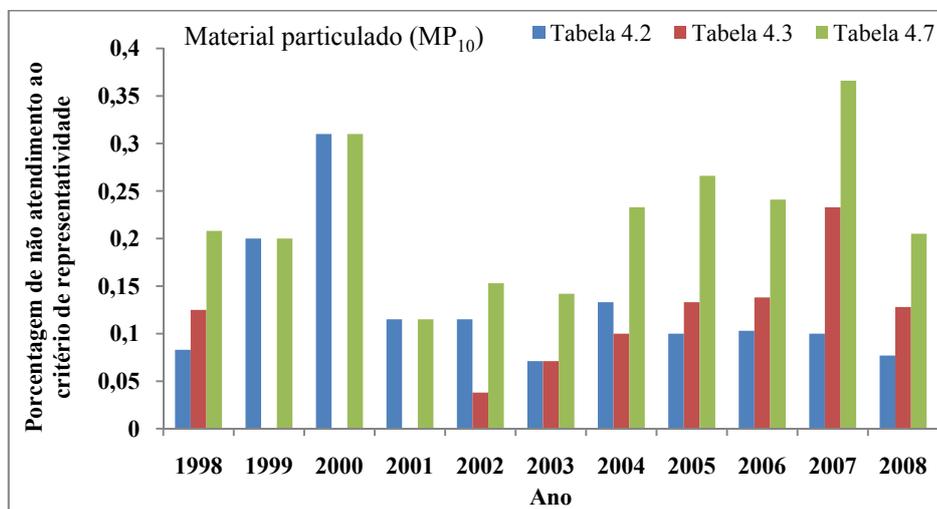


Figura 4.2 Comparação entre os dados das Tabelas 4.2, 4.3 e 4.7 para MP₁₀

²¹A Tabela 4.4 apresenta a parcela das estações que não atendeu ao critério de representatividade devido às falhas dos monitores e de infraestrutura, sem que fosse possível distinguir predominância de uma das causas. Por essa situação estar presente poucas vezes e não interferir na discussão sobre as causas do não atendimento ao critério de representatividade, a Tabela 4.4 não foi considerada na continuidade deste capítulo.

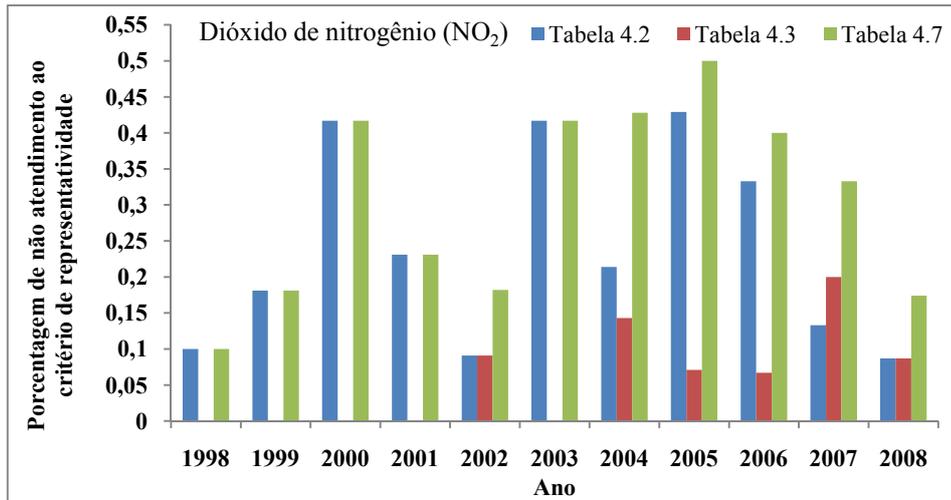


Figura 4.3 Comparação entre os dados das Tabelas 4.2, 4.3 e 4.7 para NO₂

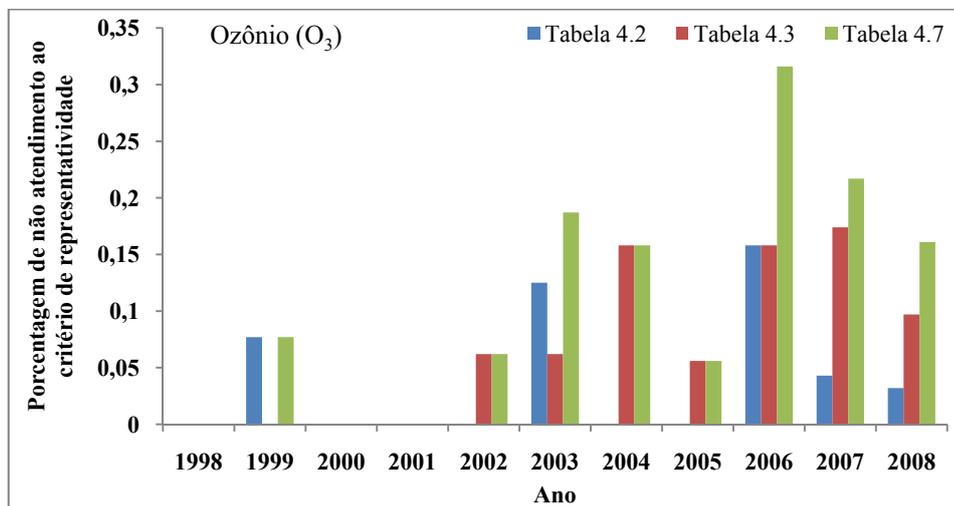


Figura 4.4 Comparação entre os dados das Tabelas 4.2, 4.3 e 4.7 para O₃

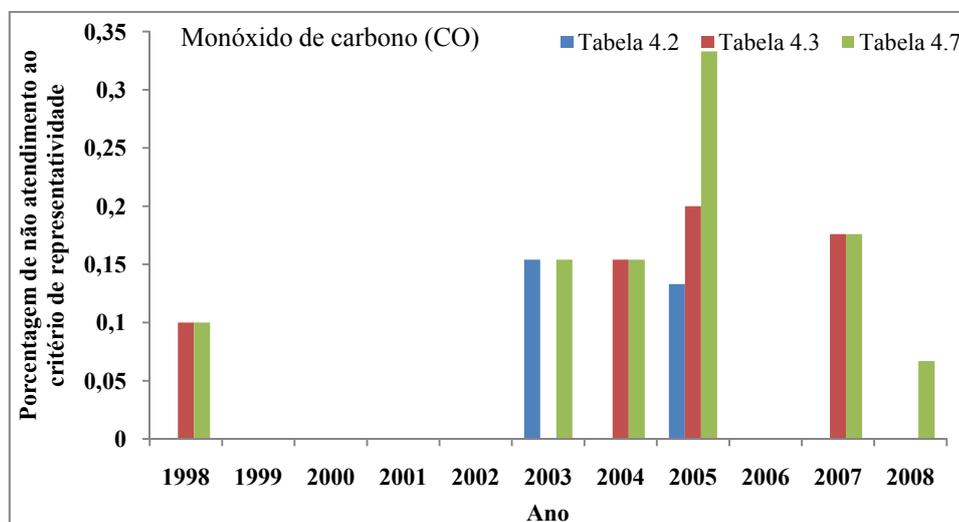


Figura 4.5 Comparação entre os dados das Tabelas 4.2, 4.3 e 4.7 para CO

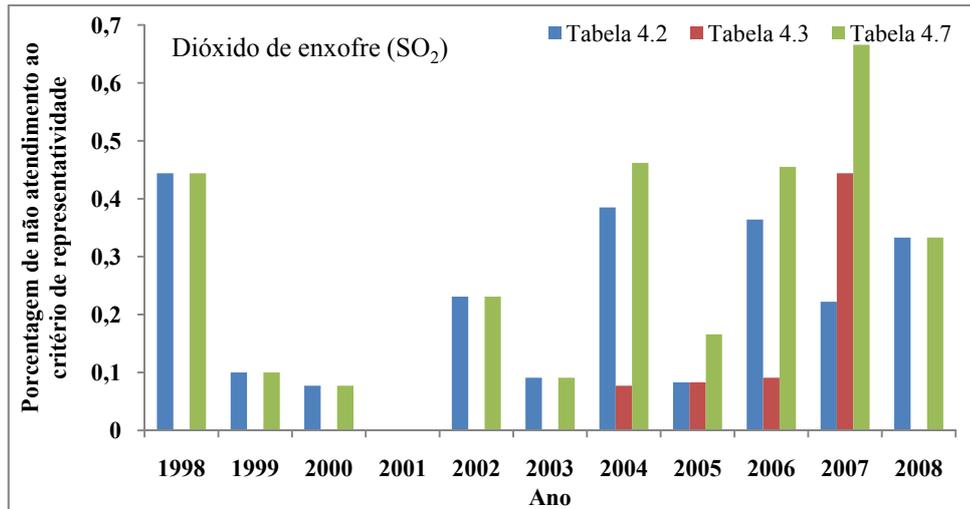


Figura 4.6 Comparação entre os dados das Tabelas 4.2, 4.3 e 4.7 para SO₂

A observação dessas Figuras aponta para as falhas dos monitores como a causa principal da indisponibilidade ao longo do período de observação (1998-2008), notadamente para os que medem MP₁₀, NO₂ e SO₂. O aumento da falta de representatividade causada por falhas de infraestrutura a partir de 2004 também é evidente. Quebra de aparelho de ar condicionado e falta de energia são algumas das causas verificáveis no apêndice B.

Detalhando a análise, verifica-se que para MP₁₀, Figura 4.2, o não atendimento ao critério por falha dos monitores mostra tendência razoavelmente constante a partir de 2001, diferentemente das falhas de infraestrutura, com tendência de crescimento entre 2002 e 2007 e que não estavam presentes no período de 1999 a 2001. Nesse período os monitores foram os únicos responsáveis pelo não atendimento ao critério de representatividade.

Em relação a NO₂, Figura 4.3, predominam as falhas dos monitores, com as falhas de infraestrutura sendo observadas a partir de 2002, embora com participação menor.

Igualmente, para SO₂, Figura 4.6, predominam as falhas dos monitores, com as falhas de infraestrutura sendo observadas a partir de 2004, em geral com participação menor.

Contrariamente à tendência anteriormente apontada, para O₃ e CO as falhas de infraestrutura predominam em relação às dos monitores, com concentração predominante dos dados a partir de 2002, como visto nas Figuras 4.4 e 4.5, respectivamente. Rápida verificação

no apêndice B indica que falta de energia elétrica, desativação temporária da estação e furto de equipamentos são as causas predominantes.

Falhas dos monitores e de infraestrutura devem ser vistas sob perspectivas distintas no tocante às suas causas. Para os monitores há um programa de manutenção preventiva vigente há longo tempo. As tarefas de manutenção são realizadas por equipe dedicada à rede de monitoramento, com visitas periódicas às estações para aplicação do programa, além de testes de funcionamento dos monitores. Pode-se inferir que há, portanto, razoável controle sobre as causas das falhas, que, em geral, estão associadas à degradação de componentes dos monitores (mais detalhes no item 4.2), que leva a uma relativa regularidade na desqualificação das medições feitas ao longo do período de observação, como evidenciado na Tabela 4.2, notadamente para MP_{10} , NO_2 e SO_2 .

Já as falhas de infraestrutura têm origens diversas, passando por problemas externos à CETESB, como no caso de falhas em telefonia que impede a transmissão das medições para a central, ou ainda áreas diferentes da própria empresa, como a de manutenção (aterramento das estações, equipamentos de ar condicionado). A Tabela 4.3 permite verificar o aumento dessas falhas a partir de 2002, que pode estar relacionado com o envelhecimento dessa infraestrutura – ao menos a interna à CETESB – e a ausência de um programa de manutenção preventiva.

Embora não seja propósito deste trabalho aprofundar a discussão sobre a manutenção da rede, pode-se inferir pelo anteriormente afirmado que a capacidade de gerenciamento de manutenção pela CETESB sobre os monitores é maior que sobre a infraestrutura, razão pela qual este trabalho aprofundou a discussão sobre a confiabilidade desses monitores.

Outra forma de apresentar os dados das Tabelas 4.2 e 4.3 é agrupá-los por períodos, por meio de médias aritméticas. As Tabelas 4.8 e 4.9 mostram esses agrupamentos e evidenciam o anteriormente afirmado quanto à predominância das falhas dos monitores e o aumento das falhas de infraestrutura no período de 2006 a 2008.

Tabela 4.8 Indisponibilidade da rede automática devida às falhas dos monitores – dados agrupados

Ano	Indisponibilidade				
	MP ₁₀	NO ₂	O ₃	CO	SO ₂
2006/2008	0,093	0,184	0,078	0	0,306
2002/2005	0,105	0,288	0,031	0,072	0,198
1998/2001	0,177	0,175	0,019	0	0,155

Tabela 4.9 Indisponibilidade da rede automática devida às falhas de infraestrutura – dados agrupados

Ano	Indisponibilidade				
	MP ₁₀	NO ₂	O ₃	CO	SO ₂
2006/2008	0,166	0,118	0,143	0,059	0,178
2002/2005	0,086	0,076	0,085	0,089	0,040
1998/2001	0,031	0	0	0,025	0

Até aqui, evidenciou-se que parcela significativa do monitoramento ambiental é comprometida anualmente pelo não atendimento ao critério de representatividade das medições, sendo que as principais causas são as falhas dos monitores e as falhas de infraestrutura. A Tabela 4.7 sintetiza essa situação, com destaque na Tabela 4.10 para os valores médio, mínimo e máximo de indisponibilidade no período de observação, por parâmetro.

Tabela 4.10 Valores mínimo, médio e máximo da indisponibilidade da rede automática da CETESB, por parâmetro

Parâmetro	Indisponibilidade		
	Mínima	Média	Máxima
MP ₁₀	0,115	0,222	0,366
NO ₂	0,100	0,306	0,500
O ₃	0	0,112	0,360
CO	0	0,089	0,333
SO ₂	0	0,275	0,666

É de interesse verificar se a situação apresentada e sintetizada nas Tabelas 4.7 e 4.10 se assemelha ao de outras redes automáticas de monitoramento da qualidade do ar. A busca na literatura e em sítios na rede internacional de comunicação (internet) levou aos relatórios

emitidos pelo Environment Canada, órgão ambiental do Canadá, e pelos órgãos ambientais do Reino Unido²² acerca do comportamento das suas redes nacionais de monitoramento.

ENVIRONMENT CANADA (2000, 2001a, 2001b, 2002, 2003, 2005, 2007, 2008) apresentam amplo diagnóstico da qualidade do ar no Canadá. O mais atual dos relatórios, contemplando os anos de 2005 e 2006, informa a presença de 319 estações automáticas, sendo 236 em áreas urbanas e as demais em área rural. São 145 monitores de SO₂, 79 de CO, 152 de NO₂, 219 de O₃, 59 de MP₁₀ e 196 de MP_{2.5}. A Tabela 4.11 traz a parcela das estações que não atenderam ao critério de representatividade mostrado no Quadro 4.1 no período de 1998 a 2006. Tais relatórios mostram por estação, ano e parâmetro as médias mensais e anual das concentrações medidas e o sinal (–) quando as medições não atenderam o citado critério.

Tabela 4.11 Indisponibilidade da rede automática do Environment Canada

Ano	Indisponibilidade				
	MP ₁₀	NO ₂	O ₃	CO	SO ₂
2006	0,083	0,135	0,070	0,056	0,090
2005	0,076	0,156	0,154	0,123	0,165
2004	0,035	0,072	0,119	0,105	0,097
2003	0,086	0,182	0,083	0,097	0,062
2002	0,121	0,155	0,095	0,095	0,091
2001	0,221	0,189	0,120	0,122	0,116
2000	0,162	0,182	0,140	0,176	0,095
1999	0,131	0,252	0,178	0,154	0,094
1998	0,196	0,204	0,133	0,160	0,123

Fontes: dados brutos do ENVIRONMENT CANADA, 2000, 2001a, 2001b, 2002, 2003, 2005, 2007, 2008

Bower, Lampert e Broughton (2004, 2005) e Bower et al. (2006, 2007, 2008, 2009) apresentam detalhado diagnóstico da qualidade do ar no Reino Unido. O relatório mais recente, referente ao ano de 2008, informa a presença de 127 estações automáticas, sendo 102 em áreas urbanas (18 em Londres) e 25 em áreas rurais. São 45 monitores de SO₂, 27 de CO, 111 de NO₂, 80 de O₃, 77 de MP₁₀ e 53 de MP_{2.5}. A Tabela 4.12 traz a parcela das estações que não atenderam ao critério de representatividade, por parâmetro, obtida a partir dos

²²Department for environment, food and rural affairs (DEFRA); The Welsh assembly government; The Scottish government; The department of environment in Northern Ireland.

relatórios anteriormente mencionados para o período de 2003 a 2008. Tais relatórios apresentam por estação, ano e parâmetro as médias mensais e anual das concentrações medidas e o sinal (-), quando o conjunto de medições, por parâmetro, não atendeu ao critério de representatividade mostrado no Quadro 4.1.

Tabela 4.12 Indisponibilidade da rede automática no Reino Unido

Ano	Indisponibilidade				
	MP ₁₀	NO ₂	O ₃	CO	SO ₂
2008	0,169	0,081	0,051	0,074	0,044
2007	0,026	0,044	0	0,026	0,064
2006	0,031	0,045	0,059	0,063	0,039
2005	0,014	0,045	0,011	0,051	0,039
2004	0,123	0,045	0,057	0,025	0,051
2003	0,069	0,123	0,071	0,088	0,064

A despeito da significativa diferença na quantidade de estações e monitores é razoável comparar a ausência de representatividade das medições (ou indisponibilidade) do monitoramento no Canadá e no Reino Unido com a da CETESB.

A simples comparação dos valores médios da Tabela 4.10 com os das Tabelas 4.13 (Environment Canada) e 4.14 (Órgãos ambientais do Reino Unido) permite inferir que a indisponibilidade média da rede automática da CETESB é maior que a desses órgãos ambientais, bem como os valores máximos alcançados, notadamente para NO₂ e SO₂.

Deve-se entender que os valores apresentados nas Tabelas 4.10, 4.13 e 4.14 refletem os critérios de representatividade das medições adotados pelas instituições. O Quadro 4.1 apresenta esses critérios, ficando evidente que os da CETESB e do Environment Canada se assemelham, sobretudo na média anual, a qual é informada no relatório de qualidade das instituições, por parâmetro e estação.

Tabela 4.13 Valores mínimo, médio e máximo da indisponibilidade da rede automática do Environment Canada, por parâmetro

Parâmetro	Indisponibilidade		
	Mínima	Média	Máxima
MP ₁₀	0,035	0,123	0,221
NO ₂	0,072	0,170	0,252
O ₃	0,070	0,121	0,178
CO	0,056	0,121	0,176
SO ₂	0,062	0,104	0,165

Tabela 4.14 Valores mínimo, médio e máximo da indisponibilidade da rede automática dos Órgãos Ambientais do Reino Unido, por parâmetro

Parâmetro	Indisponibilidade		
	Mínima	Média	Máxima
MP ₁₀	0,014	0,072	0,169
NO ₂	0,044	0,064	0,123
O ₃	0	0,042	0,071
CO	0,025	0,055	0,088
SO ₂	0,039	0,050	0,064

Quadro 4.1 Critério de representatividade das medições

	CETESB	Environment Canada	Reino Unido (vide nota 21)
Média horária	válida quando 3/4 das medidas são consideradas válidas	Não há menção	Requer que pelo menos 3 médias de 15 min das medições sejam consideradas válidas
Média diária	válida quando 2/3 das médias horárias são consideradas válidas	Calculada se 3/4 das medições horárias são disponíveis	Válida quando 3/4 das médias horárias são consideradas válidas
Média mensal	Média mensal válida quando 2/3 das médias diárias são consideradas válidas	Calculada a partir da existência de 50% das medições horárias disponíveis no período	Média mensal válida quando 3/4 das médias diárias são consideradas válidas
Média anual	Média anual válida quando 1/2 das médias diárias são consideradas válidas para os quadrimestres janeiro-abril, maio-agosto e setembro-dezembro	Calculada a partir da existência de 50% das medições horárias disponíveis no período e de médias mensais em dois meses de cada quadrimestre	Não há clareza no critério. Contudo, observa-se que foi reportada uma média com 58,6% das medições válidas; outra média não foi reportada com 48,9% das medições válidas

Fontes: CETESB, 2009; adaptado de ENVIRONMENT CANADA, 2008; adaptado de BOWER et al., 2009

Os relatórios do Environment Canada e dos Órgãos Ambientais do Reino Unido não apresentam as causas para a invalidação das medições, não sendo possível aprofundar a comparação entre essas instituições e a CETESB.

4.2 TAXA DE OCORRÊNCIA DE FALHA E NÚMERO ESPERADO DE FALHAS

Como afirmado no item 4.1, a principal razão para desqualificar as medições frente ao critério de representatividade são as falhas dos monitores. Por isso, entendeu-se necessário aprofundar o conhecimento da confiabilidade dos mesmos, razão pela qual desenvolveu-se intenso tratamento probabilístico sobre seus tempos de falha, com o objetivo de determinar taxas de ocorrência de falha (ROCOF) durante o período de observação $[0, t_0)$ e o número esperado de falhas $E\{N(t)\}$ para o período subsequente de um ano. A adequada compreensão desses atributos de confiabilidade possibilita propor melhorias na operação e manutenção dos monitores, aumentando a disponibilidade, minimizando a falta de atendimento do critério de representatividade das medições e melhorando a informação disponibilizada pela CETESB.

O método de trabalho está descrito no item 3.2.2. A base teórica para a estimativa da ROCOF e do $E\{N(t)\}$ foi desenvolvida no capítulo 2.

Os passos iniciais previstos na Figura 3.13, até *exame visual dos dados*, foram seguidos à medida que os dados foram coletados. Variações no apontamento dos tempos de falha, como já mencionado no item 3.2.2, foram observados, revistos e ajustados. No Quadro 3.2 os analisadores com $n \geq 5$ estão destacados em azul.

Para os 44 monitores com $n \geq 5$, estimou-se a ROCOF no período de observação $[0, t_0)$ e o número esperado de falhas no período $(t_0, t_0+8760h)$, com base nessa ROCOF.

Na Tabela 4.15 encontra-se uma síntese dos passos anteriormente mencionados, previstos na Figura 3.13. No apêndice C apresenta-se, a título de exemplo, a sequência completa de cálculos para o monitor NO_x – 1703, modelado pelo HPP, o monitor CO – 1314, modelado pelo RP e o monitor O_3 – 1513, modelado pelo NHPP.

Tabela 4.15 Estimativa ROCOF no período de observação $[0, t_0]$ e do $E\{N(t)\}$ no período $(t_0, t_0+8760h)$ para monitores com $n \geq 5$
(continua)

Analisador		Tempo (t_0) de operação (h)	Número (n) de falhas observadas	Estatísticas				Modelo HPP		Modelo NHPP	
tipo	identificação			Laplace	MIL - HDBK 189	Valor-p (1)	TTT	ROCOF (h^{-1})	$E\{N(t)\}$	ROCOF (h^{-1})	$E\{N(t)\}$
Dióxido de enxofre (SO ₂)	SO ₂ - 1101	88320	5	0,568	10,893		-0,102	5,66E-05	0,496		
	SO ₂ - 1103	88320	11	-0,022	20,619		0,375	1,25E-04	1,091		
	SO ₂ - 1104	88320	7	0,073	13,096		-0,457	7,93E-05	0,694		
	SO ₂ - 1106	68448	5	-0,011	7,899		-0,246	7,31E-05	0,640		
	SO ₂ - 1109	88320	5	1,159	6,873		-1,221	5,66E-05	0,496		
	SO ₂ - 1110	64392	5	1,779	3,968		-0,667	7,77E-05	0,680		
	SO ₂ - 1113	88320	5	-0,209	11,236		1,505	5,66E-05	0,496		
	SO ₂ - 1114	75240	8	2,065	8,032 (2)	L: 0,039 M: 0,105				$\beta_0 = -10,893$ $\beta_1 = 3,79E-05$	3,34
Monóxido de carbono (CO)	CO - 1301	85176	6	-0,819	12,848		0,922	7,04E-05	0,617		
	CO - 1302	88320	7	-0,561	18,742		-0,632	7,93E-05	0,694		
	CO - 1303	81792	12	-0,229	28,402		-1,153	1,47E-04	1,285		
	CO - 1304	88320	6	0,804	7,362		0,064	6,79E-05	0,595		
	CO - 1306	88320	6	-0,778	15,444		0,538	6,79E-05	0,595		
	CO - 1308	89616	6	-0,136	9,188		-0,967	6,70E-05	0,587		
	CO - 1310	88320	10	0,697	14,535		0,314	1,13E-04	0,992		
	CO - 1311	56448	7	1,553	6,346		-0,419	1,24E-04	1,086		
	CO - 1312	60264	7	1,455	8,992		0,048	1,16E-04	1,018		
	CO - 1314 (3)	77088	5	-1,200	12,484		2,537				
	CO - 1315	60504	8	0,018	12,384		-0,357	1,32E-04	1,158		
CO - 1316	39576	5	2,101	2,806	L: 0,036 M: 0,031				$\beta_0 = -11,618$ $\beta_1 = 1,03E-04$	7,41	
Particulado (MP ₁₀)	PI - 2209	83808	7	0,361	12,378		-0,341	8,35E-05	0,732		
	PI - 2214	88320	5	-0,389	10,515		0,582	5,66E-05	0,496		

Analisador		Tempo (t_0) de operação (h)	Número (n) de falhas observadas	Estatísticas				Modelo HPP		Modelo NHPP	
tipo	identificação			Laplace	MIL – HDBK 189	Valor-p (1)	TTT	ROCOF (h^{-1})	$E\{N(t)\}$	ROCOF (h^{-1})	$E\{N(t)\}$
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	NO _x - 1701	88320	6	0,792	7,968		0,764	6,79E-05	0,595		
	NO _x - 1703	88320	21	0,376	35,897		-0,847	2,38E-04	2,083		
	NO _x - 1704	79608	8	-1,237	17,167		-0,770	1,01E-04	0,880		
	NO _x - 1705	88320	5	0,339	8,045		-0,511	5,66E-05	0,496		
	NO _x - 1706	76576	5	-0,980	12,706		-0,715	6,53E-05	0,572		
	NO _x - 1707	73320	8	0,368	12,442		-0,384	1,09E-04	0,956		
	NO _x - 1709	84000	8	1,792	7,191		-0,306	9,52E-05	0,834		
	NO _x - 1710	88320	6	-0,706	12,618		-0,332	6,79E-05	0,595		
	NO _x - 1717	39744	7	1,092	9,229		-0,850	1,76E-04	1,548		
	NO _x - 1720	21504	5	1,387	4,301		0,023	2,33E-04	2,037		
Ozônio (O ₃)	O ₃ - 1502	82368	9	0,237	14,173		1,288	1,09E-04	0,957		
	O ₃ - 1503	85512	5	1,134	5,800		-1,436	5,85E-05	0,512		
	O ₃ - 1505	101784	14	-0,830	26,616		-0,486	1,38E-04	1,205		
	O ₃ - 1507	88320	6	0,670	7,348		0,451	6,79E-05	0,595		
	O ₃ - 1508	75264	7	-0,962	18,543		-0,515	9,30E-05	0,815		
	O ₃ - 1509	70272	7	-0,639	17,926		0,752	9,96E-05	0,873		
	O ₃ - 1510	77208	10	0,088	19,436		0,222	1,30E-04	1,135		
	O ₃ - 1513	73032	7	3,216	2,560	L: 0,014 M: <0,002				$\beta_0 = -14,003$ $\beta_1 = 9,10E-05$ 8,60	
	O ₃ - 1515	88320	6	0,238	9,585		0,948	6,79E-05	0,595		
	O ₃ - 1517	70728	6	0,961	11,236		-1,084	8,48E-05	0,743		
Multicalibrador	MCL - 3105	88320	5	-0,777	15,361		-0,043	5,66E-05	0,496		
	MCL - 3116	88320	5	1,921	3,957		-0,047	5,66E-05	0,496		

(1) L significa valor-p para o teste de Laplace; M significa valor-p para o teste da norma MIL-HDBK 189.

(2) Valor do teste não permite rejeitar H_0 ao nível de significância de 5%.

(3) O teste TTT demonstrou evidência suficiente para descartar H_0 de HPP. Assim, aplicou-se o modelo RP, com X_i modelados por uma distribuição de Weibull, biparamétrica. Obteve-se $E\{N(t)\} = 0,470$. A estimativa detalhada encontra-se no apêndice C.

Em 41 dos 44 monitores não há evidência estatística suficiente ($\alpha = 5\%$) para rejeitar a hipótese de ausência de tendência dos tempos de falha, significando que a ROCOF se mostra constante. Os outros três apresentam tendência de deterioração, ou seja, ROCOF crescente no tempo, entre eles o analisador $\text{SO}_2 - 1114$, assim considerado com base apenas no teste de Laplace. Os demais 123 monitores apresentam $n \leq 4$ falhas durante o período de observação.

Equipamentos eletrônicos são apontados na literatura como de elevada confiabilidade. Confirmou-se esse entendimento neste estudo, dado que a grande maioria dos monitores não atingiu cinco falhas ou apresenta ROCOF constante, mesmo passadas 80000h de operação. Poucos monitores atingiram mais de 10 falhas. A título de exemplo, observar no apêndice C os registros do monitor $\text{NO}_x - 1703$, com 21 falhas e mais de 80000h operacionais.

Daquilo até aqui exposto é possível inferir que a (in)disponibilidade das estações da rede automática, apontada na Tabela 4.10, por parâmetro, é influenciada pelas falhas dos equipamentos de medição, Tabela 4.2. Por sua vez, a tendência constante das taxas de falha da maioria dos monitores com $n \geq 5$ e a parcela significativa dos monitores que ainda não atingiu cinco falhas permite inferir que a ROCOF não pode ser entendida como alta, ratificada pelo número esperado de falhas $E\{N(t)\} \leq 1$ para a maioria dos monitores, como mostrado na Tabela 4.15.

Porém, outro contribuinte para a indisponibilidade das estações é o tempo depreendido entre a interrupção na coleta do dado decorrente da falha do monitor e a recuperação dessa capacidade, seja pela substituição do monitor, seja pelo seu reparo e retorno à operação. No apêndice B é possível verificar por ano, estação e parâmetro as causas de interrupções nas medições, entre elas falhas dos monitores. Porém, não é possível distinguir detalhes sobre o período de interrupção, por exemplo, quanto tempo foi despendido entre a interrupção e a ida do operador à estação, ou ainda o tempo despendido para a identificação do componente em falha e sua substituição. Contudo, há clareza que melhorias no programa de manutenção, com

o objetivo de aumentar a capacidade de recuperar a função de medição em tempo menor, são possíveis e podem ser otimizadas a partir dos resultados deste estudo.

Embora não seja de interesse deste trabalho, estudo similar pode ser realizado para as falhas de infraestrutura, que permitiria, ao conhecer suas causas em detalhes, propor melhorias na manutenção da infraestrutura e projeto das estações.

Conhecer a taxa com que as falhas dos monitores acontecem e a tendência são fundamentais para prever o número de falhas num futuro de interesse. Neste trabalho, estimou-se o número médio esperado de falhas para o período de um ano, subsequente ao final do período de observação, partindo-se da premissa que a taxa de falhas estimada se mantém no período subsequente. A premissa pode ser considerada aplicável, pois o intervalo de estimação da ROCOF (11 anos) é significativamente maior que o intervalo futuro (1 ano) para a maioria dos 44 monitores em que este procedimento foi aplicado.

Os resultados expressados na Tabela 4.15 podem ser mais explorados. A observação do parâmetro tempo de operação (t_0) indica que parcela significativa dos 44 monitores operou por mais de 70000h, com número de falhas próximo a sete. Pode-se inferir uma taxa média aproximada de uma falha a cada 10000h de operação, confirmada pelos valores de ROCOF que se aproximam de $1E-04/h$ para os monitores modelados segundo HPP. Diante dessa taxa, os valores de $E\{N(t)\}$ são menores que um para o período subsequente de um ano, informação de interesse para a otimização do programa de manutenção.

Ocorrem também comportamentos distintos, como os monitores NO_x -1717 e NO_x -1720, que apresentam t_0 menores que 40000h, porém com 7 e 5 falhas, respectivamente, que originam ROCOFs acima de $1E-04/h$ e, conseqüentemente, $E\{N(t)\}$ acima de 1,5. De maneira similar, o monitor NO_x -1703 se destaca pelo número de falhas ($n = 21$) bem maior que os demais em 88320h de operação, que também origina ROCOF acima de $1E-04/h$ e $E\{N(t)\}$ acima de 2. Não obstante as ROCOFs e $E\{N(t)\}$ aumentadas, os testes de Laplace e da

norma MIL-HDBK 189 não apresentam evidência suficiente ($\alpha = 5\%$) para rejeitar a hipótese de ROCOF constante. Entende-se que se faz necessária análise mais aprofundada das planilhas de falhas desses monitores, que está além dos objetivos apontados no item 1.2.

4.3 A DISPONIBILIDADE E O LICENCIAMENTO AMBIENTAL

A próxima pergunta a ser respondida é se a indisponibilidade da rede automática influenciou os processos de tomada de decisão da CETESB, com particular interesse para as decisões associadas ao licenciamento ambiental envolvendo fontes de poluição atmosférica.

Clarificando a indagação: o licenciamento ambiental de fontes de poluição no estado de São Paulo é disciplinado pela lei nº 997/76 e seu regulamento, aprovado pelo Decreto nº 8468/76 e suas alterações. Para as fontes que emitem poluentes atmosféricos, os procedimentos de licenciamento foram recentemente revistos e atualizados por meio dos Decretos Estaduais nº 48.523/04, nº 50.753/06 e nº 52.469/07, os quais estabeleceram (i) o critério para a determinação do grau de saturação da qualidade do ar dos municípios abrangidos pela rede de monitoramento da CETESB, (ii) a qualificação dessa saturação em termos de severidade e (iii) as restrições ao estabelecimento dessas fontes em municípios saturados ou em vias de saturação, que podem chegar à necessidade de compensar em 110% as novas emissões, ou seja, para cada novo 1kg de poluente saturado emitido, 1,1kg do mesmo poluente devem ser reduzidos, da própria empresa ou de outras empresas da região.

O critério de classificação dos municípios quanto ao grau de saturação (vide item 1.1.1.1) requer medições dos três anos anteriores ao ano de vigência da classificação, a qual é proposta pela CETESB, avaliada pelo Conselho Estadual de Meio Ambiente (CONSEMA) e aprovada por resolução do Secretário de Meio Ambiente (CETESB, 2009).

De acordo com esse critério, a classificação é mais restritiva à medida que diminuem os anos com medições válidas. A Tabela 4.16 traz a aplicação do critério para os poluentes legislados, considerando a existência de medições válidas por 3, 2 e 1 ano.

É conveniente explorar este aspecto da legislação com mais profundidade. Em CETESB (2009, p. 319) são apresentados os municípios considerados saturados ou em vias de saturação por um ou mais poluentes regulados, quais sejam: material particulado (MP, que engloba MP₁₀, FMC e PTS), NO₂, SO₂, CO e O₃. São 214 municípios, classificados com base nos resultados do monitoramento de 2006, 2007 e 2008. É interessante explorar a classificação por poluente, notadamente para partículas inaláveis (MP₁₀) e ozônio (O₃).

Tabela 4.16 Saturação para os poluentes legislados com monitoramento automático

	NR	Saturada	Em vias de saturação	Não saturada
MP₁₀ longo prazo	3	MA > 50 µg/m ³	MA > 45 µg/m ³	MA ≤ 45 µg/m ³
	2	MA > 45 µg/m ³	MA > 40 µg/m ³	MA ≤ 40 µg/m ³
	1	MA > 45 µg/m ³	MA > 40 µg/m ³	MA ≤ 40 µg/m ³
	0	SC	SC	SC
SO₂ longo prazo	3	MA > 80 µg/m ³	MA > 72 µg/m ³	MA ≤ 72 µg/m ³
	2	MA > 72 µg/m ³	MA > 64 µg/m ³	MA ≤ 64 µg/m ³
	1	MA > 72 µg/m ³	MA > 64 µg/m ³	MA ≤ 64 µg/m ³
	0	SC	SC	SC
O₃ curto prazo	3	4º VD > 160 µg/m ³	3º VD > 144 µg/m ³	3º VD ≤ 144 µg/m ³
	2	3º VD > 160 µg/m ³	2º VD > 144 µg/m ³	2º VD ≤ 144 µg/m ³
	1	2º VD > 160 µg/m ³	1º VD > 144 µg/m ³	1º VD ≤ 144 µg/m ³
	0	2º VD > 160 µg/m ³	1º VD > 144 µg/m ³	SC
CO curto prazo	3	4º VD > 9 ppm	3º VD > 8,1 ppm	3º VD ≤ 8,1 ppm
	2	3º VD > 9 ppm	2º VD > 8,1 ppm	2º VD ≤ 8,1 ppm
	1	2º VD > 9 ppm	1º VD > 8,1 ppm	1º VD ≤ 8,1 ppm
	0	2º VD > 9 ppm	1º VD > 8,1 ppm	SC
NO₂ longo prazo	3	MA > 100 µg/m ³	MA > 90 µg/m ³	MA ≤ 90 µg/m ³
	2	MA > 90 µg/m ³	MA > 80 µg/m ³	MA ≤ 80 µg/m ³
	1	MA > 90 µg/m ³	MA > 80 µg/m ³	MA ≤ 80 µg/m ³
	0	SC	SC	SC

NR – número de anos representativos; SC – sem classificação; VD – valor diário

MA – média aritmética das médias anuais

Fonte: Adaptado de CETESB, 2009, p. 327-334

CETESB (2009, p. 326) apresenta a relação das estações que medem MP₁₀, com destaque para aquelas classificadas como saturadas (SAT) ou em vias de saturação (EVS), com base nos critérios de longo e curto prazos, este último não considerado neste trabalho para MP₁₀. São 28 municípios, incluindo São Paulo, com várias estações automáticas, Santa Gertrudes e São José do Rio Preto com estações manuais. Como este trabalho prioriza a

discussão sobre as estações automáticas, as estações manuais deixam de ser citadas daqui em diante. Na Tabela 4.17 constam as estações e, conseqüentemente, os municípios onde a média aritmética (MA) das médias dos anos válidos indicou a classificação SAT quando houve ultrapassagem do PQAR, ou EVS, quando a média se aproximou do padrão.

Das 49 estações, 40 são automáticas, sendo que apenas 11 estações apresentaram médias representativas para três anos.

Tabela 4.17 Classificação de saturação da sub-região por MP₁₀ (longo prazo)

Estação	Média aritmética ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			MA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NR	Classificação
	2006	2007	2008			
Osasco	45	-	47	46	2	SAT
Cubatão – Vila Parisi	99	108	99	102	3	SAT
Cambuci	39	46	-	43	2	EVS
Centro	-	45	45	45	2	EVS
Congonhas	-	46	44	45	2	EVS
Parelheiros	-	-	42	42	1	EVS
Parque D. Pedro II	40	41	-	41	2	EVS

NR – número de anos representativos; MA – média aritmética das médias anuais; SAT – saturada;

EVS – em vias de saturação

Fonte: CETESB, 2009, p. 326

Para ozônio, CETESB (2009, p. 332) apresenta a relação das estações que medem o poluente, predominantemente classificadas como saturadas (SAT) ou em vias de saturação (EVS), com base no critério de curto prazo. São 34 estações distribuídas em 20 municípios, incluindo a RMSP com 15, sendo 11 em São Paulo. Vinte e sete estações apontaram saturação para o poluente, sendo que apenas seis com médias representativas nos três anos.

Na Tabela 4.18 constam, das estações anteriormente citadas, apenas aquelas em que a classificação traz aspectos de interesse para este trabalho. No caso do ozônio, as medições são de curto prazo, indicadas como de maior valor diário (VD). Para efeito de classificação, são de interesse os quatro maiores VD obtidos ao longo dos três anos de medição, mesmo que um ou mais desses anos não tenham sido considerados válidos, de acordo com o critério.

É de interesse comparar as classificações apresentadas para MP₁₀ e O₃, Tabelas 4.17 e 4.18, respectivamente, com a obtida se dois ou três anos de medições estivessem disponíveis.

Tabela 4.18 Classificação de saturação da sub-região por O₃ (curto prazo)

Estação	Máxima dos últimos três anos ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				NR	Classificação
	1º VD	2º VD	3º VD	4º VD		
Ribeirão Preto	175	169	162	160	1	SAT
Cubatão – Centro	221	220	204	203	3	SAT
Cubatão – Vale do Mogi	163	161	158	149	0	SAT
Cubatão – Vila Parisi	177	176	167	145	0	SAT
Araraquara	151	132	132	126	0	EVS
Bauru	181	128	126	126	0	EVS
Jaú	149	143	141	140	0	EVS
São José do Rio Preto	154	145	143	141	0	EVS
Araçatuba	146	144	142	139	0	EVS

NR – número de anos representativos; VD – valor diário; SAT – saturada; EVS – em vias de saturação

Fonte: CETESB, 2009, p. 332

Hipoteticamente, se os valores indicados na Tabela 4.18 fossem oriundos de dois anos de medições representativas, Cubatão – Vale do Mogi teria classificação EVS ao invés de SAT; Cubatão – Vila Parisi e Ribeirão Preto seriam EVS com três anos. Já Araraquara, Bauru, Jaú e Araçatuba, com dois anos e São José do Rio Preto com três anos seriam classificadas com não saturada (NS), ao invés de EVS. Cabe observar que estas cinco últimas estações entraram em operação a partir do segundo quadrimestre de 2008, razão pela qual apresentam NR = 0.

Já para MP₁₀, Tabela 4.17, se a média aritmética MA = 46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para Osasco se originasse de três anos de medições válidas, o município seria classificado como EVS. Pelo mesmo raciocínio, pode-se verificar que o município de São Paulo seria classificado como NS se as medições se originassem de três anos válidos das estações Cambuci, Centro, Congonhas, Parque D. Pedro II e Parelheiros.

Para SO₂, CO e NO₂ não houve aspectos de maior interesse na classificação apresentada em 2008, pois o padrão não foi ultrapassado para as medições de NO₂ e SO₂ ou, quando ultrapassado, como no caso do CO, a classificação foi baseada em medições dos três anos. Mesmo a estação de São Caetano do Sul, que apresentou apenas dois anos de medições válidas para CO, não teria sua classificação SAT alterada, em função dos valores medidos.

Mas quais as implicações da classificação quando esta decorre da falta de três anos de medições consecutivas da qualidade do ar válidas?

SÃO PAULO (2004, 2006 e 2007) dão nova redação ao artigo 42 do regulamento da Lei nº 997/76, o qual estabelece que a instalação de novas fontes de poluição ou a ampliação das já existentes em sub-regiões classificadas com saturadas (SAT) ou em vias de saturação (EVS) estão sujeitas à compensação das emissões de poluentes, dentro das seguintes condições:

- o total de emissões adicionadas é ≥ 100 t/ano para material particulado (MP); ≥ 40 t/ano para óxidos de nitrogênio (NO_x); ≥ 40 t/ano para compostos orgânicos não voláteis, exceto metano (COVs, não- CH_4); ≥ 250 t/ano para óxidos de enxofre (SO_x); ≥ 100 t/ano para monóxido de carbono (CO).

A compensação se dará em 110% do total de emissões adicionadas para o poluente se a sub-região for classificada como SAT e em 100% para aquela classificada com EVS.

O Decreto Estadual nº 52.469, no seu artigo 1º, dá nova redação ao artigo 20º do regulamento da Lei nº 997/76. Seu parágrafo 3º estabelece que a abrangência da sub-região de gerenciamento da qualidade do ar onde houver estação de medição da qualidade do ar será:

3. Para o ozônio, o território compreendido pelos municípios que, no todo ou em parte, estejam situados a uma distância de até 30km da estação de monitoramento da qualidade do ar;
4. Para os demais poluentes, o território do município onde está localizada a estação de monitoramento da qualidade do ar (SÃO PAULO, 2007);

Do exposto verifica-se que os empreendimentos que buscarem o licenciamento ambiental em uma sub-região (município ou conjunto de municípios no caso de O_3) classificada como SAT ou EVS terão de fazer compensações ambientais se o total das novas emissões adicionadas, por poluente, for maior que os valores anteriormente citados. Se, por força da ausência um ou mais anos de medições válidas, a sub-região for classificada em uma faixa superior, por exemplo, SAT ao invés de EVS, os empreendimentos estarão sujeitos a

compensações mais severas, ou seja, 110% ao invés de 100% para a classificação SAT ou 100% ao invés de zero para a classificação EVS.

A título de exemplo, verifica-se em CETESB (2009, p. 324) que o município de Ribeirão Preto foi classificado como saturado para O₃ baseado em um ano de medições válidas. Da Tabela 4.16 verifica-se que para essa condição a sub-região é classificada como SAT se o 2º VD > 160 µg/m³. Da Tabela 4.18 verifica-se que o 2º VD = 169 µg/m³, razão pela qual a sub-região composta por Ribeirão Preto e outros 14 municípios²³ foi considerada saturada, classificação que vigeu até a publicação da nova classificação baseada nos anos de 2007 a 2009, ocorrida em 30.06.2010, por meio da Resolução SMA-068 (SÃO PAULO, 2010). Como já dito, se, por hipótese, os valores da Tabela 4.18 se originassem de dois anos de medições válidas, a classificação seria feita com base no 3º VD > 160 µg/m³ e o *status* de SAT permaneceria, visto que 3º VD = 162 µg/m³. Porém, se os valores se originassem de três anos de medições válidas, a classificação seria EVS, visto que o 4º VD = 160 µg/m³.

Raciocínio idêntico pode ser feito para o município de Osasco, classificado como saturado para MP₁₀ baseado em dois anos de medições válidas. Da Tabela 4.16 verifica-se que para dois anos de medições válidas a sub-região é classificada como SAT se MA > 45 µg/m³. Da Tabela 4.17 verifica-se que MA = 46 µg/m³, razão pela qual a sub-região foi classificada como saturada (CETESB, 2009, p. 326). Se a média aritmética (MA) da Tabela 4.17 se originasse de três anos de medições válidas, MA= 46 µg/m³ classificaria o município como EVS. No caso do material particulado, apenas o município em que há uma estação medindo o parâmetro é classificado. Pelo mesmo raciocínio, pode-se verificar que o município de São Paulo é classificado como EVS em decorrência da classificação realizada com dois ou um ano nas estações Cambuci, Centro, Congonhas, Parque D. Pedro II e Parelheiros.

²³Altinópolis, Barrinha, Batatais, Cravinhos, Dumont, Jardinópolis, Luiz Antônio, Pontal, Pradópolis, Sales de Oliveira, São Simão, Serra Azul, Serrana e Sertãozinho.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho discutiu-se a influência da disponibilidade da rede automática de monitoramento da qualidade do ar no licenciamento ambiental de fontes de poluição atmosférica realizado no estado de São Paulo pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), visto ser esta atribuição de relevância do Órgão, que emitiu cerca de 13500 licenças de operação em 2008, de acordo CETESB (s/d, p. 2/12).

Apontou-se que a ausência de medições válidas dos três últimos anos implicou na classificação de alguns municípios como *saturados (SAT)* quando possivelmente a classificação adequada seria *em vias de saturação (EVS)*. Igualmente, alguns municípios classificados como EVS seriam considerados *não saturados (NS)*, situação evidenciada para os parâmetros MP_{10} e O_3 .

Demonstrou-se que essa ausência decorreu, predominantemente, de falhas dos monitores e, secundariamente, mas em parcela também importante, de falhas de infraestrutura.

Dessa forma, confirma-se a hipótese de trabalho, qual seja: a disponibilidade da rede automática influenciou na informação prestada pela CETESB ao público, com possíveis reflexos na classificação dos municípios quanto à qualidade do ar e, conseqüentemente, no licenciamento ambiental de fontes industriais de poluentes atmosféricos.

As ferramentas estatísticas de diagnóstico do comportamento dos tempos de falha e de prognóstico dos atributos de confiabilidade *taxa de ocorrência de falhas (ROCOF)* e *número esperado de falhas $E\{N(t)\}$* , aplicadas aos monitores, são adequadas para descrever o comportamento temporal das falhas desses sistemas reparáveis, destacando-se a simplicidade das estimativas quantitativas, razão pela qual recomenda-se que o aperfeiçoamento do programa de manutenção desses monitores seja realizado com o emprego de tais ferramentas.

Embora não fosse propósito do trabalho aprofundar a discussão sobre a confiabilidade da infraestrutura, há evidência que melhorias desta certamente trarão reflexos positivos na disponibilidade da rede automática. Assim, recomenda-se a implantação de um programa de manutenção para equipamentos de infraestrutura sobre os quais a CETESB tem governança.

A oportunidade de melhoria das informações prestadas pela CETESB à sociedade ganha relevância ao se verificar os possíveis reflexos da disponibilidade da rede automática na classificação dos municípios quanto ao grau de saturação da qualidade do ar, realizada em 2008. O critério descrito nos Decretos Estaduais nº 48.523/04, nº 50.753/06 e nº 52.469/07, por ser mais conservativo à medida que o número de anos válidos é menor que três, aponta a necessidade de aperfeiçoar do programa de manutenção da rede automática, buscando aumentar sua disponibilidade, de forma a minimizar a classificação de municípios baseada em dois ou menos anos de medições representativas. Pode-se alcançar este aumento a partir de um balanço entre o aumento da confiabilidade dos monitores e da infraestrutura e a redução das interrupções para manutenção quando das falhas dos seus componentes e sistemas, respectivamente, ou seja, recuperar a função de medição em tempo menor do que o atual.

Por fim, algumas recomendações adicionais para aumentar a disponibilidade da rede:

- a) dispor de monitores extras para substituir aqueles em falha, de forma a restaurar rapidamente a função de coleta das medições;
- b) adotar estratégia que considere a substituição do monitor poucas horas após a interrupção da coleta das medições e a verificação da impossibilidade de reparo do monitor que estava em serviço;
- c) estabelecer metas progressivas para reduzir a indisponibilidade média, cujo objetivo inicial a ser alcançado são os valores do Environment Canada, Tabela 4.13, visto que decorrem de um critério de representatividade das medições semelhante ao adotado pela CETESB (vide Quadro 4.1).

Referências

ÁLVARES JR., O. M.; LACAVAL, C. I. V.; FERNANDES, P. S. **Emissões atmosféricas**. Brasília: SENAI/DN, 2002. 373 p.

ANDERSEN INSTRUMENTS INC. **Operator manual: FH 62 I-N PM10 Beta attenuation monitor**. Smyrna, s/d.

ASCHER, H. E. Evaluation of repairable system reliability using the "bad-as-old" concept. **IEEE Transactions on Reliability**, v. R-17, n.2, p. 103-110, June 1968.

ASCHER, H. E.; FEINGOLD, H. **Repairable systems reliability: modeling, inference, misconceptions and their causes**. New York: Marcel Dekker, 1984. 223 p.

ASCHER, H. E. MIL-STD-781C: A vicious circle. **IEEE Transactions on Reliability**, v.R-36, n.4, p. 397-402, Oct. 1987.

ASCHER, H. E.; HANSEN, C. K. Spurious exponentiality observed when incorrectly fitting a distribution to nonstationary data. **IEEE Transactions on Reliability**, v.47, n.4, p. 451-459, Dec. 1998.

ASCHER, H. E. Different insights for improving part and system reliability obtained from *exactly same* DFOM "failure numbers". **Reliability Engineering and System Safety**, v.92, p. 552-559, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: confiabilidade e manutenibilidade: terminologia**. Rio de Janeiro, 1994.

BOWER, J.; LAMPERT, J.; BROUGHTON, G. **Air pollution in the UK: 2003**. Didcot: Netcen, 2004. (Netcen/ED45098/Issue 1). Disponível em: <<http://www.airquality.co.uk/annualreport/index.php>>. Acesso em: 06 out. 2010.

_____. **Air pollution in the UK: 2004**. Didcot: Netcen, 2005. (Netcen/ED48692008/Issue 1). Disponível em: <<http://www.airquality.co.uk/annualreport/index.php>>. Acesso em: 06 out. 2010.

BOWER, J. et al. **Air pollution in the UK: 2005**. Didcot: Netcen, 2006. (Netcen/ED48692008/Issue 1). Disponível em: <<http://www.airquality.co.uk/annualreport/index.php>>. Acesso em: 06 out. 2010.

_____. **Air Pollution in the UK: 2006**. Didcot: Netcen, 2007. (AEA/ENV/R/2544). Disponível em: <<http://www.airquality.co.uk/annualreport/index.php>>. Acesso em: 02 nov. 2010.

_____. **Air Pollution in the UK: 2007**. Didcot: AEA, 2008. (AEA/ENV/R/2544). Disponível em: <<http://www.airquality.co.uk/annualreport/index.php>>. Acesso em: 06 out. 2010.

_____. **Air Pollution in the UK: 2008**. Didcot: AEA, 2009. (AEAT/ENV/R/2823/Issue 1). Disponível em: <<http://www.airquality.co.uk/annualreport/index.php>>. Acesso em: 06 out. 2010.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2006**. São Paulo, 2007. 167 p. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/publicacoes.asp>>. Acesso em: 11 jan. 2011.

_____. **Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2007**. São Paulo, 2008. 294 p. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/publicacoes.asp>>. Acesso em: 11 jan. 2011.

_____. **Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2008**. São Paulo, 2009. 340 p. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/publicacoes.asp>>. Acesso em: 11 jan. 2011.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **2002 a 2009 – Evolução plurianual**. (relatório não divulgado publicamente). São Paulo, s/d. 12 p.

COX, D. R.; LEWIS, P. A. W. **The statistical analysis of series of events**. London: Methuen, 1966. 285 p.

CROWDER, M. J. et al. **Statistical analysis of reliability data**. Boca Raton: Chapman & Hall: CRC, 1991. 250 p.

ENVIRONMENT CANADA. **National Air Pollution Surveillance (NAPS) Network: annual summary for 1998**. (Environmental Protection Series Report 7/AP/31). Ontário, 2000. Disponível em: <<http://www.ec.gc.ca/Publications/default.asp?lang=En&xml=7F2D936B-1DBB-4F8E-8185-09D839F4212D>>. Acesso em: 05 out. 2010.

_____. **National Air Pollution Surveillance (NAPS) Network:** annual summary for 1999. (Environmental Protection Series Report 7/AP/32). Ontario, 2001a. Disponível em: <<http://www.ec.gc.ca/Publications/default.asp?lang=En&xml=7DD225C9-20CE-47A2-9583-DDBED97B1BEE>>. Acesso em: 05 out. 2010.

_____. **National Air Pollution Surveillance (NAPS) Network:** annual summary for 2000. (Environmental Protection Series Report 7/AP/33). Ontario, 2001b. Disponível em: <<http://www.ec.gc.ca/Publications/default.asp?lang=En&xml=FB814DA2-9DEF-4BFE-A6A4-0E50CF8EFB64>>. Acesso em: 05 out. 2010.

_____. **National Air Pollution Surveillance (NAPS) Network:** annual summary for 2001. (Environmental Protection Series Report 7/AP/34). Ontario, 2002. Disponível em: <<http://www.ec.gc.ca/Publications/default.asp?lang=En&xml=937329E2-A70A-47D1-AB2F-11B9AE7C40A0>>. Acesso em: 05 out. 2010.

_____. **National Air Pollution Surveillance (NAPS) Network:** annual data summary for 2002. (Environmental Protection Series Report 7/AP/35). Ontario, 2003. Disponível em: <<http://www.ec.gc.ca/Publications/default.asp?lang=En&xml=886D96DD-3B20-4451-8C0A-DE75E5EF2049>>. Acesso em: 05 out. 2010.

_____. **National Air Pollution Surveillance (NAPS) Network:** annual data summary for 2003. (Environmental Protection Series Report 7/AP/37). Ontario, 2005. Disponível em: <<http://www.ec.gc.ca/Publications/default.asp?lang=En&xml=3CF8C676-F1DA-46A1-9324-ECE74F3F7D90>>. Acesso em: 27 set. 2010.

_____. **National Air Pollution Surveillance (NAPS) Network:** annual data summary for 2004. (Environmental Protection Series Report 7/AP/38). Ontario, 2007. Disponível em: <<http://www.ec.gc.ca/Publications/default.asp?lang=En&xml=3C91AE19-0D69-463C-9F6D-B35034A45041>>. Acesso em: 27 set. 2010.

_____. **National Air Pollution Surveillance (NAPS) Network:** annual data summary for 2005-2006. (Environmental Protection Series Report 7/AP/39). Ontario, 2008. Disponível em: <<http://www.ec.gc.ca/Publications/default.asp?lang=En&xml=8928E8A8-0C6F-4B1B-8597-AB3E0F31F4A5>>. Acesso em: 27 set. 2010.

FELLER, W. **An introduction to probability theory and its applications**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1957. 461p.

FERREIRA, A. B. H. **Novo dicionário Aurélio da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1975.

KRIVTSOV, V. V. Recent advances in theory and applications of stochastic point process models in reliability engineering. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 92, n. 5, p. 549-551, 2007.

LEE, L. Testing adequacy of the Weibull and log linear rate models for a Poisson process. **Technometrics**, v.22, n.2, p. 195-199, May 1980.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2003. 706 p.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Tradução e revisão técnica de Verônica Calado. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 496 p.

NISHIKAWA, A. **São Paulo's Automatic Air Quality Monitoring Network**. (apresentação interna à CETESB). São Paulo, 2007.

O'CONNOR, P. D. T. **Practical reliability engineering**. 4.ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2002. 513 p.

RIGDON, S. E.; BASU, A. P. **Statistical methods for the reliability of repairable systems**. New York: John Wiley & Sons, 2000. 290 p.

ROSS, S. M. **Introduction to probability models**. 9. ed. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2007. 782 p.

SALDANHA, P. L. C.; de SIMONE, E. A.; FRUTUOSO e MELO, P. F. An application of non-homogeneous Poisson point processes to the reliability analysis of service water pumps. **Nuclear Engineering and Design**, v.210, p. 125-133, 2001.

SÃO PAULO (Estado). Decreto nº 48.523, de 02 de março de 2004. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, Poder Executivo, São Paulo, v.114, n.41, 03 mar. 2004. Seção I, p. 1.

_____. Decreto nº 50.753, de 28 de abril de 2006. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, Poder Executivo, São Paulo, v.116, n.80, 29 abr. 2006. Seção I, p. 1 e 3.

_____. Decreto nº 52.469, de 12 de dezembro de 2007. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, Poder Executivo, São Paulo, v.117, n.234, 13 dez. 2007. Seção I, p. 2, 3.

_____. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. Resolução SMA-068, de 30 de junho de 2010. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**, Poder Executivo, São Paulo, 03 jul. 2010. Seção I, p. 52-55. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/contAmbientaLegislacaoAmbienta_res.php>.

THERMO ENVIRONMENTAL INSTRUMENTS INC. **Instruction manual P/N 9997**: pulsed fluorescence SO₂ analyzer. Franklin, 1995a.

_____. **Instruction manual P/N 9994**: primary standard UV photometric O₃ calibrator. Franklin, 1995b.

_____. **Instruction manual P/N 13391**: dynamic gas calibrator. Franklin, 1995c.

_____. **Instruction manual P/N 9998**: gas filter correlation CO analyzer. Franklin, 1996.

_____. **Instruction manual P/N 9993**: trace level chemiluminescence NO-NO₂-NO_x analyzer. Franklin, 2000.

_____. **Model 111**: zero air supply (folder). Franklin, s/d.

UNITED STATES. Department of Defense. **MIL-HDBK 189**: reliability growth management, Washington, DC, 1981.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **The World Health Report 2002**: reducing risks, promoting healthy life. Geneva, 2002. 248 p. Disponível em: <http://www.who.int/whr/2002/en/whr02_en.pdf>. Acesso em: 12 mai. 2011.

APÊNDICE A Estações que não atenderam ao critério de representatividade, por parâmetro, no período de 1998 a 2008

(continua)

Estações	2008					2007				
	MP ₁₀	NO ₂	O ₃	CO	SO ₂	MP ₁₀	NO ₂	O ₃	CO	SO ₂
Cambuci	x									
Centro										
Cerqueira César										x
Congonhas										
Diadema										
Guarulhos	x				x	x				x
Horto Florestal										
Ibirapuera										
IPEN - USP							x			
Lapa										
Mauá	x		x			x	x	x		
Moóca						x		x	x	
Nossa Senhora do Ó										
Osasco					x	x				x
Parelheiros						x		x	x	
Parque D. Pedro II	x		x	x						
Penha										
Pinheiros	x					x				
Santana						x				
Santo Amaro								x		
Santo André - Capuava			x							
Santo André - Centro						x			x	
São Bernardo do Campo										
São Caetano do Sul	x	x				x	x	x	x	x
São Miguel Paulista										
Taboão da Serra	x					x	x			
Cubatão - Centro		x					x			
Cubatão - Vale do Mogi	x	x	x			x	x			
Cubatão - Vila Parisi										x
Americana										
Araçatuba	x	x	x							
Araraquara	x	x	x							
Bauru	x	x	x							
Campinas - Centro										
Jaú	x	x	x							
Jundiaí	x	x	x			x	x	x	x	
Marília	x	x	x							
Paulínia						x		x		x
Paulínia - Sul	x	x	x							
Piracicaba	x	x	x							
Presidente Prudente	x	x	x							
Ribeirão Preto		x		x		x	x	x		
São José dos Campos					x					
São José do Rio Preto	x	x	x							
Sorocaba										
NR total/Nº de estações (1)	18 em 39	14 em 23	14 em 31	2 em 15	3 em 9	14 em 30	8 em 15	8 em 23	5 em 17	6 em 9
Referência (2)	An 4, Tab A	An 4, Tab H	An 4, Tab F	An 4, Tab G	An 4, Tab I	An 4, Tab A	An 4, Tab H	(3)	(3)	An 4, Tab I

(1) Número de estações em que se observou ausência de representatividade do parâmetro em relação àquelas em operação

(2) Local de obtenção da informação mostrada em (1) no relatório de qualidade do ar (An = Anexo; Tab = Tabela; Fig = Figura)

(3) Locais dispersos no relatório. Ver capítulo referente a cada UGRHI no relatório

APÊNDICE A

(continuação)

2006					2005					2004				
MP ₁₀	NO ₂	O ₃	CO	SO ₂	MP ₁₀	NO ₂	O ₃	CO	SO ₂	MP ₁₀	NO ₂	O ₃	CO	SO ₂
X	X				X	X				X				
				X		X				X	X			
X	X				X	X								
X				X					X					
	X	X	X								X	X		
	X			X		X								X
					X			X		X				
X		X	X											
					X							X		
				X		X			X					X
	X			X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
										X	X	X	X	
		X	X											
								X						
		X	X			X					X			
					X									
					X	X		X			X		X	
	X										X			X
X		X	X											
	X	X	X	X			X				X			
					X		X				X			X
X	X	X	X											
X		X	X	X						X				
X	X					X				X	X	X		X
X		X	X		X					X		X		X
9 em 29	9 em 15	9 em 19	9 em 19	7 em 11	9 em 30	8 em 14	3 em 18	5 em 15	3 em 12	8 em 30	10 em 14	6 em 19	3 em 13	7 em 13
Fig 18, 19	Fig 53, 54	Fig 42, 43	Fig 42, 43	Fig 57, 58	Fig 17, 18	Fig 49, 50	Fig 38, 39	Fig 46	Fig 53, 54	Fig 17, 18	Fig 46, 47	Fig 35, 36	Fig 43	Fig 50, 51

APÊNDICE A

(conclusão)

2000					1999					1998				
MP ₁₀	NO ₂	O ₃	CO	SO ₂	MP ₁₀	NO ₂	O ₃	CO	SO ₂	MP ₁₀	NO ₂	O ₃	CO	SO ₂
X										X				
X	X													
	X					X								
							X							X
X														
						X			X					
	X	X			X					X				
X					X									
X										X				
					X									
	X													
					X									
X														
X	X				X	X	X		X					
					X		X			X				
													X	
		X								X				
X														X
X										X				
X														
											X			X
				X										X
X	X	X	X	X										
X				X										
12 em 29	6 em 12	3 em 16	1 em 12	3 em 13	6 em 25	3 em 11	3 em 13	0 em 10	2 em 10	7 em 24	1 em 10	0 em 10	1 em 10	4 em 9
Fig 18, 19	Fig 52, 53	Fig 46, 47	Fig 43	Fig 37, 38	Fig 14	Fig 35	Fig 32	Fig 29	Fig 25	Fig 14	Fig 34	Fig 32	Fig 29	Fig 25

APÊNDICE B – Exemplo de planilha para registrar as causas de interrupção das medições, por estação e parâmetro, 2006 (continua)

MP ₁₀	Janeiro																															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
Centro	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	2	2	2	2	2	2
Congonhas	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Guarulhos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
Moóca																																
Cubatão – Vale do Mogi																																
Jundiaí	Sem operação																															
Paulínia																																
Ribeirão Preto																																
Sorocaba																																

O ₃	Janeiro																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Horto Florestal	1	1	x													x		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
Moóca																															
Santana																															
São Caetano do Sul																															
Cubatão – Vale do Mogi																															
Cubatão – Vila Parisi	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x																			x	x	x
Jundiaí	Sem operação																														
Paulínia	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x									
Sorocaba																															

NO ₂	Janeiro																															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
Centro																										2	2	2	2	2	2	
Congonhas	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Horto Florestal	1	1																4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
Ibirapuera	1																															
Parque D. Pedro II	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Cubatão – Centro																																
Cubatão – Vila Parisi	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x																						
Jundiaí	Sem operação																															
Ribeirão Preto							x	x	x	x																		x	x	x	x	x

APÊNDICE B

(continuação)

CO	Janeiro																															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
Jundiaí	Sem operação																															
Paulínia																																
Ribeirão Preto																																

SO ₂	Janeiro																															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
Cerqueira César			x																													
Guarulhos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Ibirapuera	1	x	x	x	x	x	x	x	x																							
Osasco						1																										
Parque D Pedro II	x	x	x	x				x	x	x	1																					
Cubatão – Vila Parisi	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x																				x		
Paulínia																																

Legenda

- | | | | | | |
|---|------------------------------------|---|--------------------|---|-------------------------------|
| x | Monitor | 4 | Ar condicionado | 7 | Furto de equipamentos |
| 1 | Energia elétrica | 5 | Estabilizador | 8 | Sistema de amostragem |
| 2 | Estação desativada temporariamente | 6 | Estação em reforma | 9 | Sistema de aquisição de dados |
| 3 | Microprocessador | | | | |

APÊNDICE B

(continuação)

MP ₁₀	Setembro																													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Centro	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x								x	x	x	x					
Congonhas							x																							
Guarulhos																														
Moóca	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2			2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Cubatão – Vale do Mogi				5	5	5																								
Jundiaí																														
Paulínia	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7			7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Ribeirão Preto	Sem operação																													
Sorocaba	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

O ₃	Setembro																													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Horto Florestal																														
Moóca	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2			2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Santana																			x											
São Caetano do Sul																						4	4	4	4	4	4	4	x	x
Cubatão – Vale do Mogi				5	5	5	x																							
Cubatão – Vila Parisi	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Jundiaí																												x	x	x
Paulínia	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7			7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Sorocaba																														

NO ₂	Setembro																													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Centro																														
Congonhas					x		x				x				3															
Horto Florestal	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Ibirapuera		1	1	1	1	1	x	x	x	x	x						x	x									1	x	x	x
Parque D. Pedro II	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Cubatão – Centro	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	5	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Cubatão – Vila Parisi	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Jundiaí																														x
Ribeirão Preto	Sem operação																													

APÊNDICE B

(conclusão)

CO	Setembro																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Jundiaí	x	x													x															x	x
Paulínia	Sem operação																														
Ribeirão Preto	Sem operação																														

SO ₂	Setembro																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
Cerqueira César																															
Guarulhos																															
Ibirapuera	Sem operação																														
Osasco			1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			1	1												
Parque D Pedro II	Sem operação																														
Cubatão – Vila Parisi																															
Paulínia	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7			7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	

Legenda

x	Monitor	4	Ar condicionado	7	Furto de equipamentos
1	Energia elétrica	5	Estabilizador	8	Sistema de amostragem
2	Estação desativada temporariamente	6	Estação em reforma	9	Sistema de aquisição de dados
3	Microprocessador				

APÊNDICE C Estimativa da ROCOF e do $E\{N(t)\}$ a partir dos tempos de falha dos monitores

C.1 MONITOR DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO NO_x – 1703

IDENTIFICAÇÃO: NO_x – 1703 N° DE SÉRIE: 4251503293 MODELO: 42B
 INÍCIO DA OPERAÇÃO (1): 01.12.1998

FALHA					REPARO	
DETECÇÃO (2)	(2) - (1) (h)	t_i (h)	x_i (h)	DESCRIÇÃO	DESCRIÇÃO	RETORNO A OPERAÇÃO
10.02.1999	1704	1704	1704	Bomba (diafragma em falha)	Substituição	
15.06.1999				Bomba (diafragma) MP	Substituição	
28.06.2000				Bomba (diafragma) MP	Substituição	
03.07.2000	13896			Cooler (termopar)	Substituição	
03.07.2000	13896	13896	12192	Fotomultiplicadora	Substituição	
17.01.2001	18648	18648	4752	Tubo de osmose	Substituição	
24.01.2001	18816	18816	168	Tubo de teflon que leva amostra para tubo de reação	Substituição	
04.04.2001				Bomba MP	Substituição	
14.03.2002	14976	28752	9936	Bomba (diafragma)	Substituição	
06.08.2002	3480	32232	3480	Bomba (diafragma)	Substituição	
14.06.2003	7488	39720	7776	Bomba (diafragma)	Substituição	
23.06.2003	26040	39936	216	Cooler (termopar)	Substituição	
24.10.2003	3120	42840	2904	Bomba	Substituição	
16.03.2004	3432	46272	3432	Bomba (diafragma)	Substituição	
04.10.2004	38016			Fotomultiplicadora	Substituição	
04.10.2004	11232			Cooler (termopar)	Substituição	
04.10.2004	4824	51168	4896	Bomba	Substituição	
25.11.2004	52416	52416	1248	Ozonador	Substituição	
27.12.2004	2016			Bomba	Substituição	
27.12.2004	53184	53184	2016	Ventoinha	Substituição	
06.04.2005	2376			Bomba	Substituição	
06.04.2005	55584	55584	2400	Transformador do ozonador	Substituição	
20.07.2005	5564	57980	2396	Ozonador	Substituição	
30.07.2005	2760	58344	364	Bomba (rolamento)	Substituição	
03.08.2005	7272	58440	96	Cooler (o'rings)	Substituição	
				Capilar da amostragem	Substituição	
25.08.2005	58968	58968	528	Capilar do ozonador	Substituição	
03.05.2007	15408	73752	14784	Bomba (diafragma)	Substituição	
12.06.2008	9720	83472	9720	Bomba	Substituição	
22.08.2008	1704	85176	1704	Bomba	Substituição	
31.12.2008	t_0	88320				

Os itens destacados em amarelo e assinalados com MP foram substituídos durante manutenção

i	t_i (h)	x_i (h)	$\ln(t/t_i)$	i	t_i (h)	x_i (h)	$\ln(t/t_i)$	i	t_i (h)	x_i (h)	$\ln(t/t_i)$
1	1704	1704	3,948	8	39936	216	0,794	15	57980	2396	0,421
2	13896	12192	1,849	9	42840	2904	0,723	16	58344	364	0,415
3	18648	4752	1,555	10	46272	3432	0,646	17	58440	96	0,413
4	18816	168	1,546	11	51168	4896	0,546	18	58968	528	0,404
5	28752	9936	1,122	12	52416	1248	0,522	19	73752	14784	0,180
6	32232	3480	1,008	13	53184	2016	0,507	20	83472	9720	0,056
7	39720	7776	0,799	14	55584	2400	0,463	21	85176	1704	0,036
									$\sum t_i = 971300$		$\Sigma = 17,953$

A disposição das falhas e do tempo acumulado das falhas consta da Figura C.1.1.

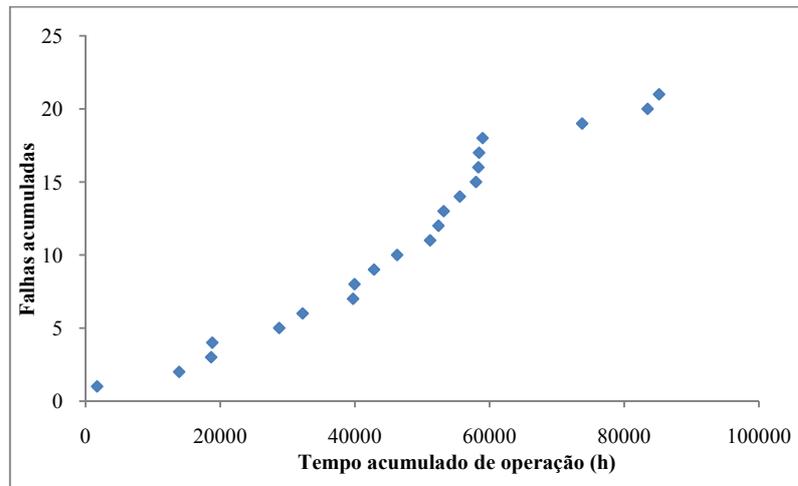


Figura C.1.1 Disposição das falhas do analisador NO_x – 1703 ao longo do tempo de operação

C.1.1 Análise da tendência dos intervalos entre falhas

Realiza-se o teste de Laplace, Equação 2.33, $U = \frac{\sum_{i=1}^n t_i - t_0}{n \sqrt{\frac{1}{12n}}}$, com $\sum t_i = 971300\text{h}$, $n = 21$,

$t_0 = 88320\text{h}$. Obtém-se $U = 0,376$. O valor de U não indica evidência para rejeitar a H_0 (ROCOF constante) ao nível de significância $\alpha = 5\%$.

Realiza-se o teste da norma MIL-HDBK 189, Equação 2.34, $\hat{\beta} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \ln(t_0/t_i)}$, com $\sum \ln(t/t_i) = 17,953$, $n = 21$, $t_0 = 88320\text{h}$. Obtém-se $\hat{\beta} = 1,170$ e $2n/\hat{\beta} = 35,897$. Sob a hipótese nula (H_0) de HPP ou ausência de tendência da ROCOF, a estatística $2n/\hat{\beta}$ tem distribuição chi-quadrada com $2n$ graus de liberdade. Rejeita-se H_0 se $\frac{2n}{\hat{\beta}} < \chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(2n)$ ou $\frac{2n}{\hat{\beta}} > \chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(2n)$.

Tem-se que $\chi_{0,975}^2(42) = 25,999$ e $\chi_{0,025}^2(42) = 61,777$. Como $2n/\hat{\beta}$ não é menor que 25,999 nem maior que 61,777, não há evidência para rejeitar H_0 .

Como não se rejeitou a hipótese de ROCOF constante, verifica-se o ajuste de X_i à distribuição exponencial por meio do teste TTT, Equação 2.35, $W = \frac{(\sum_{j=1}^{n-1} u_j) - \frac{n-1}{2}}{\sqrt{\frac{n-1}{12}}}$. A tabela a

seguir fornece os valores para o cálculo de W .

j	$x_{(j)}$	S_j	j/n	$U_j = S_j / S_n$	j	$x_{(j)}$	S_j	j/n	$U_j = S_j / S_n$
0	0	0	0	0	11	2400	36840	0,524	0,425
1	96	2016	0,048	0,023	12	2904	41880	0,571	0,483
2	168	3456	0,095	0,040	13	3432	46632	0,619	0,538
3	216	4368	0,143	0,050	14	3480	47016	0,667	0,542
4	364	7032	0,190	0,081	15	4752	55920	0,714	0,645
5	528	9820	0,238	0,113	16	4896	56784	0,762	0,655
6	1248	21340	0,286	0,246	17	7776	71184	0,810	0,821
7	1704	28180	0,333	0,325	18	9720	78960	0,857	0,911
8	1704	28180	0,381	0,325	19	9936	79608	0,905	0,918
9	2016	32236	0,429	0,372	20	12192	84120	0,952	0,970
10	2396	36796	0,476	0,424	21	14784	86712	1	1
									$\sum_{j=1}^{n-1} u_j = 8,907$

Com $\sum_{j=1}^{n-1} u_j = 8,907$ e $n = 21$, obtém-se $W = -0,847$, maior que $-z_{\alpha/2} = -1,96$. Logo, não há evidência suficiente para rejeitar a H_0 (distribuição exponencial dos tempos de falha) ao nível de significância $\alpha = 5\%$, de forma que estima-se a ROCOF por meio do HPP. A Figura C.1.2 evidencia a linearidade dos pontos $(j/n, u_j)$ e ratifica a decisão de não rejeitar H_0 .

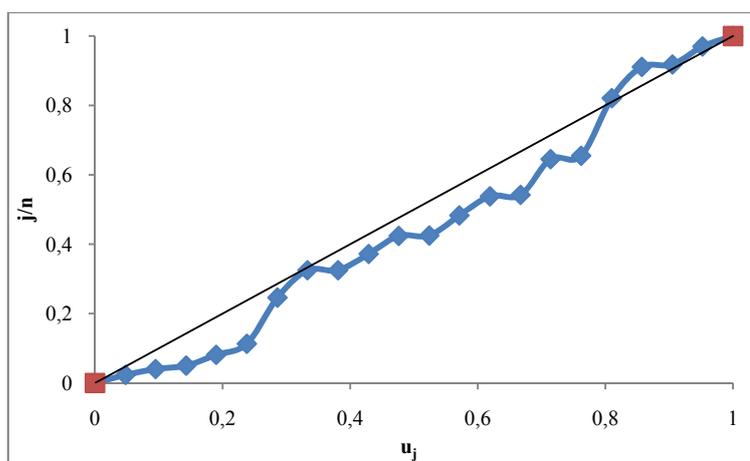


Figura C.1.2 Plotagem do teste TTT para o analisador $\text{NO}_x - 1703$

C.1.2 Estimação dos parâmetros do HPP

O estimador de máxima verossimilhança para ν provém da Equação 2.16, $\hat{\nu}(t) = N/t$. Com $N = 21$ e $t_0 = 88320$, obtém-se $\hat{\nu}(t) = 0,0002378\text{h}^{-1}$.

C.1.3 Previsão do número de falhas

Para a estimativa do número esperado de falhas num intervalo subsequente, parte-se da Equação 2.37, $E\{N(t)\} = \nu \Delta t = \nu(b - a)$. Para $\Delta t = 8760\text{h}$, tem-se $E\{N(t)\} = 2,083$.

C.2 MONITOR DE MONÓXIDO DE CARBONO CO – 1314

IDENTIFICAÇÃO: CO – 1314

Nº DE SÉRIE: 4852862293

MODELO: 48B

INÍCIO DA OPERAÇÃO (1): 07.06.1999

FALHA					REPARO	
DETECÇÃO (2)	(2) - (1) (h)	t_i (h)	x_i (h)	DESCRIÇÃO	DESCRIÇÃO	RETORNO A OPERAÇÃO
13.03.2000	6696	6696	6696	Bomba	Substituição	
13.07.2001	18384	18384	11688	Fonte de infravermelho	Substituição	
15.01.2003	19608	26304	7920	Bomba (diafragma)	Substituição	
10.02.2004	9384	35688	9384	Bomba	Substituição	18.03.2004 (36 d)
23.06.2005	10224	45912	10224	Bomba (diafragma)	Substituição	
06.07.2005				Funcionamento interrompido		
07.03.06 (244 d)				Retorno a operação		
31.12.2008	t_0	77088				

i	t_i (h)	x_i (h)	$\ln(t/t_i)$
1	6696	6696	2,443
2	18384	11688	1,433
3	26304	7920	1,075
4	35688	9384	0,770
5	45912	10224	0,518
$\sum t_i = 132984$			$\Sigma = 6,239$

A disposição das falhas e do tempo acumulado das falhas consta da Figura C.2.1.

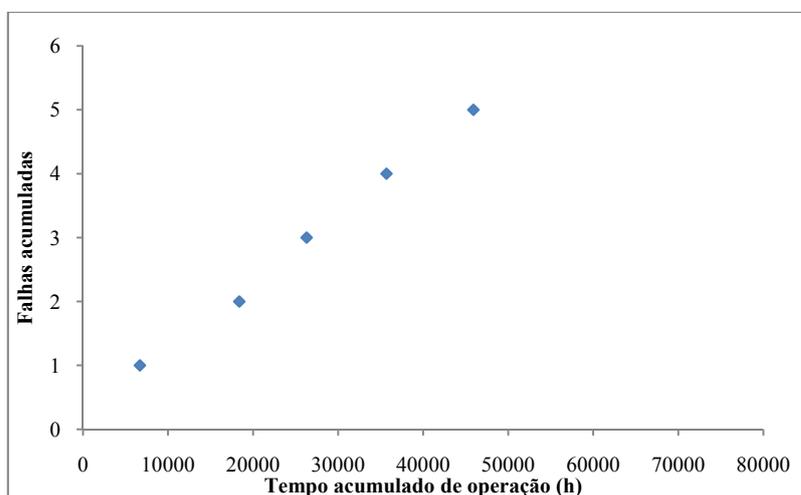


Figura C.2.1 Disposição das falhas do analisador CO – 1314 ao longo do tempo de operação

C.2.1 Análise da tendência dos intervalos entre falhas

Realiza-se o teste de Laplace, Equação 2.33, $U = \frac{\sum_{i=1}^n t_i - t_0}{t_0 \sqrt{\frac{1}{12n}}}$, com $\sum t_i = 132984\text{h}$, $n = 5$,

$t_0 = 77088\text{h}$. Obtém-se $U = -1,200$. O valor de U não indica evidência para rejeitar a H_0 (ROCOF constante) ao nível de significância $\alpha = 5\%$.

Realiza-se o teste da norma MIL-HDBK 189, Equação 2.34, $\hat{\beta} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \ln(t_0/t_i)}$, com $\sum \ln(t/t_i) = 6,239$, $n = 5$, $t_0 = 77088\text{h}$. Obtém-se $\hat{\beta} = 0,801$ e $2n/\hat{\beta} = 12,484$. Sob a hipótese nula (H_0) de HPP ou ausência de tendência da ROCOF, a estatística $2n/\hat{\beta}$ tem distribuição chi-quadrada com $2n$ graus de liberdade. Rejeita-se H_0 se $\frac{2n}{\hat{\beta}} < \chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(2n)$ ou $\frac{2n}{\hat{\beta}} > \chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(2n)$.

Tem-se que $\chi_{0,975}^2(10) = 3,247$ e $\chi_{0,025}^2(10) = 20,483$. Como $2n/\hat{\beta}$ não é menor que 3,247 nem maior que 20,483, não há evidência para rejeitar H_0 .

Como não se rejeitou a hipótese de ROCOF constante, verifica-se o ajuste de X_i à distribuição exponencial por meio do teste TTT, Equação 2.35, $W = \frac{(\sum_{j=1}^{n-1} u_j) - \frac{n-1}{2}}{\sqrt{\frac{n-1}{12}}}$. A tabela a seguir fornece os valores para o cálculo de W .

j	$x_{(j)}$	S_j	j/n	$U_j = S_j / S_n$
0	0	0	0	0
1	6696	33480	0,2	0,729
2	7920	38376	0,4	0,836
3	9384	42768	0,6	0,932
4	10224	44448	0,8	0,968
5	11688	45912	1	1
				$\sum_{j=1}^{n-1} u_j = 3,465$

Com $\sum_{j=1}^{n-1} u_j = 3,465$ e $n = 5$, obtém-se $W = 2,537$, maior que $z_{\alpha/2} = 1,96$. Logo, há evidência suficiente para rejeitar a H_0 (distribuição exponencial dos tempos de falha) ao nível de significância $\alpha = 5\%$, de forma que a estimativa da ROCOF será por meio do RP outro que não o HPP. A Figura C.2.2 evidencia a fuga da linearidade dos pontos $(j/n, u_j)$ e ratifica a decisão de rejeitar H_0 .

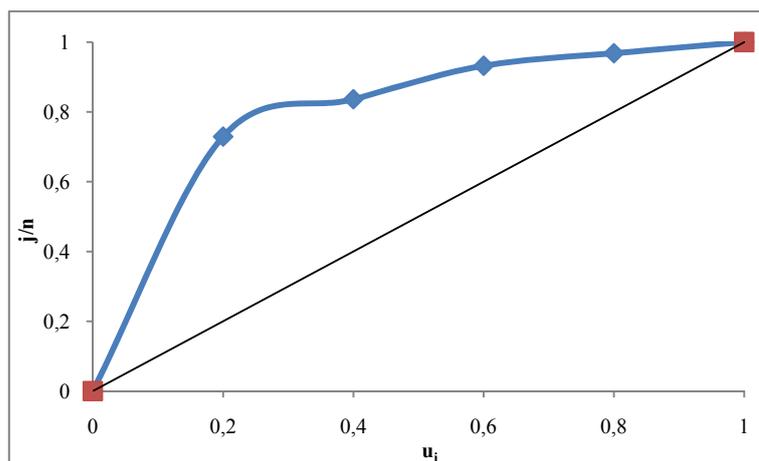


Figura C.2.2 Plotagem do teste TTT para o analisador CO – 1314

C.2.2 Estimação dos parâmetros do RP

Os estimadores de máxima verossimilhança para os parâmetros β e λ da distribuição de Weibull provêm das Equações 2.18 e 2.19. A tabela a seguir indica os valores $X_{(i)}$ ordenados por magnitude.

i	$x_i(\mathbf{h})$	$x_{(i)}(\mathbf{h})$
1	6696	6696
2	11688	7920
3	7920	9384
4	9384	10224
5	10224	11688

Com $p = 5$, obteve-se $\hat{\beta} = 6,1$ e $\hat{\lambda} = 4,2E - 25$. A FOM da distribuição de Weibull, Equação 2.17, é $h_X(x) = \lambda\beta x^{\beta-1}$ ou $h_X(x) = 2,56 \cdot 10^{-24} x^{5,1}$.

C.2.3 Previsão do número de falhas

Parte-se da Equação 2.38, $E\{N(x)\} = \lambda\beta \int_0^t (x^{\beta-1}) dx$, para a estimativa do número esperado de falhas num intervalo subsequente. Para $\Delta t = 8760h$, tem-se $E\{N(x)\} = 2,56 \cdot 10^{-24} \int_0^{8760} x^{5,1} dx$ ou $E\{N(t)\} = 0,470$.

C.3 MONITOR DE OZÔNIO O₃ – 1513

IDENTIFICAÇÃO: O₃ – 1513 Nº DE SÉRIE: 49C.63229.339 MODELO: 49C
 INÍCIO DA OPERAÇÃO (1): 30.08.2000

FALHA					REPARO	
DETECÇÃO (2)	(2)-(1) (h)	t_i (h)	x_i (h)	DESCRIÇÃO	DESCRIÇÃO	RETORNO À OPERAÇÃO
16.01.2003				Bomba MP	Substituição	
16.01.2003				Lâmpada UV MP	Substituição	
25.09.2003				Bomba MP	Substituição	
10.03.2005	12744	39648	39648	Bomba	Substituição	
21.12.2005				Bomba MP	Substituição	
25.05.2006				Bomba MP	Substituição	
25.05.2006	50232	49608	9960	Célula A	Substituição	
25.05.2006				Célula B	Substituição	
03.10.2007	62136	62136	12528	Eletroválvula A	Substituição	
03.10.2007				Eletroválvula B	Substituição	
16.06.2008	6144	68280	6144	Eletroválvula A (diafragma rompido)	Substituição	
23.09.2008				Bomba MP	Substituição	
03.11.2008	984	71616	3336	Bomba (diafragma)	Substituição	
10.11.2008	71808	71808	192	Detector da célula B	Substituição	
13.11.2008	3600	71880	72	Eletroválvula A	Substituição	
13.11.2008	9744			Eletroválvula B	Substituição	
31.12.2008	t_0	73032				

Os itens destacados em amarelo e assinalados com MP foram substituídos durante manutenção

i	t_i (h)	x_i (h)	$\ln(t/t_i)$
1	39648	39648	0,611
2	49608	9960	0,387
3	62136	12528	0,162
4	68280	6144	0,067
5	71616	3336	0,020
6	71808	192	0,017
7	71880	72	0,016
$\sum t_i$	434976		
$\sum \ln t_i$	77,112		$\Sigma = 1,280$

A disposição das falhas e do tempo acumulado das falhas consta da Figura C.3.1.

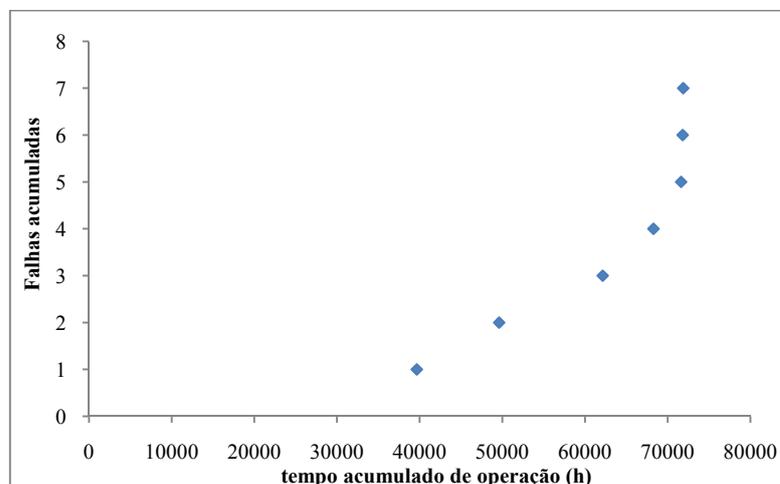


Figura C.3.1 Disposição das falhas do analisador O₃ – 1513 ao longo do tempo de operação

C.3.1 Análise da tendência dos intervalos entre falhas

Realiza-se o teste de Laplace, Equação 2.33, $U = \frac{\sum_{i=1}^n t_i - t_0}{t_0 \sqrt{\frac{1}{12n}}}$, com $\sum t_i = 434976\text{h}$, $n = 7$, $t_0 = 73032\text{h}$. Obtém-se $U = 3,216$. O valor de U indica evidência para rejeitar a H_0 (ROCOF constante) ao nível de significância $\alpha = 5\%$, visto que $U > z_{\alpha/2} = 1,96$. O valor de P para este teste é 0,014, menor que o nível de significância, e ratifica a rejeição de H_0 .

Realiza-se o teste da norma MIL-HDBK 189, Equação 2.34, $\hat{\beta} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \ln(t_0/t_i)}$, com $\sum \ln(t/t_i) = 1,28$, $n = 7$, $t_0 = 73032\text{h}$. Obtém-se $\hat{\beta} = 5,469$ e $2n/\hat{\beta} = 2,560$. Sob a hipótese nula (H_0) de HPP ou ausência de tendência da ROCOF, a estatística $2n/\hat{\beta}$ tem distribuição qui-quadrada com $2n$ graus de liberdade. Rejeita-se H_0 se $\frac{2n}{\hat{\beta}} < \chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(2n)$ ou $\frac{2n}{\hat{\beta}} > \chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(2n)$.

Tem-se que $\chi_{0,975}^2(14) = 5,629$ e $\chi_{0,025}^2(14) = 26,119$. Como $2n/\hat{\beta}$ é menor que 5,629, há evidência para rejeitar H_0 . O valor de P para este teste é 0,002, menor que o nível de significância, ratifica a rejeição de H_0 e confirma o resultado do teste de Laplace.

Dado que rejeitou-se a hipótese de ROCOF constante (ou HPP), desenvolve-se o NHPP com modelos de ROCOF $v_1(t)$ e $v_2(t)$.

C.3.2 Estimação dos parâmetros do NHPP

Exponencial linear: $v_1(t) = \exp(\beta_0 + \beta_1 t)$, Equação 2.21.

O estimador de máxima verossimilhança para β_1 provém da Equação 2.24. $\sum_{i=1}^n t_i + n\beta_1^{-1} - nt_0\{1 - e^{(-\beta_1 t_0)}\}^{-1} = 0 \rightarrow 434976 + \frac{7}{\beta_1} - \frac{7 \cdot 73032}{1 - e^{-73032\beta_1}} = 0$. Obtém-se $\hat{\beta}_1 = 0,000091$.

O estimador de máxima verossimilhança para β_0 provém da Equação 2.25. $\hat{\beta}_0 = \ln\left\{\frac{n\hat{\beta}_1}{e^{(\hat{\beta}_1 t_0)} - 1}\right\} \rightarrow \hat{\beta}_0 = \ln\left\{\frac{7 \cdot 0,000091}{e^{(0,000091 \cdot 73032)} - 1}\right\}$. Obtém-se $\hat{\beta}_0 = -14,003$. Assim, $v_1(t) = \exp(-14,003 + 0,000091t)$.

Lei das potências: $v_2(t) = \gamma \delta t^{\delta-1}$, Equação 2.22, com $\gamma > 0$ e $\delta > 0$.

O estimador de máxima verossimilhança para δ provém da Equação 2.27.

$$\hat{\delta} = \frac{n}{n \ln t_0 - \sum_{i=1}^n \ln t_i} \rightarrow \hat{\delta} = \frac{7}{7 \ln (73032) - 77,112}. \text{ Obtém-se } \hat{\delta} = 5,464.$$

O estimador de máxima verossimilhança para γ provém da Equação 2.28.

$$\hat{\gamma} = \frac{n}{t_0^{\hat{\delta}}} \rightarrow \hat{\gamma} = \frac{7}{(73032)^{5,464}}. \text{ Obtém-se } \hat{\gamma} = 1,866 \text{ E-}26 \text{ e } v_2(t) = \mathbf{1,02 \cdot 10^{-25} t^{4,464}}.$$

A Figura C.3.2 apresenta o comportamento de $v_1(t)$ e $v_2(t)$ no intervalo de interesse.

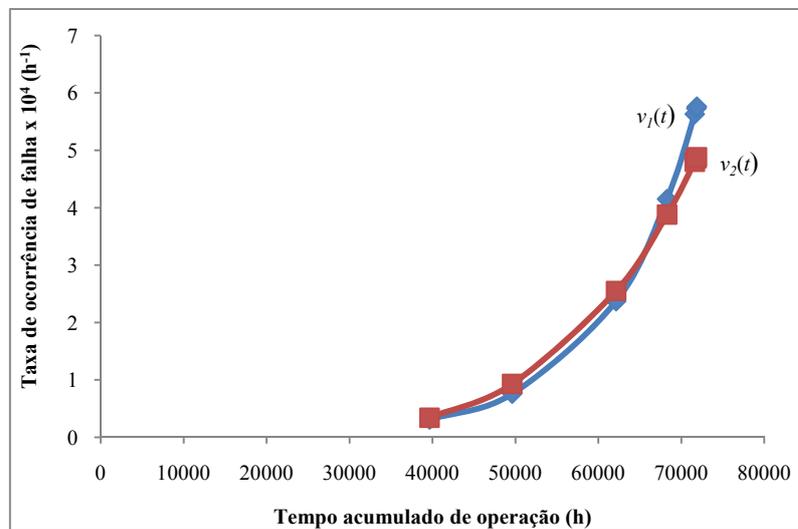


Figura C.3.2 Comportamento de $v_1(t)$ e $v_2(t)$ ao longo do período de operação

C.3.2.1 Escolha entre os modelos de ROCOF $v_1(t)$ e $v_2(t)$

Escolheu-se entre $v_1(t)$ e $v_2(t)$ com apoio de método gráfico. Dividiu-se o período de observação $[0, 73032]$ em três diferentes sub-períodos. Ajustou-se os intervalos de forma a se obter as melhores estimativas de β_0 , β_1 , γ e δ . A tabela a seguir apresenta o sub-período 1 e os valores que compõem as Figuras C.3.3 e C.3.4.

Intervalo (h)	n_r	b_r	$v(b_r)$	$\ln b_r$	$\ln v(b_r)$
0-60500	1	30250	0,0000165	10,317	-11,012
60500-64500	1	62250	0,00025	11,039	-8,294
64500-67500	1	66000	0,000333	11,097	-8,007
67500-73032	4	70266	0,000723	11,16	-7,232

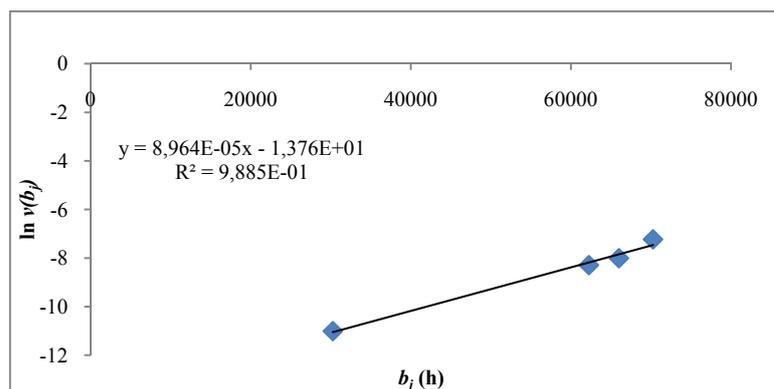


Figura C.3.3 Estimação de β_0 e β_1 para o sub-período 1

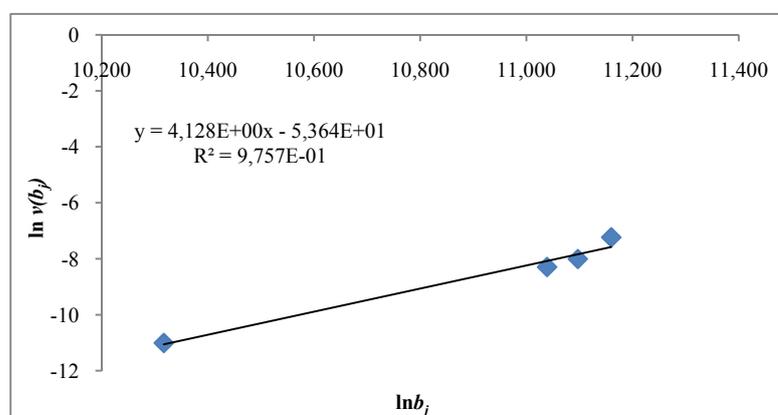


Figura C.3.4 Estimação de γ e δ para o sub-período 1

A tabela a seguir apresenta o sub-período 2 e os valores que compõem as Figuras C.3.5 e C.3.6.

Intervalo (h)	n_r	b_j	$v(b_j)$	$\ln b_j$	$\ln v(b_j)$
0-61000	1	30500	0,0000164	10,325	-11,018
61000-65000	1	63000	0,00025	11,051	-8,294
65000-68000	1	66500	0,000333	11,105	-8,007
68000-73032	4	70516	0,000795	11,164	-7,137

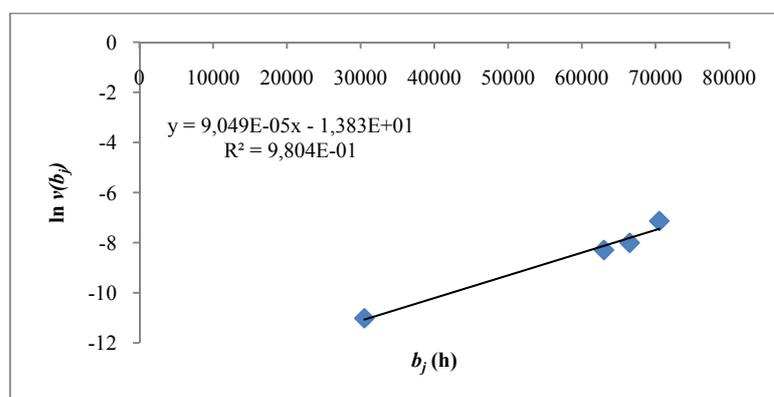


Figura C.3.5 Estimação de β_0 e β_1 para o sub-período 2

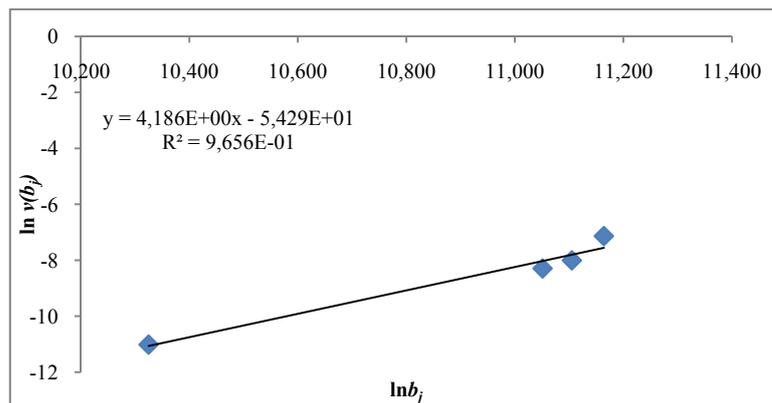


Figura C.3.6 Estimação de γ e δ para o sub-período 2

A tabela a seguir apresenta o sub-período 3 e os valores que compõem as Figuras C.3.7 e C.3.8.

Intervalo (h)	n_r	b_i	$v(b_i)$	$\ln b_i$	$\ln v(b_i)$
0-60000	1	30000	0,0000167	10,309	-11,000
60000-64000	1	62000	0,00025	11,035	-8,294
64000-67500	1	65750	0,000286	11,094	-8,160
67500-73032	4	70266	0,000723	11,160	-7,232

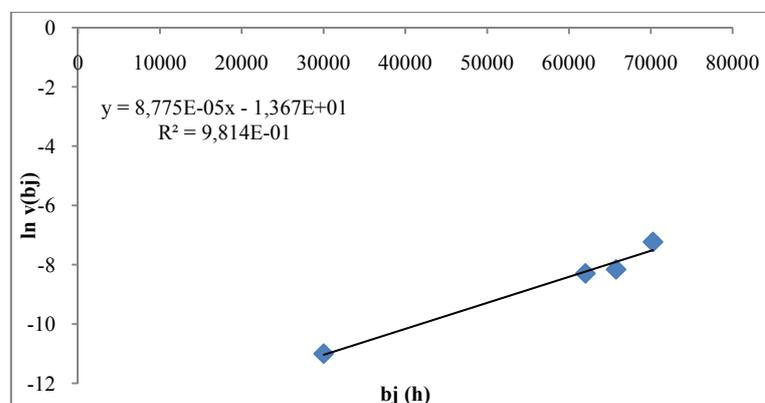


Figura C.3.7 Estimação de β_0 e β_1 para o sub-período 3

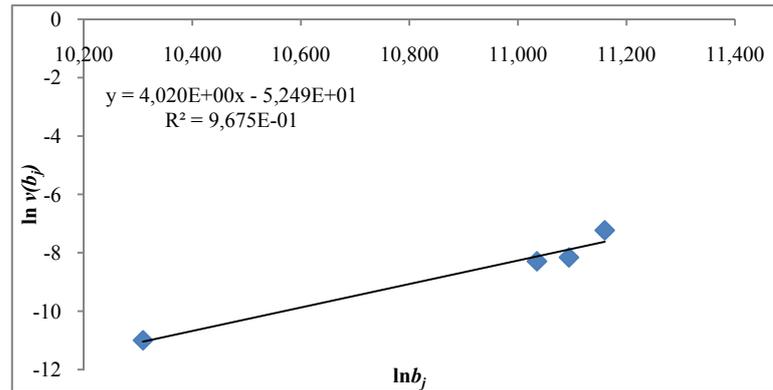


Figura C.3.8 Estimação de γ e δ para o sub-período 3

A tabela a seguir apresenta as estimativas de β_0 , β_1 , γ e δ pelo método gráfico e pelo método log-verossimilhança.

	β_0	β_1	δ	γ
Intervalo1	-13,76	0,0000896	5,128	9,870E-25
Intervalo 2	-13,83	0,0000905	5,186	5,097E-25
Intervalo 3	-13,67	0,000088	5,020	3,186E-24
Log-verossimilhança	-14,003	0,000091	5,464	1,866E-26

Com base no intervalo 2, conclui-se que a Equação $v_l(t)$ é a que melhor representa os dados de falha, de forma que a ROCOF é $v_1(t) = \exp(-14,003 + 0,000091t)$.

C.3.3 Previsão do número de falhas

Para a estimativa do número esperado de falhas num intervalo subsequente, com base em $v_l(t)$, parte-se da Equação 2.36, $E\{N(t)\} = \frac{e^{\beta_0}}{\beta_1} \{e^{b\beta_1} - e^{a\beta_1}\}$. Para o intervalo (73032, 81792), equivalente a um ano de observações, tem-se $E\{N(t)\} = 8,55$.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO DM	2. DATA 26 de maio de 2011	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/DM-012/2011	4. N° DE PÁGINAS 123
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Análise da disponibilidade da rede automática de monitoramento da qualidade do ar e seus reflexos no licenciamento ambiental realizado em São Paulo			
6. AUTOR(ES): José Carlos de Moura Xavier			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Monitoramento da qualidade do ar, sistema reparável, taxa de ocorrência de falhas, número esperado de falhas, disponibilidade			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Monitoramento da saúde de sistemas; Controle automático; Qualidade do ar; Análise de falhas; Controle ambiental; Engenharia sanitária			
10. APRESENTAÇÃO: ITA, São José dos Campos. Curso de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica. Área de Infraestrutura Aeroportuária. Orientador: Wilson Cabral de Sousa Junior. Defesa em 03/05/2011. Publicada em 2011			
11. RESUMO: A qualidade do ar no estado de São Paulo é acompanhada pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) por meio de uma rede de monitoramento das concentrações de CO, SO ₂ , NO _x , O ₃ e material particulado, com o objetivo primordial de proteger a saúde humana. Falhas nesse acompanhamento podem reduzir a disponibilidade da rede e comprometer as estratégias da CETESB associadas à preservação da qualidade ambiental, entre elas a qualificação de municípios quanto ao grau de saturação da qualidade do ar. Este trabalho realiza um estudo analítico sobre a disponibilidade rede automática de monitoramento e seus reflexos no licenciamento ambiental realizado pela CETESB, bem como discute a possibilidade de melhoria da informação prestada à sociedade baseada no aumento dessa disponibilidade. Encontrou-se entre 1998 a 2008 valores de disponibilidade média próximos a 80%, sendo que esse nível possivelmente influenciou na qualificação de alguns municípios, classificados como <i>saturado</i> quando o plausível seria <i>em vias de saturação</i> , ou classificados como <i>em vias de saturação</i> ao invés de <i>não saturado</i> . Os reflexos dessa qualificação poderão ser observados no licenciamento ambiental de fontes de poluentes atmosféricos pela necessidade da compensação das emissões em municípios qualificados como <i>saturado</i> ou <i>em vias de saturação</i> . A disponibilidade média encontrada decorre predominantemente de falhas dos monitores de SO ₂ , NO _x e MP ₁₀ e de falhas de infraestrutura da rede automática, razão pela qual aperfeiçoar o programa de manutenção dos monitores e implantar um programa para os equipamentos de infraestrutura são algumas das recomendações que objetivam aumentar a disponibilidade para cerca de 88% e minimizar sua interferência na qualificação dos municípios quanto ao grau de saturação da qualidade do ar.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () CONFIDENCIAL () SECRETO			