

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**REGULAMENTOS DE EMISSÕES DE  
MOTORES: IMPLANTAÇÃO DO PLT  
INTEGRADO COM A MELHORIA DA  
QUALIDADE**

Lourival Rech Junior

Porto Alegre, novembro de 2007

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**REGULAMENTOS DE EMISSÕES DE  
MOTORES: IMPLANTAÇÃO DO PLT  
INTEGRADO COM A MELHORIA DA  
QUALIDADE**

Lourival Rech Junior

Orientador: Professora Giovana Savitri Pasa, Dr.Eng.

Banca Examinadora:

Professor Carlos Honorato Schuch Santos, Dr.Eng.

Professor José Luis Duarte Ribeiro, Dr.Eng.

Professora Morgana Pizzolato, Dr.Eng.

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Produção como requisito parcial à obtenção do título de  
MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Modalidade: Profissional

Área de concentração: Sistemas de Qualidade

Porto Alegre, novembro de 2007

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Profissional e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

---

**Prof. Giovana Savitri Pasa, Dr.Eng.**

Orientador PPGEP/UFRGS

---

**Prof. Flávio Sanson Fogliatto, Dr.Eng.**

Coordenador PPGEP/UFRGS

**Banca Examinadora:**

Professor Carlos Honorato Schuch Santos, Dr.Eng. (PPGA/UCS)

Professor José Luis Duarte Ribeiro, Dr.Eng. (PPGEP/UFRGS)

Professora Morgana Pizzolato, Dr.Eng. (PPGEP/UFRGS)

Para Lourival e Petronila, meus pais.

## AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Giovana Savitri Pasa, pelo conhecimento transmitido e pela paciência das revisões.

Agradeço a meus pais, Lourival e Petronila, por terem despertado em mim o gosto pelos estudos e proporcionado as condições que pavimentaram o caminho para realização deste trabalho. Agradeço a minha irmã, Jeisa, pela admiração, que é mútua, e pelo seu exemplo de dedicação à vida acadêmica.

Agradeço aos colegas da empresa, em especial ao Dr. Martin Johannes Maaß, pelas valiosas dicas sobre legislação e motores, a Geraldo Pizzato e Fabio Gonçalves, pelas trocas de idéias e a Elton Farina Prux e Tiago Vier, por suas contribuições na elaboração e melhoria dos procedimentos operacionais.

Aos amigos Clarindo e Marisa, pelo apoio que foi fundamental para realização deste trabalho.

Finalmente agradeço a Aline pela paciência e compreensão com a minha ausência.

## RESUMO

Os regulamentos de controle de emissões de exaustão de motores pequenos fora de estrada, recentemente introduzidos nos EUA e na Europa, exigem a realização de ensaios em motores, conhecidos como PLT – *Production Line Testing*. O presente trabalho apresenta uma sistemática para implantação deste programa de ensaios na linha de produção pelo fabricante. Neste trabalho foi identificada a oportunidade de utilizar métodos complementares para monitoramento e melhoria da qualidade, considerando requisitos do usuário e regulamentos. A sistemática proposta foi aplicada em uma empresa fabricante de motores durante a introdução de uma linha de produção e possibilitou a implantação do PLT com sucesso. O monitoramento da qualidade permitiu a identificação de informações adicionais, como tendências de afastamento do ajuste, que passariam despercebidas pelos métodos exigidos pelos regulamentos, e assim ajudou a prevenir a produção de unidades não-conformes. Finalmente, foi realizada uma otimização baseada em dados de testes compulsórios, que resultou em melhoria da qualidade sem custos adicionais.

Palavras-chave: Qualidade, Regulamentos, Emissões de exaustão, Motores.

## ABSTRACT

Regulations for engine exhaust emissions control, recently introduced in the USA and Europe, demand engine testing, known as PLT – Production Line Testing. The present work suggests a systematic approach for implementation of such a manufacturer production line testing. The opportunity of integrating complementary methods for quality monitoring and improvement, considering both, regulations and user requirements, was identified. The proposed approach was applied for an engine manufacturer during introduction of a production line, allowing a successful implementation of PLT. The complementary quality monitoring allowed the identification of additional information, such as adjustment offset trends, that would have been unnoticed by only applying the methods as demanded by the regulations, and thus helped to prevent production of non-conforming products. An optimization based on data from compulsory tests was performed, resulting in quality improvements at no additional costs.

Key words: Quality, Regulations, Exhaust Emissions, Engines.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Seção transversal de um motor de dois tempos com ignição por centelha.....	21
Figura 2	Esquema de um carburador operando em aceleração máxima.....	22
Figura 3	Relação entre as variáveis associadas ao funcionamento do motor .....	24
Figura 4	Guias e normas ISO/IEC e ABNT para avaliação da conformidade.....	27
Figura 5	Etapas para implantação de normas da família ISO 9000 .....	47
Figura 6	Processos da abordagem de Juran e suas atividades .....	54
Figura 7	Efeito dos processos da abordagem de Juran sobre os custos da baixa qualidade ....	54
Figura 8	Função perda da qualidade de Taguchi .....	57
Figura 9	Estrutura do sistema da qualidade total proposto por Taguchi.....	57
Figura 10	Função perda por tipo de VR.....	68
Figura 11	Esquema da cabine de ajuste do motor.....	72
Figura 12	Estrutura da situação anterior à sistematização da implantação do PLT.....	73
Figura 13	Mecanismos de avaliação da conformidade presentes nos regulamentos .....	75
Figura 14	Estrutura sugerida para planejamento da implantação do PLT .....	78
Figura 15	Esquema da avaliação de um requisito.....	84
Figura 16	Sistemática proposta para implantação do PLT .....	84
Figura 17	Avaliação do requisito analisador de NO <sub>x</sub> .....	86
Figura 18	Avaliação do requisito gases analíticos.....	88
Figura 19	Avaliação do requisito verificação da eficiência do conversor de NO <sub>2</sub> em NO.....	90
Figura 20	Avaliação do requisito seqüência de teste .....	91
Figura 21	Integração do PLT com a melhoria da qualidade .....	97
Figura 22	Resumo das cartas de controle usadas no PLT .....	122
Figura 23	Matriz da qualidade .....	124
Figura 24	Gráficos das variáveis de resposta em função do fator de controle.....	125
Figura 25	Gráfico da perda em função do fator de controle .....	127
Figura 26	Causas de invalidações de testes nas unidades avaliadas .....	129
Figura 27	Sistema de amostragem de emissões e conjunto analítico .....	142
Figura 28	Sumário da Diretiva 97/68/EC .....	151
Figura 29	Sumário da Diretiva 2002/88/EC .....	152

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Categorias de definição da qualidade e aplicações.....	50
Tabela 2	Dimensões da qualidade e suas definições .....	52
Tabela 3	Modelos de motor com os padrões de emissões aplicáveis.....	71
Tabela 4	Matriz de comparação dos requisitos dos regulamentos .....	81
Tabela 5	Dados e resultados do cálculo dos fatores de importância .....	126
Tabela 6	Expressões e valores para cálculo da perda.....	126
Tabela 7	Resultados da comparação dos dados de testes antes e após a transferência .....	128
Tabela 8	Subpartes do regulamento 40 CFR 90.....	139
Tabela 9	Classificação dos motores por tipo e cilindrada conforme EPA .....	139
Tabela 10	Padrões de emissões para motores EPA Fase 1.....	140
Tabela 11	Padrões de emissões para motores EPA Fase 2 Classe I-A, I-B e I .....	140
Tabela 12	Padrões de emissões para motores EPA Fase 2 Classe II .....	140
Tabela 13	Padrões de emissões para motores EPA Fase 2 das classes portáteis .....	140
Tabela 14	Analisadores específicos para cada componente dos gases de exaustão.....	141
Tabela 15	Requisitos de exatidão e frequência de calibração das medições.....	142
Tabela 16	Especificação dos gases analíticos para operação dos analisadores.....	143
Tabela 17	Exemplos de pontos de calibração para linearização .....	144
Tabela 18	Procedimentos específicos por analisador.....	144
Tabela 19	Relação dos ciclos de teste usados para cada classe de motor .....	145
Tabela 20	Descrição dos ciclos de teste .....	146
Tabela 21	Informação registrada em cada parte do teste .....	146
Tabela 22	Estrutura do regulamento CARB.....	149
Tabela 23	Padrões de emissões CARB para motores de ignição por centelha [g/kWh].....	149
Tabela 24	Classificação dos motores por tipo e cilindrada conforme UE .....	152
Tabela 25	Padrões de emissões para motores UE Estágio I.....	153
Tabela 26	Padrões de emissões para motores UE Estágio II .....	153
Tabela 27	Pesos moleculares dos gases de exaustão.....	155

## LISTA DE SIGLAS

AQL	Acceptable Quality Level (Nível aceitável de qualidade)
CAA	Clean Air Act
CAP	Controle Automático do Processo
CARB	California Air Resources Board
CCR	California Code of Regulations
CEP	Controle Estatístico do Processo
CFR	Code of Federal Regulations
CLD	Chemiluminescence detector
CLP	Controlador Lógico Programável
COP	Conformance of Production
COV	Compostos orgânicos voláteis
CQ	Característica da qualidade
CTQ	Compliance Test Procedure
CUSUM	Soma cumulativa
CVS	Constant volume sampling
DF	Fator de deterioração
EM	Estados Membros
EPA	Environmental Protection Agency
ERP	Enterprise Resource Planning
EUA	Estados Unidos da América
FC	Fator de controle
FE	Fundo de escala

FEL	Family Emission Limit
FID	Flame ionization detector
HC	Hidrocarboneto
IR	Importância relativa
IVND	Infravermelho não dispersivo
MCR	Matriz de comparação dos requisitos
NIST	National Institute of Standards and Technology
PLT	Teste de Linha de Produção (Production Line Testing)
PM	Material particulado (Particulate matter)
PP	Parâmetro do produto/processo
QFD	Desdobramento da função qualidade
SEA	Selective Enforcement Audit
SORE	Small Off-road Engine
TQC	Controle Total da Qualidade (Total Quality Control)
UE	União Européia
VR	Variável de resposta

## SUMÁRIO

1	COMENTÁRIOS INICIAIS .....	14
1.1	INTRODUÇÃO.....	14
1.2	TEMA E OBJETIVOS .....	15
1.3	JUSTIFICATIVA.....	15
1.4	MÉTODO.....	17
1.5	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO .....	18
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE MOTORES DE DOIS TEMPOS .....	20
2.2	AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE.....	24
2.3	REGULAMENTOS DE CONTROLE DE EMISSÕES DE MOTORES .....	28
2.3.1	Estados Unidos da América (EUA).....	28
2.3.2	União Européia (UE).....	43
2.4	IMPLANTAÇÃO E INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE GESTÃO .....	46
2.5	QUALIDADE .....	49
2.5.1	Histórico .....	49
2.5.2	Definição de qualidade .....	50
2.5.3	Dimensões da qualidade .....	51
2.5.4	Abordagem de Juran.....	52
2.5.5	Abordagem de Taguchi .....	55
2.5.6	Cartas de controle .....	59
2.5.7	Método para otimização de produtos e processos.....	65
3	PROPOSTA DE SISTEMÁTICA PARA IMPLANTAÇÃO DO TESTE DE LINHA DE PRODUÇÃO (PLT) INTEGRADO COM A MELHORIA DA QUALIDADE.....	69
3.1	ESTUDO DA SITUAÇÃO ANTERIOR À IMPLANTAÇÃO.....	69
3.1.1	Estudo dos padrões de emissões.....	70
3.1.2	Processo de ajuste do motor .....	71
3.2	ESTUDO DOS REQUISITOS DOS REGULAMENTOS QUANTO AO PLT .....	74
3.3	LEVANTAMENTO DAS AÇÕES NECESSÁRIAS PARA IMPLANTAÇÃO DO PLT .....	82
3.3.1	Equipamentos de teste .....	85
3.3.2	Materiais de referência .....	87
3.3.3	Controle de sistemas de medição.....	89
3.3.4	Procedimento de teste.....	91
3.4	ESTUDO DOS REQUISITOS DO USUÁRIO.....	92
3.5	MELHORIA DA QUALIDADE.....	94
3.5.1	Monitoramento do processo de ajuste do motor e dos resultados de PLT .....	94
3.5.2	Otimização do processo de ajuste do motor .....	96
3.6	GESTÃO DA IMPLANTAÇÃO.....	98
4	IMPLANTAÇÃO DO PLT INTEGRADO COM A MELHORIA DA QUALIDADE .....	101
4.1	IMPLANTAÇÃO DO PLT .....	101

4.1.1 Implantação dos equipamentos de teste.....	101
4.1.2 Aquisição de materiais de referência.....	104
4.1.3 Implantação do controle de sistemas de medição.....	108
4.1.4 Implantação do procedimento de teste.....	111
4.1.5 Treinamento dos responsáveis por processos.....	117
4.2 INTEGRAÇÃO DO PLT COM A MELHORIA DA QUALIDADE.....	118
4.2.1 Implantação de cartas de controle no processo de ajuste do motor.....	118
4.2.2 Implantação de cartas de controle no PLT.....	121
4.2.3 Implantação da otimização do processo de ajuste do motor.....	124
4.3 AVALIAÇÃO DO SISTEMA IMPLANTADO.....	128
5 CONCLUSÃO.....	131
REFERÊNCIAS.....	134
APÊNDICE A: Resumo do Regulamento EPA (40 CFR 90).....	139
APÊNDICE B: Estrutura e padrões de emissões do Regulamento CARB (CCR 13).....	149
APÊNDICE C: Resumo das particularidades das Diretivas 97/68/EC e 2002/88/EC.....	150
APÊNDICE D: Matriz de Comparação dos Requisitos dos Regulamentos.....	156
ANEXO A: Especificações do combustível de teste EPA.....	161
ANEXO B: Exemplo de Plano de Amostragem para Auditoria de Fiscalização Seletiva da EPA.....	162
ANEXO C: Coeficientes para intervalos de confiança de 95% com uma cauda ( $t_{95}$ ).....	163
ANEXO D: Especificações para Gasolina de Certificação para Califórnia.....	164
ANEXO E: Critério de Avaliação da Auditoria de Fiscalização CARB.....	165
ANEXO F: Critério de Avaliação para Inspeção da Conformidade da Produção da UE.....	166
ANEXO G: Especificações para Combustível de Referência para Motores com Ignição por Centelha da Legislação Européia.....	167

# 1 COMENTÁRIOS INICIAIS

## 1.1 INTRODUÇÃO

A competitividade de uma organização depende de fatores internos, como o custo da mão-de-obra, a capacitação tecnológica, a flexibilidade dos meios de produção e a qualificação dos recursos humanos. Além dos fatores internos, existem fatores externos capazes de influenciar a competitividade, como o mercado de atuação, a agressividade dos concorrentes, a macroeconomia, a política tributária, a infra-estrutura e as legislações. Segundo Porter (1999), políticas governamentais podem influenciar a competitividade, algumas vezes de forma indireta, como no caso das barreiras à entrada de produtos, causadas por regulamentos de controle da poluição.

Apesar da realidade da globalização, possibilitada, entre outras coisas, pela redução de barreiras técnicas, o aparecimento de regulamentos ambientais pode criar novos empecilhos ao comércio. Mesmo quando as plantas de uma organização estão instaladas em países com regulamentos ambientais brandos, é preciso considerar que os países de destino dos produtos podem ser rigorosos nestes regulamentos.

Regulamentos de controle da poluição, no entanto, não são apenas barreiras técnicas à entrada de produtos, são também reflexo da conscientização de alguns governos da necessidade de um desenvolvimento sustentável. Não só os governos, mas também os consumidores estão mais preocupados com o impacto que os produtos causam ao meio-ambiente, e assim o desempenho ambiental dos produtos tornou-se um diferencial competitivo (DAVIS et al., 2000).

De acordo com a definição de Campos (1992), um produto de qualidade é aquele que atende as necessidades dos clientes, entre eles usuários e órgãos de regulamentação governamental. Portanto, a sobrevivência da organização depende da consideração das características da qualidade demandada, entre elas o desempenho ambiental e os requisitos dos regulamentos, em todas as fases do ciclo de vida do produto, desde o desenvolvimento, passando

pela fabricação até a utilização e descarte.

## 1.2 TEMA E OBJETIVOS

Este trabalho tem como tema o programa de testes de linha de produção, exigido por regulamentos de emissões de motores pequenos do tipo “fora de estrada”, considerando simultaneamente o monitoramento e melhoria da qualidade quanto a requisitos dos regulamentos e clientes.

O objetivo geral do trabalho é construir uma sistemática para implantar o programa de testes de linha de produção (PLT) de pequenos motores do tipo “fora de estrada”, atendendo aos requisitos dos regulamentos de controle de emissões da EPA – *Environmental Protection Agency*, CARB – *California Air Resources Board* e UE – União Européia e aproveitando seus resultados para monitoramento e melhoria da qualidade.

Os objetivos específicos deste trabalho são: o estudo da situação anterior à implantação; o estudo das exigências dos regulamentos, de forma a facilitar sua posterior implantação; o fornecimento de subsídios à identificação das ações para implantação do PLT; e a proposição de métodos que utilizem os resultados de ensaios obrigatórios para realimentação do processo de ajuste do motor na linha de montagem.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Em busca de um desenvolvimento sustentável, os governos têm criado regulamentos que exigem a realização de ensaios em produtos quanto ao desempenho ambiental. Atualmente, controlam as emissões de gases de motores usados em equipamentos fora de estrada os Estados Unidos, o Canadá e a União Européia. Equipamentos fora de estrada são aqueles usados em jardinagem, agricultura, construção e aeroportos, além de veículos para recreação e lanchas.

Os poluentes controlados para os motores utilizados em equipamentos fora de estrada são os hidrocarbonetos (HC), os óxidos de nitrogênio (NOx), o monóxido de carbono (CO), e em alguns casos o material particulado (PM). As legislações dos países citados anteriormente impõem limites para as quantidades emitidas destes poluentes. Os óxidos de nitrogênio e os

compostos orgânicos voláteis (COV), entre eles os HC, são precursores do ozônio na baixa atmosfera e da chuva ácida. O ozônio, quando respirado, pode desencadear vários problemas de saúde, como dor no tórax, tosse e irritação na garganta, além de agravar bronquites, asma e enfisema. O monóxido de carbono entra na corrente sanguínea através dos pulmões e reduz a entrega de oxigênio aos órgãos e tecidos. A exposição a baixas concentrações de monóxido de carbono é mais grave para indivíduos com doenças cardiovasculares, porém, em altas concentrações prejudica também indivíduos saudáveis. O material particulado está associado à agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares existentes, alteração do sistema de defesa do corpo, danos ao tecido pulmonar, carcinogênese e mortalidade prematura (EPA, 2003a).

De acordo com MDIC (2002), barreiras técnicas ao comércio são discrepâncias entre os requisitos aplicáveis a produtos, de um país para outro, e entre procedimentos para avaliar a conformidade a esses requisitos. As exigências de certificação de produtos de acordo com algum padrão normativo constituem barreiras técnicas ao comércio. A certificação e produção de motores para comercialização em mercados regulamentados, normalmente, exigem a realização de ensaios complexos, com o uso de equipamentos dispendiosos, que podem constituir barreira técnica à exportação. Portanto, a implantação do PLT, exigido por regulamentos, é uma vantagem competitiva que pode abrir as portas de novos mercados.

A satisfação do cliente com um produto está associada à adequação ao uso (JURAN e GRYNA, 1993). Portanto, é importante para a sobrevivência da organização que o sistema implantado, além dos requisitos legais, considere também os requisitos do cliente. Assim, é necessário e oportuno aproveitar processos exigidos pelos regulamentos para avaliar e melhorar a qualidade do produto quanto às demandas do cliente. Além disso, segundo Garvin (2002), uma melhora na conformidade dos produtos está associada à redução dos custos da qualidade e aumento da produtividade.

O grupo da empresa onde o trabalho foi desenvolvido estava transferindo a produção de alguns modelos de motores de uma unidade no exterior para a unidade brasileira. A implantação do programa de testes de linha de produção, exigido pelos regulamentos, permitiu à unidade brasileira ter total responsabilidade sobre a produção, evitar o envio de motores para realização de ensaios no exterior e assim reduzir a necessidade de estoque e o tempo de reação em caso de problemas de conformidade.

## 1.4 MÉTODO

Esta dissertação foi baseada numa pesquisa-ação realizada em uma empresa fabricante de motores. Esta pesquisa ocorreu durante a transferência da produção de uma linha de produtos de uma unidade fabril no exterior para uma unidade brasileira. Estes produtos destinam-se principalmente a mercados com regulamentos de controle de emissões, que exigem a realização de ensaios para avaliação da conformidade da produção.

O trabalho iniciou com uma breve revisão do princípio de funcionamento do tipo de motor abordado e do fenômeno da combustão, a fim de auxiliar a compreensão dos processos envolvidos no trabalho. Foram estudados os conceitos associados à atividade de avaliação da conformidade, para permitir a identificação dos seus mecanismos exigidos pelos regulamentos em questão. Os órgãos de regulamentação abordados neste trabalho foram apresentados e os requisitos associados ao programa de testes de linha de produção foram levantados através da consulta aos textos dos respectivos regulamentos de controle de emissões.

Uma revisão da literatura em busca de casos de implantação e integração de normas permitiu conhecer abordagens que podem ser aplicadas para implantar o programa de PLT. A literatura sobre a história, os conceitos e algumas abordagens da qualidade foi revisada, o que permitiu delimitar a abrangência deste trabalho dentro do tema qualidade. Por fim, foram revisados métodos e técnicas da qualidade que podem complementar o PLT.

A pesquisa-ação iniciou com o estudo dos processos já existentes na empresa e que precisavam ser considerados para implantação do PLT. O próximo passo foi o estudo dos requisitos dos regulamentos, com o objetivo de organizá-los de uma forma que favorecesse sua implantação. As exigências dos três regulamentos foram comparadas para identificação do caso mais exigente para cada requisito e eventuais incompatibilidades. Isto permitiu que os procedimentos elaborados atendessem todos os regulamentos de controle de emissões simultaneamente.

Cada requisito dos regulamentos pode ser desdobrado em ações a partir da avaliação da relação com outros requisitos e com a situação existente. O estudo dos requisitos do usuário foi realizado em reuniões da equipe de trabalho. O objetivo foi identificar as relações entre

características importantes para o cliente e o desempenho em emissões, para que estas relações fossem consideradas nos processos propostos.

Com base no conhecimento obtido na revisão da literatura foi realizado um estudo para integrar técnicas e métodos da qualidade com o PLT, aproveitando os processos obrigatórios para promover melhoria da qualidade, sem gerar conflitos com as exigências dos regulamentos.

Definidas as ações a serem executadas, passou-se ao planejamento da implantação, com a elaboração de cronograma e atribuição de responsáveis pela implantação. As ferramentas usadas no planejamento e controle da implantação foram definidas com base no processo de gestão de projetos da empresa e na experiência da equipe de trabalho.

Finalmente ocorreu a execução das ações conforme definido no planejamento, levando em consideração as particularidades dos processos da empresa, dos sistemas de medição e das relações com fornecedores. O sistema implantado foi avaliado comparando-se os resultados dos ensaios da unidade estrangeira com os resultados da unidade brasileira.

## 1.5 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Os órgãos de regulamentação citados na seção 1.2 cobrem diversos tipos e aplicações de motores, porém este trabalho abordou a parte que cobre o controle de emissões de motores de ignição por centelha com aplicação fora de estrada com potência abaixo de 19 kW.

A sistemática desenvolvida é aplicável a motores de quatro ou de dois tempos, com ignição por centelha ou por compressão, desde que as particularidades descritas nos regulamentos quanto aos tipos de motor sejam observadas. A pesquisa-ação foi realizada durante a implantação da linha de montagem de um motor de dois tempos com ignição por centelha, portanto os exemplos apresentados ao longo do trabalho levaram em conta as particularidades deste tipo de motor.

Este trabalho se ocupou com as seções dos regulamentos que tratam do programa de testes de linha de produção do fabricante, das seções relacionadas com sua implantação e das seções que estabelecem os padrões de emissões. Há outros aspectos tratados pelos regulamentos

que não foram abordados por fugirem ao escopo do trabalho.

Este trabalho abordou a fase de produção dos motores e não contemplou modificações no projeto do produto. Foram alvos de estudo as características relacionadas a emissões e ao desempenho funcional do motor. Características ligadas ao conjunto acionado pelo motor não foram consideradas.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. No primeiro capítulo, são apresentados o tema, os objetivos, a justificativa, o método utilizado para realização do trabalho e sua delimitação. O capítulo 2 traz uma revisão da literatura, abordando os assuntos necessários para compreensão dos processos envolvidos, além de apresentar os regulamentos pertinentes e seus requisitos relevantes para este trabalho. Esse capítulo trata ainda de fazer um levantamento dos métodos utilizados na implantação de normas e revisa o tema qualidade.

O capítulo 3 inicia com o estudo da situação anterior à implantação. Na seqüência, os requisitos dos regulamentos, levantados no capítulo anterior, são organizados de forma a compará-los, possibilitando a identificação do caso mais exigente para cada item. Os requisitos dos regulamentos foram desdobrados em ações para sua implantação. Este capítulo traz ainda o estudo dos requisitos do usuário e a aplicação do conhecimento levantado no referencial teórico sobre qualidade, com o objetivo de complementar o PLT. Por fim, são apresentadas ferramentas e recomendações para gestão da implantação.

No capítulo 4, é relatada a implantação do PLT e dos processos complementares, descrevendo os detalhes observados na elaboração dos procedimentos, o treinamento do pessoal responsável por estas atividades, a aplicação de ferramentas, as dificuldades encontradas e suas soluções. Os resultados obtidos foram avaliados, comparando dados da unidade anterior à transferência com a unidade da pesquisa-ação. O capítulo 5 é o fechamento do trabalho, apresentando as conclusões e sugestões para sua continuidade.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo inicia com uma breve revisão do princípio de funcionamento de motores de dois tempos com ignição por centelha e do fenômeno da combustão, com o objetivo de facilitar o entendimento do mecanismo de formação das emissões gasosas controladas por regulamentos. Em seguida são apresentados alguns conceitos associados à atividade de avaliação da conformidade, necessários para localizar e classificar as exigências dos regulamentos. Na seqüência são apresentados os regulamentos de controle de emissões de motores aplicáveis ao produto abordado neste trabalho.

A literatura foi revisada em busca de abordagens de implantação e integração de sistemas de gestão, como as normas ISO, cujos métodos pudessem auxiliar a implantação do PLT. Fecha o capítulo uma revisão da evolução do conceito de qualidade. O conhecimento desta evolução foi importante para a compreensão da situação atual do tema. Algumas abordagens, métodos e técnicas selecionadas foram estudados em maior profundidade, dada a relevância para este trabalho.

### 2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE MOTORES DE DOIS TEMPOS

A fim de facilitar a compreensão do processo de formação das emissões gasosas em motores e de conceitos associados a motores de combustão abordados neste trabalho, foi realizada uma revisão teórica do princípio de funcionamento de motores de dois tempos. A seguir são descritos os ciclos de operação, mostrando os principais componentes do motor com suas funções e parâmetros. Mais adiante é explicada a influência destes parâmetros na combustão e na formação dos gases de exaustão.

Os dois ciclos do princípio de funcionamento dos motores de dois tempos são os seguintes: a) Ciclo de aspiração, compressão e ignição; e b) Ciclo de trabalho, pré-compressão e exaustão. No primeiro ciclo, mostrado na Figura 1(a), a pressão na **carcaça do virabrequim** (5) diminui devido ao aumento de volume causado pelo movimento ascendente do **pistão** (2). O

pistão tem a função de controlar os tempos de abertura e fechamento da **janela de admissão** (4), **janela de exaustão** (3) e **canais de transferência** (7). Quando a **janela de admissão** (4) é aberta, mistura fresca, representada na figura pelas setas amarelas, é aspirada para dentro da **carcaça do virabrequim** (5). Em seu movimento ascendente, o **pistão** (2) fecha a **janela de exaustão** (3) e **canais de transferência** (7), e comprime a mistura ar-combustível na **câmara de combustão** (1). Pouco antes de o **pistão** (2) atingir o ponto morto superior, a mistura comprimida na câmara de combustão é incendiada por uma centelha gerada pela **vela de ignição** (8). A energia liberada na forma de calor durante a combustão provoca a expansão dos gases, fazendo a pressão na **câmara de combustão** (1) elevar-se rapidamente e empurrando o **pistão** (2) para baixo (EMPRESA, 2002).

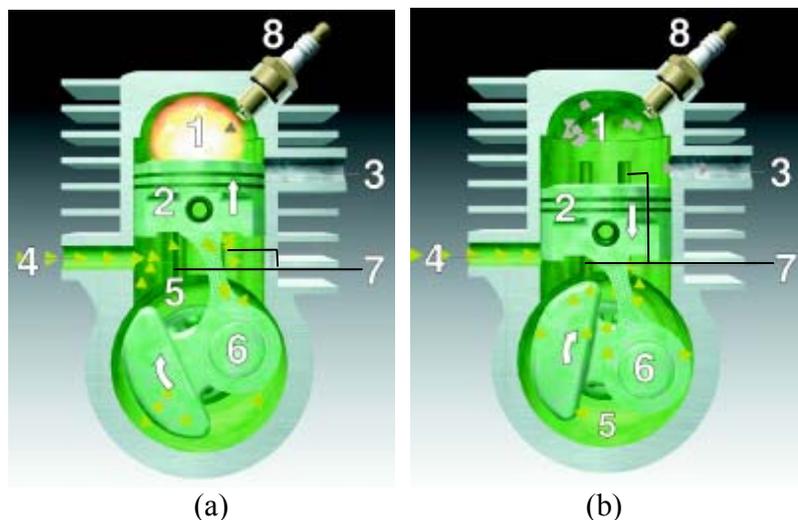


Figura 1 Seção transversal de um motor de dois tempos com ignição por centelha.

(a) Ciclo de aspiração, compressão e ignição. (b) Ciclo de trabalho, pré-compressão e exaustão.

Legenda: 1) Câmara de combustão; 2) Pistão; 3) Janela de exaustão; 4) Janela de admissão; 5) Carcaça do virabrequim; 6) Virabrequim; 7) Canais de transferência; 8) Vela de ignição.

Fonte: Empresa (2002)

No segundo ciclo, mostrado na Figura 1B, o movimento descendente do pistão transfere trabalho ao **virabrequim** (6) e pré-comprime a mistura na carcaça do virabrequim (5). Quando a janela de exaustão (3) e os canais de transferência (7) são abertos, os produtos da combustão, representados na figura pelas setas cinzas, fluem para fora da câmara de combustão (1) através da janela de exaustão (3). A mistura fresca pré-comprimida na carcaça do virabrequim (5) escoo para a câmara de combustão (1) através dos canais de transferência (7) e empurra os produtos da combustão restantes para fora, através da janela de exaustão (3). Este processo é chamado de

lavagem da câmara de combustão. Neste processo, uma parte da mistura fresca que entra na câmara de combustão pode ser perdida através da janela de exaustão. Esta perda é chamada de perda por lavagem e é inerente ao conceito de motor de dois tempos. Outra característica peculiar dos motores de dois tempos é a adição de óleo ao combustível. A mistura ar-combustível-óleo escoa constantemente entre as peças com movimento relativo, como pistão, cilindro e virabrequim, garantindo a lubrificação necessária (EMPRESA, 2002).

A mistura ar-combustível que alimenta o motor é formada no carburador, mostrado na Figura 2. Para um motor operando em regime de carga, a vazão de ar aspirado e, conseqüentemente, a pressão no venturi do carburador, são dependentes da rotação. A vazão de combustível depende da pressão no venturi e da perda de carga no sistema de combustível, que pode ser controlada através do parafuso de regulagem principal, como pode ser visto na Figura 2. A uma rotação constante, a razão ar-combustível na mistura é função da vazão de combustível (EMPRESA, 1999).

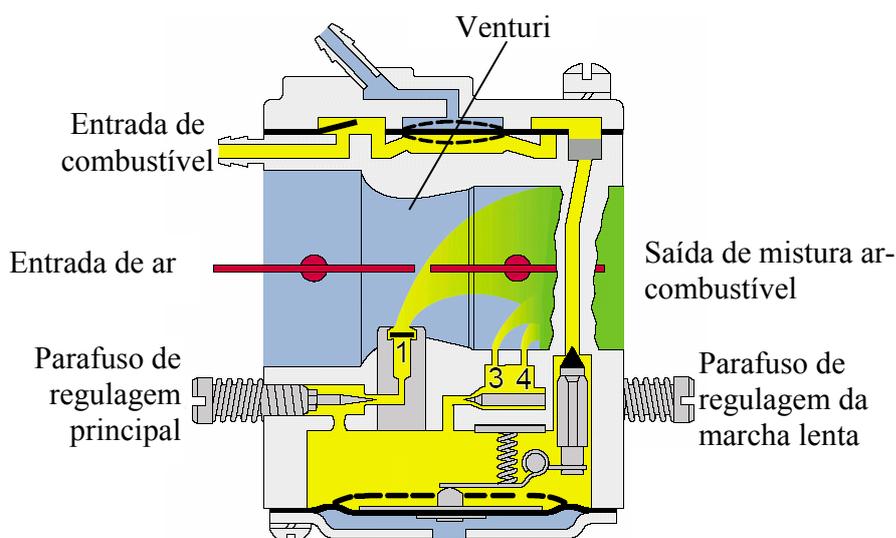


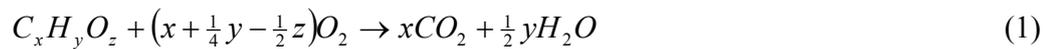
Figura 2 Esquema de um carburador operando em aceleração máxima

Legenda: 1) Injetor principal; 3) Injetor de lenta secundário; 4) Injetor de lenta primário.

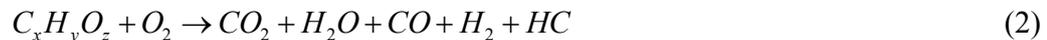
Fonte: Empresa (1999)

A natureza e a quantidade dos gases presentes na exaustão do motor, que são objeto central deste estudo, dependem da razão entre as quantidades de oxigênio e combustível na mistura, medida pela variável  $\lambda$ . Esta variável é definida como a razão entre a massa de oxigênio presente na mistura e a massa de oxigênio necessária para combustão completa do combustível

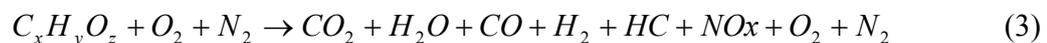
presente na mistura. Quando a razão entre as massas de combustível e oxigênio na mistura é estequiométrica ( $\lambda=1$ ), todo o combustível será consumido durante a combustão e os produtos da reação química são dióxido de carbono e água, como pode ser visto na Equação 1 para um combustível hipotético (BOSCH, 1976).



Quando a quantidade de oxigênio presente na mistura é menor que a mínima necessária para combustão completa ( $\lambda < 1$ ), ou seja, quando há excesso de combustível, haverá formação de monóxido de carbono e hidrogênio, além de dióxido de carbono e água, como pode ser visto na equação química não balanceada da combustão incompleta, mostrada na Equação 2. Quanto maior a proporção de combustível na mistura, maior a concentração de CO nas emissões, até atingir-se um limite a partir do qual a combustão se torna impossível. Portanto, existe correlação entre a concentração de CO nas emissões e a razão ar-combustível, justificando o uso da concentração de CO como parâmetro para ajuste da mistura. Em motores de dois tempos, o HC presente nas emissões é proveniente, principalmente, das perdas por lavagem. Da mesma forma que a concentração de CO, a concentração de HC aumenta com a razão de combustível na mistura (PISCHINGER, 2000).



No ar misturado ao combustível, além do oxigênio, necessário para combustão, há nitrogênio. Em altas temperaturas o nitrogênio reage com o oxigênio, formando óxidos de nitrogênio (NOx). Assim, a equação química não balanceada da combustão, com os reagentes e produtos, considerando a presença do nitrogênio pode ser vista na Equação 3 (OLIVEIRA, 2002).



Considerando um volume fixo, como o volume do cilindro do motor no momento em que a janela de exaustão é fechada, quanto maior a proporção de combustível na mistura, menor a quantidade de oxigênio, o que equivale a um menor número de moléculas de oxigênio disponíveis para combustão. Se um menor número de moléculas de oxigênio reage com combustível, a quantidade total de energia liberada é menor, resultando em menor pressão média

efetiva sobre o pistão, que significa menor potência do motor, temperatura do cilindro mais baixa e menor formação de NOx.

A relação entre as variáveis está resumida na Figura 3. Desta figura fica claro que, para uma rotação constante, há uma relação direta entre a posição do parafuso de regulagem principal, o consumo de combustível e o resultado de emissões.

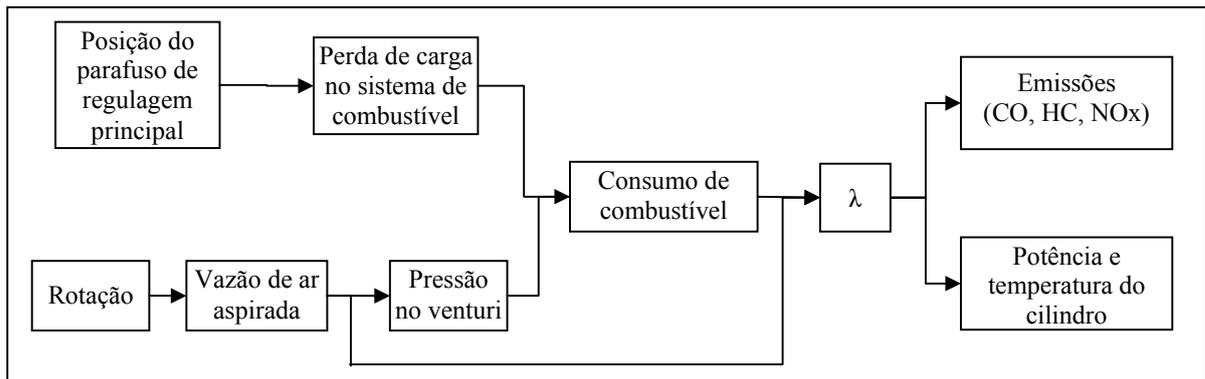


Figura 3 Relação entre as variáveis associadas ao funcionamento do motor

## 2.2 AVALIAÇÃO DA CONFORMIDADE

A avaliação da conformidade compulsória é uma ferramenta utilizada por regulamentos governamentais para proteger a saúde e a segurança do consumidor e o meio ambiente (INMETRO, 2007). O objetivo desta seção é introduzir os conceitos e definições necessários para facilitar a compreensão e localizar as atividades de avaliação da conformidade exigidas pelos regulamentos de controle de emissões de motores, apresentadas na seção 2.3.

Os conceitos, definições, vocabulário e princípios gerais da atividade de avaliação da conformidade são apresentados na Norma ABNT NBR ISO/IEC 17000. “Segundo esta norma, a Avaliação da Conformidade é a ‘demonstração de que requisitos especificados relativos a um produto, processo, sistema, pessoa ou organismo são atendidos’” (INMETRO, 2007, p. 8).

Um programa de avaliação da conformidade pode ser dividido em dois momentos. Primeiramente ocorre uma avaliação da conformidade do objeto. Esta deve ser seguida por atividades de acompanhamento, que garantam a conformidade do produto colocado no mercado (INMETRO, 2007).

O Inmetro (2007) apresenta uma classificação da atividade de avaliação de conformidade. Quanto à aplicação, a avaliação da conformidade pode ser voluntária ou compulsória. Ela é voluntária quando parte do fabricante, com o objetivo de obter vantagem competitiva. A avaliação é compulsória quando exigida por lei ou regulamento, no caso do produto oferecer riscos à segurança do consumidor ou ao meio ambiente. Quanto ao agente econômico a atividade de Avaliação da Conformidade pode ser de três tipos:

- a) por Primeira Parte: realizada por pessoa ou organização que fornece o produto;
- b) por Segunda Parte: realizada por pessoa ou organização com interesse de usuário do produto;
- c) por Terceira Parte: realizada por organização independente em relação ao fornecedor e ao cliente.

Os principais mecanismos utilizados para realizar avaliação da conformidade são apresentados a seguir:

- a) Certificação: é uma atestação relativa a produtos, processos, serviços, pessoas, organizações ou sistemas de gestão, realizada por terceira parte. A certificação de produtos, processos ou serviços pode ser classificada da seguinte forma,
  - Modelo 1: ensaios realizados somente uma vez, chamada de Ensaio de Tipo;
  - Modelo 2: Ensaio de Tipo seguido de Ensaio em Amostras retiradas no comércio;
  - Modelo 3: Ensaio de Tipo seguido de Ensaio em Amostras retiradas no fabricante;
  - Modelo 4: Ensaio de Tipo seguido de Ensaio em Amostras retiradas no comércio e no fabricante;
  - Modelo 5: Ensaio de Tipo, Avaliação e Aprovação do Sistema de Gestão da Qualidade do fabricante, auditorias no fabricante e Ensaio em Amostras retiradas no comércio e no fabricante;
  - Modelo 6: Avaliação e aprovação do Sistema de Gestão da Qualidade do fabricante;

- Modelo 7: Ensaio de Lote;
- Modelo 8: Ensaio 100%;
- b) Declaração da conformidade pelo fornecedor: é uma atestação por primeira parte, na qual o fabricante garante que um produto ou processo está em conformidade com requisitos especificados;
- c) Inspeção: é uma avaliação por observação e julgamento, acompanhada por ensaios quando apropriado;
- d) Etiquetagem: neste mecanismo uma característica do produto é determinada através de ensaios e informada ao consumidor, sendo utilizada para conscientização dos mesmos;
- e) Ensaio: equivale à determinação de uma ou mais características de uma amostra de acordo com procedimento especificado. Normalmente está associado à certificação e inspeção.

Este trabalho trata principalmente da certificação de produto, cujos fundamentos são apresentados no ISO/IEC Guia 67 (Conformity assessment – Fundamentals of product certification). Segundo ABNT (2005), a certificação de produto é composta pelo menos dos seguintes elementos:

- a) Seleção (amostragem): definição das características a serem avaliadas e requisitos para avaliação e amostragem;
- b) Determinação: pode incluir ensaio, medição, inspeção, avaliação de projeto, avaliação de serviço e auditoria para verificar se o produto satisfaz os requisitos especificados. No caso de determinação de características pode-se combinar medição e comparação do valor medido com o requerido;
- c) Análise crítica e atestação: análise e documentação das evidências quantitativa e qualitativa. Se as evidências são julgadas adequadas, emite-se um certificado.

Pode haver ainda outros elementos, como avaliação do processo de produção e amostragem do mercado. O ISO/IEC Guia 67 apresenta uma tabela com os diferentes tipos de sistema de certificação de produto e seus respectivos elementos. Entre os elementos adicionais constantes desta tabela está a Supervisão, que pode ser realizada através dos seguintes mecanismos:

- a) ensaio ou inspeção de amostras do mercado;
- b) ensaio ou inspeção de amostras de fábrica;
- c) auditorias de sistema da qualidade combinadas com ensaios ou inspeções aleatórias;
- d) avaliação do processo de produção ou serviço.

Na seção 3.2 são apresentados os mecanismos de supervisão da certificação do produto utilizados pelos regulamentos EPA, CARB e UE.

Para maiores detalhes sobre a atividade de avaliação da conformidade, Pizzolato (2006) apresenta diversas Normas e Guias elaborados por organismos internacionais que definem os seus requisitos. Estes documentos estão listados na Figura 4.

<b>Número Guia/Norma</b>	<b>Data versão ISO</b>	<b>Data versão ABNT</b>	<b>Uso</b>
28	2004	2005	Certificação de produto
53	2005	2006	Certificação de produto
60	2004	2005	Todas as avaliações da conformidade
62	1996	2000	Certificação de sistemas de gestão da qualidade
65	1996	1997	Certificação de produto
66	1999	2001	Certificação de sistemas de gestão ambiental
67	2004	2005	Certificação de produto
17000	2004	2006	Todas as avaliações da conformidade
17011	2004	2005	Acreditação de organismos que acreditam organismos de avaliação da conformidade
17020	1998	2005	Organismos que executam inspeção
17024	2003	2004	Certificação de pessoal
17025	2005	2005	Ensaio
17050	2004	2005	Declaração da conformidade pelo fornecedor

Figura 4 Guias e normas ISO/IEC e ABNT para avaliação da conformidade

Fonte: Pizzolato (2006)

O objetivo da avaliação da conformidade é garantir que os requisitos mínimos estabelecidos em uma norma ou regulamento sejam atendidos, porém isto não garante completamente a qualidade do produto, que é responsabilidade do fabricante (INMETRO, 2007).

Para esta finalidade foram estudados abordagens e métodos específicos, apresentados na seção 2.5.

## 2.3 REGULAMENTOS DE CONTROLE DE EMISSÕES DE MOTORES

A empresa onde foi realizada a pesquisa-ação atua em nível global e precisa considerar regulamentos específicos em diversos mercados, como é o caso dos regulamentos de controle de emissões de motores nos Estados Unidos da América e na União Européia, que abrangem também pequenos motores fora de estrada, enquanto no resto do mundo estes produtos estão livres deste tipo de exigência.

As próximas seções apresentam a história e os conceitos do controle de emissões nos países de interesse, explicando sua origem e como as fontes controladas evoluíram, até chegar ao controle de equipamentos fora de estrada. Este conhecimento facilita o entendimento das estruturas e particularidades dos regulamentos. Os regulamentos são apresentados com seus requisitos quanto à realização de testes durante a fase de produção dos motores.

### 2.3.1 ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA (EUA)

#### 2.3.1.1 Clean Air Act (CAA)

Nos EUA, grupos de interesse público, privado ou agências governamentais podem notificar o congresso quanto a questões ambientais não regulamentadas. O congresso pode, então, decidir criar uma comissão para juntar fatos sobre o problema e escrever um projeto de lei. Se o texto for aprovado no congresso e assinado pelo presidente, ele se torna uma lei. Porém, a maioria das leis não é detalhada o suficiente para ser colocada em prática. Neste caso, agências de regulamentação, autorizadas pelo congresso, descrevem os detalhes técnicos, operacionais e legais baseadas no seu conhecimento técnico e político (EPA, 2003b).

No final da década de 1940, incidentes de poluição aguda do ar, que levaram à morte de dezenas de pessoas nas cidades de Los Angeles (Califórnia) e Donora (Pensilvânia), fizeram aumentar a consciência e a preocupação do público sobre a questão da poluição do ar. Após vários governos estaduais e municipais criarem legislações sobre poluição do ar, o governo

federal dos EUA decidiu que este tema deveria ser tratado em nível nacional, e assim, em 1955, foi aprovado o *Air Pollution Control Act* (Lei de Controle da Poluição do Ar). O texto identificou a poluição do ar como um problema nacional e anunciou investimento em pesquisas para melhorar a situação da poluição atmosférica. Em 1963, foi aprovado o *Clean Air Act* (CAA), que instituiu limites às fontes estacionárias de emissões, como usinas de energia e siderúrgicas, mas não limitou as emissões de fontes móveis, que eram as maiores responsáveis por vários poluentes nocivos. O CAA foi alterado em 1965, para limitar também as emissões produzidas por automóveis (AMS, 1999; FOUNDATION FOR CLEAN AIR PROGRESS, [2002-2005]).

Em 1970, o CAA passou por uma revisão profunda, fixando limites mais rigorosos para emissões de fontes estacionárias e móveis, que deveriam ser inspecionados pelos governos federal e estadual. Com esta revisão, houve uma mudança na política de controle da poluição do ar, que deixou de ser de aconselhamento e passou a ser de fiscalização. Esta lei também deu a qualquer cidadão o direito de tomar medidas legais contra qualquer pessoa ou organização que violasse os limites de emissões, incluindo o governo. O texto de 1970 estabeleceu seis poluentes a serem controlados: material particulado (PM), dióxido de enxofre, monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx), ozônio e chumbo (AMS, 1999; FOUNDATION FOR CLEAN AIR PROGRESS, [2002-2005]).

Com o aumento da preocupação com o meio-ambiente, o CAA foi novamente revisado em 1990. Este texto identificou 5 áreas principais de atuação: padrões de qualidade do ar, emissões de veículos e combustíveis alternativos, poluentes tóxicos do ar, chuva ácida e destruição do ozônio estratosférico. Esta lei tornou os regulamentos existentes ainda mais rigorosos. O *Clean Air Act* de 1990 instituiu programas para reduzir a poluição da maneira mais eficiente e menos onerosa possível, através de abordagens baseadas no mercado, permitindo que organizações negociassem créditos. Organizações ganhariam créditos quando emitissem menos que o permitido e poderiam vendê-los para organizações que emitissem acima dos limites, de forma que o balanço final de emissões atendesse os padrões estabelecidos. Esta revisão da lei permitiu que fontes de emissões móveis não veiculares, como equipamentos usados em construção e jardinagem, pudessem ser regulamentadas, caso estudos mostrassem que este controle ajudaria a diminuir a poluição (AMS, 1999; FOUNDATION FOR CLEAN AIR PROGRESS, [2002-2005]).

Um dos programas do CAA de 1990 tem como objetivo reduzir o ozônio no nível do solo, que é produto de reações químicas entre NO<sub>x</sub> e compostos orgânicos voláteis (COV), como os HC, na presença de luz solar. O ozônio no nível do solo é o principal componente da poluição urbana do ar, e é formado a partir da combinação de poluentes de diversas fontes, como chaminés, solventes e motores de automóveis e equipamentos. Os poluentes que formam o ozônio podem ser levados para longe de suas fontes pelo vento, enquanto reagem através da ação da radiação solar e do calor, e assim atingem áreas distantes dos locais onde foram gerados. O clima e a geografia determinam a intensidade e o local do problema de poluição. Quando há inversão térmica e os ventos estão calmos, a situação é a pior possível, pois o ozônio se forma próximo da fonte dos poluentes e não pode se dissipar, enquanto mais poluentes são emitidos no mesmo local (EPA, 2007; EPA, 2003a).

Apesar de o CAA ser uma lei federal, que cobre todos os EUA, os governos estaduais podem criar agências para garantir seu cumprimento. A lei permite inclusive que os estados tenham limites de controle da poluição mais rigorosos do que os definidos para o país inteiro (EPA, 2007).

### **2.3.1.2 Environmental Protection Agency (EPA)**

Até 1970, a agência de regulamentação para controle da poluição do ar nos EUA era o Departamento de Saúde, Educação e Bem-Estar. O aumento da consciência ambiental nos Estados Unidos culminou com a reorganização das agências federais de controle ambiental, que levou à criação da *Environmental Protection Agency* (EPA) em dezembro de 1970. Seu objetivo inicial foi consolidar, numa única agência, as iniciativas de pesquisa, monitoramento, definição de padrões e fiscalização da poluição do ar, água e solo. Esta reorganização permitiria que problemas ambientais fossem resolvidos de maneira mais eficiente, avaliando o impacto da poluição no ambiente como um todo. A unificação da autoridade de controle da poluição garantiria que não fossem criados novos problemas ambientais a partir do controle dos problemas existentes (AMS, 1999; NIXON, 1970; FOUNDATION FOR CLEAN AIR PROGRESS, [2002-2005]).

O CAA é a lei que dá autoridade à EPA para escrever regulamentos sobre emissões.

Quando a agência decide que um regulamento pode ser necessário, o assunto é pesquisado e, se confirmado, uma proposta de regulamento é escrita. A proposta é listada no registro federal para considerações do público, e editada após as revisões pertinentes. Uma vez que o regulamento foi concluído e publicado no registro federal, ele é codificado no *Code of Federal Regulations* (CFR). O CFR é o registro oficial de todos os regulamentos criados pelo governo federal norte-americano e é dividido em 50 títulos, um para cada área particular. Todos os regulamentos ambientais estão no título 40 (EPA, 2003).

A EPA publicou no *Federal Register*, no dia 3 de julho de 1995, o regulamento que passou a controlar as emissões de motores fora de estrada com ignição por centelha abaixo de 19 kilowatts. Este regulamento encontra-se no CFR Título 40, dentro do Capítulo I, que é destinado à EPA, no Sub-capítulo C, que trata de programas do ar, sob a Parte 90, e é conhecido como 40 CFR 90 (ESTADOS UNIDOS, 1995).

Estudos realizados pela EPA mostraram que motores fora de estrada contribuíam, em média, com 10% dos COV durante o verão, nas áreas que estavam excedendo os limites de poluição por ozônio, e que os motores abaixo de 19kW eram a fonte de metade destas emissões fora de estrada. Em áreas que estavam excedendo os limites de poluição por CO, os equipamentos fora de estrada eram responsáveis por 9% das emissões de CO no inverno, enquanto os motores abaixo de 19kW respondiam por 56% destas emissões. Após discussões com a indústria e outras partes interessadas, decidiu-se por uma implementação de padrões em duas fases (ESTADOS UNIDOS, 1995).

A primeira fase da EPA seria similar ao regulamento da *California Air Resources Board* (CARB) para motores de equipamentos utilitários e de jardinagem, em vigor a partir de 1995, com modificações para atender os requisitos do CAA. O regulamento CARB é apresentado mais adiante. A segunda fase poderia incluir pontos como vida útil, emissões evaporativas, emissões de reabastecimento e programas de incentivo baseados no mercado. A expectativa era reduzir em 32% as emissões de hidrocarbonetos e em 7% as emissões de monóxido de carbono destes motores no ano de 2020 (ESTADOS UNIDOS, 1995).

Após sua publicação em 1995, o texto do regulamento 40 CFR 90 foi modificado em 1999 para estabelecer os padrões para a Fase 2 de equipamentos não portáteis e em 2000 para

fixar os padrões para a Fase 2 de equipamentos portáteis (ESTADOS UNIDOS, 1999; ESTADOS UNIDOS, 2000).

Os próximos parágrafos e seções trazem as definições e requisitos estabelecidos para os motores fora de estrada de ignição por centelha abaixo de 19 kW e têm como fonte o texto atual do regulamento 40 CFR 90, alterado pela última vez em 2005.

Os motores fora de estrada, aos quais se aplica o regulamento, são definidos como qualquer motor de combustão interna que: a) é montado em equipamento autopropelido ou serve a um propósito duplo, propelindo a si próprio e realizando outra função (como tratores de jardim, guindastes fora de estrada); ou b) é montado num equipamento que precisa ser propelido enquanto realiza sua função (como cortadores de grama); ou c) é montado num equipamento portátil ou transportável, significando que foi projetado para ser carregado ou movimentado de um lugar a outro (ESTADOS UNIDOS, 2005).

Para fins de aplicação do regulamento, diferentes modelos de motores fabricados por uma empresa podem ser agrupados em famílias de motor. Podem pertencer a uma mesma família de motor os modelos que forem idênticos em relação aos aspectos relevantes para emissões (ESTADOS UNIDOS, 2005).

O texto atual do regulamento, referente ao ano de 2005, é apresentado em subpartes, mostradas no Apêndice A. As próximas seções trazem os conceitos e requisitos associados às subpartes relevantes para este trabalho. A conformidade dos motores em relação ao regulamento depende do atendimento destes requisitos.

#### ***2.3.1.2.1 Padrões de Emissões, Certificação e Programa de Créditos (Subpartes B e C)***

Os padrões de emissão são valores de emissão específica, em g/kWh, que não devem ser excedidos para um determinado poluente ou combinação de poluentes presentes nos gases de exaustão, como por exemplo, HC+NO<sub>x</sub> e CO. Estes valores limite são diferentes de acordo com a cilindrada, a aplicação e o ano de produção. Os padrões definidos pela EPA são apresentados no Apêndice A.

Antes de introduzir uma família de motor para comercialização no mercado americano, é

obrigatório obter junto à EPA um certificado de conformidade, que só é emitido caso os padrões de emissões e demais requisitos do regulamento e do CAA sejam atendidos. Este processo é chamado de certificação. Para fins de certificação, o fabricante deve realizar medições de emissões em motores de teste, conforme procedimento na subparte E, e enviar os resultados juntamente com informações do projeto do motor a EPA. Eventualmente, a EPA poderá inspecionar motores e solicitar que parâmetros ajustáveis assumam qualquer valor dentro da faixa de ajuste.

Para famílias de motores participantes do programa de créditos, apresentado a seguir, devem ser declarados o *Family Emission Limit* (FEL) para HC+NO<sub>x</sub> e a vida útil do motor. O FEL é o nível de emissões usado para o programa de créditos e substitui o padrão de emissões para fins de certificação, auditoria de fiscalização seletiva e teste de linha de produção (PLT). A auditoria de fiscalização seletiva e o PLT são apresentados nas seções 2.3.1.2.5 e 2.3.1.2.6.

Para efeito de certificação, uma família de motor é considerada conforme quando os valores de emissões de todos os motores de teste que representam esta família não excederem cada padrão ou FEL, se aplicável. Para fins de certificação, PLT e auditoria de fiscalização seletiva, o resultado de emissões de famílias de motores sujeitas a padrões da EPA Fase 2 deve considerar um fator de deterioração (DF). O fator de deterioração corrige o valor de emissões levando em consideração o desgaste do motor e de componentes de controle de emissões. De acordo com a tecnologia do motor, do volume de produção do fabricante e do modelo de motor, o valor do DF pode ser calculado durante o processo de certificação ou tabelado pelo regulamento.

Na subparte C do regulamento estão as diretrizes para o programa de créditos de emissões, que é voluntário, e se aplica somente a emissões de HC+NO<sub>x</sub> de motores Fase 2. Os créditos são calculados para cada família de motor, a partir da diferença entre FEL e o padrão de HC+NO<sub>x</sub>.

Os procedimentos e equipamentos que devem ser usados na medição das emissões de motores, para determinar se os padrões de emissões estão sendo atendidos e garantir que os resultados das medições sejam confiáveis, são apresentados nas próximas seções.

### ***2.3.1.2.2 Equipamentos para teste de emissões (Subparte D)***

A subparte D do regulamento especifica os equipamentos a serem usados nos testes de emissões para fins de certificação, PLT e auditoria de fiscalização seletiva. Nestes testes, o motor é operado em um ciclo, determinado de acordo com suas características, enquanto os gases de exaustão, puros ou diluídos, são coletados. Estes gases são analisados quanto às concentrações de poluentes específicos, que são convertidas em taxas de emissão em massa, em gramas por hora.

O regulamento define os métodos permitidos para coleta de emissões e fixa particularidades dos sistemas de medição, como o princípio de medição dos analisadores de gases para cada poluente, temperaturas em determinados pontos da linha de transporte dos gases de exaustão e a presença de determinados componentes. Além disso, o regulamento especifica a exatidão exigida de todos os sistemas de medição e suas frequências de calibração. Para os analisadores de gases, há ainda requisitos de repetitividade, estabilidade e uso da faixa de medição.

Os materiais de referência, como padrões de calibração dos sistemas de medição e o combustível usado para operar o motor durante o teste, são especificados no regulamento. Para operação e calibração dos analisadores de gases são necessários gases analíticos, com especificações quanto à rastreabilidade, método de obtenção e contaminação permitida.

Para operar o motor de acordo com o ciclo de teste exigido pelo regulamento, é necessário um dinamômetro, capaz de controlar a rotação do motor. Ao mesmo tempo, o dinamômetro realiza a medição de torque e rotação, e deve atender aos requisitos de exatidão especificados. O dinamômetro deve permitir que o motor seja instalado na posição normal de utilização, para evitar que o combustível se distribua de forma diferente da aplicação normal.

As condições ambientais da sala de teste, como temperatura, pressão e umidade, devem ser medidas e monitoradas. A pressão e temperatura devem atender a parâmetros fixados pelo regulamento, que se não forem atendidos tornam o teste inválido.

O regulamento define procedimentos para calibração e verificação periódica de todos os sistemas de medição. Entre estes procedimentos está a linearização, que é comum a todos os

analisadores de gases. Além deste, há procedimentos de ajuste e verificação, específicos para cada tipo de analisador, como as verificações de interferência com gases presentes na amostra e a verificação de conversores químicos presentes nos equipamentos.

Para o sistema de coleta de amostra, devem ser realizados testes de vazamento. As especificações para exatidão dos instrumentos de medição devem ser atendidas considerando inclusive o sistema de registro dos dados. As exigências do regulamento EPA quanto a equipamentos para testes de emissões são mostradas com mais detalhe no Apêndice A.

#### ***2.3.1.2.4 Procedimentos para teste de gases de exaustão (Subparte E)***

A subparte E descreve os procedimentos para realização de teste de gases de exaustão em motores fora de estrada com ignição por centelha. Há requisitos específicos conforme o sistema de coleta de amostra de emissões utilizado.

O teste consiste na operação do motor em determinadas seqüências de modos, enquanto os gases de exaustão gerados são analisados quanto a componentes específicos. Há ciclos de teste específicos, com rotação e carga definidos, conforme o tipo e a cilindrada do motor, mostrados no Apêndice A. Para cada modo, determina-se a concentração de cada poluente, o consumo de combustível e a potência. Os resultados são ponderados e usados para calcular a vazão em massa de cada poluente emitido em relação à potência (g/kWh).

O regulamento divide a execução do teste em três partes: pré-teste, ciclo de teste, e pós-teste. Para cada parte, são definidos os procedimentos a serem realizados. No pré-teste, é realizado o amaciamento do motor para estabilização dos valores de emissões, um pré-condicionamento para aquecimento do motor e verificações dos analisadores de gases e do sistema de coleta de amostra.

No ciclo de teste, são realizados os modos de operação definidos, conforme as características do motor. Cada modo de operação inicia com um período de estabilização, seguido da amostragem dos gases de exaustão, medição e registro das grandezas necessárias para cálculo dos resultados de emissões.

O pós-teste consiste de verificações do sistema de coleta de amostra e dos analisadores

de gases. Encerradas as verificações, os resultados são registrados e avaliados. Ao longo do teste, uma série de informações deve ser registrada, entre elas dados sobre o motor ou teste, valores medidos ou resultados de cálculo, mostrados no Apêndice D. Para registro dos dados do teste pode-se utilizar um computador ou qualquer dispositivo automático de coleta de dados.

Os valores finais para a taxa de emissão em massa específica em relação à potência devem ser calculados conforme as equações definidas no regulamento, de acordo com o método de medição utilizado. No Apêndice A são apresentadas as equações usadas quando a vazão de combustível é escolhida como base para o cálculo de emissões em massa a partir do método *raw gas*.

#### ***2.3.1.2.5 Auditoria de Fiscalização Seletiva (Subparte F)***

A fim de fiscalizar a conformidade dos motores produzidos quanto a emissões, a EPA pode solicitar ao fabricante a realização de uma auditoria de fiscalização seletiva, enviando um pedido de teste. Este pedido contém todas as instruções para realização da auditoria, entre elas o procedimento de amostragem e o local designado para realização dos testes, que pode ser as instalações do fabricante.

O critério usado para avaliar a conformidade nesta auditoria é o nível aceitável de qualidade (AQL). O AQL é definido como a porcentagem máxima de motores reprovados, considerada satisfatória em uma inspeção por amostragem. O AQL especificado para estas auditorias é de 40%. Um motor é reprovado quando o resultado final deteriorado do teste, para um ou mais poluentes, exceder o padrão de emissão ou FEL. O fabricante deve testar motores da amostra selecionada até que uma decisão de aprovação seja alcançada para todos os poluentes ou uma decisão de reprovação seja encontrada para um poluente.

Os números de decisão de aprovação e reprovação são dados em tabelas, como aquela mostrada no Anexo C. Caso uma família de motor seja reprovada na auditoria, a EPA pode suspender seu certificado de conformidade.

### 2.3.1.2.6 Programa de Teste de Linha de Produção (PLT) no Fabricante (Subparte H)

Para determinar a conformidade de motores Fase 2, é exigida, além de eventuais auditorias de fiscalização seletiva, a realização de testes de linha de produção (PLT). O PLT consiste em realizar os procedimentos para teste de gases de exaustão, descritos na subparte E, utilizando os equipamentos para testes de emissões, descritos na subparte D, de acordo com os critérios de amostragem e avaliação dos resultados apresentados na subparte H. Os testes de linha de produção devem ser realizados pelo fabricante, para cada família de motor.

A frequência de amostragem de motores para PLT é descrita no regulamento. No início de cada ano o fabricante deve selecionar motores aleatoriamente, a uma taxa de 1% da produção. Os resultados iniciais são usados para calcular o tamanho de amostra necessário para o restante do ano. No caso de famílias recém certificadas, deve-se testar 2 motores e então calcular o tamanho de amostra exigido para cada poluente (HC+NOx e CO), conforme a Equação 4. Para famílias com produção continuada, deve-se testar 1 motor e então calcular o tamanho de amostra, conforme Equação 4, combinando este resultado com o do último motor testado no ano anterior. Após cada teste, o tamanho de amostra deve ser recalculado para cada poluente e o maior entre os dois valores de N indica o número de testes necessários, que devem ser distribuídos de forma uniforme ao longo do resto do ano.

$$N = \left[ \frac{(t_{95} \times \sigma)}{(x - FEL)} \right]^2 + 1 \quad (4)$$

N: tamanho de amostra requerido para o ano modelo;

$t_{95}$ : coeficiente que depende do número de testes realizados (n) conforme Anexo C;

$\sigma$ : desvio padrão dos resultados de emissões da amostra atual;

x: média dos resultados de emissões da amostra atual;

FEL: *Family Emission Limit* ou padrão caso não haja FEL.

Se, a qualquer momento, o tamanho de amostra requerido (N) for menor ou igual ao tamanho de amostra atual (n) e a média da amostra (x) para HC+NOx e CO for menor ou igual ao FEL ou padrão, os testes podem parar. Os testes devem continuar enquanto não houver uma decisão de parar ou de não conformidade. Se a qualquer momento, a média para HC+NOx ou CO

exceder o FEL ou padrão, deve-se continuar testando à taxa máxima de amostragem, que é o menor valor entre: a) 30 testes por ano; ou b) 1% da produção anual planejada.

Testes além do tamanho máximo de amostra são permitidos, contudo não podem ser incluídos no cálculo do tamanho de amostra e na avaliação estatística dos resultados, apresentada mais adiante. Os dados destes testes adicionais devem ser identificados e incluídos nos relatórios enviados periodicamente à EPA.

Os motores selecionados para PLT não podem sofrer ajustes, reparos, preparações, modificações ou medições, a menos que estes processos estejam documentados nos procedimentos de montagem e inspeção, e sejam realizados em todos os motores da linha de produção, ou sejam aprovados previamente pela Agência. A fim de determinar o efeito de desvios do ajuste recomendado pelo fabricante, bem como de configurações que podem ocorrer em motores em uso, a Agência pode solicitar que qualquer parâmetro do motor passível de ajuste seja alterado para qualquer valor dentro da faixa ajustável.

Os resultados de PLT são avaliados através de um método estatístico para definir se a produção está em conformidade. Para este fim, a EPA estabelece o método CUSUM, que é um caso especial da carta de controle CUSUM, cujo conceito é apresentado na seção 2.5.6.1.2. Após cada teste realizado, deve-se atualizar a estatística  $C_i$ , conforme a Equação 5, e o limite de ação  $H$ , conforme a Equação 6, para cada poluente controlado (HC+NO<sub>x</sub> e CO).

$$C_i = \text{Max} [0 \text{ ou } (C_{i-1} + X_i - (\text{FEL} + F))] \quad (5)$$

Onde:

$C_i$ : estatística CUSUM atual;

$C_{i-1}$ : estatística CUSUM anterior (antes de qualquer teste a estatística é zero ( $C_0 = 0$ ));

$X_i$ : resultado do teste de emissão do último motor testado;

FEL: FEL ou padrão de emissão (caso não haja FEL);

$F$ :  $0,25 \sigma$ ;

$\sigma$ : desvio padrão dos resultados de emissões da amostra atual.

$$H = 5 \sigma \quad (6)$$

Após cada teste, a estatística  $C_i$  é comparada ao limite de ação  $H$ . Se a estatística  $C_i$  exceder o limite de ação  $H$  em dois testes consecutivos, para qualquer poluente controlado, a

família pode ser determinada como em não conformidade e o fabricante deve informar a EPA dentro de 10 dias úteis.

Quando uma alteração no certificado de conformidade envolver mudança no FEL para produção futura, os cálculos de tamanho de amostra e CUSUM devem incorporar o novo FEL, permanecendo inalterados os cálculos realizados previamente. Quando uma alteração no certificado de conformidade modificar o FEL para produção passada e/ou futura, sem modificações no motor, os cálculos prévios devem ser refeitos usando o novo FEL.

Em caso de erro no procedimento, problema nos equipamentos de teste ou problema no motor que possa resultar em danos, é permitido repetir o teste. Porém, os resultados de todos os testes, com explicações detalhadas das razões para se invalidar um teste, devem ser relatados à EPA no relatório trimestral, apresentado mais adiante. Testes invalidados por problemas no motor devem ser documentados em detalhe, inclusive os reparos realizados, permitindo que os resultados após o reparo sejam utilizados como resultado original do teste.

No caso de um motor selecionado para PLT exceder o FEL ou padrão, deve-se tomar uma ação para reduzir as emissões abaixo do limite e realizar um novo teste, chamado de reteste. Se não for possível reduzir as emissões abaixo dos limites, o motor é considerado não conforme e não poderá ser vendido nos EUA.

Dentro de 45 dias após o término de cada trimestre, o fabricante deve enviar à EPA um relatório, em formato padronizado pela agência, com os resultados de todos os testes realizados, válidos, inválidos ou retestes. Em caso de teste inválido, a razão da invalidação deve ser informada, enquanto para reteste é obrigatório descrever a solução encontrada pelo fabricante. O relatório trimestral deve conter os resultados da estatística CUSUM.

Se, a qualquer momento, a estatística CUSUM exceder o limite de ação em dois testes consecutivos, a família de motor pode ser determinada como não conforme e ter seu certificado de conformidade suspenso pela Agência. Os prazos e procedimentos para envio de notificações de ambas as partes e ações decorrentes da suspensão do certificado estão definidos no regulamento. Porém, antes de suspender um certificado a Agência trabalha junto com o fabricante para realizar modificações na linha de produção e tentar evitar a parada da produção.

O certificado de conformidade de uma família pode ser revogado, após ter sido suspenso devido a não conformidade, caso a solução proposta exija mudança no projeto do motor ou

sistema de controle de emissões. Após a revogação, se o fabricante desejar introduzir no mercado esta versão modificada, deve-se demonstrar que esta atende o regulamento, testando tantos motores quanto necessários para que a estatística CUSUM, usando o novo FEL, fique abaixo do limite de ação.

### **2.3.1.2 California Air Resources Board (CARB)**

Como visto anteriormente, o *Clean Air Act* permite que os governos dos estados norte-americanos criem agências para garantir seu cumprimento e definam padrões de emissões mais rigorosos que os definidos pela EPA. Antes mesmo da existência do CAA, o estado da Califórnia já havia criado órgãos para controle da poluição do ar e até hoje é conhecido por lançar tendências, que normalmente são seguidas por legislações de controle de emissões no resto do mundo. Esta seção apresenta brevemente a história desta Agência, a estrutura do seu regulamento para motores pequenos e os pontos do regulamento que divergem da EPA.

Os primeiros episódios reconhecidos de *smog* em Los Angeles, na Califórnia, ocorreram no verão de 1943 e já em 1945 a cidade iniciou seu programa de controle da poluição do ar, criando o órgão de Controle de Fumaça no Departamento de Saúde. A natureza e as causas do *smog* foram descobertas em 1952 pelo Dr. Arie Haagen-Smit, que viria a ser o primeiro diretor da CARB e é considerado o pai do controle da poluição do ar. Segundo ele, óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos na presença de radiação ultravioleta do sol formam ozônio, um dos principais componentes do *smog*. O primeiro padrão para HC e CO nos gases de exaustão de automóveis foi adotado em 1966 no estado da Califórnia, sendo o primeiro deste tipo nos EUA. A *California Air Resources Board* foi criada em 1967, mesmo ano em que a lei Federal da Qualidade do Ar permitiu que o estado da Califórnia estabelecesse seus próprios padrões de emissões para novos veículos, com base em suas necessidades por controles mais rígidos (CARB, 2006a; CARB 2006b).

Apesar dos motores pequenos (abaixo de 25 hp) representarem apenas 1% do total da poluição do ar na Califórnia, as legislações estadual e federal obrigam qualquer fonte a emitir o mínimo econômica e tecnologicamente possível. Os padrões CARB Fase I passaram a vigorar em 1995 e mesmo assim alguns motores conformes chegavam a desperdiçar até 25% do combustível que consumiam. Por isso, os padrões Fase II, que entrariam em vigor em 1999, tornaram-se mais exigentes e foram adotados em 2000, reduzindo significativamente as emissões que formam *smog*

provenientes destes motores (CARB, [entre 1998 e 2004]).

O regulamento californiano que controla as emissões de motores fora de estrada pequenos (*small off-road engines* – SORE) encontra-se no Título 13 do *California Code of Regulations* (CCR), que trata de veículos motorizados, na divisão 3, destinada à CARB, no capítulo 9, que aborda dispositivos de controle da poluição de motores e veículos *fora de estrada*, no seu Artigo primeiro. A estrutura deste regulamento é mostrada no Apêndice B (CALIFORNIA, 2004).

O §2403 do regulamento CARB incorpora por referência o texto do regulamento EPA 40 CFR 90, subpartes A, B, D e E, com algumas modificações. As subpartes incorporadas tratam respectivamente das definições (subparte A), padrões de emissões e diretrizes para certificação (subparte B), equipamentos para teste de emissões (subparte D) e procedimento de teste para exaustão gasosa (subparte E). Portanto, os requisitos da EPA e da CARB quanto a padrões de emissões, equipamentos e procedimentos de teste são os mesmos, com algumas exceções, que são apresentadas nesta seção (CARB, 2004).

O CAA permite que o Estado da Califórnia estabeleça padrões de emissões diferentes dos federais, porém ele também define exceções, como os motores usados em equipamentos para construção ou agricultura abaixo de 175 hp, para os quais é proibida a adoção de padrões estaduais. Os padrões de emissões para motores fora de estrada para venda na Califórnia, não excetuados pelo CAA, são mostrados no Apêndice B.

Quanto aos poluentes controlados, uma diferença da CARB em relação à EPA é que os motores de dois tempos são controlados também quanto à emissão de material particulado (PM). A obtenção do valor da emissão de PM pode ser feita através de teste, cujo procedimento é indicado no regulamento CARB, ou estimado conforme a Equação 7 (CARB, 2004).

$$PM_{est} = \frac{HC}{RazaoCombustivelOleo} \quad (7)$$

Onde:

PM<sub>est</sub>: material particulado estimado;

HC: emissão específica de HC ponderada [g/kWh];

RazaoCombustivelOleo: razão combustível-óleo usada no motor de teste.

Em relação aos valores limite de emissões há algumas diferenças entre CARB e EPA no que diz respeito à classificação dos motores e datas de introdução. A CARB não faz distinção entre motores portáteis e não-portáteis e as divisões entre as classes de cilindrada diferem da EPA. Tanto para CARB quanto para EPA, os valores limite tornam-se gradualmente mais rigorosos, primeiramente para CARB sendo seguidos pela EPA, chegando a valores finais semelhantes na maioria dos casos.

As exigências quanto a equipamentos para realização de testes e a verificação destes são exatamente iguais para CARB e EPA. Somente no caso do uso de refrigeração auxiliar do motor, a CARB exige que ela seja representativa da operação em uso e sua necessidade justificada.

Quanto aos materiais especificados, as exigências também são iguais para CARB e EPA, com exceção do combustível para teste, cujas especificações estão no Anexo D. Além disso, caso não seja utilizado combustível certificado no acúmulo de serviço, a CARB estabelece limites para o número de octanas.

Com exceção da medição ou cálculo da emissão de PM, as exigências da CARB quanto a procedimentos de teste de emissões, como condições e seqüência de teste, informações registradas e cálculo dos resultados, são as mesmas da EPA.

O §2407 do regulamento CARB trata da conformidade de motores novos e do teste de linha de produção. O regulamento permite que o fabricante opte, durante a certificação, entre dois sistemas de PLT: CUSUM e Auditoria da Qualidade. O primeiro é similar ao exigido pela EPA, e o segundo baseia-se na amostragem de 1% do volume produzido, com avaliação baseada na média e desvio-padrão, após a medição de 10 motores. Na seqüência são apresentadas somente as particularidades do sistema CUSUM para CARB (CALIFORNIA, [2004]).

Apesar da maior parte das exigências da CARB e EPA quanto à realização do PLT serem semelhantes, há algumas diferenças quanto à amostragem e avaliação dos resultados. A CARB estabelece um número de amostras mínimo por trimestre, que é de 2 motores por família, independente do cálculo do tamanho de amostra 'N'. Além disso, diferentemente da EPA, motores testados além do número máximo de amostras, devem ser incluídos nos cálculos de CUSUM e tamanho de amostra. Em relação à avaliação dos resultados, a CARB permite que a

potência medida na certificação seja usada como constante no cálculo das emissões de cada PLT realizado. Há ainda pequenas diferenças quanto aos procedimentos em caso de detecção de não conformidade.

Além do teste de PLT, o regulamento CARB pode solicitar a realização de teste de conformidade, similar à Auditoria de Fiscalização Seletiva existente na EPA, mostrada na seção 2.3.1.2.5, e se diferencia desta pelo critério de aprovação ou falha, mostrado no Anexo E.

### **2.3.2 UNIÃO EUROPÉIA (UE)**

Seguindo as tendências em legislação de controle de emissões de pequenos motores fora de estrada adotadas nos EUA, a União Européia também passou a controlar suas emissões, buscando diminuir a poluição e evitar barreiras técnicas ao comércio. Esta seção apresenta brevemente a história da União Européia, o processo de criação de legislação, a estrutura da legislação de controle de emissões de motores pequenos e seus pontos divergentes do regulamento EPA.

A União Européia é uma estrutura política e econômica criada em 1992 pelo Tratado de Maastricht. A UE é formada atualmente por 27 Estados Membros (EM), que continuam a ser nações soberanas e independentes, mas delegam alguns assuntos, como por exemplo, a proteção do meio-ambiente, para serem decididos de acordo com o interesse comum. Os assuntos de responsabilidade da UE são determinados em Tratados com a participação dos chefes de governo de todos os EM e aprovação dos parlamentos nacionais. A elaboração e adoção de legislação na UE envolvem três instituições: a Comissão Européia, o Parlamento Europeu e o Conselho da UE (CE, 2006).

A Comissão Européia é independente dos governos nacionais e deve representar os interesses da UE no seu conjunto. Somente a Comissão pode apresentar propostas de legislação. Uma proposta de legislação européia só é elaborada quando, após estudos e consulta ao Comitê Econômico Europeu, ao Comitê das Regiões e aos parlamentos e governos nacionais, ficar determinado que o problema não possa ser solucionado em nível nacional. Quando, por exemplo, considera-se necessária nova legislação sobre uma questão ambiental, a Comissão Européia, por meio de sua Direção Geral do Ambiente, consulta representantes das partes interessadas, como a

indústria, os governos e organizações ambientais, e então elabora uma proposta. Se a proposta for aprovada pela Comissão ela é enviada para avaliação do Conselho da UE e do Parlamento Europeu. A Comissão também é responsável pela aplicação da legislação nos EM (CE, 2006).

O Parlamento Europeu, que representa os interesses dos cidadãos da UE, compartilha com o Conselho da UE a responsabilidade por avaliar e aprovar as propostas de legislação apresentadas pela Comissão Europeia. Este pode ainda solicitar à Comissão que apresente propostas de legislação sobre assuntos necessários. O Conselho da UE representa os EM, e é formado por um ministro do governo de cada país, cuja área depende da questão abordada (CE, 2006).

A legislação europeia derivada dos tratados é composta por diretivas, regulamentos, decisões, resoluções e pareceres. A particularidade das diretivas, que são usadas para o controle de emissões de motores, é o seu propósito de aproximar as leis dos EM sobre um determinado assunto. Diretivas definem o resultado a ser atingido, porém dão liberdade aos EM para definir os meios utilizados para atingir a meta (BORCHARDT, 2000).

Com o objetivo de reduzir a poluição do ar por motores fora de estrada, foi adotada em 1997 a Diretiva 97/68/EC, que estabelece os limites de emissões e o procedimento de certificação para introdução no mercado de motores com ignição por compressão. Esta Diretiva teve seu escopo ampliado pela Diretiva 2002/88/EC, para englobar os motores com ignição por centelha até 19 kW, que são responsáveis por 10 a 15% da emissão total de compostos orgânicos voláteis na Comunidade Europeia. As estruturas destas Diretivas são mostradas no Apêndice C (UNIÃO EUROPEIA, 1998; UNIÃO EUROPEIA, 2003).

Além da questão ambiental, o objetivo da legislação europeia foi evitar a criação de regulamentos nacionais, que poderiam resultar em barreiras técnicas ao comércio. A legislação europeia de controle de emissões de motores *fora de estrada* está propositadamente alinhada com a legislação norte-americana correspondente, também com o objetivo de evitar barreiras técnicas (UNIÃO EUROPEIA, 2003).

No sentido de evitar barreiras técnicas, a divisão dos motores em classes, de acordo com cilindrada e aplicação, é igual à divisão feita pelo regulamento EPA, apenas com denominações

diferentes, como mostrado no Apêndice C. Os padrões de emissões da Fase I e da Fase II da UE são mostrados no Apêndice C, sendo similares aos valores estabelecidos pela EPA. A entrada em vigor dos limites é estabelecida na Diretiva, de acordo com a classe do motor e é defasada em relação à EPA.

Os EM devem informar à Comissão e aos outros EM quais são suas autoridades responsáveis pela certificação e serviços de teste para questões da Diretiva. Através da certificação, um EM garante que um modelo de motor atende os requisitos técnicos da Diretiva com relação às emissões.

Solicitações de certificação de um modelo de motor devem ser enviadas para uma única autoridade responsável, de qualquer EM. Os órgãos de certificação de cada EM deve informar periodicamente os órgãos de certificação dos demais EM sobre os certificados emitidos, negados ou revogados. Antes de emitir um certificado, os órgãos responsáveis devem certificar-se de que existe um controle eficaz da conformidade da produção por parte do fabricante. Segundo a legislação europeia, o EM que conceder um certificado deve tomar as ações necessárias para garantir que os motores produzidos estejam em conformidade com este certificado (UNIÃO EUROPÉIA, 1998).

Cada órgão que emite um certificado tem o dever de garantir a conformidade dos motores produzidos com os padrões de emissões. Assim sendo, a Diretiva estipula que, em caso de não conformidade, o órgão que emitiu o certificado deve tomar ações para restabelecer o atendimento aos requisitos, que se necessário pode resultar na revogação do certificado. Estas ações devem ser comunicadas aos órgãos dos demais EM (UNIÃO EUROPÉIA, 1998).

A Diretiva não estabelece um processo de PLT como a EPA e a CARB. Para garantir a conformidade da produção com os padrões de emissões, os fabricantes devem estabelecer processos de controle da qualidade do produto. Os resultados devem ser arquivados por um período determinado pelo órgão responsável e analisados para avaliar a estabilidade e variabilidade natural das características do motor. Qualquer não conformidade detectada deve gerar novos ensaios e ações para restabelecer a conformidade (UNIÃO EUROPÉIA, 1998).

Os métodos de controle podem ser inspecionados anualmente pelo organismo

certificador. Nesta ocasião devem ser apresentados todos os documentos e resultados correspondentes. Se o inspetor julgar necessário, pode-se proceder à medição de unidades retiradas do processo, de acordo com o procedimento de ensaio definido na Diretiva. O critério de avaliação para esta inspeção é apresentado no Anexo F. Em caso de não conformidade, o órgão de certificação deve garantir que as ações necessárias para restabelecimento da conformidade sejam realizadas o mais rápido possível.

Testes de acordo com o procedimento definido na Diretiva são realizados somente durante inspeções do processo de controle de qualidade, caso o inspetor considere necessário, ou se o processo de controle de qualidade, estabelecido pelo fabricante, incluir este tipo de ensaio.

Os procedimentos e equipamentos de teste, descritos de forma detalhada na Diretiva, são similares aos exigidos para teste de PLT pela EPA, e diferem destes somente em algumas exigências quanto a verificações dos equipamentos, tempo de amostragem e condições de teste, apresentadas no Apêndice C.

As especificações do combustível de referência, a ser utilizado em ensaios para medir emissões, são definidas na Diretiva e estão no Anexo G. Além disso, há algumas exigências específicas da UE quanto ao cálculo do valor de emissões, descritas no Apêndice C.

## 2.4 IMPLANTAÇÃO E INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE GESTÃO

Foram encontrados na literatura trabalhos que apresentam abordagens e ferramentas para implantação e integração de sistemas de gerenciamento, como normas ISO, normas exigidas pela indústria automotiva e normas de saúde e segurança do trabalho. O objetivo desta seção é encontrar ferramentas que possam ser aproveitadas ou adaptadas para implantar o programa de teste de linha de produção, exigido pelos regulamentos apresentados na seção 2.3, de forma integrada. Da mesma forma que os regulamentos, os sistemas de gestão exigem o atendimento de uma grande quantidade de requisitos e, portanto, suas abordagens de implantação e integração podem apresentar similaridades.

Entre os trabalhos que tratam da implantação de normas ISO ou itens de normas ISO estão Bhuiyan e Alam (2005), Pizzolato et al. (2005), Fuentes et al. (2000) e Borchardt (1999).

A abordagem sugerida por Bhuiyan e Alam (2005) para implantação de sistemas de qualidade inicia com a avaliação da discrepância entre os procedimentos existentes e os exigidos pelo sistema a ser implantado. O resultado desta avaliação é o levantamento das áreas que precisam ser consideradas. Em seguida, um time de projeto, formado por pessoas chave dos processos, elabora os procedimentos. Por fim, ocorre o treinamento do pessoal nas instruções de trabalho e realiza-se uma auditoria interna para determinar as discrepâncias remanescentes.

As fases da abordagem para implantação de normas da família ISO 9000 apresentada por Fuentes et al. (2000) são mostradas na Figura 5. Nesta abordagem o treinamento é considerado uma atividade que ocorre ao longo de todo o processo.

Fase	Descrição
Diagnóstico	Avaliação da situação para identificar discrepância entre modelo atual e proposto. Identificar as variáveis das fases subsequentes e as técnicas para medi-las
Planejamento	Planejar fases subsequentes com base na informação levantada no diagnóstico
Documentação	Juntar a documentação para o futuro sistema da qualidade
Implantação	- Gradual: processos são auditados e garantidos enquanto estão sendo definidos e documentados; ou - “ <i>Big bang</i> ”: todas as atividades de auditoria ocorrem após o término da documentação
Controle e Manutenção	Verificação periódica do sistema

Figura 5 Etapas para implantação de normas da família ISO 9000

Fonte: elaborado com base em Fuentes et al. (2000)

Pizzolato et al. (2005) sugerem uma metodologia em 5 etapas para gerenciamento da adequação de um laboratório aos requisitos da norma NBR ISO/IEC 17025:2001. A primeira Etapa é a **definição do prazo** e depende do planejamento estratégico e do diagnóstico da situação atual. A Etapa 2 consiste em **organizar os itens da norma com base no conhecimento da equipe**, formando estruturas lógicas para facilitar a elaboração de procedimentos. Na Etapa 3 ocorre a **definição das ações a serem implantadas**. A Etapa 4 é a **elaboração do cronograma da implantação**, considerando as relações de dependência entre as atividades. Na Etapa 5 ocorre o **acompanhamento das ações** com o objetivo de atender os prazos.

Borchardt (1999) destaca a importância da fase de planejamento e o embasamento teórico da equipe no processo de implantação de um sistema de gerenciamento dos equipamentos de inspeção, medição e ensaios, que é um item da norma ISO 9000. A terceirização de atividades associadas à metrologia deve levar em consideração a estratégia da empresa, os custos e a qualificação requerida. A implantação realizada consiste das seguintes etapas:

- a) pré-ISO: consiste em visitas a outras empresas certificadas, treinamento dos responsáveis pela implantação, levantamento dos recursos necessários para implantação;
- b) planejamento: definição de responsabilidades para implantação e execução, avaliação dos padrões necessários e disponíveis, etc.;
- c) execução: elaborar plano de calibração, definir critérios de aceitação, desenvolver *software* para gerenciamento de dados de calibração, etc.;
- d) verificação e padronização: análise das reprovações dos instrumentos, análise da frequência de calibração, auditoria interna, etc.

Há trabalhos que abordam a integração de sistemas de gerenciamento da qualidade, do meio ambiente e da saúde e segurança do trabalho, entre eles Zutshi e Sohal (2005), McDonald et al. (2003), Karapetrovic (2002), Haro (2001), Viegas (2000) e Wilkinson e Dale (1999).

Zutshi e Sohal (2005) e McDonald et al. (2003) falam das vantagens resultantes da integração dos sistemas de gerenciamento da qualidade, meio ambiente e segurança e saúde ocupacional, entre elas: a redução de custos; a melhor utilização de recursos, através da eliminação de processos duplicados e redução do tempo gasto na revisão de procedimentos; e a melhoria da comunicação. Outra vantagem da integração entre sistemas é a visão holística proporcionada, que evita os conflitos existentes nas abordagens funcionais.

Karapetrovic (2002) afirma que, ao integrar sistemas de gerenciamento, o alinhamento entre objetivos e o compartilhamento de recursos humanos, financeiros e materiais são as atividades que geram os maiores benefícios em termos de economia e sinergia. Dentre as estratégias apresentadas para integrar sistemas de gestão, é particularmente interessante a que prevê a implantação simultânea dos sistemas da qualidade e ambiental, pois os efeitos de sinergia são obtidos desde o início.

Haro (2001) apresenta uma proposta de auto-avaliação integrada, quanto aos requisitos de diversas normas do setor automotivo, como QS-9000 (americana), VDA 6 (alemã), AVSQ (italiana) e EAQF (francesa). Para chegar nesta proposta foi utilizada uma sistemática que iniciou com a análise e comparação dos requisitos de cada norma, seguida da elaboração de uma matriz de correspondência entre os requisitos de todas as normas.

Entre as dificuldades citadas por Viegas (2000) na integração de normas, estão identificar suas diferenças e garantir que todos os requisitos sejam contemplados. A implantação do sistema integrado inicia com um macro planejamento das atividades, identificando as relações de dependência e as atividades críticas. As atividades principais foram desdobradas em um plano de ação usando a ferramenta 5W1H.

Para Wilkinson e Dale (1999), o primeiro passo na integração de sistemas de gerenciamento é a combinação dos sistemas usando matrizes. Estas matrizes são usadas para produzir procedimentos que atendam os requisitos de todos os sistemas.

## 2.5 QUALIDADE

Como visto na seção 2.2, a avaliação da conformidade não garante completamente a qualidade do produto, que é imprescindível para a sobrevivência das organizações. O objetivo desta seção é apresentar a evolução da qualidade ao longo do tempo, suas definições e conceitos, para em seguida, estudar algumas abordagens, ferramentas e métodos da qualidade, selecionados de acordo com a relevância para este trabalho.

### 2.5.1 HISTÓRICO

Garvin (2002) divide a história da qualidade em quatro eras: a) inspeção; b) controle estatístico; c) garantia da qualidade; e d) gestão estratégica da qualidade.

Antes do século XIX todos os produtos existentes eram fabricados por artesãos, que dominavam o processo desde o projeto, passando pela produção até a venda e opcionalmente realizavam uma inspeção. A inspeção formal surgiu com a produção em massa, no início do século XIX.

Somente em 1931 surgiu o controle estatístico, baseado na obra de Shewhart, com os conceitos de limite de controle e amostragem. No final dos anos 40, o controle estatístico estava estabelecido, porém restrito à área de produção.

O início da era da Garantia da Qualidade ocorre com o lançamento do *Quality Control Handbook* por Juran em 1951, que abordou pela primeira vez os custos associados à qualidade.

Estes foram divididos em custos inevitáveis (prevenção) e evitáveis (falhas). Esta abordagem constata que o projeto do produto define os custos da qualidade. Em 1956, Feigenbaum propôs o Controle Total da Qualidade (*Total Quality Control* – TQC), segundo o qual a qualidade depende do envolvimento de todos os departamentos, desde o projeto até a entrega. Simultaneamente ao surgimento do TQC, começou-se a utilizar técnicas estatísticas e de análise com o objetivo de melhorar o desempenho dos produtos ao longo do tempo, o que foi chamado de Engenharia de Confiabilidade. No início da década de 60 surgiu a filosofia do Zero Defeito, que se baseia na motivação e conscientização dos funcionários. Crosby, um dos defensores do Zero Defeito, sustenta que é economicamente viável reduzir os defeitos a zero, contrariando Juran, para quem existe um nível ótimo de defeitos diferente de zero.

A era da Gestão Estratégica da Qualidade iniciou quando o aumento da fatia do mercado conquistada pelos produtos japoneses nos EUA conscientizou os fabricantes norte-americanos do impacto da qualidade na competitividade e mudou o enfoque de preventivo para estratégico. A qualidade passou a ser definida do ponto de vista do cliente. Ganharam força as pesquisas de mercado, o *benchmarking* e a análise de reclamações de usuários. A constatação de que superar a concorrência em qualidade aumentava a fatia de mercado e reduzia custos levou à idéia de melhoria contínua, pois cada competidor buscava sempre superar seus concorrentes. A adoção da gestão estratégica exige o envolvimento da alta gerência, que pode criar metas específicas para a melhoria da qualidade, baseadas na satisfação do cliente. Técnicas de controle estatístico e TQC foram incorporadas à gestão estratégica, porém com foco na melhoria contínua.

### **2.5.2 DEFINIÇÃO DE QUALIDADE**

Segundo Garvin (2002), qualidade é um conceito de difícil definição e motivo de confusão. Ainda hoje não há consenso sobre a definição de qualidade, pois diferentes disciplinas como filosofia, economia, marketing e operações, têm se ocupado com seu estudo a partir de diferentes pontos de vista. Foram identificadas cinco categorias de definições da qualidade, cada qual com uma abordagem diferente: transcendente; baseada no produto; baseada no usuário; baseada na produção e baseada no valor. A Tabela 1 apresenta as categorias das definições da qualidade, com sua síntese e campo de aplicação.

Tabela 1 Categorias de definição da qualidade e aplicações

Categoria	Síntese da definição	Aplicação
Transcendente	Qualidade é reconhecida quando vista	Filosofia
Produto	Qualidade depende da quantidade de cada atributo presente no produto	Engenharia
Usuário	Qualidade é satisfação do cliente	Marketing
Produção	Qualidade é conformidade com as especificações na primeira tentativa	Produção
Valor	Qualidade é oferecer o desempenho desejado a um custo aceitável	Difícil aplicação

Fonte: elaborado com base em Garvin (2002)

Para Garvin (2002) a abordagem da qualidade deve ter diferentes ênfases, de acordo com a fase do ciclo de vida em que se encontra o produto. Na fase de concepção do produto é interessante a visão baseada no usuário, para identificar as características desejadas pelo consumidor. Na fase do projeto recomenda-se a visão baseada no produto, desdobrando as características desejadas em especificações. Durante a fase de fabricação, a visão baseada na produção deve garantir que os produtos atendam às especificações. Porém, o sucesso desta abordagem depende da integração entre os departamentos responsáveis por cada uma destas etapas.

### 2.5.3 DIMENSÕES DA QUALIDADE

Vários autores buscaram dividir a qualidade em elementos a fim de facilitar sua análise. Juran e Gryna (1993) dividem a satisfação do cliente em dois componentes: características do produto e ausência de defeitos. A primeira diz respeito às características do produto desejadas pelo cliente e são definidas durante o projeto, determinando seu custo inerente, com grande impacto sobre o preço de venda.

As características do produto abrangem desempenho, confiabilidade, durabilidade, facilidade de uso, manutenibilidade, estética, disponibilidade de opções e reputação. A ausência de defeito é obtida quando o produto é fabricado de acordo com as especificações determinadas no projeto. A falha em obter ausência de defeito aumenta o custo do produto sem agregar valor para o cliente (JURAN; GRZYNA, 1993; GROOVER, 1996).

Garvin (2002) enumera 8 dimensões da qualidade: a) desempenho, b) características, c) confiabilidade, d) conformidade, e) durabilidade, f) atendimento, g) estética, e h) qualidade

percebida. A Tabela 2 apresenta as dimensões da qualidade e uma síntese de suas definições. Todas estas dimensões são citadas como características do produto por Juran e Gryna (1993), com exceção da conformidade, que é equivalente à ausência de defeito. Davis et al. (2003) citam as dimensões da qualidade, conforme propostas por Garvin.

Tabela 2 Dimensões da qualidade e suas definições

Dimensão	Definição
Desempenho	Medida das características operacionais básicas
Características	Características secundárias complementares
Confiabilidade	Probabilidade de falha dentro de um período definido
Durabilidade	Vida útil
Conformidade	Atendimento às especificações
Atendimento	Rapidez, competência e cortesia no reparo
Estética	Efeitos dos sentidos humanos. Aparência, textura, sabor, cheiro ou som.
Qualidade percebida	Reputação do fabricante

Fonte: elaborado com base em Garvin (2002)

Garvin (2002) e Porter (1999) exploram a relação entre as dimensões da qualidade e como estas podem ser combinadas de forma estratégica. Este posicionamento é crucial para a competitividade da organização.

Este trabalho focaliza na fase de produção, cuja dimensão da qualidade associada é a conformidade. Portanto, esta dimensão será detalhada mais a fundo e norteará as iniciativas de controle e melhoria da qualidade. Evidentemente, sempre que possível, as demais dimensões da qualidade serão consideradas. Garvin (2002) cita duas abordagens para tratar da conformidade: abordagem tradicional e abordagem de Taguchi.

As próximas seções detalham estas abordagens. Como exemplo de abordagem tradicional será apresentada a abordagem de Juran. Cada abordagem possui suas próprias definições de qualidade e empregam técnicas e métodos diferentes. O objetivo deste estudo é conhecer estas abordagens em busca de princípios que possam ser aplicados neste trabalho.

#### **2.5.4 ABORDAGEM DE JURAN**

Na abordagem de Juran, qualidade é definida como adequação ao uso, do ponto de vista do cliente, enquanto este é definido como qualquer parte afetada pelo produto ou processo. Assim, identificam-se clientes externos, que não se limitam aos usuários finais, mas também

incluem os revendedores e até mesmo órgãos governamentais de regulamentação, e clientes internos, que são todos os setores envolvidos (JURAN; GRZYNA, 1993).

Juran baseia sua abordagem da função qualidade no conceito de custos da qualidade. Ele divide estes custos em quatro categorias, sendo elas custos de falhas internas, custos de falhas externas, custos de avaliação e custos de prevenção (DAVIS et al., 2003; FEIGENBAUM apud DA SILVA, 2003; JURAN; GRZYNA, 1993).

Os custos de falhas internas estão associados a defeitos detectados antes do produto chegar ao cliente (sucata, retrabalho, etc.); os custos de falhas externas estão associados a defeitos encontrados pelo cliente (pagamento de garantia, investigação devido a reclamações, etc.); custos de avaliação ocorrem na inspeção da conformidade com os requisitos da qualidade (inspeção de recebimento, inspeção durante o processo, etc.); os custos de prevenção destinam-se a manter os custos de falha e inspeção no mínimo (planejamento da qualidade, controle do processo, etc.).

Para Juran a função qualidade pode ser estruturada com foco em 3 processos: planejamento da qualidade, controle da qualidade e melhoria da qualidade. As atividades desenvolvidas em cada processo são mostradas na Figura 6. A abordagem dos 3 processos está baseada nos custos da baixa qualidade e os efeitos de cada processo sobre estes custos são mostrados na Figura 7. O planejamento da qualidade define a faixa alvo para os custos da baixa qualidade e o controle da qualidade se encarrega de monitorar estes limites e agir em caso de desvios devido a causas esporádicas. O processo de melhoria da qualidade deve identificar oportunidades de redução dos custos da baixa qualidade devido a causas crônicas, diagnosticá-las e solucioná-las. (JURAN; GRZYNA, 1993).

Devido ao produto e processo já estarem definidos, ou seja, a fase de planejamento encontrar-se encerrada, o foco deste trabalho foi nos processos de controle e melhoria da qualidade.

Dentro da abordagem de Juran, controle de qualidade é o processo que visa alcançar metas e prevenir mudanças desfavoráveis. Este é composto das seguintes etapas: escolha do objeto de controle e unidade de medida; estabelecimento de uma meta; projeto de um sensor capaz de medir o objeto de controle; medição do desempenho atual; avaliação da diferença entre

valor atual e meta; e tomar ação caso necessário (JURAN; GRZYNA, 1993).

Planejamento	Estabelecer objetivos da qualidade
	Identificar clientes
	Identificar necessidades dos clientes
	Desenvolver características dos produtos
	Desenvolver características do processo
Controle	Estabelecer controles para o processo e transferir para produção
	Escolher objetos de controle
	Escolher unidades de medida
	Estabelecer objetivos
	Criar sensor
	Medir desempenho atual
	Interpretar a diferença
Melhoria	Tomar ação sobre a diferença
	Justificar necessidade
	Identificar projetos
	Organizar times de projeto
	Diagnosticar causas
	Sugerir solução e medir eficiência
	Lidar com a resistência à mudança
	Implantar controle para manter os ganhos

Figura 6 Processos da abordagem de Juran e suas atividades  
Fonte: Adaptado de JURAN e GRZYNA, 1993.

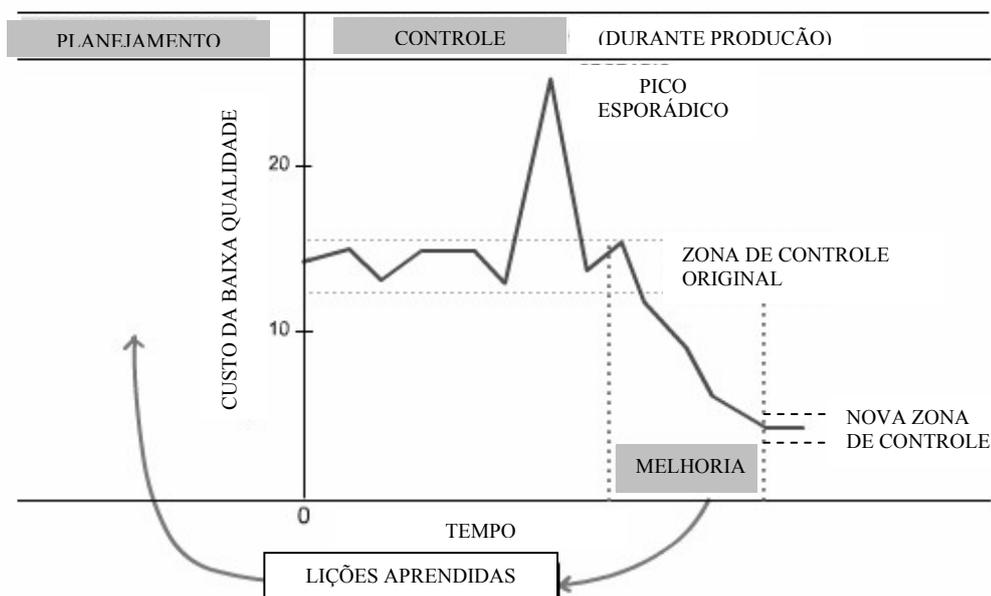


Figura 7 Efeito dos processos da abordagem de Juran sobre os custos da baixa qualidade  
Fonte: Adaptado de JURAN e GRZYNA, 1993.

Os objetos de controle podem ser características da qualidade do produto, parâmetros do processo ou características da qualidade de matérias-primas e podem ser definidos pela própria organização ou impostos pelos clientes, por regulamentos governamentais ou por órgãos de

padronização (JURAN; GRAYNA, 1993).

A medição da qualidade é a atividade principal do controle, realimentando o processo e identificando problemas. Esta pode assumir várias formas, como a inspeção na linha, inspeção de produto acabado e auditoria do produto (JURAN; GRAYNA, 1993).

Inspeção consiste na medição de uma característica e comparação com especificações para determinar conformidade. O objetivo de uma inspeção pode ser a aceitação de produtos, determinar a estabilidade e a capacidade de um processo, verificar o projeto de um produto, avaliar inspeções anteriores ou determinar a exatidão de um instrumento de medição (JURAN; GRAYNA, 1993).

A inspeção para aceitação de produtos envolve 3 decisões: conformidade, adequação ao uso e comunicação. Produtos conformes podem ser destinados ao processo seguinte. A adequação ao uso só é avaliada quando um produto não conforme é descoberto e leva em consideração o usuário do produto, a aplicação, a existência de risco para a segurança, a urgência e o custo do reparo. A existência de produtos não-conformes deve ser comunicada à produção para prevenir reincidências. Não conformidades recorrentes indicam uma condição crônica, que deve ser diagnosticada e eliminada através de um projeto de melhoria da qualidade (JURAN; GRAYNA, 1993).

A auditoria de produto mede a qualidade do processo de controle, de forma independente, e, portanto deve ocorrer após o término das inspeções. Esta redundância justifica-se para produtos críticos, como forma de garantia. Neste tipo de auditoria, procura-se medir a adequação ao uso e a conformidade com as especificações do produto entregue ao usuário (JURAN; GRAYNA, 1993).

### **2.5.5 ABORDAGEM DE TAGUCHI**

Para Taguchi qualidade pode ser medida como função da perda que um produto causa à sociedade a partir de sua liberação. Entre as perdas estão: custo de operação, falha funcional, custos de manutenção e reparo, insatisfação do consumidor e prejuízos ao meio ambiente. Mesmo que algumas destas perdas sejam difíceis de quantificar em termos monetários, elas são reais.

(GROOVER, 1996; TAGUCHI; ELSAYED; HSIANG, 1990).

Há perda para sociedade quando uma característica funcional de um produto difere de seu valor nominal. Quando a dimensão de um componente difere de seu valor nominal a função deste componente é afetada de forma negativa. A perda aumenta com o desvio, como mostrado na Figura 8. Produtos com características próximas da especificação nominal têm qualidade melhor e resultam em maior satisfação do cliente. Num certo nível de desvio a perda é inaceitável e se torna necessário descartar ou retrabalhar a peça. Este nível identifica uma maneira possível de especificar o limite de tolerância. A perda associada a um produto com desvio do valor nominal pode ser calculada a partir da Equação 8. Para melhorar a qualidade deve-se reduzir a perda, projetando produto e processo para estar o mais próximo possível do alvo (GROOVER, 1996; TAGUCHI; ELSAYED; HSIANG, 1990).

Na abordagem de Taguchi, o objetivo do controle de qualidade também é minimizar a variabilidade. Juran e Gryna (1993) fazem uma ressalva. Há casos em que a redução da variabilidade, além dos limites de especificação, pode resultar em aumento dos custos de manufatura. Ao se aplicar métodos de controle da qualidade, é preciso ter em mente que o objetivo é minimizar o custo total do processo, composto por custos da qualidade e custos de manufatura. Ribeiro, Fogliatto e Ten Caten (2000) apresentam uma abordagem para minimizar custos da qualidade e de manufatura simultaneamente.

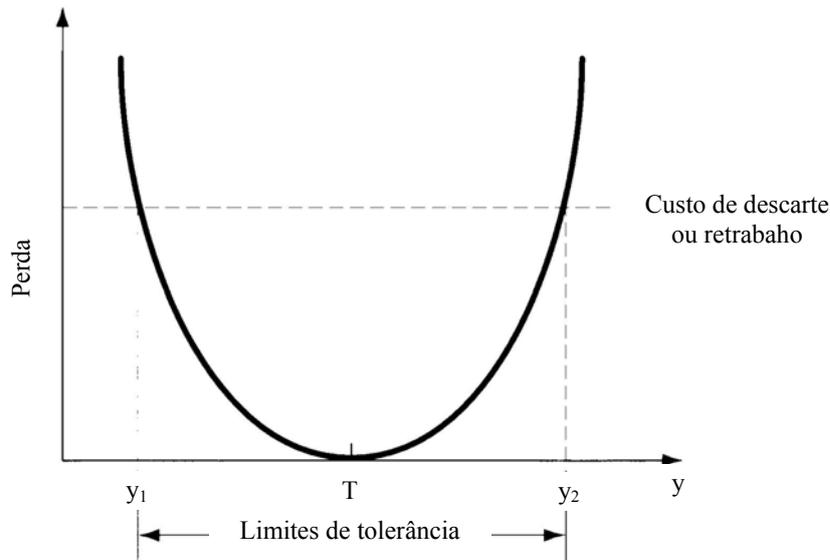


Figura 8 Função perda da qualidade de Taguchi  
 Fonte: Groover (1996)

$$L(y) = k(y - T)^2 \tag{8}$$

Onde:

L(y): função perda;

k: constante de proporcionalidade;

y: valor medido da característica da qualidade de interesse;

T: valor nominal da característica da qualidade.

Para se obter um projeto robusto é necessário considerar diversas atividades dentro da organização como: planejamento do produto, projeto do produto, projeto do processo, produção e assistência técnica, formando um sistema da qualidade total. Este sistema pode ser dividido em duas partes: controle da qualidade *off-line* e controle da qualidade *on-line*. A Figura 9 mostra a estrutura deste sistema (GROOVER, 1996; TAGUCHI; ELSAYED; HSIANG, 1990).

Controle da qualidade <i>off-line</i>	Projeto do produto	Projeto do sistema
		Projeto dos parâmetros
		Projeto das tolerâncias
	Projeto do processo	Projeto do sistema
		Projeto dos parâmetros
		Projeto das tolerâncias
Controle de qualidade <i>on-line</i>	Produção	Diagnóstico e ajuste do processo
		Previsão e correção do processo
		Medição do processo e ação
	Relação com clientes	Assistência técnica
		Feedback para o projeto do produto

Figura 9 Estrutura do sistema da qualidade total proposto por Taguchi  
 Fonte: Adaptado de Groover (1996)

O controle da qualidade *off-line* consiste do projeto do produto e projeto do processo, que podem ser divididos em três etapas: projeto do sistema, projeto de parâmetros e projeto de tolerâncias (GROOVER, 1996; TAGUCHI; ELSAYED; HSIANG, 1990).

O **projeto do sistema** envolve a aplicação de conhecimento de engenharia e análise para projetar um protótipo que atenda as necessidades do cliente. Na fase de projeto do produto o projeto do sistema define a configuração do produto, os componentes, os subconjuntos e os materiais. Na fase de projeto do processo o projeto do sistema significa escolher os processos de fabricação mais apropriados.

O **projeto de parâmetros** relaciona-se com a determinação dos ajustes ótimos para os parâmetros do produto e processo. É nesta fase que se obtém o projeto robusto, através da definição de valores para os parâmetros do produto que resultem em características funcionais pouco sensíveis a variações nos parâmetros. Os valores dos parâmetros do produto também devem minimizar os efeitos de variações no processo.

No **projeto de tolerância** determina-se os limites aceitáveis para variação dos valores obtidos no projeto de parâmetros, buscando o equilíbrio entre perda da qualidade e custo.

O controle da qualidade *on-line* é responsável pela produção e pelas relações com clientes. Seu objetivo é reduzir a variabilidade nos produtos através de ajustes nos processos a partir da observação dos processos ou produtos. O processo de relação com o consumidor lida com reparos, reposição e reclamações e envia estas informações aos departamentos responsáveis, para que as devidas correções sejam feitas.

Na produção, Taguchi enumera três métodos para controle da qualidade: ajuste e diagnóstico do processo; previsão e correção do processo; e medição do processo e ações (GROOVER, 1996). No **ajuste e diagnóstico do processo**, este é medido periodicamente e ajustes são feitos para manter os parâmetros em seus valores nominais. Na **previsão e correção do processo** os parâmetros do processo são medidos em intervalos periódicos a fim de identificar tendências. A **medição do processo e ação** consiste na inspeção de 100% das unidades para identificar defeitos e retrabalhá-las ou descartá-las.

### **2.5.6 CARTAS DE CONTROLE**

Esta seção apresenta alguns conceitos de Controle Estatístico de Processo necessários para a aplicação de cartas de controle. As condições necessárias para aplicação de cartas de controle são enumeradas, com o objetivo de avaliar seu emprego no processo abordado neste trabalho. Finalmente são apresentados alguns tipos de carta de controle, com suas particularidades, e uma abordagem para sua implantação.

Juran e Gryna (1993) definem controle estatístico do processo como a aplicação de métodos estatísticos para medição e análise da variação em um processo, que pode ter dois tipos de causas: a) comuns e b) especiais.

Segundo Montgomery et al. (2004), causas comuns são atribuídas ao efeito cumulativo de variações muito pequenas, inerentes ao processo, chamada de variabilidade natural. Causas especiais são fontes de variabilidade geralmente maiores que a variabilidade natural, atribuídas a máquinas ajustadas incorretamente, erros dos operadores ou materiais com defeito.

O processo é dito sob controle estatístico quando somente causas comuns estão presentes, correspondendo a um desempenho aceitável. Quando causas especiais estão presentes, o processo é considerado fora de controle, resultando em uma parcela de produtos não conformes. Para Woodal (2000), a distinção entre causas comuns e especiais depende do contexto, devendo-se atuar sobre uma causa para melhorar a qualidade quando sua remoção for economicamente viável.

Cartas de controle são ferramentas utilizadas para monitorar processos, identificando a presença de causas especiais. Consistem de gráficos onde registra-se uma estatística de uma amostra, como a média ou a amplitude, em intervalos periódicos. Tipicamente as cartas de controle contêm uma linha central e limites de controle. A linha central corresponde à média da estatística e os limites de controle são posicionados a uma determinada distância da linha central, medida em unidades de desvio padrão daquela estatística. Quando um ponto é posicionado entre os limites de controle o processo é considerado sob controle, caso contrário, o processo é considerado fora de controle. Outro indício de que o processo está fora de controle é a presença de tendências, como muitos pontos de um único lado da linha central em seqüência

(MONTGOMERY et al., 2004).

Um conceito importante para o uso de cartas de controle é o de subgrupo racional, segundo o qual a variabilidade dentro de uma amostra deve representar a variabilidade natural do processo e assim os limites de controle representarão uma fronteira entre causas comuns e causas especiais. Montgomery et al. (2004) apresentam duas abordagens baseadas no tempo para a coleta das amostras.

Na primeira, cada amostra consiste de unidades produzidas em seqüência, utilizada quando se pretende detectar desvios no processo. Na segunda, cada amostra consiste de unidades que representam todas as unidades produzidas desde o último subgrupo e é usado para decisões sobre aceitação de produtos, porém torna difícil a detecção de desvios na média do processo. Quando um processo possui várias máquinas cujas saídas são misturadas, recomenda-se aplicar cartas de controle para cada máquina de forma individual, pois do contrário seria muito difícil detectar se alguma máquina está sob influência de causas especiais.

Box et al. (1997) dividem a implantação de cartas de controle em 3 questões: a) se a carta de controle é um método apropriado para o processo, b) qual tipo de carta de controle usar e c) definir os limites de controle.

Cartas de controle são apropriadas somente para processos com períodos estáveis, sem mudanças na média e variância. No caso da variância ser estável, mas a média oscilar, Box et al. (1997) recomendam o uso de Controle Automático do Processo (CAP), que usa técnicas de ajuste do processo. Segundo Montgomery et al. (1994), o CAP busca minimizar a variabilidade, transferindo-a da variável de saída para uma variável de entrada controlável. Ao utilizar CAP, Box et al. (1997) e Montgomery et al. (1994) recomendam a aplicação de sistemas de controle estatístico para monitorar o processo quanto a causas especiais.

O tipo de carta de controle e os limites de controle dependem do tipo de distúrbio possível no processo e do objetivo da carta de controle. Para detectar picos recomenda-se cartas de Shewhart. Em caso de pequenos desvios deve-se usar cartas de soma cumulativa (CUSUM). Quanto ao objetivo, pode-se estar interessado em monitoramento em tempo real, solução de problemas ou avaliação da estabilidade do processo. No caso de monitoramento, deve-se usar

métodos com baixa taxa de alarme falso (BOX et al., 1997).

Montgomery et al. (2004) e Juran e Gryna (1993) concordam sobre a necessidade de um plano de ação associado à carta de controle, que deve ser executado quando causas especiais são detectadas. Sem ação por parte do pessoal responsável pelo processo para identificar e eliminar a causa especial, a carta de controle perde seu propósito. Durante a implantação de uma carta de controle, as ações necessárias em caso de detecção de causas especiais devem ser planejadas.

### **2.5.6.1 Cartas de controle para variáveis**

Ao monitorar características variáveis, recomenda-se usar duas cartas de controle e assim monitorar a tendência central e a variabilidade do processo simultaneamente. A carta  $\bar{X}$  é a mais empregada para monitorar tendência central e as cartas de amplitude (R) ou desvio padrão ( $\sigma$ ) para a variabilidade.

#### **2.5.6.1.1 Carta de controle para valores individuais**

A literatura prevê que quando a taxa de produção for muito baixa, o custo de medição da característica de interesse for muito alto ou a característica controlada variar muito lentamente, pode ser necessário realizar o controle a partir de amostras de uma unidade. Nestes casos pode-se usar uma carta de controle para valores individuais. A variabilidade do processo será estimada a partir da amplitude móvel de duas observações consecutivas. A amplitude móvel equivale à diferença entre duas medições consecutivas em módulo (RIBEIRO; TEN CATEN, 2000).

A linha central e limites de controle para carta de controle para valores individuais são calculados conforme as Equações 9, 10 e 11.

$$LCS = \bar{x} + 3 \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (9)$$

$$LC = \bar{x} \quad (10)$$

$$LCI = \bar{x} - 3 \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (11)$$

Onde:

$\bar{x}$  : média dos valores individuais;

$\bar{R}$  : média das amplitudes móveis;

$d_2$ : quando a amplitude móvel é calculada a partir de 2 observações equivale a 1,128.

A linha central e limites de controle para carta de controle para amplitudes móveis são calculados conforme as Equações 12, 13 e 14.

$$LCS = D_4 \bar{R} \quad (12)$$

$$LC = \bar{R} \quad (13)$$

$$LCI = D_3 \bar{R} \quad (14)$$

Onde:

$D_4$ : quando a amplitude móvel é calculada a partir de 2 observações equivale a 3,267;

$D_3$ : quando a amplitude móvel é calculada a partir de 2 observações equivale a 0.

A carta para valores individuais pode ser interpretada da mesma maneira que uma carta para média. Uma mudança na média do processo resultará em pontos fora dos limites ou uma tendência, que consiste de vários pontos do mesmo lado da linha central. Cartas de controle para valores individuais são pouco sensíveis a pequenas mudanças na média do processo.

#### **2.5.6.1.2 Carta de controle de soma cumulativa (CUSUM)**

A carta de controle CUSUM é um traçado cronológico da soma acumulada dos desvios de uma propriedade estatística de uma amostra, como a média ou a dispersão, em relação a um valor alvo. Cada ponto adicionado à carta contém informação de todas as observações (JURAN; GRAYNA, 1993).

Desta forma o método de soma cumulativa elimina a principal desvantagem das cartas de controle de Shewhart, que usam como critério somente a informação contida no último ponto adicionado. Ao combinar informação de várias amostras, o método de soma cumulativa é mais efetivo na detecção de pequenas mudanças no processo, sendo particularmente efetiva para amostras formadas por uma unidade. Entre as desvantagens do método CUSUM estão: o atraso na detecção de grandes alterações no processo; a dificuldade na análise de dados históricos para detectar controle em um processo ou trazer um processo para controle; e a dificuldade no reconhecimento de padrões (MONTGOMERY, 1985).

Conforme Montgomery (1985) o método da soma cumulativa foi originalmente

desenvolvido para detectar mudanças em apenas uma direção, sendo chamada de *one-sided test*. Coincidentemente, este é o método exigido pelos regulamentos EPA e CARB para avaliar os resultados dos testes de linha de produção (PLT), como visto na seção 2.3.1.2.6. Neste método, a cada amostra calcula-se a estatística  $S_m$ , conforme a Equação 15. Se a estatística  $S_m$  for menor que zero, ela é automaticamente igualada a zero. Quando a estatística  $S_m$  exceder o limite de ação  $h$ , a média do processo ultrapassou o valor de referência. O limite de ação  $h$  para o método CUSUM é definido a partir das probabilidades de falha na detecção e de alarme falso desejadas, e do valor na mudança da média que se deseja detectar.

$$S_m = \sum_{i=1}^m (\bar{x}_i - w) \quad (15)$$

Onde:

$\bar{x}_i$ : valor da  $i$ -ésima amostra;

$w$ : valor de referência, geralmente a média entre o valor alvo e valor correspondente à qualidade rejeitável.

Woodall (2000) recomenda o uso de cartas de controle de Shewhart em conjunto com a carta CUSUM, pois a primeira pode ser usada para detectar um número maior de efeitos devidos a causas especiais.

### 2.5.6.1.3 Carta de controle de médias móveis

Segundo Montgomery (1985), assim como as cartas CUSUM, cartas baseadas em médias móveis são muito efetivas na detecção de pequenas mudanças do processo e aplicam-se nas mesmas situações. Ribeiro e ten Caten (2000) recomendam o uso simultâneo de cartas de médias móveis e valores individuais. A média móvel é calculada conforme a Equação 16. A cada nova amostra, a observação mais recente é adicionada ao cálculo e a mais antiga é descartada. Os limites de controle são calculados conforme as Equações 17 e 18.

$$M_t = \frac{\bar{x}_t + \bar{x}_{t-1} + \dots + \bar{x}_{t-w+1}}{w} \quad (16)$$

Onde:

$\bar{x}_t$ : é a média de uma amostra de  $n$  unidades no instante  $t$ ;

$w$ : passo (número de observações utilizadas para calcular a média móvel).

$$LCS = \bar{x} + \frac{3\sigma}{\sqrt{nw}} \quad (17)$$

$$LCI = \bar{x} - \frac{3\sigma}{\sqrt{nw}} \quad (18)$$

### 2.5.6.2 Implantação de cartas de controle

Juran e Gryna (1993) apresentam um roteiro para implantação de cartas de controle que consiste nas seguintes etapas: a) Escolha da característica a ser controlada; b) Escolha do tipo de carta de controle; c) Definição da linha central e base para cálculo dos limites; d) Definição da amostragem; e) Obtenção do sistema para coleta dos dados; f) Cálculo dos limites de controle e definição da interpretação e das ações; e) Registrar os dados e interpretar os resultados.

Na **escolha da característica a ser controlada** deve-se identificar as variáveis que contribuem para características do produto final; escolher o método de medição; e determinar o ponto mais cedo no processo onde pode ser realizado o teste, com o propósito de prevenir defeitos.

Para **escolha do tipo de carta de controle**, Montgomery apud Schissatti (1998) fornece um fluxo que considera o tipo de característica (variável ou atributo), o tamanho de amostra e o tamanho da variação que se deseja detectar.

Na **definição da linha central e base para cálculo dos limites**, especifica-se se a linha central será a média de dados coletados ou uma média desejada, e a distância dos limites de controle em número de desvios padrão, de acordo com o risco.

Ao se realizar a **definição da amostragem**, é preciso ter em mente o conceito de subgrupo racional. Além disso, segundo Schissatti (1998), também se considera nesta etapa a disponibilidade dos meios de medição. Ao se trabalhar com tamanhos de amostra pequenos, pode-se aumentar a capacidade de detecção de mudanças utilizando limites de atenção, aprimorando a análise de tendências e aumentando a frequência de amostragem.

A **obtenção do sistema para coleta de dados** consiste em projetar e disponibilizar o

sistema de medição. De preferência, além de indicar os resultados, este sistema deve registrá-los.

A próxima etapa é o **cálculo dos limites de controle e definição da interpretação e das ações**. Para calcular os limites de controle utilizam-se regras estatísticas. O critério para considerar o processo fora de controle e as ações decorrentes desta detecção precisam ser estabelecidos nesta etapa. Por fim, a etapa **registrar os dados e interpretar os resultados**, equivale à operação da carta de controle.

### **2.5.7 MÉTODO PARA OTIMIZAÇÃO DE PRODUTOS E PROCESSOS**

Nesta seção é apresentada uma abordagem quantitativa para melhoria de produtos e processos, suas etapas, ferramentas aplicáveis a cada etapa e os cuidados necessários na sua aplicação.

Ribeiro e Elsayed (1995) sugerem uma abordagem em 4 passos para otimização de produtos ou processos: identificação do problema, construção de um modelo, informação sobre o gradiente e níveis ótimos. Abordagens similares foram usadas por Pasa (1996), Ribeiro, Fogliatto e ten Caten (2000) e Pizzolato (2002). De forma geral identifica-se nestes procedimentos as seguintes etapas: a) Caracterização do Problema; b) Planejamento e Execução de Experimentos; c) Modelagem Individual das Variáveis de Resposta; d) Escolha de uma função objetivo; e e) Otimização. Na seqüência são detalhadas as etapas pertinentes para este trabalho.

#### **2.5.7.1 Caracterização do problema**

Na etapa de Caracterização do Problema deve ser definido o objetivo do estudo e identificadas as características da qualidade (CQ) importantes e suas variáveis de resposta (VR) associadas. Na seqüência devem ser definidas as especificações, valores alvo e importâncias relativas das VR's. Então são levantados os parâmetros do processo (PP) associados às VR's escolhidas.

O Desdobramento da Função Qualidade (QFD) tem sido utilizado para priorização de CQs em diversos trabalhos, como em Ribeiro, ten Caten e Fritsch (1998), Ribeiro, Fogliatto e ten Caten (2000) e ten Caten, Ribeiro e Fogliatto (2000). Nestes trabalhos, dependendo do que se

deseja avaliar, foram utilizadas diferentes matrizes, desdobrando CQs em VRs e estas em PPs. Em outro caso demandas da qualidade foram desdobradas em CQs e estas em processos.

Verificou-se na literatura que há divergência na nomenclatura usada para definir os elementos do QFD. Neste trabalho adotou-se a terminologia usada por Ribeiro, Fogliatto e ten Caten (2000). Segundo esta definição, características da qualidade refletem as expectativas do cliente quanto ao produto ou processo. Variáveis de resposta são variáveis mensuráveis capazes de traduzir as características da qualidade em requisitos técnicos. Fatores de controle (FC) são itens mensuráveis, controláveis e que afetam as variáveis de resposta.

De forma geral, QFD pode ser aplicado sempre que for preciso priorizar múltiplas características baseadas em suas importâncias e intensidades de relações. Os *inputs* para o QFD podem ser provenientes de pesquisas de mercado e opinião de especialistas. Normalmente, características da qualidade são levantadas e priorizadas em pesquisas de mercado e podem ser aspectos subjetivos. Partindo das CQs a equipe técnica levanta as VRs, que devem ser requisitos técnicos quantificáveis. A matriz que relaciona CQs e VRs é conhecida como Matriz da Qualidade.

#### **2.5.7.2 Modelagem individual das variáveis de resposta**

Para Montgomery (1997), quando se deseja prever resultados, otimizar ou controlar um processo é necessário conhecer a relação entre as variáveis envolvidas. Usando regressão é possível obter um modelo que relacione duas ou mais variáveis. O objetivo da terceira etapa da abordagem de otimização é obter modelos para cada VR em função dos FCs.

Conforme Pasa (1996) e Pizzolato (2002), é possível construir modelos para média e variabilidade das VRs, utilizando rotinas de regressão linear simples e regressão linear múltipla. O modelo de regressão linear simples é mostrado na Equação 19 e o modelo de regressão linear múltipla é mostrado na Equação 20. Modelos com estrutura mais complexa do que a mostrada na Equação 20, como polinômios, podem ser analisadas por regressão linear múltipla, fazendo-se as devidas definições de variáveis.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (19)$$

Onde:

Y: variável de resposta;  
 $\beta_0, \beta_1$ : parâmetros da relação linear;  
 x: variável independente;  
 $\varepsilon$ : erro aleatório.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (20)$$

Onde:

$x_1, x_2, \dots, x_k$  : variáveis independentes.

Ao se usar dados não provenientes de experimentos planejados para criar modelos, é preciso tomar alguns cuidados. Montgomery et al. (2004) alertam para possíveis problemas de estudos retrospectivos, como dificuldade de isolar efeitos de alguns parâmetros, devido à baixa variabilidade destes durante o período ou correlação entre parâmetros. Além disso, variáveis importantes podem não ter sido coletadas ou os dados podem não ser confiáveis. Neste texto não se pretende entrar em detalhes do método de análise de regressão, sendo que já há textos que tratam deste assunto em profundidade, como Montgomery (1997) e Montgomery et al. (2004).

### 2.5.7.3 Escolha de uma função objetivo

Ribeiro e Elsayed (1995) propõem uma função perda quadrática expandida como função-objetivo, capaz de tratar múltiplas VRs e tem como critérios de otimização: a) a distância da VR ao alvo; b) a variabilidade da VR e c) a sensibilidade da VR à variabilidade dos FCs. Esta função pode ser vista na Equação 21 e tem como objetivos minimizar desvios do alvo e maximizar a robustez a ruídos e a flutuações nos FCs. Esta função-objetivo é aplicada no trabalho de Ribeiro, Fogliatto e ten Caten (2000) e de forma simplificada nos trabalhos de Pasa (1996) e Pizzolato (2002).

$$\hat{Z}(x) = \sum_{j=1}^J w_j \left[ (\hat{Y}_j(x) - T_j)^2 + \hat{\sigma}_j^2(x) + \sum_{k=1}^K \sigma_k^2 \left( \frac{\partial \hat{Y}_j(x)}{\partial X_k} \right)^2 \right] \quad (21)$$

Onde:

$\hat{Z}(x)$  : perda correspondente ao ajuste x do vetor de fatores de controle;

$\hat{Y}_j(x)$  : valor esperado da j-ésima variável de resposta para o ajuste x do vetor de fatores de controle;  
 $w_j$ : fator de importância e correção de escala correspondente a j-ésima variável de resposta;  
 $T_j$  : valor alvo para a j-ésima variável de resposta;  
 $\hat{\sigma}_j^2(x)$  : estimativa da variância da j-ésima variável de resposta para o ajuste x do vetor de fatores de controle;  
 $\hat{\sigma}_k^2$  : estimativa da variância do k-ésimo fator de controle.

O cálculo dos fatores de importância e correção de escala  $w_j$  é diferente para cada tipo de VR. Gráficos que mostram o comportamento da perda para cada tipo de VR são mostrados na Figura 10. Para VR do tipo nominal aplica-se a Equação 22, para o tipo maior é melhor a Equação 23 e para o tipo menor é melhor a Equação 24. Estas expressões foram apresentadas no trabalho de Pizzolato (2002) e levam em consideração a importância relativa (IR) de cada VR, que representam a voz do cliente ou da equipe técnica.

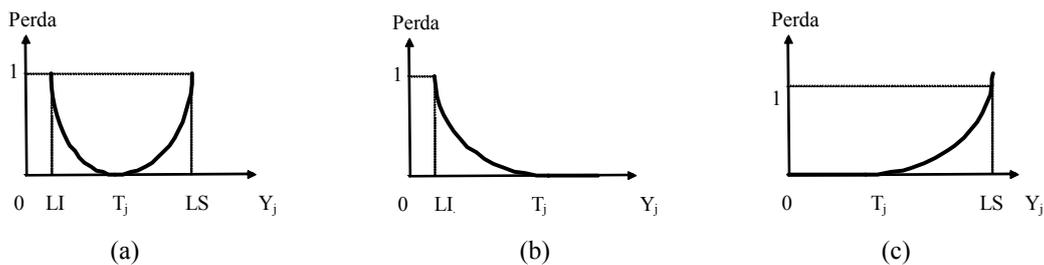


Figura 10 Função perda por tipo de VR  
 (a) Nominal; (b) Maior é melhor; (c) Menor é melhor  
 Fonte: Pasa (1996)

$$w_j = \frac{IR_j}{[(LS - LI) / 2]^2} \quad (22)$$

$$w_j = \frac{IR_j}{(T_j - LI)^2} \quad (23)$$

$$w_j = \frac{IR_j}{(LS - T_j)^2} \quad (24)$$

Onde:

LS: limite superior;

LI: limite inferior.

A adaptação deste método de otimização para que possa ser integrado ao programa de teste de linha de produção e a sua aplicação na empresa onde foi realizada a pesquisa-ação são apresentados nos próximos capítulos.

### **3 PROPOSTA DE SISTEMÁTICA PARA IMPLANTAÇÃO DO TESTE DE LINHA DE PRODUÇÃO (PLT) INTEGRADO COM A MELHORIA DA QUALIDADE**

A sistematização proposta visa adequar a produção de motores e o laboratório de ensaio aos requisitos dos regulamentos necessários para manutenção da certificação do produto. Como visto na seção 2.2, o atendimento aos requisitos mínimos estabelecidos em normas ou regulamentos pode não ser suficiente para garantir completamente a qualidade do produto. Portanto, é oportuno integrar a adequação aos requisitos dos regulamentos com ações para melhoria da qualidade, se possível aproveitando as informações geradas pelos processos compulsórios.

O presente capítulo inicia com um estudo dos processos e condições existentes antes do início do trabalho, apresentando o cenário no qual foi desenvolvida a pesquisa-ação. Na sequência é apresentado o estudo dos regulamentos para levantamento e organização dos requisitos relacionados aos objetivos do trabalho. Estes requisitos foram desdobrados em ações para operacionalização do programa de teste de linha de produção.

Os requisitos de desempenho funcional do produto, do ponto de vista do usuário, foram estudados e desdobrados em características da qualidade. A integração de métodos complementares ao programa de teste de linha de produção é apresentada na seção 3.5. Fecha este capítulo uma seção que trata dos métodos utilizados no gerenciamento da implantação.

#### **3.1 ESTUDO DA SITUAÇÃO ANTERIOR À IMPLANTAÇÃO**

A pesquisa-ação foi realizada durante a transferência de uma linha de produtos com motor de dois tempos com ignição por centelha, cuja fase de projeto do produto e processo estava concluída. A linha de produtos estava sendo transferida de uma unidade no exterior para uma unidade brasileira, onde foi realizada a pesquisa-ação.

Estava disponível na empresa em estudo um laboratório, utilizado para desenvolvimento e controle de qualidade, capaz de medir as características exigidas para os testes de linha de produção, como potência e emissões, porém sem uma estrutura formal de controle dos sistemas de medição e sem preocupações quanto ao atendimento dos requisitos dos regulamentos de controle de emissões.

O grupo da empresa onde foi realizada a pesquisa-ação possuía experiência na realização de PLT em outras unidades localizadas no exterior, porém não existia uma sistemática para sua implantação. O pessoal envolvido na realização do PLT nas outras unidades estava à disposição para esclarecimentos de dúvidas quanto ao texto dos regulamentos ou outras questões de ordem prática.

As próximas seções apresentam, primeiramente, o estudo dos padrões de emissões e as conseqüências para o projeto do produto, e na seqüência, o processo desenvolvido pela empresa para garantir a conformidade com os padrões de emissões e requisitos do usuário durante a produção.

### **3.1.1 ESTUDO DOS PADRÕES DE EMISSÕES**

Nesta seção, são mostrados os padrões de emissões estabelecidos por regulamentos de controle de emissões dos Estados Unidos da América e da União Européia, aplicáveis aos motores abordados na pesquisa-ação e sua influência no projeto do produto. Os padrões de emissões devem ser considerados durante o desenvolvimento do produto, de forma que os motores sejam projetados para atendê-los sem perder a funcionalidade. Portanto, os padrões de emissões juntamente com os requisitos dos usuários definem as características dos modelos de motor a serem colocados no mercado.

Conforme apresentado no referencial teórico, existem regulamentos específicos para cada mercado, com mudanças progressivas nos padrões de emissões e exceções conforme a aplicação, tamanho do motor e volume de produção. A partir da combinação destas informações, foi definida no projeto do produto a necessidade de dois modelos de motor para atender os volumes demandados pelos mercados, de acordo com os respectivos regulamentos. Os modelos de motor com os padrões aplicáveis são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 Modelos de motor com os padrões de emissões aplicáveis

Modelo de motor	Agência/ Fase	Padrões de emissões [g/kWh]			
		HC+NO <sub>x</sub>		CO	PM
		HC	NO <sub>x</sub>		
A	EPA II	72		603	-
	CARB III	72		536	2
B	EPA I	161	5,36	603	-
	UE I	161	5,36	603	-

Fonte: o autor

Para atender aos padrões mais rigorosos da EPA Fase II e CARB Fase III, os motores modelo A são equipados com catalisadores. Já os motores modelo B estão sujeitos aos padrões menos rigorosos da EPA Fase I e UE Fase I. Neste caso, limites menos rigorosos significam menores custos, pois não há necessidade de dispositivos de controle de emissão, como catalisadores ou conceitos de motor mais complexos.

A existência de 2 modelos de motor, com valores de emissões diferentes, deve ser considerada na implantação do PLT e no processo de produção. As conseqüências para o PLT são mostradas na seção 3.3. Os meios utilizados na produção para garantir que os motores obedeçam aos padrões de emissões e aos requisitos de desempenho funcional são apresentados na próxima seção.

### 3.1.2 PROCESSO DE AJUSTE DO MOTOR

Conforme apresentado na seção 2.1, o desempenho do motor, tanto em emissões, quanto em características importantes para o usuário, é função da razão ar-combustível na mistura formada no carburador. Em um motor recém montado, a razão ar-combustível é resultado da combinação das características dimensionais de diversos componentes como, por exemplo, carburador, cilindro, pistão e silenciador.

No projeto do produto e processo foi estabelecida a necessidade do ajuste do motor na linha de montagem, para compensar a combinação das variabilidades dos componentes e assim atender às especificações das características da qualidade importantes para órgãos de regulamentação e usuários. O ajuste é realizado variando-se a posição do parafuso de regulagem principal presente no carburador. Como também mencionado na seção 2.1, a concentração de CO nas emissões (CO [vol%]) pode ser usada como parâmetro para ajuste da mistura.

O processo de ajuste é realizado em cabines, onde o motor é ligado e trabalha em aceleração máxima por um tempo determinado, para que atinja uma condição estável. A concentração de CO nas emissões é medida continuamente. Após a fase de aquecimento, a concentração de CO em aceleração máxima é ajustada pelo operador, caso esteja fora da especificação. Este processo também impede que motores com defeitos que impossibilitem sua partida cheguem ao cliente.

A medição da concentração de CO nos gases de escape é feita de maneira indireta. Um esquema da cabine mostrando o sistema de coleta e medição de emissões pode ser visto na Figura 11. A cabine possui um **tanque de combustível** que alimenta o **motor**, um **bocal de coleta**, ligado a um **exaustor**, que aspira os **gases de exaustão** junto com **ar ambiente**. Uma **sonda** coleta uma amostra desta mistura de gases de exaustão e ar, que é então enviada para um **analisador de gases**, onde as concentrações de CO e CO<sub>2</sub> diluídas são medidas. Um **sinal** com os valores medidos é enviado a um controlador lógico programável (**CLP**), que calcula a razão CO/CO<sub>2</sub>. A razão CO/CO<sub>2</sub> entra como variável em um polinômio específico para cada modelo de motor, a partir do qual se calcula a concentração de CO nos gases de exaustão puros. O próprio CLP verifica se o motor atende a especificação e recomenda o ajuste, caso necessário.

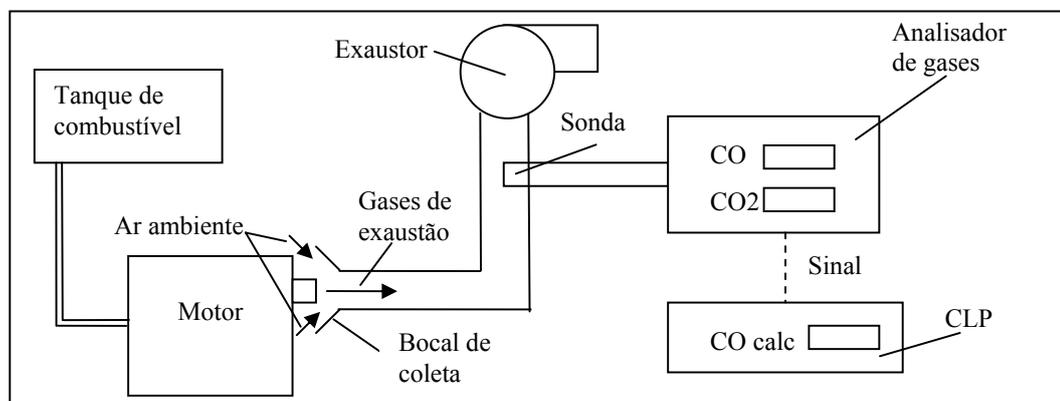


Figura 11 Esquema da cabine de ajuste do motor

A cabine deve possuir mecanismos que garantam a operação do motor dentro dos parâmetros estabelecidos para o processo de ajuste. Entre estes parâmetros estão a rotação do motor em aceleração máxima e a temperatura e pressão ambientes.

Antes do início da produção, deve-se determinar, para cada modelo de motor, o polinômio usado pelo CLP para calcular a concentração de CO. Para isto, um motor com uma

sonda conectada diretamente ao silenciador é colocado em funcionamento na cabine de ajuste. Esta sonda envia uma amostra dos gases de exaustão puros a um segundo analisador de CO. Assim é possível medir, simultaneamente, a concentração de CO nos gases de exaustão puros e as concentrações de CO e CO<sub>2</sub> diluídas. Com o motor em funcionamento na cabine, altera-se a razão ar-combustível da mistura através do parafuso de regulagem principal do carburador, esperando estabilizar em determinados pontos. Para cada ponto, são registrados os valores das concentrações de CO direto e CO e CO<sub>2</sub> diluídos. Com estes valores é possível determinar o polinômio que relaciona a razão CO/CO<sub>2</sub> diluídos e a concentração de CO direta. Esse processo precisa ser realizado para cada cabine, pois depende de particularidades do sistema de coleta de emissões.

A partir do estudo da situação anterior à implantação foi possível criar uma estrutura que explicita a relação entre os requisitos e processos apresentados nas seções anteriores, mostrada na Figura 12. Os **requisitos** considerados no desenvolvimento do produto são de dois grupos: **regulamentos** e **usuários**. Os regulamentos exigem que os motores atendam os **padrões** de emissões e que sejam realizados ensaios para avaliar a conformidade da produção (**PLT**). Os usuários, por sua vez, estão interessados no **desempenho funcional** do produto. Durante o **projeto do produto e processo** foi definida a necessidade do **processo de ajuste do motor** para garantir a conformidade com os padrões de emissões e desempenho funcional. Esta estrutura consiste no ponto de partida para a sistemática proposta para implantação do PLT, apresentada nas próximas seções.

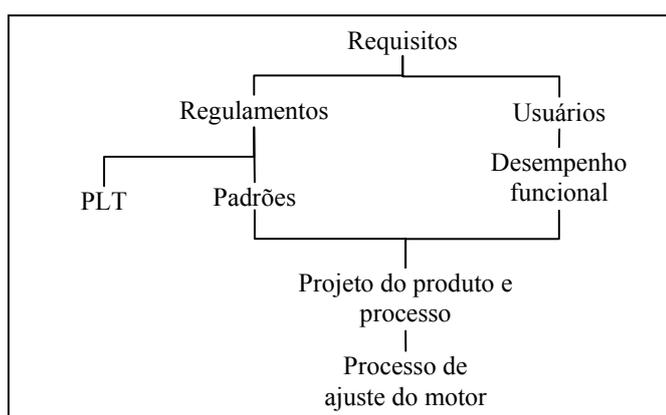


Figura 12 Estrutura da situação anterior à sistematização da implantação do PLT

### 3.2 ESTUDO DOS REQUISITOS DOS REGULAMENTOS QUANTO AO PLT

Neste trabalho foram abordados os textos que tratam do controle de emissões de motores das seguintes instituições:

- a) EPA, aplicável a todos os estados norte-americanos;
- b) CARB, aplicável ao estado norte-americano da Califórnia;
- c) UE, aplicável à União Européia.

De acordo com as leis de cada região, os textos podem ter diferentes denominações. Conforme visto na seção 2.3 os textos da EPA e CARB são chamados de regulamentos, enquanto o texto da UE é chamado de diretiva. Exceto quando especificado de outra forma, o termo regulamento será usado de forma genérica para designar os textos das três instituições.

Como visto na seção 2.3, para comercializar motores nos EUA e na Europa é necessária primeiramente uma certificação do produto junto aos órgãos designados nos regulamentos. No caso da UE ocorre também uma avaliação e aprovação do sistema de qualidade do fabricante. Com o objetivo de acompanhar a conformidade dos produtos, os regulamentos prevêm o direito de realizar auditorias e inspeções nas instalações dos fabricantes e eventualmente realizar ensaios em amostras, podendo para tanto utilizar as instalações do próprio fabricante.

Os regulamentos EPA e CARB exigem ainda a realização de ensaios por parte do fabricante para acompanhamento da produção, a fim de verificar a conformidade com os padrões. A diretiva da UE define os métodos a serem utilizados em eventuais ensaios para avaliação da conformidade com os padrões de emissões. Com base no que foi apresentado na seção 2.2, pode-se classificar estes ensaios como um mecanismo compulsório para manutenção da certificação do produto, realizado por primeira parte. Segundo Inmetro (2007), a Acreditação é um processo através do qual um órgão independente atesta a competência técnica de uma organização na realização de tarefas específicas de avaliação da conformidade. No caso dos regulamentos de emissões de motores, apesar dos ensaios realizados pelo fabricante serem necessários para manutenção da certificação do produto, não é exigida uma Acreditação, sendo suficiente uma Declaração da conformidade pelo fornecedor de que o laboratório atende os requisitos dos regulamentos. Esta Declaração da conformidade é feita através de uma carta ao organismo

certificador, enviada junto com os relatórios trimestrais exigidos pelos regulamentos.

Apesar de utilizarem mecanismos de avaliação da conformidade, os regulamentos, na maioria das vezes, adotam nomenclaturas próprias ao invés de usar a terminologia definida nas normas. Os documentos ISO sobre a atividade de avaliação da conformidade, citados na seção 2.2, não são mencionados nos regulamentos abordados. A Figura 13 resume as atividades de avaliação da conformidade presentes nos regulamentos e descreve seu significado usando a terminologia usada pelo Inmetro, que é o organismo de coordenação da atividade de avaliação da conformidade no Brasil. Na Figura 13, a terceira parte equivale ao organismo certificador ou organismo designado por este.

Objetivo do mecanismo de avaliação da conformidade	Regulamentos		
	EPA	CARB	UE
Avaliação inicial	<u>Certificação:</u> Certificação com Ensaio de Tipo (Modelo 1)	<u>Certificação:</u> Certificação com Ensaio de Tipo (Modelo 1)	<u>Certificação:</u> Certificação com Ensaio de Tipo e Avaliação e Aprovação do Sistema de Gestão do fabricante (Modelo 1 + Modelo 6)
Acompanhamento e controle	<u>SEA:</u> Ensaio de amostras retiradas no fabricante e auditoria do sistema de gestão do fabricante (realizado por terceira parte)	<u>CTP:</u> Ensaio de amostras retiradas no fabricante (realizado por terceira parte)	<u>COP:</u> Inspeção – avaliação do sistema de gestão da qualidade do fabricante acompanhada por ensaios quando apropriado (realizada por terceira parte utilizando as instalações do fabricante)
	<u>PLT:</u> Ensaio de amostras retiradas no fabricante (realizado por primeira parte)	<u>PLT:</u> Ensaio de amostras retiradas no fabricante (realizado por primeira parte)	

Figura 13 Mecanismos de avaliação da conformidade presentes nos regulamentos

Legenda:

SEA – Selective Enforcement Audit (Auditoria de Fiscalização Seletiva)

CTP – Compliance Test Procedure (Procedimento de Teste de Conformidade)

COP – Conformance of Production (Conformidade da Produção)

PLT – Production Line Testing (Teste de Linha de Produção)

Fonte: o autor

Os regulamentos CARB e EPA denominam os ensaios para manutenção da certificação do produto realizados pelo fabricante como Testes de Linha de Produção (*Production Line Testing* - PLT). A sigla PLT foi usada ao longo do texto por se tratar de um termo corrente entre os envolvidos. Para que um fabricante possa continuar comercializando seus produtos nos mercados regulamentados, estes ensaios devem ser realizados de acordo com os procedimentos e

utilizando os equipamentos descritos nos regulamentos e seus resultados não devem indicar não conformidades.

Nesta seção, serão estudados os requisitos dos regulamentos que têm por objetivo o controle e acompanhamento da produção realizada por primeira parte, ou seja, os requisitos do PLT.

A sistemática proposta para implantação do programa de PLT inicia com o estudo dos requisitos dos regulamentos, de forma a organizá-los com base no conhecimento do grupo de trabalho. Este estudo equivale à segunda etapa da abordagem de Pizzolato et al. (2005), apresentada na seção 2.4. A partir da organização dos requisitos, foi criada uma estrutura, que foi usada como base para o planejamento da implantação.

O grupo de trabalho foi formado pelo gerente da Engenharia de Produto, pelo supervisor do Laboratório de Emissões e por um analista de produto. O gerente da Engenharia de Produto é responsável pela avaliação e aprovação da entrada em série de componentes e produtos na unidade da pesquisa-ação e já foi responsável pelo processo de PLT em outra planta da empresa. O supervisor do Laboratório de Emissões é responsável pelo planejamento e controle das atividades realizadas no laboratório. O analista de produto é responsável pelo planejamento e avaliação de testes de emissões e pela programação de equipamentos do laboratório.

Os equipamentos e procedimentos a serem usados no PLT são especificados nos regulamentos. A adequação de um laboratório para realização de PLT envolve diversas atividades, que vão da aquisição de equipamentos e padrões de calibração, à elaboração de procedimentos e documentação, seguida do treinamento dos envolvidos.

O trabalho de levantamento dos requisitos iniciou com uma análise dos textos dos regulamentos. Nesta análise, foram usadas planilhas eletrônicas para organizar os requisitos, auxiliando o entendimento da estrutura de cada texto. Cada item identificado foi disposto em uma linha, usando as colunas para explicitar as relações de subordinação entre os itens. O principal atributo das planilhas eletrônicas, que facilitou este trabalho, foi a possibilidade de inserir linhas entre itens existentes, já que a ordem de aparecimento dos itens nos textos não é linear.

A partir da análise dos textos, se identificou o da EPA como o de leitura mais amigável, com um texto contínuo e completo, com seções graficamente bem delimitadas. Os textos da

CARB e UE exigem a consulta a textos separados, versões antigas, anexos ou apêndices, que podem confundir o leitor que está procurando se ambientar com o assunto. Assim, iniciou-se o estudo pelo regulamento da EPA.

O regulamento da EPA dedica uma subparte inteira ao PLT, onde são definidos o processo de amostragem de motores e os critérios de conformidade, além de referenciar outras duas subpartes, que tratam de equipamentos e procedimentos de teste. Conhecida esta estrutura, o regulamento EPA foi lido em detalhe, possibilitando conhecer as atividades necessárias à realização do PLT. Apesar de ser o texto mais amigável para iniciantes, foi possível identificar no texto do regulamento EPA as seguintes características que dificultam o entendimento e o levantamento dos requisitos para implantação:

- a) a seqüência das seções dentro das subpartes não segue uma lógica que auxilie a implantação;
- b) informações importantes sobre um único assunto são divididas em diferentes seções;
- c) a mesma informação é repetida em diferentes seções;
- d) há especificações conflitantes dentro do mesmo regulamento.

Devido a estas características, surgiu a necessidade da criação de uma estrutura que permitisse agrupar os itens de acordo com critérios que facilitassem o planejamento da implantação. A criação desta estrutura, mostrada na Figura 14, só foi possível após conhecer as atividades necessárias para realização do PLT, através da leitura cuidadosa do regulamento EPA.

Como o objetivo da estrutura é facilitar a implantação, o primeiro critério usado na sua elaboração foi a relação de dependência entre os requisitos, do ponto de vista da implantação, ou seja, a seqüência com que os assuntos precisavam ser tratados para garantir a implantação. Assim foram idealizadas quatro classes de requisitos: a) Equipamentos de teste; b) Materiais de referência; c) Controle de sistemas de medição; e d) Procedimentos de teste. As classes Equipamentos de teste, Materiais de referência e Controle de sistemas de medição, por exemplo, que podem envolver aquisições críticas quanto ao prazo, devem ser tratadas antes das outras classes.

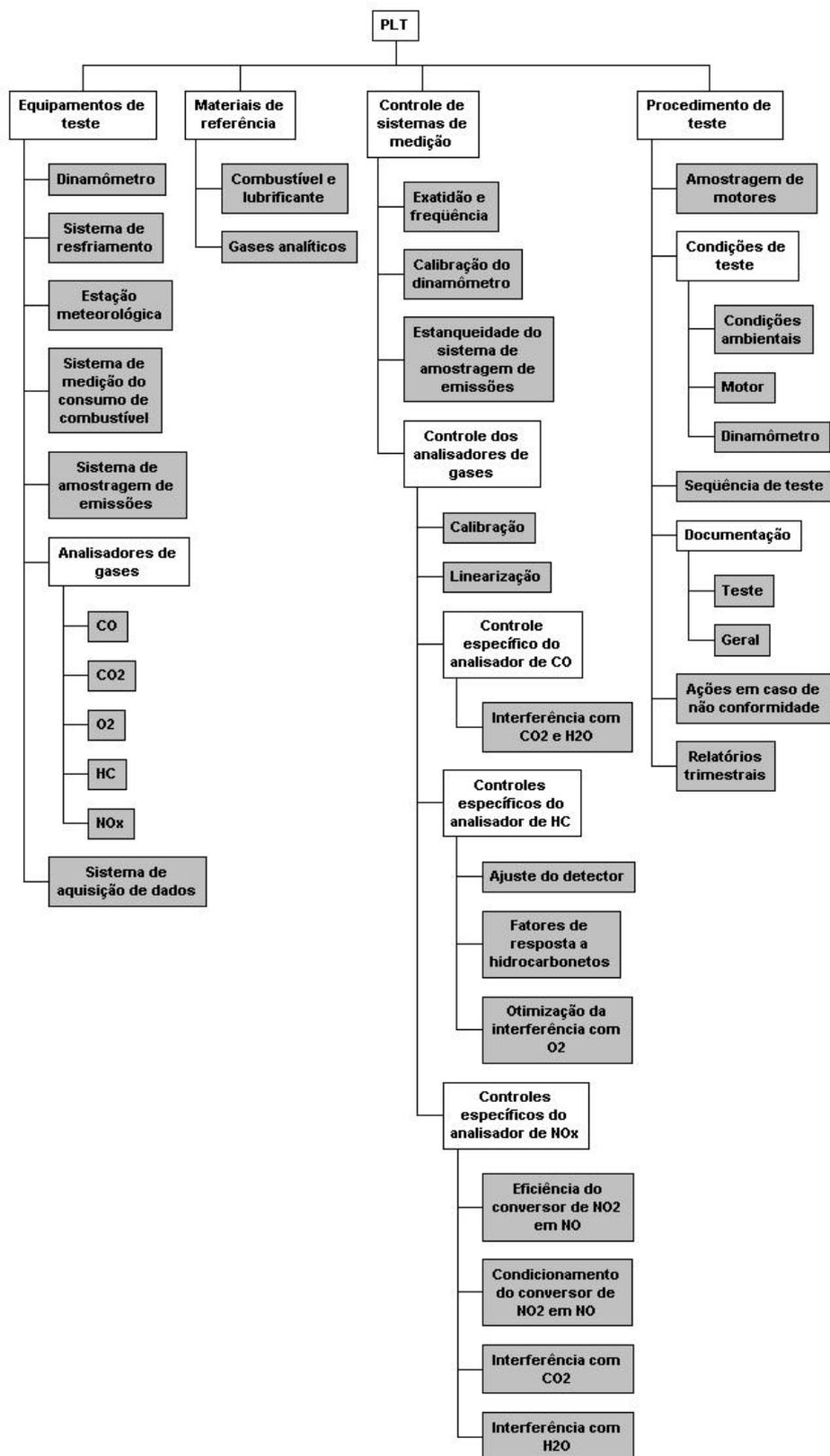


Figura 14 Estrutura sugerida para planejamento da implantação do PLT

O segundo critério foi a ordem cronológica de execução das atividades quando o sistema estiver em operação. Assim, a classe Controle de sistemas de medição, cujas atividades devem ser realizadas mensalmente, antes da realização do teste, aparece antes da classe Procedimento de teste. Os itens dentro de cada classe, quando possível, também foram ordenados usando como critério a ordem cronológica, como por exemplo, na classe Procedimento de teste, onde o item amostragem de motores marca o início de cada teste e a documentação, o fim.

Neste momento a estrutura foi desdobrada até um nível que facilitasse a posterior implantação, identificando as atividades que devem ser entregues para que a implantação seja considerada concluída (caixas em cinza).

Completada a elaboração da estrutura com base no texto da EPA, passou-se ao estudo dos regulamentos remanescentes para verificar a possibilidade de usar esta estrutura para organização dos requisitos dos três regulamentos. A parte do texto da CARB que define a amostragem de motores e a avaliação dos resultados do PLT é similar ao da EPA. As subpartes da EPA que definem equipamentos e procedimentos para PLT foram incorporadas por referência pela CARB, com pequenas modificações.

O texto da UE declara explicitamente que está alinhado com a legislação norte-americana correspondente, com o objetivo de evitar barreiras técnicas. O texto atual da UE é uma revisão, que traz somente as adições e modificações, obrigando a consulta do texto original. Além disso, o texto da UE é organizado em anexos e apêndices, de forma não linear, o que dificulta sua leitura. Para facilitar sua consulta, elaborou-se um sumário dos textos original e revisado, explicitando o que é válido em cada um. Estes sumários podem ser vistos no Apêndice C.

Portanto, apesar de organizados de formas diferentes, os textos possuem uma origem comum, que são os regulamentos de controle de emissões dos EUA, o que possibilitou o uso da estrutura mostrada na Figura 14 para organizar seus requisitos. Esta estrutura serviu de base para construção de uma matriz de comparação dos requisitos (MCR), usada para fazer a correspondência entre as seções e parágrafos dos regulamentos. Esta matriz, mostrada parcialmente na Tabela 4, foi baseada na idéia da matriz de correspondência dos requisitos de normas automotivas, apresentada por Haro (2001), e tem como objetivo facilitar a comparação entre os requisitos e identificação de eventuais conflitos. A matriz completa encontra-se no Apêndice G.

Na primeira coluna da matriz estão os requisitos dos regulamentos, organizados de acordo com a estrutura criada. Para alguns destes requisitos, houve a necessidade de desdobrá-los até um nível que permitisse a comparação entre as seções dos regulamentos. A primeira linha das demais colunas identifica as instituições e os títulos dos regulamentos. As demais linhas destas colunas trazem a numeração das seções que tratam do requisito identificado na primeira coluna nos respectivos regulamentos.

Para realizar o preenchimento da matriz se procedeu a leitura dos regulamentos, um de cada vez, do início ao fim, distribuindo suas seções nas respectivas linhas. O primeiro regulamento a passar por este processo foi o EPA. Simultaneamente ao preenchimento da matriz, foi realizado o desdobramento de alguns itens, na medida em que cada seção do texto precisava ser alocada, buscando deixar claros os limites de cada item, facilitar a comparação dos requisitos e agilizar a localização do texto.

Este processo permitiu também identificar conflitos entre requisitos do mesmo regulamento, que foram solucionados através de discussão com colegas com experiência na execução de PLT em outras unidades do grupo. Quando não existir a possibilidade de consultar pessoal com experiência em PLT, ou estes não forem capazes de solucionar estas inconsistências, as próprias agências devem ser consultadas.

Ao repetir o processo para os outros dois regulamentos, as seções cujas exigências divergiam da EPA foram identificadas e detalhadas em notas de rodapé. Como o processo de leitura e distribuição das seções na matriz foi realizado pelo mesmo indivíduo, que devido ao estudo aprofundado do regulamento EPA conhecia suas seções em detalhe, a identificação das diferenças ao ler os demais regulamentos foi automática. Em caso de dúvida, recorreu-se ao texto da EPA para confirmar a similaridade ou divergência. Assim, as diferenças entre as exigências dos regulamentos foram levantadas.

Alguns itens da estrutura e da matriz foram criados somente com o objetivo de agrupar requisitos relacionados, porém não possuem seções equivalentes nos regulamentos e, portanto, foram deixadas vazias as três células da linha correspondente. No caso de uma ou duas células vazias em uma linha, significa que o regulamento cuja célula está vazia não aborda o respectivo item.

Na quinta linha da matriz, por exemplo, o requisito abordado é o Sistema de resfriamento do motor. No regulamento EPA este requisito é tratado nas seções 90.307 e 90.404(c)(2). Como a CARB adotou esta seção por referência, os números das seções são os mesmos, porém, uma nota de rodapé descreve uma diferença em relação ao texto da EPA. Este requisito é tratado na UE em seu Anexo IV no item 2.4 e seu texto é similar à exigência da EPA.

Tabela 4 Matriz de comparação dos requisitos dos regulamentos

Itens dos Regulamentos	EPA/40 CFR 90	CARB/13 CCR	UE/Diretiva 2002/88/EC
PLT	Subparte H	2407(c) e (d)	I - 5.
A. Equipamentos de teste	Subparte D	2403(d)	VI
1. Dinamômetro	90.305	90.305	IV - App 1 - 1.1
2. Sistema de resfriamento do motor	90.307; 90.404(c)(2)	90.307 <sup>(1)</sup> ; 90.404(c)(2)	IV - 2.4
3. Estação meteorológica			
(a) Temperatura	90.309	90.309	IV - App. 1 - 1.3
(b) Umidade	90.310	90.310	IV - App. 1 - 1.3
4. Sistema de medição do consumo de combustível	90.417	90.417	IV - App 1 - 1.2 e 1.3
5. Sistema de amostragem de emissões	90.304(b); 90.414(a), (f), (g) e (h)	90.304(b); 90.414(a), (f), (g) e (h)	IV - App 1 - 1.; VI - 1.1; IV - App.1 - 1.4.4
(a) Componentes aquecidos	90.327(a)	90.327(a)	VI - Fig. 2
(b) Condensador	90.327(b)	90.327(b)	VI - Fig. 2 - B
(c) Sonda	90.414(b)	90.414(b)	VI - Fig. 2 - SP1
(d) Linha de transferência	90.414(d); 90.415	90.414(d); 90.415	VI - Fig. 2 - HSL1, HSL2 e SL
(e) Filtro aquecido	90.415	90.415	VI - Fig. 2 - F1 e F2
(f) Secagem da amostra	90.313(e)	90.313(e)	IV - App 1 - 1.4.2; VI - Fig. 2 - B
(g) Descarte	90.414(e)	90.414(e)	

(1) É necessário demonstrar que o resfriamento suplementar resultante do uso de ventiladores externos deve ser representativo da operação em uso.

Fonte: o autor

Esta matriz foi usada como base para o levantamento das ações necessárias para implantação do PLT e para elaboração dos procedimentos, garantindo que para cada requisito listado na coluna da esquerda, as exigências dos três regulamentos fossem observadas. A estrutura proposta para organização dos requisitos pode ser adotada por aqueles que necessitem implantar um sistema para atender os regulamentos abordados no trabalho. A MCR pode ser usada como guia rápido para consulta no dia-a-dia do laboratório, permitindo localizar rapidamente o texto relativo a um determinado requisito.

### 3.3 LEVANTAMENTO DAS AÇÕES NECESSÁRIAS PARA IMPLANTAÇÃO DO PLT

Esta seção tem por objetivo explicitar o raciocínio usado na avaliação dos requisitos dos regulamentos quanto ao PLT e das relações entre eles e não pretende esgotar as avaliações dos requisitos apresentados nos exemplos. O resultado destas avaliações é o levantamento das ações que precisam ser realizadas para garantir a implantação do PLT.

A avaliação dos requisitos para levantamento das ações é similar à etapa de definição das ações a serem implantadas, da abordagem de Pizzolato et al. (2005). Esta etapa também tem semelhanças com a fase de avaliação da discrepância entre os procedimentos existentes e os exigidos pelo sistema a ser implantado (diagnóstico), das abordagens de Bhuiyan a Alam (2005) e Fuentes et al. (2000), apresentadas na seção 2.4.

A matriz de comparação dos requisitos dos regulamentos, mostrada parcialmente na Tabela 4 e integralmente no Apêndice G, traz todos os itens que precisam ser atendidos para que o PLT seja realizado em conformidade. Esta matriz serviu de base para esta seção, que apresenta os métodos utilizados no levantamento das ações necessárias para operacionalizar o PLT. No capítulo 4 são descritos os detalhes da execução destas ações na organização.

Na MCR os itens foram desdobrados com o objetivo de comparar as exigências dos três regulamentos e identificar possíveis diferenças. Para a avaliação das exigências, verificou-se que os níveis menos desdobrados da estrutura de planejamento da implantação são mais adequados. Porém, destaca-se que isto só pode ser percebido devido ao desdobramento detalhado realizado durante o preenchimento da matriz.

A avaliação dos requisitos consiste em apurar as **entradas** necessárias, estudar suas exigências e relações, resultando nas **saídas**, que são as ações que conduzem para o atendimento dos requisitos. As entradas são informações necessárias para realização da avaliação dos requisitos, enquanto as saídas são os produtos desta avaliação. O levantamento das entradas deve ser feito de forma iterativa. Conforme se avança no estudo dos requisitos dos regulamentos, surge a necessidade de novas entradas para se produzir as saídas. De acordo com características específicas de cada classe de requisitos, destacam-se como possíveis elementos relacionados à avaliação dos requisitos as seguintes:

## a) entradas,

- seções dos textos associadas ao requisito analisado;
- saídas da avaliação de outros requisitos da matriz;
- especificações e resultados de ensaios do produto;
- realimentação das saídas da própria avaliação;

## b) saídas,

- discrepância entre as características exigidas pelo regulamento e as presentes nos equipamentos existentes no laboratório;
- realização de ensaios para verificar características do sistema existente;
- especificações para aquisição ou alteração de equipamentos;
- instalação e programação de equipamentos;
- procedimentos de operação, manutenção e calibração dos equipamentos;
- procedimentos de execução dos testes;
- documentos para registro do controle de sistemas de medição;
- modelos de relatórios de teste.

A Figura 15 mostra o esquema da avaliação de um requisito qualquer. Foi possível identificar semelhanças entre as entradas e saídas das avaliações de requisitos da mesma classe, permitindo a criação de listas de elementos comuns para cada uma delas, com exceção da classe Procedimento de teste. Na seqüência são apresentados as listas de elementos comuns e exemplos de avaliações para cada uma das classes de requisitos. Os exemplos permitem visualizar algumas das relações de dependência existentes entre requisitos dos regulamentos, muitas delas entre requisitos de classes diferentes.

As avaliações de alguns requisitos puderam ser realizadas com base exclusivamente no estudo dos regulamentos, porém há requisitos para os quais a necessidade de determinadas entradas e saídas só foi percebida durante a implantação. Portanto, as listas de elementos puderam auxiliar na avaliação dos requisitos, porém é importante lembrar que este é um processo iterativo, que não termina na fase de levantamento das ações.

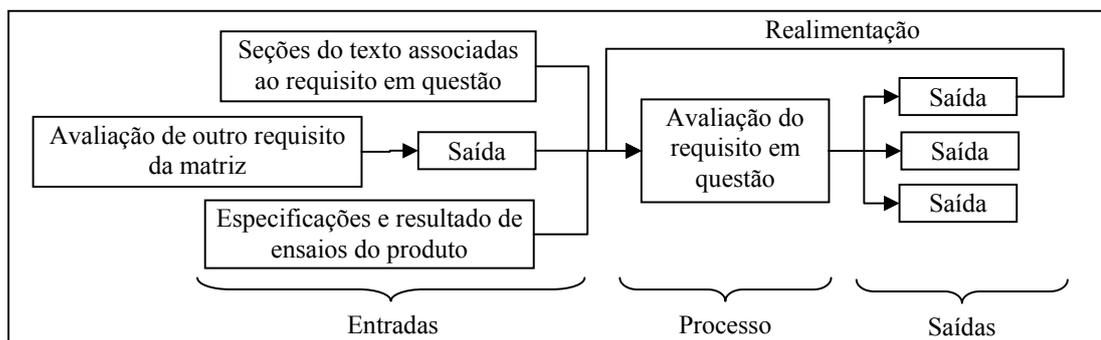


Figura 15 Esquema da avaliação de um requisito

Sintetizando, um esquema da sistemática proposta para implantação do PLT, apresentado nesta seção e na anterior, é mostrado na Figura 16. O ponto de partida da sistemática é o texto dos regulamentos, que foram estudados com o objetivo de entender suas estruturas. Conhecidas as estruturas decidiu-se tomar o texto do regulamento EPA como base para elaborar uma nova estrutura que facilitasse a implantação.

Os requisitos dos três regulamentos foram comparados em uma matriz, permitindo identificar os casos mais exigentes e eventuais conflitos. A avaliação dos requisitos que devem ser adequados, considerando suas relações com outros requisitos e com a situação existente permitiu levantar as atividades a serem realizadas para implantar o PLT.

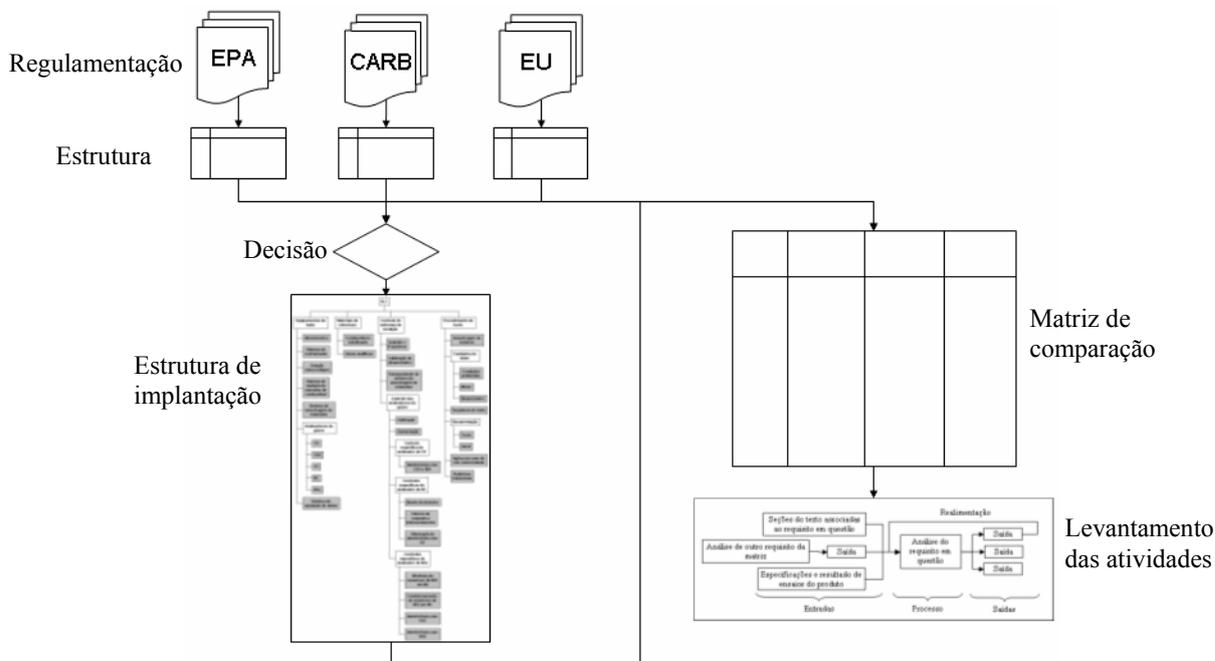


Figura 16 Sistemática proposta para implantação do PLT

### 3.3.1 EQUIPAMENTOS DE TESTE

Os requisitos da classe Equipamentos de teste, necessários para realização do PLT, são os seguintes: dinamômetro; sistema de resfriamento do motor; estação meteorológica; medição de vazão de combustível; amostragem de emissões; analisadores de gases e aquisição de dados. Na avaliação de cada requisito citado pode-se encontrar entre suas entradas os seguintes elementos:

- a) textos dos regulamentos;
- b) resultados de testes do desenvolvimento e certificação do motor, como valores medidos de potência, rotação, consumo de combustível e concentração dos poluentes nas emissões;
- c) requisitos da classe Procedimentos de teste, como os modos de operação e as especificações para leitura das respostas dos instrumentos, cálculo da média e registro dos dados;
- d) saídas da própria avaliação, que a realimentam, entre elas a discrepância entre as características exigidas e as presentes nos equipamentos existentes; e resultados de ensaios para verificar se os equipamentos existentes atendem as exigências.

Entre as saídas das avaliações dos requisitos relacionadas a equipamentos podem estar os seguintes elementos:

- a) ensaios realizados nos equipamentos de teste existentes para verificar o atendimento de requisitos;
- b) especificações para aquisição ou alteração de equipamentos, caso os equipamentos existentes não atendam os requisitos;
- c) procedimentos de operação e manutenção de equipamentos.

A avaliação dos requisitos do analisador de NO<sub>x</sub> será mostrada como exemplo da classe Equipamentos de teste, e pode ser vista na Figura 17. Nesta pesquisa-ação o laboratório para realização do PLT já existia, e assim esta avaliação foi uma comparação das características do equipamento existente com as exigidas pelos regulamentos.

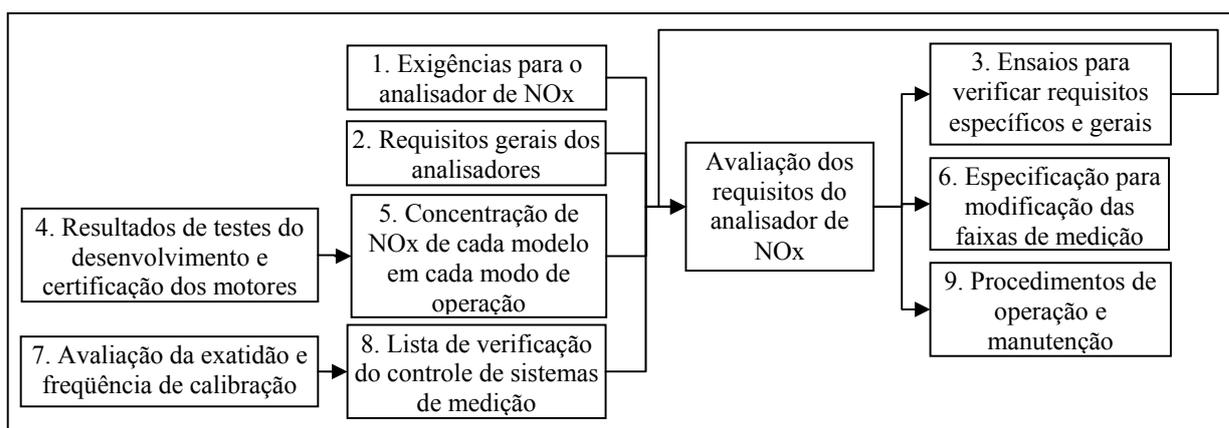


Figura 17 Avaliação do requisito analisador de NOx

Entre as **exigências para o analisador de NOx (1)** estão o princípio de medição utilizado e a presença de um conversor de NO<sub>2</sub> em NO, ambos atendidos pelo equipamento existente no laboratório. Para verificar a conformidade com outras exigências específicas, como a eficiência do conversor e a interferência com CO<sub>2</sub> e água; e com **requisitos gerais dos analisadores (2)**, como repetitividade, ruído e estabilidade dos ajustes do zero e do fundo de escala, o equipamento existente passou por **ensaios (3)**.

O resultado destes ensaios realimentou a avaliação e define a possível necessidade de aquisição de um novo analisador, que neste caso não foi necessária. A partir do cruzamento entre **requisitos gerais dos analisadores (2)** quanto à faixa de operação e as **concentrações de NOx de cada modelo de motor em cada modo de operação (5)**, que são **resultados dos testes do desenvolvimento e certificação dos motores (4)**, foi definida a necessidade e a **especificação para modificação das faixas de medição (6)**.

A **lista de verificação do controle de sistemas de medição (8)**, que é um resultado da **avaliação da exatidão e frequência da calibração (7)**, deve ser considerada caso seja necessário especificar a aquisição dos analisadores. Estes podem ser adquiridos individualmente, de diferentes fabricantes, com operação manual ou na forma de uma bancada, com todos os analisadores integrados e um sistema de controle computadorizado, capaz de realizar calibrações de forma automática. O sistema existente no laboratório é uma bancada que contém todos os analisadores de gases necessários e permite a realização de ajuste automático do zero e do fundo de escala.

Para que o sistema possa operar com alta produtividade após sua implantação, é necessário que os equipamentos possam ser operados de forma correta e que não ocorram paradas não programadas. Depois do sistema implantado, é necessário realizar manutenções preventivas periódicas para manter as condições de operação. Para tanto devem ser elaborados **procedimentos de operação e manutenção (9)** do equipamento.

### 3.3.2 MATERIAIS DE REFERÊNCIA

O Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia (VIM) define um material de referência como: “Material ou substância que tem um ou mais valores de propriedades, que são suficientemente homogêneos, e bem estabelecidos para ser usado na calibração de um aparelho, na avaliação de um método de medição ou atribuição de valores a materiais” (INMETRO, 2005, p. 58).

Quando um material de referência é acompanhado de um certificado, com rastreabilidade e incerteza estabelecidos, trata-se de um material de referência certificado (MRC). Pizzolato (2006) fala da importância da produção e certificação dos materiais de referência, e apresenta o programa de materiais de referência certificados do NIST (National Institute of Standards and Technology) para gases, estabelecido em parceria com a EPA.

Na classe de requisitos Materiais de referência estão o combustível para operação do motor e os gases analíticos usados para calibração, verificação e operação dos analisadores de gases. Os gases analíticos para calibração dos analisadores de gases devem ter rastreabilidade ao NIST e, portanto, são MRC's. Entre as entradas da avaliação de um material de referência podem estar:

- a) textos dos regulamentos;
- b) saídas de avaliações da classe Equipamentos de teste, como as especificações dos analisadores de gases e suas faixas de medição;
- c) saídas de avaliações da classe Controle de sistemas de medição, como as especificações dos pontos para calibração das faixas de medição dos analisadores e do equipamento usado para produzir tais concentrações.

As saídas das avaliações dos materiais de referência podem ser:

- a) lista de materiais, com suas especificações e exigências quanto à composição, pureza e rastreabilidade;
- b) procedimento de documentação de certificados, para garantir a rastreabilidade aos materiais de referência usados em cada teste, calibração ou verificação;
- c) procedimento de manuseio dos materiais e controle de nível e de estoque.

Como exemplo da classe Materiais de referência é mostrado a avaliação dos requisitos dos gases analíticos, que pode ser vista na Figura 18.

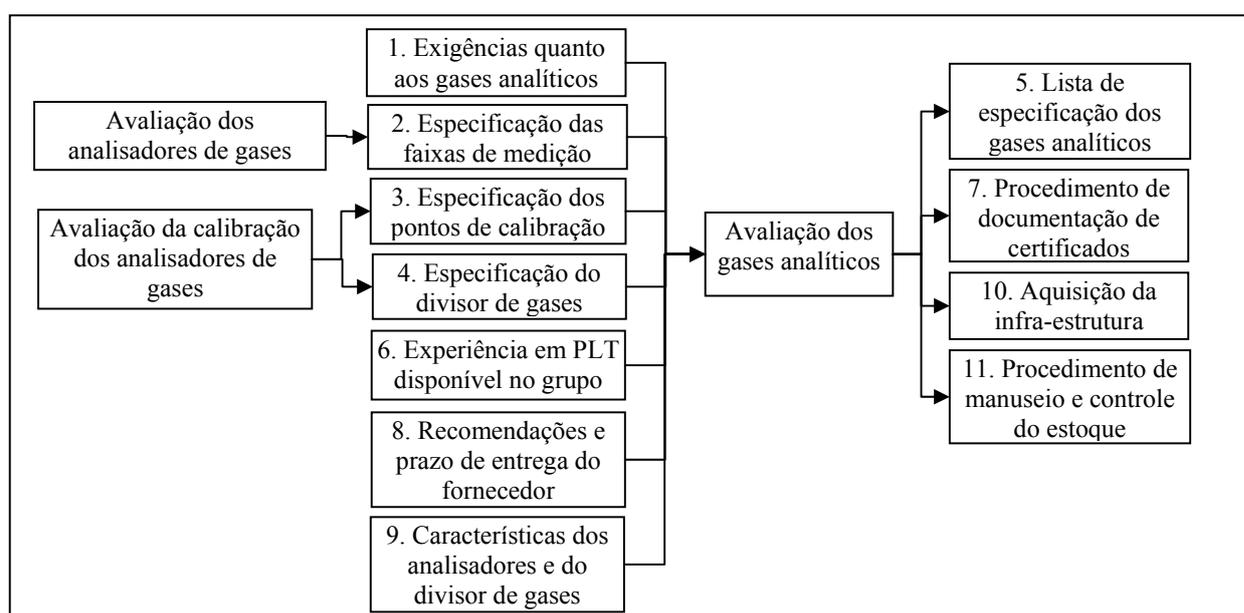


Figura 18 Avaliação do requisito gases analíticos

Entre as **exigências quanto aos gases analíticos (1)** estão as especificações quanto a composição, pureza, rastreabilidade e exatidão de todos os gases necessários para operação, calibração e verificação dos analisadores. Combinando estas exigências com as **especificações das faixas de medição (2)** dos analisadores, a **especificação dos pontos de calibração (3)** e a **especificação do divisor de gases (4)**, é possível gerar a **lista de especificação dos gases analíticos (5)**.

A partir da **experiência em PLT disponível no grupo (6)**, sabe-se que os gases utilizados em calibrações e verificações devem ser rastreáveis, portanto é importante criar **procedimentos de documentação de certificados (7)**.

As **recomendações e prazo de entrega do fornecedor (8)** combinadas com as **características dos analisadores e do divisor de gases (9)**, como as pressões de trabalho serviram de base para a **aquisição da infra-estrutura (10)**, como reguladores de pressão para os cilindros e instalações para armazenamento dos cilindros. Os manômetros dos reguladores de pressão devem permitir a leitura da pressão de trabalho com exatidão. As **recomendações e prazo de entrega do fornecedor (8)** precisam ser considerados na elaboração do **procedimento de manuseio e controle de estoque (11)**.

### 3.3.3 CONTROLE DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO

A classe Controle de sistemas de medição visa assegurar a exatidão das medições realizadas, através de calibrações e verificações. Segundo Inmetro (2005), a calibração de um instrumento de medição equivale a um conjunto de operações para estabelecer a relação entre os valores indicados por este instrumento e o valor correspondente estabelecido por padrões. Entre as entradas das avaliações dos requisitos desta classe encontram-se:

- a) textos dos regulamentos;
- b) saídas de avaliações da classe Equipamentos de teste, como suas especificações;
- c) saídas de avaliações da classe Materiais de referência, como a lista de gases analíticos.

Entre os elementos que podem estar entre as saídas das avaliações de requisitos da classe Controle de sistemas de medição estão:

- a) especificação para aquisição de equipamentos;
- b) ensaios;
- c) procedimentos de execução do controle de sistemas de medição;
- d) protocolos que comprovam a realização do controle e seus resultados;
- e) contratação de terceiros para realização de calibrações.

A avaliação do requisito Verificação da eficiência do conversor de  $\text{NO}_2$  em  $\text{NO}$ , presente no analisador de  $\text{NO}_x$ , como visto na seção 3.3.1, é apresentada como exemplo desta classe, mostrado na Figura 19.

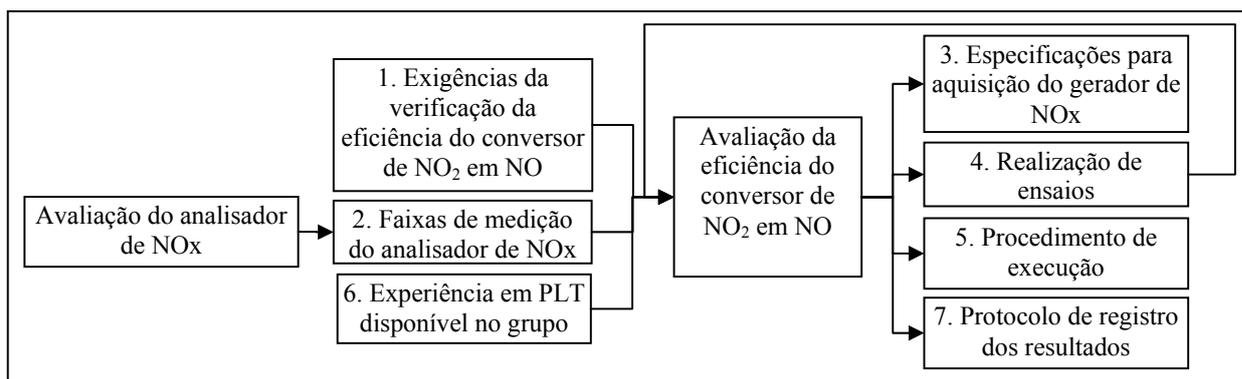


Figura 19 Avaliação do requisito verificação da eficiência do conversor de NO<sub>2</sub> em NO

O analisador de NO<sub>x</sub> deve possuir um conversor de NO<sub>2</sub> em NO, pois o princípio de medição utilizado só é capaz de detectar NO, daí a importância de verificar a taxa de conversão. O processo de verificação da eficiência do conversor está descrito em detalhe nos regulamentos, onde fica explícita a necessidade de um gerador de NO<sub>x</sub> para sua realização. Combinando as **exigências da verificação da eficiência do conversor de NO<sub>2</sub> em NO (1)** com as **faixas de medição do analisador de NO<sub>x</sub> (2)** foram definidas as **especificações para aquisição do gerador de NO<sub>x</sub> (3)**.

Estão disponíveis no mercado equipamentos que integram diversas funções, permitindo realizar diversas verificações, como por exemplo, o equipamento que combina divisor de gases (necessário para linearização dos analisadores) e gerador de NO<sub>x</sub>. Antes de decidir quais equipamentos adquirir, deve-se listar todos os equipamentos necessários e consultar os fornecedores sobre as possibilidades, pois a existência destes produtos combinados não é citada nos regulamentos.

Como o processo de verificação da eficiência do conversor é complexo e novo para a equipe de trabalho, foi necessária a **realização de ensaios (4)** para visualizar a seqüência de operações e definir a concentração dos gases necessários para operação correta do gerador de NO<sub>x</sub>. Os resultados dos ensaios realimentaram a avaliação, permitindo a elaboração do **procedimento de execução (5)**.

De acordo com a **experiência em PLT disponível no grupo (6)**, sabe-se que a realização do controle de sistemas de medição deve ser comprovada e seus resultados registrados. Para este fim deve-se elaborar um **protocolo de registro dos resultados (7)**, onde devem

constar, além dos resultados, a data, o operador e os equipamentos e materiais de referência utilizados.

### 3.3.4 PROCEDIMENTO DE TESTE

Os requisitos da classe Procedimento de teste, que são os procedimentos exigidos pelos regulamentos para realização do PLT, foram divididos da seguinte forma: amostragem de motores; condições de teste; seqüência de teste; documentação; ações em caso de não conformidade; e relatórios trimestrais.

Para os requisitos desta classe não há um modelo geral das saídas que levam ao atendimento dos requisitos, portanto, cada requisito precisa ser tratado individualmente. A avaliação apresentada como exemplo para esta classe é a seqüência de teste, mostrada na Figura 20.

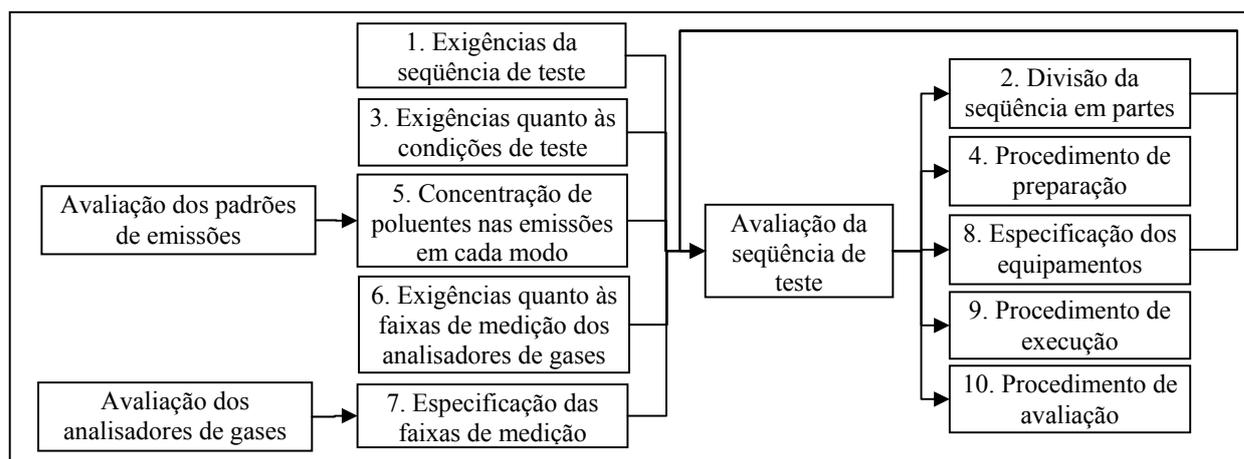


Figura 20 Avaliação do requisito seqüência de teste

Os regulamentos descrevem a seqüência de operações que deve ser realizada para executar o PLT. A partir da avaliação das **exigências da seqüência de teste (1)**, concluiu-se que a **divisão da seqüência em partes (2)** simplificaria o trabalho dos operadores e a automação do processo. A primeira parte foi chamada de preparação e engloba as operações realizadas para que o motor atenda as condições de teste e a sua montagem na bancada. A segunda parte foi considerada a execução do teste propriamente dita, iniciando com o registro dos dados gerais do teste e terminando com a gravação de todos os dados gerados. A terceira parte é a avaliação dos resultados e sobrepõe em parte a fase de execução. A avaliação do teste inicia com a análise dos

resultados do teste para decidir seu *status*, que é registrado, encerrando a fase de execução. A fase de avaliação do teste continua com a análise estatística dos resultados para verificar a conformidade da família de motor.

A **divisão da seqüência em partes (2)** realimentou a avaliação da seqüência de teste e foi combinada às **exigências quanto às condições de teste (3)** para produzir o **procedimento de preparação (4)**.

Avaliando-se as **exigências da seqüência de teste (2)** em conjunto com as **concentrações de poluentes nas emissões em cada modo (5)**, as **exigências quanto às faixas de medição dos analisadores de gases (6)** e a **especificação das faixas de medição (7)**, observou-se a necessidade de alternar entre as faixas de medição dos analisadores para cada modo exigido pelos regulamentos, resultando em **especificações dos equipamentos (8)**.

A automação da execução do teste não é uma exigência dos regulamentos, mas uma possibilidade da maioria das bancadas de teste, que pode acelerá-lo e evitar a ocorrência de erros de operação que poderiam invalidá-lo. Ao se especificar os equipamentos de teste para aquisição, principalmente o sistema de controle e a bancada de analisadores, deve-se prever a possibilidade de automação da seqüência de teste e comunicação entre estes equipamentos. Para permitir uma automação completa, deve ser possível alternar entre as faixas de medição dos analisadores e enviar gases para verificação do ajuste do zero e do fundo de escala, de forma remota.

As **especificações dos equipamentos (8)** realimentam a avaliação e são combinadas as **exigências da seqüência de teste (1)** para elaboração do **procedimento de execução (9)** e do **procedimento de avaliação (10)**.

Até este ponto a sistemática proposta abordou as exigências dos regulamentos. As próximas seções tratam da integração de processos complementares, que podem aproveitar os resultados de processos obrigatórios para promover melhoria da qualidade. Para promover melhoria da qualidade é necessário conhecer as características importantes para o usuário do produto, que é o tema da próxima seção.

### 3.4 ESTUDO DOS REQUISITOS DO USUÁRIO

Os requisitos do usuário são considerados principalmente no projeto do produto e do

processo, de forma que as características demandadas pelo cliente estejam presentes no produto e que as especificações associadas a estas características sejam atendidas na fase de produção. Porém, o conhecimento dos requisitos do usuário é importante para este trabalho, para garantir que estes sejam considerados na concepção dos processos que visam monitorar e melhorar a qualidade.

Existem métodos diretos para se identificar e avaliar as demandas do usuário, como pesquisa de mercado ou grupos focados. Neste trabalho, as demandas do usuário em relação ao motor (características da qualidade) foram estimadas de forma indireta, com base no conhecimento de pessoas internas, em uma reunião entre o analista de produto e o gerente da Engenharia de Produto, cujas funções foram descritas na seção 3.2. Nessa reunião, as características da qualidade foram levantadas a partir de uma análise baseada em seu conhecimento sobre as necessidades do usuário. As características da qualidade identificadas como mais importantes em relação aos motores foram o desempenho e a durabilidade. Além destas características da qualidade, existem outras características importantes para o usuário, como ruído e peso. Porém, estas características são definidas durante o projeto do produto, não sendo passíveis de ajuste durante a produção e, portanto, não foram consideradas neste trabalho.

Da mesma forma que as características da qualidade, também foram levantadas as variáveis de resposta capazes de traduzir as características da qualidade em variáveis mensuráveis, com base em seu conhecimento técnico. Foram identificadas como variáveis de resposta a potência do motor ( $P$  [kW]) e a temperatura do cilindro ( $T$  [°C]).

A potência do motor está relacionada ao desempenho. Para o produto em questão, a potência determina o tempo necessário para a realização de uma tarefa ou a capacidade do equipamento realizar determinada tarefa. A temperatura do cilindro está associada à durabilidade do motor. Existe um limite para a temperatura do cilindro, a partir do qual o motor é danificado permanentemente e precisa ter componentes caros, como cilindro e pistão, substituídos.

O conhecimento obtido no estudo dos requisitos dos usuários foi aplicado nas atividades de monitoramento e melhoria da qualidade, apresentadas na seção 3.5. Na mesma reunião entre analista de produto e gerente da Engenharia de Produto foram avaliadas as importâncias relativas das características da qualidade demandadas por usuários e regulamentos, e as intensidades de

relação entre características da qualidade e variáveis de resposta, com o objetivo de priorizá-las para uma otimização. O resultado desta avaliação é mostrado na seção 3.5.2.

Os comentários do gerente foram baseados em seu conhecimento e experiência sobre a adequação ao uso dos produtos. O gerente foi responsável pela área de Engenharia de Qualidade e Confiabilidade na maior planta do grupo por 10 anos, o que o qualifica para identificar e avaliar as características da qualidade e variáveis de resposta de maneira alinhada com a política e estratégia da organização.

### 3.5 MELHORIA DA QUALIDADE

Para obter produtos de qualidade é preciso garantir que eles atendam as especificações associadas aos requisitos dos regulamentos e do usuário. A finalidade desta seção é estudar e propor métodos que permitam melhorar a qualidade na fase de produção e discutir como estes métodos podem ser integrados com o PLT, se possível aproveitando seus ensaios e resultados.

#### **3.5.1 MONITORAMENTO DO PROCESSO DE AJUSTE DO MOTOR E DOS RESULTADOS DE PLT**

Conceitualmente, o processo de ajuste do motor na linha de montagem equivale ao método de controle da qualidade *on-line* de Taguchi, chamado de medição do processo e ação, visto na seção 2.5.5, pois consiste na inspeção de 100% das unidades e ajuste quando necessário. Operacionalmente, o processo de ajuste se assemelha ao controle automático do processo, na medida em que a variabilidade da variável de saída “CO [vol%]” é transferida para variável de entrada “posição do parafuso de regulagem principal”. A diferença em relação ao CAP é que a realimentação não é automática, mas realizada pelo operador.

Conforme recomendado por Box et al. (1997) e Montgomery et al. (1994), para detectar possíveis causas especiais presentes no CAP, aplica-se simultaneamente o controle estatístico do processo. A semelhança entre o processo de ajuste do motor e o CAP justifica a aplicação de controle estatístico, já que causas especiais podem interferir neste processo, como, por exemplo, desgaste dos analisadores do sistema de ajuste e desvios nos componentes do motor.

Juran e Gryna (1993) afirmam que, para atender ao propósito de prevenção, o controle

deve ser realizado o mais cedo possível. Portanto, o momento ideal para aplicação da carta de controle é imediatamente após o processo de ajuste do motor. Para atender o volume de produção há na linha de montagem três cabines de ajuste dos motores. Concluído o processo de ajuste, o operador faz uma marca, que identifica por qual cabine o motor passou. Então os motores provenientes das três cabines são reunidos na mesma linha e transportados para os processos subsequentes. Quando as saídas de várias máquinas são misturadas na mesma linha, Montgomery et al. (2004) recomendam utilizar cartas de controle para cada máquina de forma individual.

Os regulamentos EPA e CARB, por sua vez, exigem que a amostragem para PLT deva ser representativa de toda a produção. Portanto, as amostras para PLT são retiradas de forma aleatória, após a embalagem, onde não é possível identificar em qual cabine o motor foi ajustado. Este procedimento garante que a exigência destes regulamentos seja atendida, porém, ao se detectar uma condição de processo fora de controle estatístico, a identificação de causas especiais que não atuem nas 3 cabines fica dificultada. Além disso, estes regulamentos exigem a aplicação de um método estatístico aos resultados do PLT, para avaliar a conformidade da produção.

O regulamento europeu exige a existência de procedimentos de controle da qualidade do produto durante a produção, com o objetivo de avaliar continuamente a conformidade, porém não especifica os ensaios que devem ser realizados para este controle. Em acordo com o órgão de certificação da EU, determinou-se que seriam realizados anualmente ensaios usando o procedimento descrito no texto do regulamento, similar ao PLT, com uma amostra inicial de 3 motores. O critério de conformidade seria o mesmo utilizado em caso de inspeção do órgão de certificação, mostrado no Anexo F.

Buscando atender o propósito de prevenção de falhas e facilitar a identificação de causas especiais em cada cabine de ajuste, e, adicionalmente, aproveitar os resultados de PLT para monitorar o processo sem ferir as exigências dos regulamentos, propõe-se a aplicação de cartas de controle em dois pontos: a) após o processo de ajuste dos motores e b) no PLT.

Para evitar possíveis conflitos, a integração entre os métodos estatísticos de controle e os processos demandados pelos regulamentos foi prevista nesta seção. Porém, para atender o prazo definido para o início da produção, foi necessário dar prioridade à implantação de processos

obrigatórios em detrimento dos métodos estatísticos de controle. Os detalhes das atividades necessárias para implantação das cartas de controle são apresentados nas seções 4.2.1 e 4.2.2.

### 3.5.2 OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE AJUSTE DO MOTOR

Para monitorar a qualidade do processo de ajuste do motor, do qual dependem características importantes para regulamentos e clientes, foi planejada a implantação de cartas de controle. Porém, Juran e Gryna (1993) afirmam que métodos de controle detectam somente causas especiais, enquanto possíveis problemas crônicos, originados no planejamento da qualidade, continuariam acarretando perdas.

Neste trabalho, percebeu-se a oportunidade de aproveitar resultados de ensaios realizados por exigência dos regulamentos para realizar otimizações periódicas. A abordagem detalhada na seção 2.5.7 foi adaptada para este fim e sua proposta de aplicação é apresentada na seqüência. A abordagem adaptada consiste nas seguintes etapas: caracterização do problema, modelagem das variáveis de resposta (VR), e otimização.

A **caracterização do problema** consiste na definição do objetivo da otimização e na identificação das variáveis de resposta e fatores de controle. O processo de ajuste do motor usa a concentração de CO nas emissões (CO [vol%]) como fator de controle, cujas tolerâncias de especificação são definidas a partir de limites funcionais e de emissões durante o projeto do produto. O objetivo da otimização é obter o valor nominal da especificação do fator de controle que resulte na menor perda da qualidade.

Ainda na caracterização do problema, pode-se utilizar uma lógica matricial para priorizar as variáveis de resposta com base em suas importâncias e intensidades de relações, como aquelas definidas na reunião entre analista de produto e gerente da Engenharia de Produto, descrita na seção 3.4.

Na maioria dos casos de otimização disponíveis na literatura, recomenda-se executar experimentos para obter dados a serem usados na **modelagem das variáveis de resposta**. Ressalta-se que em determinadas situações ou empresas podem ser usados dados de outra natureza, como, por exemplo, resultados de ensaios realizados para controle da qualidade ou

exigidos por regulamentos.

Para **otimização** foi escolhida como função objetivo a função perda multivariada, proposta por Ribeiro e Elsayed (1995), que leva em consideração, além de desvios do alvo, as variabilidades das VR's e a sensibilidade das VR's à variações no FC. Esta função é mostrada na Equação 21. De acordo com a função perda de Taguchi, há perda da qualidade sempre que uma característica diferir de seu valor nominal. Considerando a característica concentração de CO nas emissões, um desvio para baixo diminui a vida útil do motor, devido à menor lubrificação. Um desvio para cima diminui a potência disponível e aumenta a emissão de gases poluentes e a formação de depósitos no motor, o que exigiria manutenções mais freqüentes.

A aplicação da proposta para otimização do processo de ajuste do motor na linha de montagem utilizando resultados de PLT é apresentada na seção 4.2.3.

A integração de ferramentas e métodos para melhoria da qualidade ao programa de teste de linha de produção resultou no modelo mostrado na Figura 21. Este modelo contém os processos da situação anterior à implantação (acima da linha pontilhada), descritos na seção 3.1.

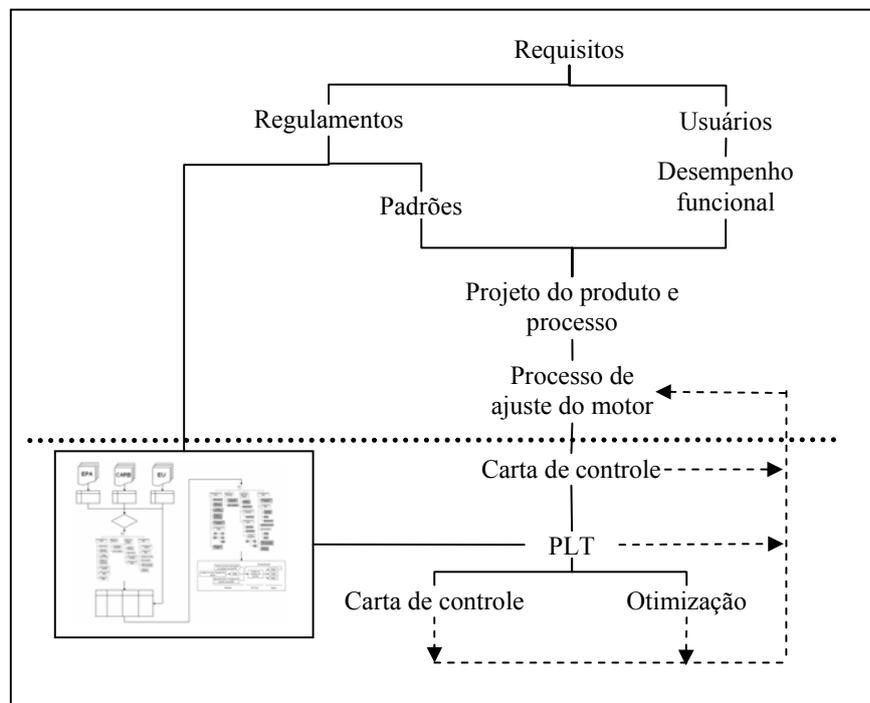


Figura 21 Integração do PLT com a melhoria da qualidade

O modelo proposto aplica a técnica da **carta de controle** imediatamente após o processo

de ajuste do motor e após o **PLT** para monitorar características da qualidade associadas a regulamentos e usuários. A **otimização** é realizada a partir de dados gerados no PLT. A linha tracejada representa um fluxo de informações e indica que todos os procesos implantados (cartas de controle, PLT e otimização) podem fornecer dados para realimentar o processo de ajuste do motor.

A próxima seção trata dos métodos utilizados para planejar e controlar a implantação do PLT integrado com a melhoria da qualidade.

### 3.6 GESTÃO DA IMPLANTAÇÃO

Nas seções anteriores, foram levantadas as ações que precisam ser realizadas para atingir os objetivos do trabalho. Nesta seção, são apresentados os métodos utilizados para planejar a realização destas ações, de forma a atender os prazos do projeto.

A empresa onde foi realizada a pesquisa-ação possui um processo de gestão de projetos bem estruturado, que utiliza ferramentas para planejamento e controle das atividades, como cronogramas e planos de ação. No planejamento da implantação da sistemática proposta, foram utilizadas técnicas de gestão de projetos apropriadas ao tamanho da tarefa, de acordo com a experiência da equipe técnica.

A partir das ações necessárias para que os requisitos dos regulamentos fossem atendidos (saídas das avaliações dos requisitos na seção 3.3), elaborou-se um cronograma, definindo as relações de dependência entre estas ações, seus responsáveis e prazos. Simultaneamente à elaboração do cronograma, foi formada a equipe de projeto, avaliando a disponibilidade e o conhecimento necessário para realização das atividades.

Durante a execução de uma ação, pode-se identificar a necessidade de desdobrá-la em tarefas menores, que levam à conclusão da atividade listada no cronograma. Para controlar a realização destas tarefas, geralmente bem específicas e de curta duração, foi usado um plano de ação. Este plano de ação consiste na ferramenta 5W1H adaptada, contendo somente os itens “o que”, “como”, “quem” e “quando”, associado a um esquema de cores para acompanhar sua situação. O plano de ação foi atualizado semanalmente em reuniões do time de projeto, sendo usado para monitorar os prazos.

Com o objetivo de cumprir o prazo de início da produção, buscou-se separar a implantação do PLT, que é um processo compulsório sem o qual a produção não poderia ser iniciada, de processos complementares, que poderiam ser implantados mais tarde sem impacto no prazo de início da produção. Assim, a implantação foi dividida em duas partes: a) implantação do PLT e b) integração do PLT com a melhoria da qualidade. Apesar da implantação ocorrer em momentos diferentes, a relação entre o PLT e os processos para monitoramento e melhoria da qualidade foram previstos nas fases de estudo dos requisitos e levantamento de atividades, visando sua integração.

Alguns requisitos dos regulamentos podem exigir decisões que influenciam as especificações de instrumentos de medição, que por sua vez determinam os padrões e equipamentos usados na sua calibração. Quando houver definições que impliquem em restrições para as atividades subsequentes, esta relação precisa ser explicitada e controlada para evitar incompatibilidades que possam gerar retrabalhos.

Um exemplo desta situação é a exigência quanto a faixas de medição dos analisadores. Os regulamentos exigem que as concentrações dos poluentes medidas no PLT estejam entre 15% e 100% da faixa de medição dos analisadores. Neste caso, o primeiro passo é determinar as concentrações possíveis de serem medidas durante o PLT, para então especificar as faixas de medição dos analisadores. As faixas de medição, por sua vez, são entradas para a definição dos gases de calibração e verificação a serem adquiridos. A concentração dos gases de calibração determina especificações de outros equipamentos, como o gerador de NO<sub>x</sub>, necessário para a verificação da eficiência do conversor de NO<sub>2</sub> em NO existente no analisador de NO<sub>x</sub>.

Ao elaborar o cronograma da implantação deve-se considerar que atividades que exigem aquisições de equipamentos e materiais podem ser críticas quanto ao prazo, devido à necessidade de importação. A importância de antecipar a definição das aquisições o máximo possível é evidente. Recomenda-se percorrer o cronograma, identificando as atividades que podem implicar em aquisições e priorizar a sua realização.

Deve-se planejar a implantação de processos que envolvem aquisições de forma que seja possível realizar testes preliminares com certa antecedência. O objetivo para esta pesquisa-ação foi a realização de testes preliminares 3 meses antes do início da produção. Assim, caso ocorressem problemas nos testes preliminares, haveria tempo para realizar ajustes, que poderiam

envolver novas aquisições ou modificações de equipamentos no fabricante. Os fabricantes de equipamentos podem estar localizados no exterior, o que exigiria a elaboração de documentação para envio e retorno do material. O suporte do departamento de comércio exterior ou de uma empresa especializada seria essencial nestes tramites, para evitar que, ao retornar, o equipamento ficasse bloqueado na alfândega por problemas de documentação.

Os procedimentos de manutenção dos equipamentos, de controle de sistemas de medição e de realização de testes só podem ser elaborados após a aquisição e instalação dos sistemas físicos, o que reforça a necessidade de antecipar a definição dos equipamentos. Os testes preliminares devem ser acompanhados pelo responsável pela elaboração dos procedimentos, não necessitando que os operadores estejam treinados, pois os procedimentos ainda podem sofrer modificações. Nos 3 meses entre os testes preliminares e o início da produção, realiza-se o treinamento do pessoal, onde os procedimentos são colocados à prova e melhorados conforme sugestão dos operadores.

A elaboração de procedimentos que só podem ser verificados após o início da produção e não envolvem aquisições, como a coleta de amostras e as ações em caso de não conformidade, não necessitam de tanta antecedência, no entanto, devem estar prontos antes do início da produção, para permitir o treinamento do pessoal.

## **4 IMPLANTAÇÃO DO PLT INTEGRADO COM A MELHORIA DA QUALIDADE**

Neste capítulo, são apresentados os detalhes da realização das ações levantadas no capítulo 3. Como apresentado anteriormente, este capítulo está dividido em Implantação do PLT e Integração do PLT com a melhoria da qualidade. A primeira parte traz as observações importantes realizadas durante a implantação de equipamentos, materiais e procedimentos para a realização de Testes de Linha de Produção, destacando particularidades associadas ao trabalho dentro da organização. Na segunda parte, são detalhados os elementos dos métodos de controle estatístico e sua implantação, bem como a otimização realizada a partir de resultados de PLT.

### **4.1 IMPLANTAÇÃO DO PLT**

A implantação do Teste de Linha de Produção envolve as ações relacionadas às quatro classes de requisitos apresentadas no capítulo 3.

#### **4.1.1 IMPLANTAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE TESTE**

A implantação dos equipamentos de teste abrangeu a aquisição e modificação de equipamentos para atendimento dos requisitos dos regulamentos e a elaboração de procedimentos de operação e manutenção, apresentados na seqüência.

##### **4.1.1.1 Aquisição e modificação de equipamentos**

Devido à burocracia envolvida no processo de aquisição dentro da organização e prevendo possíveis atrasos decorrentes de processos alfandegários e greves de órgãos governamentais envolvidos na liberação de produtos importados, as aquisições foram planejadas com antecedência.

O processo de aquisição iniciou com a solicitação de orçamentos. Para tanto foi

necessário definir as especificações dos equipamentos que se desejava adquirir. Estas especificações foram definidas com base no estudo das exigências dos regulamentos e das relações com outros equipamentos.

A compatibilidade entre os diversos equipamentos foi um ponto fundamental na solicitação de orçamentos, onde foram especificadas características como faixas de operação, pressão, vazão e temperatura de trabalho. Isto foi particularmente importante para equipamentos que trabalham com fluxos, tais como, geradores, divisores e analisadores de gases, e é ainda mais crítico quando os equipamentos são de fabricantes diferentes, porém não desprezível para equipamentos de mesmo fabricante, que podem pertencer a famílias de produto ou gerações diferentes.

Visando a automação de processos, avaliou-se a possibilidade de comunicação entre o sistema de controle e os instrumentos de medição. Quando equipamentos de fabricantes diferentes precisavam trabalhar em conjunto, foi necessário levantar junto aos fabricantes quais protocolos de comunicação estavam disponíveis.

Ao decidir sobre a aquisição de instrumentos de medição, foram considerados critérios técnicos, tais como, exatidão, confiabilidade, *know-how* do fornecedor na aplicação desejada, compatibilidade com equipamentos existentes e possibilidade de expansão. Além destes, foram considerados também critérios econômicos, como produtividade, custo de aquisição, operação e manutenção; e critérios comerciais, como assistência técnica, prazo de entrega de peças de reposição e garantia.

Equipamentos complexos podem necessitar tempos de entrega longos, portanto, ao definir o prazo da aquisição foi necessário considerar os meios de transporte disponíveis, o tempo demandado no transporte e a geração de documentação para importação. Foi previsto ainda um fator de segurança para o prazo e assim tentar compensar possíveis imprevistos, como greve de órgãos fiscalizadores.

Em paralelo ao processo de aquisição, ocorreram obras de infra-estrutura e obtenção de material para operação, essenciais para o funcionamento dos equipamentos. Os fornecedores de equipamentos complexos, como os envolvidos nesta pesquisa-ação, possuem equipes muito enxutas no Brasil, devido à baixa demanda por estes produtos, quando comparada com países

mais industrializados. Sendo assim, nem sempre há técnicos do fornecedor disponíveis para instalar o equipamento imediatamente após sua entrega e uma folga no prazo foi prevista em decorrência disto.

Nos casos em que foi constatada a necessidade de modificações em equipamentos existentes, aproveitou-se as manutenções periódicas, realizadas por técnicos dos fabricantes, para sua implantação. A possibilidade e a efetividade das modificações foram discutidas previamente com o fabricante do equipamento. A vantagem de realizar a modificação juntamente com a manutenção é a economia dos custos associados à visita do técnico e à verificação do equipamento, que ocorre obrigatoriamente após manutenções ou modificações, e desta forma foi realizada uma única vez. Além disso, também evita-se gastos com transporte dos equipamentos e a documentação associada, caso o equipamento fosse enviado para o fabricante.

Todas as atividades necessárias para modificação de equipamentos, que estavam fora do escopo da manutenção, foram acertadas de antemão com os fornecedores. Neste acerto foram definidos o tempo e os recursos necessários para a realização da modificação, bem como o custo associado.

#### **4.1.1.2 Elaboração de procedimentos de operação e manutenção**

Considerou-se a instalação do equipamento como o momento ideal para aprender sobre sua operação e a manutenção preventiva necessária, aproveitando a presença *in loco* de técnicos do fornecedor. A elaboração de procedimentos de operação e manutenção ocorreu em paralelo à instalação.

No caso de equipamentos já em utilização, para os quais não havia procedimentos estabelecidos, aproveitou-se a manutenção periódica do fabricante para elaborar e verificar procedimentos de manutenção preventiva, a serem realizados pelo operador da bancada de teste, discutindo com o técnico do fabricante quanto à frequência de realização.

Os manuais de instrução dos equipamentos foram usados como fonte de consulta na elaboração dos procedimentos, porém, considerou-se importante neste processo aproveitar a oportunidade do contato pessoal com técnicos com vasta experiência sobre o equipamento. O

conhecimento adquirido neste contato foi documentado de forma detalhada para facilitar futuras consultas. Nesta documentação utilizou-se fotografias com legendas elucidativas.

Apesar de não ser exigência dos regulamentos, foi elaborado um plano de manutenção preventiva. Um sistema para controle da realização das manutenções preventivas foi implantado, agrupando os procedimentos de acordo com a frequência exigida e criando listas de verificação para manutenções semanal, mensal, semestral e anual. Com isto a sensação de confiança nos equipamentos aumentou, enquanto o risco de invalidação de testes por falha nos equipamentos foi reduzido. Também foi reduzido o risco de paradas não programadas dos equipamentos, que acarretariam o bloqueio de produtos acabados por falta de teste de linha de produção.

#### **4.1.2 AQUISIÇÃO DE MATERIAIS DE REFERÊNCIA**

As exigências dos regulamentos quanto aos materiais de referência usados na calibração dos equipamentos e na operação do motor são bastante rigorosas. As próximas sessões abordam a aquisição, documentação e manuseio destes materiais.

##### **4.1.2.1 Aquisição de materiais de referência**

As especificações dos gases de calibração dos analisadores foram levantadas a partir da avaliação dos seus requisitos, das especificações dos equipamentos e dos requisitos do controle de sistemas de medição. A lista de especificação dos gases analíticos elaborada para este trabalho pode ser vista no Apêndice A na Tabela 16. A busca por um fornecedor capaz de atender estas exigências é descrita na seqüência.

Primeiramente, as especificações dos gases de calibração foram submetidas aos possíveis fornecedores para avaliação da viabilidade técnica das especificações, do processo de produção e da rastreabilidade desejados. O Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia (VIM) define rastreabilidade como: “Propriedade do resultado de uma medição ou do valor de um padrão estar relacionado a referências estabelecidas, geralmente a padrões nacionais ou internacionais, através de uma cadeia contínua de comparações, todas tendo incertezas estabelecidas” (INMETRO, 2005, p. 57).

Os regulamentos americanos exigem que os gases de calibração sejam rastreáveis ao NIST (*National Institute of Standards and Technology*). A EPA estabeleceu protocolos que descrevem os métodos a serem utilizados por fornecedores na produção de gases de calibração. Estes protocolos fazem parte do dia-a-dia de fabricantes localizados nos EUA, porém não são citados nos regulamentos. Ao responsável pela implantação do PLT basta saber da existência destes protocolos e cobrar para que eles sejam respeitados por seus fornecedores, principalmente aqueles localizados fora dos EUA. Pizzolato (2006) apresenta alguns detalhes deste programa de MRC do NIST.

Neste caso, materiais de referência rastreáveis ao NIST são padrões de gás com incerteza conhecida em relação a padrões primários de misturas gasosas mantidas pelo NIST. Estas exigências não são comuns para os fornecedores nacionais. Portanto, foram realizadas reuniões com os fornecedores para esclarecer as necessidades e explicar que o não atendimento das exigências dos regulamentos pode ter conseqüências graves para o fabricante de motores.

As informações que devem constar no certificado dos materiais de referência também foram discutidas. O sistema de emissão de certificados do fornecedor pode ser pouco flexível, dificultando a adição das informações necessárias para atender as exigências dos regulamentos.

Constatada a viabilidade técnica, foram negociados preço e prazo de entrega dos materiais de referência em reunião entre o responsável pelo PLT, representante do departamento de compras e representante do fornecedor. Preço é crítico porque o fabricante precisa importar padrões de gás fornecidos pelo NIST para garantir a rastreabilidade. A importância quanto ao prazo de entrega é que a falta de um material de referência pode impedir a realização de PLT, bloqueando a expedição dos produtos acabados.

Os regulamentos também definem as especificações do combustível a ser utilizado no PLT. A organização da pesquisa-ação decidiu importar os combustíveis dos fornecedores que abastecem as outras unidades do grupo que já realizam PLT.

A busca pelos fornecedores de materiais de referência certificados iniciou o mais cedo possível, pois a importação de padrões pode ser lenta. Além disso, pode ser necessário desenvolver os processos de produção dos materiais de referência para atender as exigências dos

regulamentos.

Além da aquisição dos próprios materiais, foi necessário providenciar os recursos e instalações que permitissem a utilização dos materiais de referência, como reguladores de pressão, tubulações, válvulas, tanques e bombas de combustível. A especificação destas instalações levou em consideração as características dos instrumentos de medição e equipamentos de verificação, como as pressões de trabalho; e requisitos dos regulamentos, como a pressão no sistema de combustível do motor.

Quanto ao combustível, a solução adotada foi a mesma já em operação nas outras unidades. A unificação das especificações do combustível foi negociada e aceita pelas agências de regulamentação. Um combustível que atende as especificações da CARB passou a ser importado e utilizado em todos os ensaios de emissões. Para compensar a diferença na especificação do combustível, foi acertado com a EPA a adição de um valor de *offset* ao resultado de CO [g/kWh], definido a partir de ensaios realizados pela empresa onde foi realizada a pesquisa-ação.

#### **4.1.2.2 Documentação dos materiais de referência**

Em caso de uma auditoria de fiscalização das agências de regulamentação, se solicitado, deve ser possível rastrear os materiais de referência utilizados em testes ou controle de sistemas de medição, como combustível e padrões para calibração.

No caso de materiais que são consumíveis, como combustível e gases de calibração, a solução implantada foi a criação de formulários, que devem ser preenchidos para cada material que entra em utilização. No formulário, ficam registrados as datas de início e término de utilização, o número do certificado do material, a data de validade e os valores de referência.

Os formulários ficam arquivados e permitem que os materiais utilizados em qualquer processo possam ser rastreados a partir de sua data de execução, bastando compará-la com as datas de início e término de utilização. Estes formulários também facilitaram o controle da data de validade dos materiais. Em alguns casos, como apresentado na seção 4.1.3.4, optou-se por uma redundância na rastreabilidade aos materiais de referência, registrando o número do certificado ou do lote de fabricação do material no relatório de teste ou verificação. Esta

redundância visa facilitar a consulta aos documentos e assegurar a rastreabilidade em caso de falha em qualquer dos sistemas.

Os materiais de referência devem ser fornecidos com seus respectivos certificados, caso contrário, não é possível comprovar a rastreabilidade dos materiais aos padrões exigidos. Portanto, o pessoal de recebimento foi instruído a rejeitar material sem certificado e solicitar que este seja enviado o mais rápido possível. Em alguns casos, como do combustível, os dados informados no certificado são necessários para calcular o resultado do ensaio e a falta do certificado impediria sua utilização e a realização de PLT.

Os certificados de todos os materiais já utilizados ou em utilização são arquivados no laboratório e ficam disponíveis para consulta em caso de fiscalização dos órgãos de regulamentação.

#### **4.1.2.3 Procedimento de manuseio e controle do estoque**

O armazenamento e manuseio incorretos dos materiais de referência podem alterar suas características. O uso de material de referência com características fora do especificado pode acarretar erro na calibração de equipamentos, causar distúrbio no funcionamento de equipamentos de medição e influenciar o comportamento do motor medido. Portanto, elaborou-se procedimentos de manuseio dos materiais, respeitando as recomendações dos regulamentos e dos fabricantes, e treinou-se os responsáveis por estes processos.

Como a falta de um material de referência pode levar à paralisação da produção e os prazos de entrega costumam ser longos, é essencial que existam sistemas confiáveis para controle do estoque destes materiais. Nesta pesquisa-ação os materiais de referência consumíveis, como gases e combustível, foram cadastrados no sistema *Enterprise Resource Planning* (ERP) existente na empresa. Neste sistema, a compra é realizada de forma automática sempre que o estoque mínimo for atingido. O estoque mínimo foi definido levando em consideração os longos prazos de entrega para este tipo de material. O controle físico do estoque é realizado pelo pessoal do almoxarifado, que só libera a retirada do material mediante a solicitação via sistema, garantindo que não exista diferença entre as quantidades físicas e contábeis.

O controle do nível dos materiais em uso evita a invalidação de testes por falta de

material no meio de um teste e fornece dados para estimar a demanda e detectar possíveis problemas, como vazamentos ou anomalias em instrumentos de medição. A estimativa da demanda, juntamente com o prazo de entrega, alimentam o sistema de controle de estoque na determinação do estoque mínimo.

#### **4.1.3 IMPLANTAÇÃO DO CONTROLE DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO**

Visando garantir a exatidão das medições realizadas durante o PLT, os regulamentos exigem a execução de diversas verificações dos sistemas de medição. Em laboratórios sem exigências quanto a regulamentos, algumas destas verificações são executadas durante manutenções periódicas realizadas pelos fabricantes dos equipamentos. Porém, com a implantação do PLT, os regulamentos determinam que alguns destes procedimentos sejam realizados com uma frequência maior que aquela proporcionada pelas manutenções periódicas. Esta maior frequência exigiu que os operadores passassem a executar as verificações ou que prestadores de serviços fossem contratados para realizá-las.

##### **4.1.3.1 Terceirização do controle de sistemas de medição**

Para os sistemas de medição comuns a diversos laboratórios de ensaio, como os sistemas de medição de temperatura, umidade, pressão, força e frequência, existem empresas especializadas na sua calibração. Nestes casos, a prestadora de serviço de calibração possui os equipamentos necessários para sua execução e é responsável por prover a rastreabilidade aos padrões de referência exigidos.

Contudo, a bancada de teste de motores possui sistemas muito específicos e a execução de algumas calibrações exige que um funcionário capaz de operar a bancada de teste trabalhe em conjunto com o prestador de serviço. Nestes casos, elaborou-se procedimentos para treinar o pessoal e servir de referência para consulta.

As calibrações foram terceirizadas sempre que estavam disponíveis prestadores de serviço com competência técnica para realizá-las. Considerou-se os prestadores de serviço como capazes quando estes estavam certificados ou reconhecidos por organismos nacionais ou

estaduais de metrologia. Desta forma, reduziu-se investimentos em instrumentos de medição e calibrações de padrões em laboratórios externos.

Há instrumentos de medição cuja calibração precisaria ser realizada em laboratórios externos. Porém, para a frequência exigida pelos regulamentos, a calibração externa era inviável, devido ao tempo de parada e ao esforço para desmontar e remontar o sistema. Nestes casos, a opção é trocar o instrumento ou desenvolver um método de calibração que possa ser realizado no próprio laboratório. Um exemplo foi a medição de vazão, para a qual foi desenvolvido um método baseado em boas práticas de engenharia e que permitiu que sua calibração fosse realizada pelo prestador de serviço no próprio laboratório.

Quando não havia prestadores de serviço com competência técnica ou com os equipamentos necessários para realizar as verificações, desenvolveu-se o *know-how* dentro da organização e se adquiriu os equipamentos. Este foi o caso das linearizações, verificações de interferência e eficiência de componentes dos analisadores de gases. O processo de aquisição dos equipamentos usados nas verificações foi similar à aquisição de equipamentos de teste descrito na seção 4.1.1.1.

Durante a implantação do controle de sistemas de medição, ao integrar os diversos equipamentos existentes ou adquiridos, percebeu-se que, em conjunto, alguns deles não funcionavam como planejado, gerando a necessidade de modificações. Este foi o caso do divisor de gases, cuja vazão de trabalho estava muito acima daquela demandada pelos analisadores de gases. Além disso, o divisor não possuía regulador de pressão na saída, gerando alarmes quando se tentava ajustar a vazão. A solução foi modificar o divisor de gases para trabalhar com uma vazão próxima a dos analisadores e equipá-lo com um regulador que mantém a pressão na saída constante, independente da vazão.

#### **4.1.3.3 Elaboração de procedimentos para controle de sistemas de medição**

A execução de calibrações e verificações de instrumentos de medição são tarefas triviais para os técnicos dos fabricantes dos equipamentos, pois fazem parte do seu dia-a-dia. Porém, para os operadores da bancada de teste, que podem acompanhar sua execução somente na instalação e nas manutenções periódicas, geralmente semestrais ou anuais, estes processos são bastante complexos.

Da mesma forma que a elaboração de procedimentos de manutenção dos equipamentos, a elaboração de procedimentos de calibração e verificação foi feita juntamente com o técnico do fabricante, aproveitando sua visita para manutenção periódica. Realizar o procedimento com o acompanhamento de um técnico com experiência na execução das verificações, além de elucidar várias dúvidas, acelerou a aprendizagem sobre estes processos.

Neste caso, além de providenciar os recursos, foi necessário estudar previamente as exigências dos regulamentos e o funcionamento dos instrumentos de medição e dos equipamentos usados na verificação. Para compreender a verificação realizada foi necessário conhecer detalhes do funcionamento do sistema de medição e dos fenômenos nos quais se baseiam os princípios de funcionamento dos equipamentos.

Assim, as dúvidas levantadas durante este estudo puderam ser discutidas com o técnico do fabricante. O responsável pelo PLT acompanhou o técnico do fabricante na primeira realização das verificações, elaborando os procedimentos e avaliando se as exigências dos regulamentos eram atendidas.

#### **4.1.3.4 Documentação do controle de sistemas de medição**

A documentação do controle dos sistemas de medição serve ao propósito de comprovar que, na data da realização de cada PLT, os instrumentos estavam em acordo com as exigências dos regulamentos. Para tanto, foram criados relatórios específicos, que comprovam a realização de cada verificação. Nestes relatórios são registrados os resultados da verificação, os materiais de referência utilizados e os possíveis ajustes decorrentes das verificações.

Como as verificações são numerosas e possuem frequências de realização diferentes, elaborou-se uma lista de verificação com o objetivo de agilizar e garantir sua execução. Esta lista de verificação contém todas as verificações exigidas pelos regulamentos, com suas frequências, parâmetros de aceitação e observações importantes.

Para facilitar a comprovação da conformidade dos sistemas de medição, os relatórios das verificações foram arquivados organizados por mês, em meio digital, juntamente com a lista de verificação preenchida. Assim, é possível verificar, para cada mês, se todas as verificações foram realizadas. Esta forma de organizar os documentos também facilita o seu descarte quando o prazo

exigido para manter estes documentos expirar, pois todos os documentos expirados estarão no mesmo local.

Estabeleceu-se que os certificados de calibração emitidos por prestadores de serviços devem ser arquivados no laboratório, para apresentação em caso de auditoria das agências de regulamentação. Como visto na Figura 13, as agências se reservam o direito de realizar auditorias no fabricante. Porém, somente o organismo certificador designado pela UE realiza estas de forma periódica.

#### **4.1.4 IMPLANTAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE TESTE**

A maioria dos itens que compõem a classe Procedimento de teste deve ser repetida a cada PLT realizado. A alta frequência de execução e o grande número de detalhes que devem ser observados durante a realização de cada PLT justificam o esforço em automatizar estas tarefas o máximo possível.

Durante a avaliação dos requisitos da classe Procedimentos de teste, foi constatado que a divisão do teste feita pelos regulamentos poderia ser modificada para facilitar a operacionalização e automação do PLT. Esta divisão proposta para implantação é detalhada nas próximas seções e consiste das seguintes etapas: amostragem de motores, verificação das condições, preparação, execução e avaliação do teste.

##### **4.1.4.1 Amostragem de motores**

O início do PLT ocorre com a retirada de amostras da linha de montagem, de acordo com os critérios exigidos pelos regulamentos. Para operacionalizar o processo de amostragem idealizado, foi necessário o envolvimento de diversas áreas da empresa como, planejamento da produção, informática, logística, produção e qualidade.

O departamento de planejamento da produção foi orientado a manter o responsável pela realização do PLT informado sobre quando cada modelo de motor será produzido, para que este possa planejar o momento de retirar amostras com base nas exigências dos regulamentos. Para tanto, o programa de produção passou a ser enviado também ao responsável pelo PLT, além das

pessoas que recebiam o programa normalmente. Cada vez que o programa de produção for alterado, uma nova cópia é distribuída aos envolvidos.

O processo de retirada de amostras foi elaborado levando em consideração particularidades dos sistemas de controle da produção e do estoque, movimentação de materiais e controle da qualidade da organização. Os procedimentos foram elaborados em reuniões com participantes dos departamentos de produção, qualidade, logística e informática.

Na organização em questão, cada motor produzido é registrado no sistema ERP no final da linha de montagem, que controla as quantidades produzidas e permite a consulta da data de fabricação e do lote ao qual o motor pertence. Retirar um motor para teste antes deste registro geraria problemas de planejamento, pois seria necessário produzir motores adicionais para atender a ordem de produção. Por outro lado, uma vez que o motor é registrado no sistema ERP, ele precisa ser enviado junto com seu lote para o depósito, caso contrário, o lote é rejeitado por estar incompleto.

Para solucionar esta questão, o responsável por selecionar os motores para PLT dirige-se à linha de montagem e somente anota o número de série do motor a ser testado, permitindo que ele siga o fluxo normal até chegar ao depósito. Foi criada pelo departamento de informática uma transação no sistema ERP, que permite ao responsável pelo PLT informar ao departamento de logística o número de série do motor que deve ser movimentado do depósito para o laboratório.

Dependendo do resultado do PLT, podem ser necessárias ações sobre um lote de produção. Portanto, o lote ao qual pertence o motor selecionado para PLT deve ficar bloqueado para venda até que se tenha uma decisão a partir do resultado do PLT. O departamento de qualidade adicionou o PLT ao plano de inspeção no sistema ERP, assim, um lote de produção só é liberado para venda quando o responsável pelo PLT registrar um parecer positivo. Caso o resultado do PLT indique a necessidade de ações, o responsável pelo PLT as informa também via ERP.

#### **4.1.4.2 Verificação das condições de teste**

Os regulamentos determinam condições ambientais e condições do motor, que devem

ser atendidas para que um teste seja considerado válido.

As condições ambientais dependem das condições meteorológicas. O laboratório em questão já possuía controle de temperatura, capaz de manter este parâmetro dentro do especificado, antes mesmo de se implantar o PLT. Definiu-se que os parâmetros devem ser monitorados no início de cada teste, para evitar iniciar um teste inválido, e registrados durante a execução, tornando possível verificar ao seu término se os parâmetros se mantiveram dentro das especificações.

As condições exigidas para o motor são de dois tipos: a) condições que não se alteram com o tempo e precisam ser verificadas somente na implantação do PLT; e b) condições que precisam ser garantidas por processos para cada PLT realizado.

Para verificar as condições que não se alteram com o tempo, foram realizados ensaios durante a implantação e após manutenções ou alterações nos sistemas de medição, que podem ter influência sobre os parâmetros controlados. Caso os ensaios revelem que as condições não são atendidas, o responsável por PLT deve tomar as ações necessárias para corrigir este problema, que podem envolver modificações dos sistemas de medição.

Para as condições que precisam ser garantidas por processos, foram elaborados procedimentos e os operadores treinados na sua execução. Como exemplo destes processos pode-se citar o amaciamento e o controle do ajuste do motor, que fazem parte da preparação do motor para o teste, detalhada na próxima sessão.

#### **4.1.4.3 Preparação do teste**

A preparação tem como objetivo garantir que as condições do motor estejam de acordo com o exigido pelos regulamentos, possibilitar que o motor seja montado na bancada de teste e instalar os dispositivos que permitem operar o motor e a medir as características necessárias para determinar a conformidade com os padrões de emissões.

Visando garantir que o motor atenda as condições exigidas pelos regulamentos, realiza-se o amaciamento do motor e a verificação de sua regulagem, ainda na fase de preparação. Para realizar o amaciamento é necessário aplicar carga ao motor, o que pode ser feito com o próprio

dinamômetro da bancada de teste. Neste caso específico, aproveitou-se de uma particularidade do produto para realizar o amaciamento sem necessidade de um dinamômetro, aumentando o tempo disponível da bancada para realização de ensaios. O produto em questão possui um rotor de trabalho, que exerce carga sobre o motor quando a embreagem centrífuga é acoplada. A embreagem acopla o motor ao rotor quando a rotação ultrapassa um valor especificado. Portanto, para realizar o amaciamento, basta acelerar o motor e ajustar a carga para que a rotação especificada para o amaciamento seja mantida. O tempo de amaciamento é controlado com um cronômetro, que inicia a medição automaticamente quando o motor é ligado e interrompe a contagem quando o motor é desligado.

Encerrado o amaciamento, é necessário desmontar alguns componentes do motor para possibilitar a montagem de dispositivos necessários para fixá-lo à bancada, conectar seu eixo ao dinamômetro e alimentá-lo com combustível de um tanque externo. O rotor de trabalho deve ser desmontado para permitir a conexão do eixo do motor ao dinamômetro e, assim, medir sua potência. Porém, neste produto, o rotor de trabalho também tem a função de refrigerar o motor. Para que a temperatura de operação do motor na bancada fosse comparável à encontrada em aplicação normal, foi necessário utilizar ventiladores externos para refrigeração, o que é permitido pelos regulamentos. A instalação de sensores e sondas, necessários para as medições, deve ser feita antes da montagem na bancada de teste, enquanto ainda há liberdade de movimentação do motor.

Para alternar entre os modos de operação exigidos pelos regulamentos (totalmente acelerado e marcha lenta) foi usado um atuador pneumático conectado ao acelerador, acionado pelo sistema de controle da bancada. O sistema de ignição do motor é conectado eletricamente à bancada de teste, que pode desligar o motor automaticamente em caso de mau funcionamento do sistema de medição que possa resultar em perigo para integridade do motor e do pessoal. O desligamento da ignição também pode ser acionado pelo operador em caso de emergência.

As atividades da preparação do teste envolvem operações manuais, que não permitem automação. Os dispositivos instalados durante a preparação foram projetados tendo em vista a praticidade de instalação, já que são usados a cada PLT realizado.

#### 4.1.4.4 Execução do teste

A execução do teste consiste na operação do motor na seqüência dos modos descrita nos regulamentos, atendendo a critérios de estabilização, realizando verificações nos instrumentos de medição, medindo e registrando resultados. A fase de execução compreende ainda o registro de dados sobre o motor, que são utilizados para identificação e em cálculos, de forma que sejam gravados junto dos resultados de teste. Para a execução do teste aproveitou-se todas as facilidades proporcionadas pela tecnologia da informação presentes nos equipamentos e instrumentos de medição.

A redução considerável no tempo de execução e a eliminação de erros justificaram a automação da execução do teste. Erros na seqüência ou nos parâmetros do teste, atraso na realização ou omissão de determinadas etapas poderiam invalidar um teste, exigindo repetição. Com a automação, repetições devido aos motivos listados foram eliminadas. A automação permitiu realizar diversas operações em seqüência, executando, sem interrupção, parte do pré-teste, teste e pós-teste descritos nos regulamentos.

A bancada de teste possui controle programável capaz de se comunicar com instrumentos de medição, comandar atuadores e gravar dados. Além disso, os instrumentos de medição permitem operação em controle externo.

Para implantar a automação da execução foi necessário pessoal com experiência na linguagem de programação do sistema de controle da bancada e conhecimento dos protocolos de comunicação utilizados pelos instrumentos de medição. Estas competências foram encontradas em funcionários da organização ou dos fabricantes dos equipamentos. Foi necessário que técnicos de fabricantes trabalhassem em conjunto com o responsável pelo PLT para programar a comunicação entre os equipamentos fornecidos por eles. Suporte de pessoal com conhecimento de eletro-eletrônica foi necessário para instalar a parte física de controle dos atuadores.

Foi elaborado pelo responsável pelo PLT um fluxograma das operações a serem realizadas, que serviu de referência para o trabalho de programação. Nesta pesquisa-ação, o responsável pelo PLT também foi responsável pela automação, o que garantiu que o sistema implantado atendesse as exigências dos regulamentos.

Nesta pesquisa-ação, o sistema de controle já estava integrado com a bancada de analisadores. O envio de comandos para iniciar e finalizar a medição, bem como o envio dos sinais dos analisadores para o sistema de controle já estavam disponíveis. Foi necessário estudar o protocolo de comunicação para envio de comandos à bancada de analisadores e programar novos comandos, que permitem realizar, de forma automática, as verificações dos analisadores exigidas pelos regulamentos.

A seqüência de teste foi programada de forma a realizar, sem interferência do operador, quase todas as operações exigidas, como período de estabilização, controle do critério de estabilização, verificação das respostas dos analisadores aos gases zero e de fundo de escala, alteração entre os modos de operação do motor, alternar entre as faixas de medição dos analisadores e registro dos resultados de cada modo. A intervenção do operador é necessária somente depois de terminados os modos de operação, para desconectar a sonda de coleta de emissões para realização do teste de *hang-up*. Todos os dados do teste são gravados automaticamente em um banco de dados.

#### **4.1.4.5 Avaliação do teste**

Encerradas as medições e verificações dos sistemas de medição, um volume considerável de cálculos é necessário para se obter o resultado do teste. Nesta tarefa foram aproveitados os recursos de tecnologia da informação disponíveis no sistema de controle da bancada.

Entre estes recursos está um *software*, capaz de ler os dados gravados durante o teste, que pode ser programado para realizar os cálculos necessários e apresentar os resultados na forma de um relatório que facilite a avaliação.

Antes de encerrar a execução do teste, o operador gera um relatório, avalia se o teste é válido e decide as ações subseqüentes de acordo com os resultados. Para auxiliar o operador nesta tarefa, elaborou-se um procedimento que define os critérios para invalidar um teste. O resultado da avaliação deve ser registrado no relatório, que serve de documento para comprovar a realização do PLT. Os regulamentos definem as ações necessárias de acordo com o *status* do teste: repetição devido à invalidação; repetição por exceder os padrões de emissões (a causa da

não conformidade deve ser identificada e eliminada antes da repetição); ou análise estatística dos resultados para verificar a conformidade da produção como um todo.

Para realizar a análise estatística, utilizou-se o *software* MS Excel para ler os resultados do teste e realizar os cálculos. Com isto, o tempo para realizar a análise estatística foi reduzido e eventuais erros na transcrição de dados do relatório foram eliminados. As possíveis ações decorrentes da análise estatística foram definidas em procedimentos elaborados pelo responsável pelo PLT de acordo com os regulamentos (ações em caso de não conformidade) e os critérios de controle de qualidade (ações para apurar causas especiais).

Encerradas as avaliações e ações decorrentes destas, a seqüência de teste é considerada concluída e o produto precisa ser remontado, ficando pronto para utilização pelo usuário.

Da mesma forma que a automação da execução, a automação da avaliação dependeu do trabalho conjunto entre o responsável pelo PLT e a pessoa com conhecimento dos *softwares* utilizados.

#### **4.1.5 TREINAMENTO DOS RESPONSÁVEIS POR PROCESSOS**

Uma das etapas mais importantes de qualquer projeto que propõe novos processos ou mudanças em processos existentes é o treinamento dos responsáveis, pois são essas as pessoas fundamentais para a execução das tarefas. Qualquer sistema que dependa da participação de pessoas não terá sucesso se não for compreendido e aceito pelos envolvidos. Por isso, sempre que possível, os procedimentos levaram em consideração a opinião e a experiência das pessoas que executam as tarefas.

Para cada atividade necessária para operacionalização do PLT, foram estabelecidos procedimentos para orientar o trabalho dos operadores. Além de padronizar a execução das tarefas, os procedimentos foram utilizados no treinamento dos operadores e serviram de fonte de consulta. Estes procedimentos reúnem conhecimento sobre a realização do PLT e sobre a operação dos sistemas. Portanto, só puderam ser elaborados após a conclusão da avaliação dos requisitos dos regulamentos e da implantação dos equipamentos e sistemas associados às respectivas atividades.

Para preparar o pessoal responsável pela execução de tarefas, foi idealizado um treinamento *on the job*. Após uma breve introdução sobre as exigências dos regulamentos, foi solicitado aos participantes que executassem determinadas tarefas, sob supervisão do instrutor, baseando-se nos procedimentos elaborados. Durante o treinamento *on the job*, foram detectados problemas nos procedimentos, como inconsistências entre o que era solicitado e o que era possível executar, ou insuficiência de informações para executar a tarefa. Conforme os problemas foram encontrados, estes eram prontamente corrigidos, tornando o processo de treinamento num teste dos procedimentos elaborados.

O departamento de recursos humanos mantém no sistema ERP um cadastro de todos os treinamentos existentes na organização e seus conteúdos. Cada departamento pode escolher neste cadastro quais treinamentos são requisitos de cada função e sugerir novos treinamentos, caso necessário. No caso do treinamento em Teste de PLT, solicitou-se a inclusão deste como requisito para a função de Técnico de Teste de Emissões. Cada colaborador e seu superior podem consultar no sistema os requisitos demandados para sua função e quais são atendidos.

Entre as vantagens deste sistema estão: comprovar, em caso de auditoria de uma agência reguladora, quais pessoas estão qualificadas para executar tais testes; e garantir que colaboradores admitidos ou transferidos para a função de Técnico de Teste de Emissões recebam o treinamento necessário para realização de teste de PLT.

## 4.2 INTEGRAÇÃO DO PLT COM A MELHORIA DA QUALIDADE

Esta seção apresenta as ações necessárias para implantação das cartas de controle, cuja integração com os procedimentos obrigatórios dos regulamentos foi planejada na seção 3.5.1. Entre estas ações estão: a definição do tamanho e frequência de amostra, a definição dos limites de controle e, por fim, o plano de ação associado à detecção de causas especiais.

### 4.2.1 IMPLANTAÇÃO DE CARTAS DE CONTROLE NO PROCESSO DE AJUSTE DO MOTOR

O objetivo das cartas de controle após o processo de ajuste do motor é monitorá-lo, de forma a detectar, o mais rápido possível, a presença de causas especiais em cada uma das cabines. Como visto na seção 2.5.6.4, o primeiro passo na implantação de uma carta de controle é a

escolha da característica a ser controlada.

Devido à complexidade da medição das variáveis de resposta, como potência e vazão específica de emissões (HC+NO<sub>x</sub> [g/kWh] e CO [g/kWh]), e a boa correlação existente entre estas características e a concentração de CO [vol%] nas emissões, a última foi escolhida como característica a ser controlada na carta implantada no processo de ajuste do motor. O método de medição desta característica é mais simples e rápido, quando comparado à medição das variáveis de resposta.

Apesar de mais simples que as medições realizadas para PLT, o método de medição da concentração de CO [vol%] nas emissões ainda é trabalhoso e demorado, se comparado a métodos manuais de medição dimensional, por exemplo. Para realizar a medição, é necessário substituir o silenciador original por outro, preparado com uma sonda para coleta da amostra dos gases de exaustão, antes de passarem pelo catalisador, caso presente no modelo. A concentração de CO [vol%] presente na amostra é determinada com um analisador de gases com uma faixa de medição apropriada para as concentrações existentes em gases de exaustão puros.

O tempo médio necessário para medir cada motor é de aproximadamente 1 hora. Este tempo contempla a coleta do motor na linha, sua preparação (substituição do silenciador original pelo silenciador com sonda) e a montagem de um dispositivo para controle da rotação. Compõem ainda este tempo, a medição e o retrabalho, necessário para devolver o motor para linha de montagem. A medição é composta por um período de 5 minutos de estabilização mais 5 minutos de coleta de emissões. Há ainda a necessidade de calibrações e verificações periódicas do sistema de medição.

Após a escolha da característica a ser controlada e do método de medição, parte-se para a escolha do tipo de carta de controle. Porém, para usar o método proposto por Montgomery apud Schissatti (1998) para selecionar o tipo de carta de controle, a amostragem precisa estar definida.

Como visto na seção 2.5.6.1.1, em algumas situações é preciso usar tamanhos de amostra de uma unidade para controle do processo. Uma destas situações ocorre quando o custo do método de medição é alto, como neste caso, onde o método usado demanda elementos caros, como o analisador de gases, os materiais para sua calibração e um técnico qualificado na operação deste sistema. Além disso, o tempo de medição relativamente longo também contribui para o aumento do custo. Para manter o propósito de prevenção de não conformes em caso de

incidência de causa especial, estipulou-se que no mínimo uma amostra por dia deveria ser tomada para cada cabine.

A característica controlada é do tipo variável e o tamanho de cada amostra é de uma unidade, portanto, aplicam-se somente cartas de controle capazes de lidar com este tamanho de amostra, como carta para valores individuais, CUSUM e de médias móveis. Para detectar tanto picos e tendências quanto pequenos desvios, decidiu-se usar simultaneamente cartas para valores individuais, para amplitudes móveis e de médias móveis.

A próxima etapa é a definição da linha central e da base para cálculo dos limites. Devido à facilidade em centrar o processo, estipulou-se como linha central para a carta para valores individuais o valor nominal da especificação para a característica controlada. Os limites de controle para todas as cartas são calculados conforme descrito no referencial teórico, na seção 2.5.6.1, a partir de resultados de medições realizadas para este fim. As etapas seguintes consistem em disponibilizar o sistema para coleta de dados e na definição das ações em caso de detecção de causas especiais.

O sistema de coleta de dados consiste de planilhas elaboradas no *software* MS Excel, onde o operador digita os resultados do teste. A cada nova observação adicionada na planilha os gráficos resultantes podem ser vistos instantaneamente. Ao se detectar um ponto além dos limites de controle em qualquer carta ou uma tendência na carta de valores individuais, como muitos pontos do mesmo lado da linha central, a seguinte seqüência de ações é disparada:

- a) informar os responsáveis pelo processo;
- b) interromper a operação da cabine sob suspeita e bloquear o lote de produção;
- c) aumentar a amostragem da cabine sob suspeita para confirmação;
- d) analisar os resultados para confirmar se há um desvio da média do processo em relação à sua especificação ou aumento da variabilidade.

Caso a situação fora de controle estatístico seja confirmada, deve-se planejar ações para identificar a causa especial, que pode estar associada ao **processo de ajuste do motor** ou a **desvio em componentes**.

Quando a causa especial estiver associada ao processo de ajuste do motor deve-se buscar eliminá-la. Caso a remoção da causa especial seja muito dispendiosa, existe a possibilidade de modificar o ajuste da cabine (definir novo polinômio de referência para cabine com base no valor do desvio). Após a eliminação da causa ou modificação do ajuste da cabine deve-se retirar mais uma amostra para verificar se a correção foi efetiva.

Como a medição da característica CO [vol%] leva mais tempo do que o processo de ajuste do motor, não é viável classificar os produtos em conformes e não conformes. Portanto, confirmada a eficácia da solução, todas as unidades do lote, ajustadas na cabine que apresentou problema, devem passar novamente pelo processo de ajuste do motor. Para efeito deste trabalho, um lote de produção corresponde aos motores produzidos entre duas observações consecutivas, que equivale a aproximadamente 210 unidades.

Quando a causa especial estiver associada a desvio em componentes, o responsável por estes componentes deve ser informado, para que tome as ações necessárias, e testes são realizados para avaliar a adequação ao uso e o efeito sobre emissões. Com base nos resultados destes testes pode-se decidir por liberar o desvio ou retrabalhar o lote de produção.

O monitoramento do processo de ajuste do motor por cartas de controle está em acordo com o exigido pela UE, no que diz respeito à existência de controle da qualidade do produto, pois está baseado na relação existente entre as características controladas pelos regulamentos – HC, NOx e CO [g/kWh] – e a concentração de CO [vol%].

#### **4.2.2 IMPLANTAÇÃO DE CARTAS DE CONTROLE NO PLT**

O objetivo da carta de controle no PLT é aproveitar seus resultados para monitorar o processo de ajuste e avaliar a estabilidade da correlação entre a concentração de CO [vol%] e as vazões específicas de emissões (HC+NOx [g/kWh] e CO [g/kWh]), além de monitorar outras características medidas somente no PLT. Foi utilizada para implantação das cartas de controle a abordagem recomendada por Juran e Gryna (1993), vista no item 2.5.6.2.

Os regulamentos EPA e CARB exigem a aplicação de métodos estatísticos para avaliar os resultados das características HC+NOx [g/kWh], CO [g/kWh] e PM [g/kWh] (somente

CARB). Além destas, são medidas no PLT e podem ser monitoradas por cartas de controle as características potência (P [kW]), CO [vol%] e temperatura do cilindro (T [°C]).

Os métodos de medição e de amostragem são aqueles definidos para PLT. Conforme visto na seção 2.3.1.2.6, o método de controle estatístico exigido pelos regulamentos americanos é a carta de controle de soma cumulativa (CUSUM), cujas limitações são o atraso na detecção de grandes alterações no processo, e a dificuldade na análise de dados históricos e no reconhecimento de tendências. Montgomery (1985) e Woodall (2000) recomendam a utilização de cartas de controle mais sensíveis a grandes mudanças em conjunto com a carta CUSUM.

Como cada amostra para PLT consiste de uma unidade, procurou-se complementar o monitoramento das características já controladas pela carta CUSUM aplicando cartas para valores individuais e, assim, facilitar a identificação de tendências e grandes mudanças nestas características. Para as características não controladas por CUSUM, decidiu-se usar cartas para médias móveis para detectar pequenos desvios e cartas para valores individuais para detectar tendências e picos de grande magnitude.

Quando comparada com a carta CUSUM, considerou-se a carta para médias móveis mais fácil de aplicar, devido a seu caráter mais visual e cálculo dos limites mais simples. Por este motivo ela foi escolhida para as características não controladas pelos regulamentos. Para avaliar a variabilidade de todas as características decidiu-se usar cartas de amplitudes móveis. Um resumo das cartas de controle aplicadas aos resultados de PLT é mostrado na Figura 22.

Característica	Carta de controle usada para monitorar:		
	Pequenos desvios	Tendências	Variabilidade
HC+NO <sub>x</sub> [g/kWh]	CUSUM	Valores individuais	Amplitude móvel
CO [g/kWh]			
PM			
P [kW]	Médias móveis	Valores individuais	Amplitude móvel
T [°C]			
CO [vol%]			

Figura 22 Resumo das cartas de controle usadas no PLT

Os limites para as cartas CUSUM foram definidos conforme exigido pelos regulamentos. Como linha central para as cartas para valores individuais estipulou-se o valor nominal das especificações para cada característica controlada. Os limites de controle para todas as cartas de médias móveis, valores individuais e amplitudes móveis são calculados conforme

descrito no referencial teórico, na seção 2.5.6.1, a partir dos resultados de PLT.

O sistema usado para coleta de dados é o próprio sistema desenvolvido para análise estatística dos resultados de PLT utilizando o *software* MS Excel e descrito na seção 4.1.4.5. Este foi expandido para que, a cada PLT realizado, as estatísticas necessárias para as cartas de controle adicionais sejam calculadas de forma automática. Este sistema permite visualizar os pontos correspondentes a cada medição e os limites de controle.

As ações em caso de pontos além dos limites de controle dependem da característica e da carta na qual o ponto foi detectado. Quando o limite de ação é ultrapassado em dois PLT's consecutivos para as cartas CUSUM, configura-se uma não conformidade, que deve ser tratada conforme descrito nos regulamentos. Para as outras cartas de controle, deve-se aumentar a amostragem, coletando unidades das três cabines de ajuste, para identificar a causa especial ou confirmá-la, caso esta tenha sido identificada na análise inicial. As causas especiais podem estar associadas a erro no ajuste do motor ou desvio em componentes. Se a causa especial estiver associada ao processo de ajuste, todas as unidades do lote de produção com problema devem ser reajustadas após a eliminação da causa especial.

Como as características estão correlacionadas, um ponto fora dos limites ou uma tendência pode ser detectada em mais de uma carta, dependendo da causa geradora. A experiência com o processo de ajuste do motor mostra que a maior probabilidade de situação fora de controle está associada a um desvio da característica CO [vol%] em relação ao valor nominal. Neste caso, deve-se identificar e eliminar a causa raiz. Caso isto não seja possível, deve-se modificar o ajuste das cabines (definir novos polinômios de referência com base no valor do desvio).

Utilizando dados provenientes do PLT verificou-se que é possível usar estes resultados para monitorar o processo de ajuste do motor e detectar tendências que passariam despercebidas pelo método exigido pelos regulamentos, aproveitando atividades obrigatórias para melhoria da qualidade.

### 4.2.3 IMPLANTAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE AJUSTE DO MOTOR

O método de otimização descrito na seção 3.5.2 deve ser realizado periodicamente, de forma que variações em processos e componentes, que podem alterar as relações entre o fator de controle e as variáveis de resposta, possam ser compensadas. A aplicação do método é apresentada na seqüência.

As variáveis de resposta para otimização foram levantadas na análise dos requisitos dos usuários. Na reunião entre analista do produto e gerente da Engenharia de Produto, foram identificadas como características da qualidade demandadas pelo cliente o desempenho e a durabilidade. A estas características foi adicionada a exigência legal quanto a emissões. As variáveis de resposta capazes de traduzir as características da qualidade em características mensuráveis são potência (P [kW]), temperatura do cilindro (T [°C]), emissão específica de HC+NO<sub>x</sub> (HC+NO<sub>x</sub> [g/kWh]), e emissão específica de CO (CO [g/kWh]).

A partir das características da qualidade e variáveis de resposta construiu-se a matriz mostrada na Figura 23, dispondo as características da qualidade nas linhas e as variáveis de resposta nas colunas. Nessa matriz, foram atribuídos pesos relativos para as características da qualidade, de forma que o somatório dos pesos totalizasse 100 pontos. Em seguida, a intensidade das relações entre as características da qualidade e as variáveis de resposta foi avaliada, utilizando a seguinte escala: 0 – nenhuma; 1 – fraca; 3 – média; e 9 forte. A importância relativa (IR) de cada variável de resposta foi obtida realizando-se o somatório do produto entre as intensidades de relacionamento e os pesos atribuídos às características da qualidade.

		VRs				
		Pesos	Potência	Temperatura	HC+NO <sub>x</sub>	CO
CQs	Desempenho	25	9	1	0	0
	Durabilidade	25	1	9	0	0
	Emissões	50	3	0	9	9
IR		400	250	450	450	

Figura 23 Matriz da qualidade

Nesta pesquisa-ação, uma vez que estavam disponíveis resultados de PLT realizados na unidade anterior à transferência, percebeu-se a oportunidade de utilizar estes dados para modelar as variáveis de resposta. No PLT todas as VR's e o fator de controle são medidos e registrados. Nesta análise foram usados resultados de 60 observações.

Utilizou-se regressão linear simples ou múltipla, dependendo do caso, para obter modelos do comportamento das variáveis de resposta em função do fator de controle. O *software* MS Excel foi usado para realizar a análise de regressão, traçar gráficos de cada VR em função do fator de controle e calcular sua variância. Para todas as VR's o nível de significância do modelo foi maior que 99,9%. Os gráficos com as linhas de tendência e os modelos de regressão obtidos são mostrados na Figura 24. Para manter o sigilo dos dados todos os valores foram normalizados, dividindo cada valor pelo valor alvo da VR.

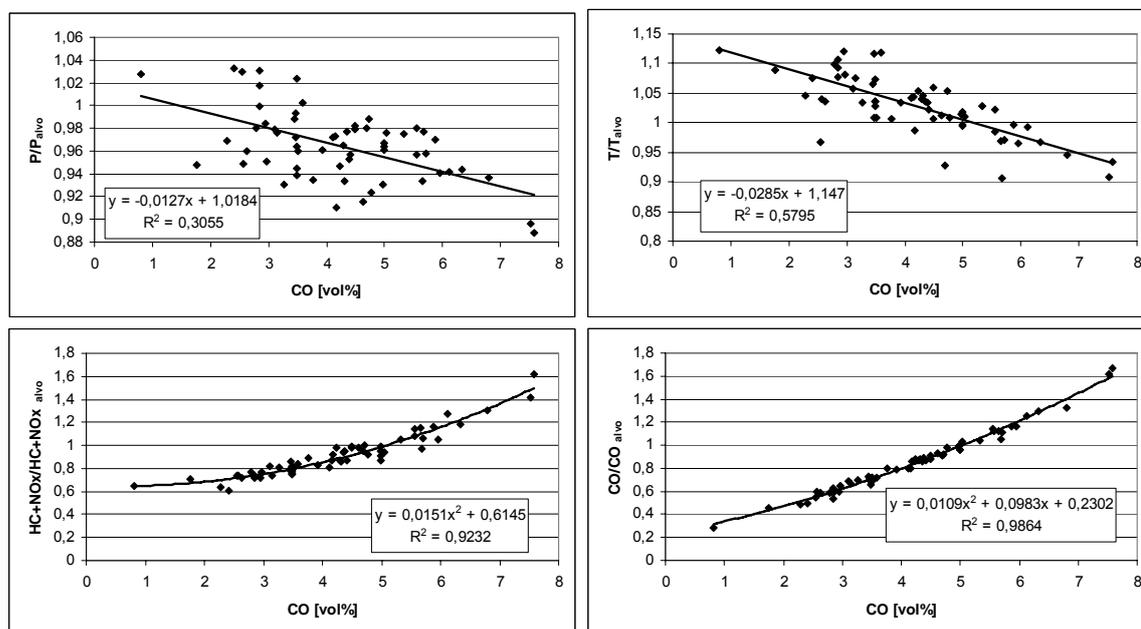


Figura 24 Gráficos das variáveis de resposta em função do fator de controle

Em seguida são calculados os elementos da função objetivo (Equação 21, retomada aqui para facilitar o acompanhamento do cálculo). O fator de importância e correção de escala  $w_j$  é calculado para cada VR, com base na sua importância relativa IR, obtida na matriz da qualidade, e em seu valor alvo  $T_j$  e limites de especificação, mostrados na Tabela 5. A forma de cálculo de  $w_j$  varia de acordo com o tipo de VR, conforme mostrado na seção 2.5.7.3. A Tabela 5 apresenta os dados necessários para cálculo dos fatores de importância e seus resultados.

$$\hat{Z}(x) = \sum_{j=1}^J w_j \left[ (\hat{Y}_j(x) - T_j)^2 + \cancel{\hat{\sigma}_j^2(x)} + \sum_{k=1}^K \sigma_k^2 \left( \frac{\partial \hat{Y}_j(x)}{\partial X_k} \right)^2 \right] \quad (21)$$

Tabela 5 Dados e resultados do cálculo dos fatores de importância

Variável de resposta	IR	Tipo	$T_j$	Limites		$w_j$
				Inferior	Superior	
P [kW]	400	Nominal	1	0,95	1,05	160000
T [°C]	250	Menor	1	-	1,154	10541,5
HC+NOx [g/kWh]	450	Menor	1	-	1,522	1651,5
CO [g/kWh]	450	Menor	1	-	1,563	1419,7

Os modelos obtidos por regressão linear entram na função objetivo como  $\hat{Y}_j(x)$  para previsão das VR's e seu desvio do alvo  $T_j$ . A variância prevista de cada variável de resposta  $\hat{\sigma}_j^2(x)$  foi considerada constante ao longo da região estudada e, portanto, não tem influência na determinação do ponto ótimo. Por este motivo a variância de cada variável de resposta foi eliminada da função objetivo.

A variância do fator de controle  $\hat{\sigma}_k^2$  foi calculada a partir da tolerância da especificação do fator de controle, considerando que esta tolerância corresponda aos limites naturais de  $\pm 3 \hat{\sigma}_k$ . A Tabela 6 traz todas as informações que permitem compor a expressão para cálculo da perda em função do fator de controle.

Como foram estabelecidos valores alvos para as variáveis do tipo menor é melhor, ao invés de estabelecer um alvo igual a zero, algumas considerações devem ser feitas. Nestes casos, um valor menor que o alvo não corresponde a perda da qualidade. Portanto, para variáveis de resposta do tipo menor é melhor, se  $\hat{Y}_j(x) < T_j$ , então  $\hat{Y}_j(x) = T_j$ , resultando em perda zero devido a desvio do alvo. A função objetivo foi modelada no software MS Excel, levando em consideração estas restrições e as expressões e valores da Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 6 Expressões e valores para cálculo da perda

$j$	$\hat{Y}_j(x)$	$\hat{\sigma}_k^2$	$\left( \frac{\partial \hat{Y}_j(x)}{\partial X_k} \right)^2$
1	$-0,0127 x + 1,0184$		0,00016129
2	$-0,0285 x + 1,147$		0,00081225
3	$0,0151 x^2 + 0,6145$	0,444	$0,00091204 x^2$
4	$0,0109 x^2 + 0,0983 x + 0,2302$		$0,000475 x^2 + 0,00428 x + 0,00966$

O objetivo da otimização em questão é minimizar a perda. Para tanto, utilizou-se a

função *Solver* do software MS Excel para encontrar o valor do fator de controle que minimiza a perda da qualidade, que equivale a 2,5 [vol%]. Esta concentração de CO deve ser tomada como alvo para o processo de ajuste na linha de montagem e resulta em uma redução de 25% nas emissões de HC+NOx e 42% nas emissões de CO em relação ao valor nominal da especificação atual. O gráfico da função perda é mostrado na Figura 25.

Esta otimização pode ser realizada periodicamente, sempre que novos resultados de PLT estiverem disponíveis, realizando assim um monitoramento da correlação entre a concentração de CO [vol%] (fator de controle) e as características da qualidade. Em caso de alteração nesta correlação, a otimização indicará um novo valor alvo para o processo de ajuste do motor. As causas de eventuais mudanças na correlação devem ser investigadas, pois podem revelar oportunidades de melhoria do produto.

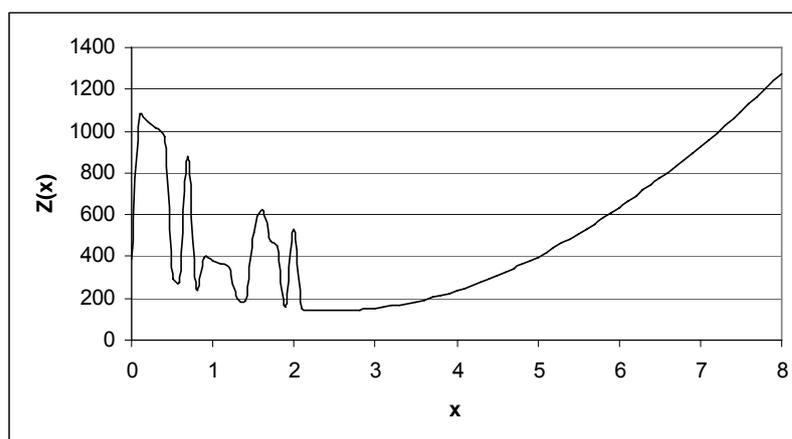


Figura 25 Gráfico da perda em função do fator de controle

Sempre que estiverem disponíveis dados provenientes de inspeções ou auditorias da qualidade, deve-se verificar a possibilidade de utilizá-los para melhorar a qualidade e aprender sobre o processo. Implantar métodos de controle de qualidade sem qualquer análise prévia manteria os custos da baixa qualidade nos níveis definidos durante o projeto do produto e processo. Neste trabalho buscou-se, antes de implantar os métodos de controle, verificar se o nível do fator de controle correspondia ao nível ótimo de custos de qualidade.

### 4.3 AVALIAÇÃO DO SISTEMA IMPLANTADO

Esta seção apresenta uma avaliação do sistema implantado com base em dados disponíveis sobre os testes realizados na unidade de produção anterior à transferência e na unidade da pesquisa-ação.

Para avaliar o sistema implantado de forma objetiva, utilizou-se dados dos relatórios trimestrais enviados às agências por ambas unidades – unidade de produção anterior à transferência e unidade onde foi realizada a pesquisa-ação. Estavam disponíveis relatórios dos seis anos anteriores à transferência da produção e dos três primeiros trimestres após a transferência. Os resultados da avaliação objetiva estão na Tabela 7.

Comparando-se o número de motores testados na unidade da pesquisa-ação e na unidade onde o motor era produzido anteriormente, em relação ao período de avaliação, conclui-se que, para as famílias de motor transferidas, o sistema implantado permite operar com a mesma produtividade. No período avaliado, a taxa de motores testados foi 21% superior no sistema implantado nesta pesquisa-ação. Porém, isto não significa que o sistema implantado permite realizar mais testes no mesmo espaço de tempo, pois, na unidade de produção anterior, o sistema é compartilhado por diversas famílias de motor, além daquelas transferidas para unidade brasileira. Apenas demonstra-se que, para as famílias de motor transferidas, o sistema implantado permite realizar no mínimo o mesmo número de testes.

Tabela 7 Resultados da comparação dos dados de testes antes e após a transferência

Unidade de produção	Período avaliado [anos]	Total de motores testados	Taxa de motores testados [motores/a]	Total de testes inválidos	Taxa de invalidação de testes	Total de motores acima do limite	Taxa de motores acima do limite
Anterior	6	212	35,3	44	21%	34	16%
Pesquisa-ação	0,75	32	42,7	6	19%	1	3%
Diferença [%]			21%		-10%		-81%

Para avaliar a eficiência da implantação do PLT, calculou-se a taxa de invalidação de testes, que é a porcentagem de testes inválidos em relação ao número de motores testados, para ambas unidades. A invalidação de testes pode indicar falhas no treinamento dos operadores ou instabilidade no sistema de medição. A taxa de invalidação da unidade da pesquisa-ação foi 10% menor que a da unidade anterior. Este dado revela a eficiência do sistema implantado, que mesmo

neste período inicial, onde seria natural a ocorrência de mais falhas, apresentou taxa de invalidação menor. Contribuíram para isto a automação de processos, aproveitando as facilidades de tecnologia da informação disponíveis; e o aprendizado sobre manutenção preventiva, possibilitado pelo contato com técnicos dos fabricantes de equipamentos.

As causas das invalidações para cada unidade foram avaliadas. A Figura 26 apresenta a divisão das causas de invalidações entre falha no equipamento e falha do operador para as duas unidades avaliadas. Dos 21% de testes invalidados na unidade anterior, 17% foram devidos à falha em equipamentos e os 4% restantes devidos a erro do operador. Na unidade brasileira, dos 19% de testes invalidados somente 3% foram devidos à falha em equipamentos, enquanto 16% foram atribuídos a erros do operador. Considerou-se importante buscar os motivos das invalidações causadas por erro do operador na unidade da pesquisa-ação e assim determinar se há necessidade de correções nos procedimentos ou se essa maior taxa de erro dos operadores faz parte do aprendizado.

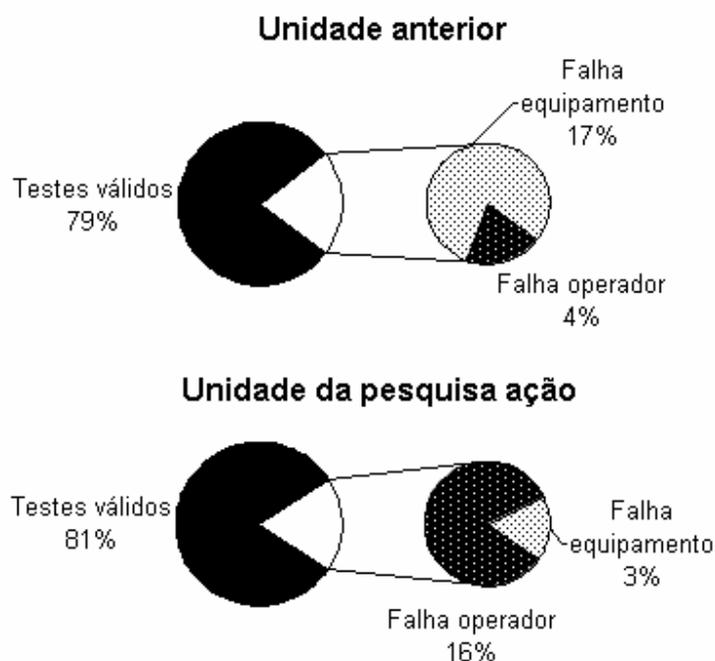


Figura 26 Causas de invalidações de testes nas unidades avaliadas

A maior parte dos testes invalidados na unidade brasileira por erro do operador ocorreram por falta de observação das condições ambientais antes de iniciar o teste. A maioria

das invalidações ocorreram em um período com condições climáticas atípicas, que elevou a pressão atmosférica muito acima dos valores habituais. Para evitar reincidências elaborou-se uma tabela com as faixas de temperatura e pressão atmosférica permitidas para teste, que deve ser consultada antes de iniciar cada teste.

Outra evidência da eficácia da implantação do PLT é que a unidade da pesquisa ação já encaminhou relatórios trimestrais para a EPA e CARB, relativos aos dois primeiros trimestres de operação da linha de montagem, sem qualquer objeção por parte destas agências. Além disso, o sistema implantado passou por auditoria do órgão de certificação da União Européia, sem que qualquer não conformidade fosse detectada.

Ao comparar a taxa de motores que excederam os limites de emissões em PLT nas duas unidades, é possível avaliar o processo de produção e seu monitoramento. A taxa de motores acima dos limites de emissões da unidade da pesquisa-ação foi 81% menor do que a da unidade anterior à transferência. Como visto na seção 2.3.1.2.6, uma família de motor é considerada não conforme quando o limite de ação da estatística CUSUM é excedido em dois testes consecutivos. A probabilidade de se encontrar motores que excedam os limites, o que contribuiria para que o limite de ação da carta CUSUM fosse excedido, é muito menor para a unidade da pesquisa ação. Isto corresponde a uma margem de segurança mais confortável para a unidade da pesquisa-ação.

Na carta de controle para valores individuais da característica HC+NO<sub>x</sub> medida no PLT, foram detectadas 5 observações consecutivas acima da média, o que foi interpretado como uma tendência de aumento da média. Esta detecção gerou ações que fizeram a média voltar a seus valores conhecidos. Sem este monitoramento através de cartas de controle de valores individuais, muito provavelmente a taxa de motores acima dos limites na unidade onde foi realizada a pesquisa-ação seria maior.

## 5 CONCLUSÃO

Regulamentos de controle de emissões de motores exigem a realização de teste de linha de produção por parte do fabricante. Os métodos e equipamentos necessários para realização do teste de linha de produção são complexos e dispendiosos, podendo constituir barreira técnica ao comércio destes produtos. Além disso, mecanismos de avaliação da conformidade, como o teste de linha de produção, por si só, não garantem completamente a qualidade do produto.

Esta dissertação teve como objetivo implantar o programa de teste de linha de produção na empresa onde foi realizada a pesquisa-ação e propor métodos que possam aproveitar os resultados gerados pelos processos obrigatórios para promover melhoria da qualidade.

Após o estudo da estrutura dos regulamentos, foi possível concluir que a forma como os textos estão organizados não auxilia a implantação do PLT. Entre os regulamentos estudados, o EPA é o que apresenta o texto mais amigável, sendo o mais recomendável para o leitor que está procurando se ambientar com o assunto. Por este motivo ele foi escolhido para servir de base para elaboração de uma nova estrutura de organização dos requisitos que facilitasse a implantação. Devido à origem comum dos regulamentos, foi possível utilizar a mesma estrutura para organizar os requisitos dos três textos.

De acordo com cada fase do trabalho, foi necessário desdobrar mais ou menos os itens dos regulamentos. Para comparação dos requisitos, os itens foram desdobrados o máximo possível. Para a avaliação dos requisitos é conveniente uma estrutura um pouco menos desdobrada em alguns casos. Já na fase de implantação o agrupamento de uma sequência de itens facilitou sua automação.

Uma contribuição deste trabalho foi a sistemática desenvolvida para estudar, organizar e comparar os requisitos dos regulamentos, permitindo o levantamento das ações necessárias para a implantação. As estruturas elaboradas para este fim, como a matriz de comparação dos requisitos dos regulamentos EPA, CARB e UE e os sumários dos textos da UE, podem servir como guia para consulta aos textos.

A estrutura sugerida de organização dos requisitos se mostrou eficiente, pois permitiu a implantação do PLT na empresa onde foi realizada a pesquisa-ação e apresentou uma taxa de invalidação de testes 10% inferior àquela encontrada na unidade anterior à transferência. Porém, é importante ressaltar que a utilização da experiência na realização de PLT, já existente no grupo, também facilitou a definição e execução das ações para implantação, contribuindo para o seu sucesso.

O uso de todos os recursos de tecnologia da informação disponíveis na organização e mais especificamente, nos equipamentos existentes no laboratório, permitiu a automação de diversos procedimentos, contribuindo também para os resultados.

Para atender as exigências dos regulamentos e, ao mesmo tempo, promover melhoria da qualidade, foi proposta a aplicação de cartas de controle em dois pontos: após o processo de ajuste do motor, cujo sistema para coleta de dados ainda precisa ser estruturado; e após o PLT, aproveitando seus resultados. As cartas de controle implantadas após o PLT foram capazes de identificar tendências que passariam despercebidas pelos métodos exigidos pelos regulamentos. Portanto, a sistemática proposta contribuiu para que a taxa de motores que excederam os limites fosse 81% menor na unidade da pesquisa-ação em relação à unidade anterior à transferência.

A otimização proposta mostra que é possível utilizar dados já existentes na organização e provenientes de processos obrigatórios na modelagem das variáveis de resposta. A aplicação da otimização definiu um novo valor nominal para especificação do processo de ajuste do motor, que permite uma redução de 25% nas emissões de HC+NO<sub>x</sub> e 42% nas emissões de CO. O trabalho mostrou ainda que é importante avaliar as especificações usadas na produção antes da implantação de métodos de controle, caso contrário corre-se o risco de aplicar recursos para manter a produção em um nível de qualidade diferente do ótimo.

Os métodos de gestão propostos permitiram a implantação do PLT dentro do prazo determinado e com qualidade satisfatória, o que é demonstrado pelos resultados positivos em relação à unidade anterior à transferência.

Devido à origem comum dos regulamentos, estes apresentam falhas em comum, como a não observação de alguns aspectos descritos em normas internacionais que norteiam as atividades de laboratórios de ensaios. Em trabalhos futuros, poder-se-ia preencher as lacunas deixadas pelos

regulamentos adicionando ao sistema proposto os requisitos da NBR ISO/IEC 17025 - requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração - e as práticas do manual de Análise de Sistemas de Medição da NBR ISO TS 16999.

Em estudos futuros poderia-se aprimorar os métodos complementares ao PLT. Por exemplo, poderia-se usar projetos de experimentos para avaliar a influência de outros parâmetros passíveis de ajuste na linha de produção, como o ajuste da marcha lenta, sobre o desempenho, durabilidade e emissões. Nestes experimentos, além das variáveis de resposta medidas no PLT, poderia-se estudar o efeito dos fatores de controle sobre eventuais variáveis de resposta adicionais. Os resultados dos projetos de experimentos seriam usados para modelar as variáveis de resposta em novas otimizações.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT ISO/IEC GUIA 67: Avaliação de conformidade – Fundamentos de certificação de produto**. Rio de Janeiro, 2005.
- AMS – American Meteorological Society. **History of the Clean Air Act**. 1999. Disponível em <<http://www.ametsoc.org/sloan/cleanair/index.html>>. Acesso em 29 jul. 2006.
- BHUIYAN, N; ALAM, N. A case study of a quality system implementation in a small manufacturing firm. **International Journal of Productivity and Performance Management**. v. 54, n. 3, p. 172-186, 2005.
- BORCHARDT, M. **Implantação de um Sistema de Confirmação Metrológica**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, PPGEP-UFRGS. Porto Alegre, 1999.
- BORCHARDT, K.D. **O ABC do Direito Comunitário**. 5. ed. Luxemburgo: Serviço das Publicações Oficiais das Comunidades Européias, 2000. Disponível em: <[http://ec.europa.eu/publications/booklets/eu\\_documentation/02/txt\\_pt.pdf](http://ec.europa.eu/publications/booklets/eu_documentation/02/txt_pt.pdf)>. Acesso em 18 set. 2007.
- BOSCH – Robert Bosch GmbH. **Kraftfahr Technisches Taschenbuch**. Stuttgart, 1976.
- BOX, G.E.P; COLEMAN, D.E.; BAXLEY JR., R.V. A Comparison of Statistical Process Control and Engineering Process Control. **Journal of Quality Technology**. v. 29, n. 2, p. 128-130, 1997.
- CALIFORNIA. Final Regulation Order. **California Code of Regulations**. Title 13. Motor Vehicles. Division 3. Air Resources Board. Chapter 9. Off-Road Vehicles and Engines Pollution Control Device. Article 1. Small Off-Road Engines. §2400-2409. [2004]. Disponível em: <<http://arb.ca.gov/regact/sore03/fro.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2007.
- CAMPOS, V. F. **TQC Controle da Qualidade Total (no estilo japonês)**. 2. ed. Belo Horizonte: Fundação Christiano Teófilo Ottoni, 1992.
- CARB – California Air Resources Board. **California Exhaust Emissions Standards and Test Procedures for 2005 and Later Small Off-Road Engines**. 2004. Disponível em: <<http://arb.ca.gov/regact/sore03/tp2005.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2007.
- \_\_\_\_\_. **Californias’s Air Quality History Key Events**. 2006a. Disponível em: <<http://www.arb.ca.gov/html/brochure/history.htm>>. Acesso em: 12 abr. 2007.
- \_\_\_\_\_. **Fact Sheet: Reducing pollution from small engines**. Sacramento: [entre 1998 e 2004]. Disponível em: <[http://www.arb.ca.gov/msprog/offroad/sm\\_en\\_fs.pdf](http://www.arb.ca.gov/msprog/offroad/sm_en_fs.pdf)>. Acesso em: 12 abr. 2007.

CARB – California Air Resources Board. **Hystory of the Cal/EPA – Air Resources Board.** Sacramento: 2006b. Disponível em: <[http://www.arb.ca.gov/html/brochure/history\\_text\\_only.htm](http://www.arb.ca.gov/html/brochure/history_text_only.htm)>. Acesso em : 12 abr. 2007.

CE – Comissão Européia. **Como funciona a União Européia. Guia das instituições da União Européia.** Luxemburgo: Serviço das Publicações Oficiais das Comunidades Européias, 2006. Disponível em: <[http://ec.europa.eu/publications/booklets/eu\\_glance/53/2006-pt.pdf](http://ec.europa.eu/publications/booklets/eu_glance/53/2006-pt.pdf)>. Acesso em: 16 set. 2007.

DA SILVA, A. B. G. **Proposta de Sistemática para Análise e Melhoria dos Custos Relacionados à Qualidade – O Caso de uma Indústria de Balas.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, PPGEP-UFRGS. Porto Alegre, 2003.

DAVIS, M.M; AQUILANO, N.J.; CHASE, R.B. **Fundamentals of operation management.** 4th ed. Boston: McGraw-Hill, 2003.

EMPRESA onde foi realizada a pesquisa-ação. **Membranvergaser.** 1999.

EMPRESA onde foi realizada a pesquisa-ação. **Triebwerk 2-Takt-Prinzip.** Service Training System. 2002.

EPA – United States Environmental Protection Agency. **Ozone: Good Up High, Bad Nearby.** Washington DC, 2003a. Disponível em: <<http://www.epa.gov/oar/oaqps/gooduphigh/ozone.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2006.

\_\_\_\_\_. **Regulations: A Vital Tool for Protecting Public Health and the Environment.** Washington DC, 2003b. Disponível em: <<http://www.epa.gov/opei/regulatory/booklet/vitaltool.pdf>>. Acesso em 10 dez. 2006.

\_\_\_\_\_. **The Plain English guide to the Clean Air Act.** Research Triangle Park, 2007. Disponível em: <<http://www.epa.gov/air/caa/peg/peg.pdf>>. Acesso em 29 jul. 2006.

ESTADOS UNIDOS. Control of Air Pollution; Emission Standards for New Nonroad Spark-ignition Engines At or Below 19 Kilowatts. **Federal Register**, 3 jul. 1995, v. 60, n. 127, p. 34581-34567. 1995. Disponível em: <<http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-AIR/1995/July/Day-03/pr-805.html>>. Acesso em: 30 jul. 2006.

\_\_\_\_\_. Control of Emissions from Nonroad Spark-Ignition Engines at or below 19 Kilowatts. **Code of Federal Regulation.** Title 40 - Protection of Environment. Chapter I - Environmental Protection Agency. Subchapter C - Air Programs. Part 90 (40 CFR 90). 2005. Disponível em: <[http://ecfr.gpoaccess.gov/cgi/t/text/text-idx?c=ecfr&tpl=/ecfrbrowse/Title40/40cfr90\\_main\\_02.tpl](http://ecfr.gpoaccess.gov/cgi/t/text/text-idx?c=ecfr&tpl=/ecfrbrowse/Title40/40cfr90_main_02.tpl)>. Acesso em: 29 jul. 2006.

\_\_\_\_\_. Phase 2 Emission Standards for New Nonroad Spark-Ignition Handheld Engines At or Below 19 Kilowatts and Minor Amendments to Emission Requirements Applicable to Small Spark-Ignition Engines and Marine Spark-Ignition Engines. **Federal Register**, 25 abr. 2000, v. 65, n. 80, p. 24267-24314. 2000. Disponível em: <<http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-AIR/2000/April/Day-25/a7887.htm>>. Acesso em: 30 jul. 2006.

ESTADOS UNIDOS. Phase 2 Emission Standards for New Nonroad Spark-Ignition Nonhandheld Engines At or Below 19 Kilowatts. **Federal Register**, 30 mar. 1999, v. 64, n. 60, p. 15207-15255. 1999. Disponível em: <<http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-AIR/1999/March/Day-30/a6175.htm>>. Acesso em: 30 jul. 2006.

FOUNDATION FOR CLEAN AIR PROGRESS. **The History of the Clean Air Act**. [2002-2005]. Disponível em: <<http://www.cleanairprogress.org/classroom/cleanairact.asp>>. Acesso em 29 jul. 2006.

FUENTES, C. M.; BENAVENT, F. B.; MORENO, M. A. E.; CRUZ, T. G.; DEL VAL, M. P. Analysis of the implementation of ISO 9000 quality assurance systems. **Work Study**, v. 49, n. 6, p. 229-241, 2000.

GARVIN, D.A. **Gerenciando a qualidade: a visão estratégica e competitiva**. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems**. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

HARO, D.G. **Sistemas da Qualidade na Indústria Automobilística uma Proposta de Auto-Avaliação Unificada**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, PPGEP-UFRGS. Porto Alegre, 2001.

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Avaliação da Conformidade**. Diretoria da Qualidade. 2007. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/infotec/publicacoes/acpq.pdf>>. Acesso em 28 jun. 2007.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia (VIM)**: portaria INMETRO 029 de 1995. 4 ed. Rio de Janeiro, 2005.

JURAN, J.M., GRZYNA, F.M. **Quality planning and analysis: from product development through use**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1993.

KARAPETROVIC, S. Strategies for the integration of management systems and standards. **The TQM Magazine**, v. 14, n. 1, p. 61-67, 2002.

MCDONALD, M., MORS, T., PHILLIPS, A. Management system integration: can it be done?. **Quality Progress**, v. 36, n. 10, p. 67-74, 2003.

MDIC - Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio. **Barreiras técnicas: conceitos e informações sobre como superá-las**. MDIC, AEB, CNI. Brasília, 2002.

MONTGOMERY, D.C. **Introduction to statistical quality control**. New York: John Wiley & Sons, 1985.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 5th ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.

MONTGOMERY, D.C; RUNGER, G.C.; HUBELE, N.F. **Engineering Statistics**. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2004.

MONTGOMERY, D.C; KEATS, J.B.; RUNGER, G.C.; MESSINA, W.S. Integrating Statistical Process Control and Engineering Process Control. **Journal of Quality Technology**. v. 26, n. 2, p. 79-87, 1994.

NIXON, R. **Reorganization Plan No. 3 of 1970**. Washington DC: The White House, 1970. Disponível em: <<http://www.epa.gov/history/org/origins/reorg.htm>>. Acesso em: 18 set. 2007.

OLIVEIRA, A. A. M. **Motores de Combustão Interna – Formação Geral. Módulo 15: Controle de Poluentes**. Florianópolis, 2002.

PASA, G. S. **Método de Otimização Experimental de Formulações**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, PPGEP-UFRGS. Porto Alegre. 1996.

PISCHINGER, S. **Verbrennungskraftmaschinen II**. Aachen, 2000.

PIZZOLATO, M.; CATEN, C.S.T; AZEVEDO, J.; MULLER, A. F. Ferramentas para acompanhamento da adequação de laboratórios de ensaio aos requisitos da NBR ISO/IEC 17025. In: 3o Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2005, Joinville. **Anais ...**, 2005.

PIZZOLATO, M. **Mapeamento da Estrutura Global que fornece Confiança às Medições: Análise da Inserção Brasileira**. Tese de Doutorado em Engenharia de Produção, PPGEP, UFRGS. Porto Alegre, 2006.

PIZZOLATO, M. **Método de Otimização Experimental da Qualidade e Durabilidade de Produtos: Um Estudo de Caso em Produto Fabricado por Injeção de Plástico**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, PPGEP, UFRGS. Porto Alegre, 2002.

PORTER, M. **Competição: on competition: estratégias competitivas essenciais**. 3. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1999.

RIBEIRO, J. L. D.; FOGLIATTO, F. S.; TEN CATEN, C. S. Minimizing Manufacturing and Quality Costs in Multiresponse Optimization. **Quality Engineering**; v. 13, n. 2, p. 191-201, 2000.

RIBEIRO, J. L. D.; TEN CATEN, C. **Série Monográfica Qualidade: Controle Estatístico do Processo**. Porto Alegre: UFRGS, 2000.

RIBEIRO, J. L. D.; TEN CATEN, C. S.; FRITSCH, C. Controle Integrado de Processos. **Produto & Produção**, v. 2, n. 3, p. 160-175, 1998.

RIBEIRO, J. L. D.; ELSAYED, E. A. A Case Study on Process Optimization Using the Gradient Loss Function. **International Journal of Production Research**, v. 33, n. 12, p. 3233-3248, 1995.

SCHISSATTI, M. L. **Uma Metodologia de Implantação de Cartas de Shewhart para o Controle de Processos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, PPGEP, UFSC. Florianópolis, 1998.

TAGUCHI, G.; ELSAYED, E. A.; HSIANG, T. **Engenharia da Qualidade em Sistemas de Produção**. São Paulo: McGraw Hill, 1990.

TEN CATEN, C. S.; RIBEIRO, J. L. D.; FOGLIATTO, F. S. Implantação do Controle Integrado de Processos. **Produto & Produção**, v. 4, n. 1, p. 22-39, 2000.

UNIÃO EUROPÉIA. Directive 97/68/EC of the European Parliament and of the Council, of 16 December 1997. **Official Journal of the European Union**, 27 fev. 1998. p. L59/1-L59/85. Disponível em: <[http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/en/oj/1998/l\\_059/l\\_05919980227en00010085.pdf](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/en/oj/1998/l_059/l_05919980227en00010085.pdf)>. Acesso em: 10 dez. 2006.

UNIÃO EUROPÉIA. Directive 2002/88/EC of the European Parliament and of the Council, of 9 December 2002. **Official Journal of the European Union**, 11 fev. 2003. p. L35/28-L35/81. Disponível em: <[http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/en/oj/2003/l\\_035/l\\_03520030211en00280081.pdf](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/en/oj/2003/l_035/l_03520030211en00280081.pdf)>. Acesso em: 10 dez. 2006.

VIEGAS, J. **Estabelecimento de um Sistema Integrado de Gestão: Qualidade e Meio Ambiente**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, PPGEP-UFRGS. Porto Alegre: 2000.

WILKINSON, G; DALE, B. G. Integrated management systems: an examination of the concept and theory. **The TQM Magazine**. v. 11, n. 2, p. 95-104, 1999.

WOODALL, W.H. Controversies and Contradictions in Statistical Process Control. **Journal of Quality Technology**. v. 32, n. 4, p. 341-350, 2000.

ZUTSHI, A.; SOHAL, A. S. Integrated management systems The experience of three Australian organizations. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 16, n. 2, p. 211-232, 2005.

## APÊNDICE A: Resumo do Regulamento EPA (40 CFR 90)

O texto atual do regulamento EPA é dividido em subpartes, apresentadas na Tabela 8. Os valores limite para a emissão de poluentes, estabelecidos na subparte B do regulamento, são diferentes de acordo com o tipo e a cilindrada do motor. Para tanto, são definidas 5 classes de motor, mostradas na Tabela 9.

Tabela 8 Subpartes do regulamento 40 CFR 90

Subparte	Título
A	Geral
B	Padrões de emissões e certificação
C	Compensação, acúmulo e troca de créditos
D	Equipamentos de teste de emissões
E	Procedimento de testes de gases de exaustão
F	Auditoria de fiscalização seletiva
G	Importação de motores não conformes
H	Programa de teste na linha de produção do fabricante
I	Requisitos de relato de defeito relacionado a emissões, programa de recall de emissões voluntário, recall solicitado
J	Exclusão e exceções do regulamento de motores não veiculares
K	Ações proibidas e fiscalização geral
L	Garantia quanto a emissões e instruções de manutenção
M	Teste voluntário durante utilização

Tabela 9 Classificação dos motores por tipo e cilindrada conforme EPA

Tipo	Cilindrada [cm <sup>3</sup> ]	Classe
Não portátil	< 66	I-A
	≥ 66 e < 100	I-B
	≥ 100 e < 225	I
	≥ 225	II
Portátil	< 20	III
	≥ 20 e < 50	IV
	≥ 50	V

Fonte: o autor

Este regulamento foi implantado em duas fases, e assim os padrões diferem dependendo da Fase do motor. A vigência dos padrões Fase 1 ou Fase 2 são definidos no texto do regulamento e depende da classe do motor e do volume de produção. Os padrões para Fase 1 são mostrados na Tabela 10. Os padrões para Fase 2 são mostrados na Tabela 11, Tabela 12 e Tabela

13. O regulamento estabelece diversas exceções quanto à vigência dos padrões de acordo com o volume de produção.

Tabela 10 Padrões de emissões para motores EPA Fase 1  
[g/kWh]

Classe de cilindrada do motor	Hidrocarbonetos + óxidos de nitrogênio (HC+NOx)	Hidrocarbonetos	Monóxido de carbono	Óxidos de nitrogênio (NOx)
I	16,1	-	519	-
II	13,4	-	519	-
III	-	295	805	5,36
IV	-	241	805	5,36
V	-	161	603	5,36

Fonte: CFR 40 Parte 90

Tabela 11 Padrões de emissões para motores EPA Fase 2 Classe I-A, I-B e I  
[g/kWh]

Classe de motor	HC+NOx	NMHC+NOx	CO	Data efetiva
I	16,1	14,8	610	1º de agosto de 2007; adicionalmente, qualquer família de motor Classe I produzida inicialmente após 1º de agosto de 2003 deve atender os padrões Fase 2 Classe I antes de serem introduzidos no mercado
I-A	50		610	2001
I-B	40	37	610	2001

Fonte: CFR 40 Parte 90

Tabela 12 Padrões de emissões para motores EPA Fase 2 Classe II  
[g/kWh]

Classe de motor	Requisito de emissão	Ano-modelo				
		2001	2002	2003	2004	2005 e após
Classe II	HC+NOx	18,0	16,6	15,0	13,6	12,1
	NMHC+NOx	16,7	15,3	14,0	12,7	11,3
	CO	610	610	610	610	610

Fonte: CFR 40 Parte 90

Tabela 13 Padrões de emissões para motores EPA Fase 2 das classes portáteis  
[g/kWh]

Classe de motor	Requisito de emissão	Ano-modelo					
		2002	2003	2004	2005	2006	2007 e após
Classe III	HC+NOx	238	175	113	50	50	50
	CO	805	805	805	805	805	805
Classe IV	HC+NOx	196	148	99	50	50	50
	CO	805	805	805	805	805	805
Classe V	HC+NOx	-	-	143	119	96	72
	CO	-	-	603	603	603	603

Fonte: CFR 40 Parte 90

### Subparte D

Há dois métodos permitidos para coleta de emissões: *raw gas* (gás puro) e *Constant Volume Sampling* (CVS). No método *raw gas* uma amostra dos gases de exaustão é coletada continuamente e transportada diretamente para os analisadores, sendo possível medir variações nos valores medidos ao longo do tempo. No método CVS uma amostra dos gases de exaustão é coletada, podendo ser diluída com ar ambiente ou não, e enviada para um recipiente. Terminada a coleta do modo desejado, o material armazenado no recipiente é enviado para os analisadores. Ambos os métodos necessitam analisadores específicos para cada poluente a ser medido, como mostrado na Tabela 14.

Tabela 14 Analisadores específicos para cada componente dos gases de exaustão

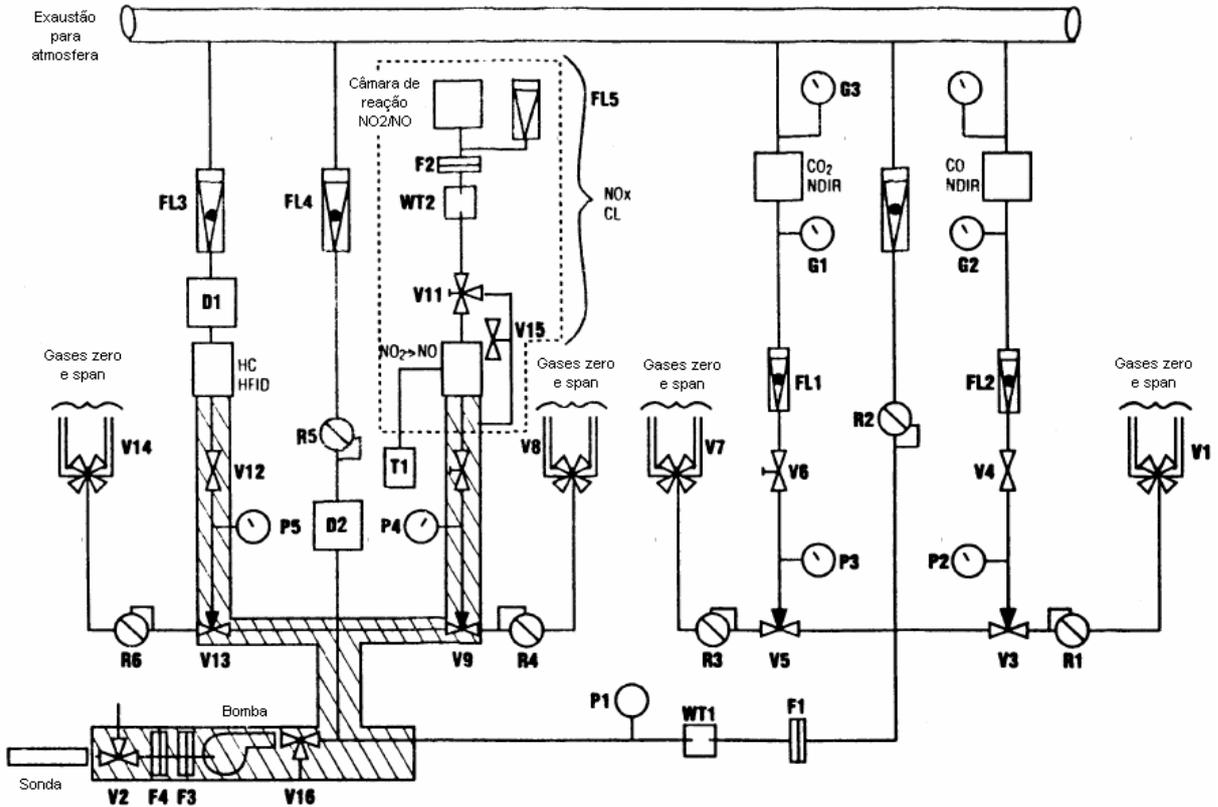
Componente	Analisador
CO	Absorção de infravermelho não dispersivo
CO <sub>2</sub>	(IVND)
HC	Detector de ionização por chama (FID)
NOx	Detector de quimiluminescência (CLD)

Caso seja utilizado o método de amostragem *raw gas*, há algumas exigências a serem cumpridas: a) o analisador FID deve ser aquecido; e b) a amostra deve passar por um condensador para remoção da água, antes de ser enviada para o analisador de CO e CO<sub>2</sub>. As temperaturas dos componentes aquecidos e do condensador estão especificadas no regulamento. A Figura 27 mostra os pontos do sistema que devem ser aquecidos (área hachurada) e a localização do condensador (WT1).

O regulamento especifica requisitos de exatidão dos analisadores, conforme a Tabela 15, além de requisitos de repetitividade, estabilidade e uso da faixa de medição. As especificações da Tabela 15 devem ser verificadas antes da primeira utilização e após grandes manutenções.

Para operação dos analisadores de gases são necessários os gases analíticos listados na Tabela 16. Os gases de calibração devem ser misturas simples e seus valores devem ser derivados de padrões NIST (*National Institute of Standards and Technology*). A concentração verdadeira de um gás de calibração deve ter um desvio máximo de 1% em relação a um gás padrão NIST, sendo permitido o uso de um divisor de gases para obter a concentração necessária para comparação com o padrão NIST. Na calibração dos analisadores é permitido o uso de divisor de gases para obter as concentrações necessárias, desde que garanta erro menor que 2% na

concentração do gás diluído. Os gases de calibração também são usados como gás *span*, que é um gás com concentração conhecida usado para verificar e ajustar a resposta de um analisador.



Legenda:

-  Filtro de particulado
-  Medidor de vazão
-  Regulador de pressão à montante
-  Regulador de pressão à jusante
-  Válvula direcional (Perna escura indica porta comum)
-  Controle de vazão ou válvula de agulha
-  Gases de calibração
-  Área aquecida (se aplicável)

Figura 27 Sistema de amostragem de emissões e conjunto analítico  
 Fonte: 40 CFR 90

Tabela 15 Requisitos de exatidão e frequência de calibração das medições

	Item	Desvio permitido da leitura*		Frequência de calibração
		Não-lenta	Lenta	
1	Rotação do motor	±2%	mesmo	Mensal ou dentro de 1 mês antes do teste de certificação
2	Torque	±2%	mesmo	Mensal ou dentro de 1 mês antes do teste de certificação
3	Consumo de combustível	±2%	±5%	Mensal ou dentro de 1 mês antes do teste de certificação
4	Consumo de ar	±2%	±5%	Como requerido
5	Temperatura do líquido de arrefecimento	±2%	mesmo	Como requerido
6	Temperatura do lubrificante	±2%	mesmo	Como requerido
7	Contrapressão da exaustão	±5%	mesmo	Como requerido
8	Depressão da admissão	±5%	mesmo	Como requerido
9	Temperatura do gás de exaustão	±15°C	mesmo	Como requerido
10	Temperatura do ar de admissão (ar de combustão)	±2°C	mesmo	Como requerido
11	Pressão atmosférica	±0,5%	mesmo	Como requerido
12	Umidade (ar de combustão) (relativa)	±3%	mesmo	Como requerido
13	Temperatura do combustível	±2°C	mesmo	Como requerido
14	Temperatura do sistema de diluição	±2°C	mesmo	Como requerido
15	Umidade do ar de diluição	±3% absoluta	mesmo	Como requerido
16	Analizador de HC	±2%**	mesmo	Mensal ou dentro de 1 mês antes do teste de certificação
17	Analizador de CO	±2%**	mesmo	Mensal ou dentro de 1 mês antes do teste de certificação
18	Analizador de NOx	±2%**	mesmo	Mensal ou dentro de 1 mês antes do teste de certificação
19	Verificação do conversor de NOx	90%	mesmo	Mensal ou dentro de 1 mês antes do teste de certificação
20	Analizador de CO2	±2%**	mesmo	Mensal ou dentro de 1 mês antes do teste de certificação

\*Todos requisitos de exatidão pertencem ao valor final gravado que inclui o sistema de aquisição de dados.

\*\*Se a leitura for menor que 100 ppm a exatidão deve ser ± 2 ppm

Fonte: 40 CFR 90

Tabela 16 Especificação dos gases analíticos para operação dos analisadores

Tipo de gás	Descrição	Concentração e balanço	Contaminação e observações
Gás puro	Nitrogênio		≤1ppmC; ≤1ppmCO; ≤400ppmCO <sub>2</sub> ; ≤0,1 ppmNO
Gás puro	Oxigênio	Pureza de 99,5% vol O <sub>2</sub>	
Gás puro	Ar sintético	O <sub>2</sub> : 18-21%	≤1ppmC; ≤1ppmCO; ≤400ppmCO <sub>2</sub> ; ≤0,1 ppmNO
Combustível para FID	Hidrogênio-hélio	H: 40±2%; He: balanço	≤1ppmC; ≤400ppmCO
Gás de calibração	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Ar sint. ou N <sub>2</sub>	Considerar o limite de segurança para mistura de C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> e ar sintético
Gás de calibração	CO	N <sub>2</sub>	
Gás de calibração	NOx	N <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub> ≤ 0,05NO
Gás de calibração	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	
Gás verificação de interferência	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> /O <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> : 90% do F.E. O <sub>2</sub> : 5% e 10%	Medir concentração de C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> por análise cromatográfica.

Fonte: o autor

O regulamento define procedimentos para calibração e verificação periódica dos analisadores de gases. Para cada faixa de medição de cada analisador há um polinômio usado para calcular a concentração medida a partir do sinal do analisador. Mensalmente é exigida uma linearização, que consiste na calibração dos analisadores com gases com concentrações nominais entre 10 e 90% da faixa de medição, usando no mínimo 6 pontos igualmente espaçados para

cobrir pelo menos 80% da faixa de 10 a 90% (64% da faixa total), conforme exemplos da Tabela 17. Para cada ponto, a diferença entre a concentração real do gás de calibração e a leitura obtida utilizando-se um polinômio ajustado por mínimos quadrados não deve exceder 2%. Caso contrário, defini-se novos coeficientes para o polinômio, capazes de atender a exigência.

Tabela 17 Exemplos de pontos de calibração para linearização

Pontos de calibração (%)	Aceitável para calibração?
20, 30, 40, 50, 60, 70	Não, a faixa coberta é de 50%, não 64%
20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90	Sim
10, 25, 40, 55, 70, 85	Sim
10, 30, 50, 70, 90	Não, apesar dos pontos igualmente espaçados e da faixa inteira ser coberta, é necessário no mínimo 6 pontos

Fonte: 40 CFR 90

Além da linearização, comum a todos os analisadores, há procedimentos de ajuste e verificação específicos para cada tipo de analisador, que estão listados na Tabela 18. Na amostra dos gases de exaustão há, além dos gases que estão sendo analisados, gases que podem interferir nas medições de várias maneiras. Verificações de interferência devem ser realizadas antes da primeira utilização e após reparos.

Tabela 18 Procedimentos específicos por analisador

Componente	Procedimento específico
HC	Otimização da resposta do detector
	Verificação e otimização da interferência com oxigênio
NOx	Verificação da eficiência do conversor de NO <sub>2</sub> em NO
	Verificação da interferência com CO <sub>2</sub>
	Verificação da interferência com H <sub>2</sub> O
CO	Verificação da interferência com H <sub>2</sub> O e CO <sub>2</sub>

Qualquer ponto do sistema, incluindo o sistema de coleta de amostra, deve ser verificado quanto a vazamento. A taxa máxima de vazamento permitida devido a vácuo é de 0,5% da vazão coletada e devido à pressão é de 5% da vazão da amostra.

A exatidão e a frequência de calibração de todos os equipamentos devem obedecer às especificações da Tabela 15, que também devem ser verificadas após manutenções. No mínimo mensalmente ou após manutenções que poderiam afetar a calibração, deve-se realizar um teste de vazamento quanto a vácuo e verificar se o sistema de registro de dados automático atende aos requisitos da Tabela 15.

O combustível usado no teste deve atender determinadas especificações, mostradas no

Anexo A. Durante o acúmulo de serviço ou envelhecimento, no caso de um teste para determinação de DF, deve-se usar gasolina sem chumbo, representativa da gasolina comercial disponível em estabelecimentos de varejo no mercado norte-americano, ou o próprio combustível de teste com as especificações do Anexo A.

A temperatura do ar admitido pelo motor deve ser medida a uma distância máxima de 10 cm do sistema de admissão. A umidade do ar na célula de teste deve ser medida e caso o motor aspire ar ambiente, este valor pode ser adotado para o ar de combustão. A temperatura ambiente na sala de teste deve ser mantida entre 20°C e 30°C. A temperatura e a pressão dentro da sala de teste não devem exceder o limite determinado pelo parâmetro  $f$ , calculado conforme a Equação 25, que deve estar entre 0,96 e 1,04 para que um teste seja válido.

$$f = \frac{99}{p_s} \cdot \left( \frac{T}{298} \right)^{0,7} \quad (25)$$

$p_s$ : pressão atmosférica seca em kPa  
 $T$ : temperatura absoluta em K

### Subparte E

O teste consiste na operação do motor em determinadas seqüências de modos, conforme a classe do motor (Tabela 19). Para as classes I, I-B e II há dois ciclos de teste, enquanto para as demais classes há somente um ciclo. A rotação e a carga para cada modo dos ciclos de teste são mostrados na Tabela 20. Enquanto executa-se o ciclo de teste os gases de exaustão gerados são analisados quanto a componentes específicos. Para cada modo determina-se a concentração de cada poluente, o consumo de combustível e a potência. Os resultados são ponderados e usados para calcular a vazão em massa de cada poluente emitido em relação à potência (g/kWh). As informações que devem ser registradas em cada parte do teste estão na Tabela 21.

Tabela 19 Relação dos ciclos de teste usados para cada classe de motor

Classe de motor	Ciclo de teste
I, I-B, II	A
I, I-B, II	B
I-A, III, IV, V	C

Tabela 20 Descrição dos ciclos de teste

Modo de rotação		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		Rotação nominal					Rotação intermediária					Lenta
Ciclo A	Modo	-	-	-	-	-	1	2	3	4	5	6
	Carga	-	-	-	-	-	100	75	50	25	10	0
	Peso	-	-	-	-	-	9%	20%	29%	30%	7%	5%
Ciclo B	Modo	1	2	3	4	5	-	-	-	-	-	-
	Carga	100	75	50	25	10	-	-	-	-	-	-
	Peso	9%	20%	29%	30%	7%	-	-	-	-	-	-
Ciclo C	Modo	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
	Carga	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
	Peso – Fase 1	90%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10%
	Peso – Fase 2	85%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15%

Fonte: 40 CFR 90

Tabela 21 Informação registrada em cada parte do teste

Parte do teste	Informação
Geral	Número de identificação do motor
	Sistema de controle de emissões
	Operador do teste
	Número de horas de operação acumulada antes do início da fase de aquecimento do teste
	Identificação do combustível
	Para motores de dois tempos, razão de mistura combustível/óleo
	Data da calibração mais recente da bancada de analisadores
Toda informação pertinente sobre a instrumentação como ajuste, ganho, números de série, número dos detectores e curvas de calibração. Desde que esta informação seja rastreável, ela pode ser resumida em um número de identificação do sistema	
Pré-teste	Data e hora do dia
	Número do teste
	Pressão barométrica [kPa]; opcionalmente pode ser uma medição modal ao invés de pré e pós-teste
	<i>Recorder chart</i> ou equivalente com os traços de zero e span para cada faixa de medição usada em cada segmento do teste
Ciclo de teste	Respostas dos analisadores com as concentrações de HC, CO, CO <sub>2</sub> e NO <sub>x</sub> nas emissões e faixas dos analisadores associadas para cada modo de teste
	Torque [N m] observado
	Rotação [rpm] observada
	Potência [kW]
	Vazão de ar aspirada [g/h], se aplicável
	Temperatura [°C] e umidade [mg/kg] na sala de teste para cada modo
	Vazão de combustível [g/h] para cada modo, para medição <i>raw gas</i>
	Temperatura [°C] e umidade [mg/kg] do ar aspirado, se aplicável
	Temperatura [°C] da superfície da câmara de mistura de exaustão, se aplicável
Temperatura [°C] da linha de amostra, se aplicável	
Pós-teste	<i>Recorder chart</i> ou equivalente identificando a verificação de <i>hang up</i>
	<i>Recorder chart</i> ou equivalente com os traços de zero e span para cada faixa de medição usada
	Tempo total acumulado de operação do motor [h] (com exatidão de décimos de hora)
	Pressão barométrica [kPa], segmento pós teste

Fonte: o autor

Os valores finais de emissões quando se utilizar o método *raw gas* baseado na vazão de

combustível devem ser calculados usando as equações de 26 a 32.

$$W_{HC} = \frac{M_{HC_{exh}}}{M_F} \times \frac{G_{FUEL}}{TC} \times \frac{WHC}{10^4} \quad (26)$$

$$W_{CO} = \frac{M_{CO}}{M_F} \times \frac{G_{FUEL}}{TC} \times WCO \quad (27)$$

$$W_{NOx} = \frac{M_{NOx}}{M_F} \times \frac{G_{FUEL}}{TC} \times \frac{WNOx}{10^4} \times K_H \quad (28)$$

Onde:

$W_{HC}$ : vazão em massa de HC na exaustão [g/h];

$M_{HC_{exh}}$ : peso molecular dos hidrocarbonetos na exaustão, conforme Equação 22.

$$M_{HC_{exh}} = M_C + \alpha M_H + \beta M_O \quad (29)$$

Onde:

$M_C$ : peso molecular do carbono = 12,01 [g/mole];

$M_H$ : peso molecular do hidrogênio = 1,008 [g/mole];

$M_O$ : peso molecular do oxigênio = 16,00 [g/mole];

$\alpha$ : razão entre as massas de hidrogênio e carbono no combustível;

$\beta$ : razão entre as massas de oxigênio e carbono no combustível;

$M_F$ : peso molecular do combustível;

$G_{FUEL}$ : vazão mássica de combustível [g/h];

$TC$ : carbono total na exaustão, conforme Equação 32.

$$TC = WCO + WCO_2 + \frac{WHC}{10^4} \quad (30)$$

Onde:

$WCO$ : concentração de CO na exaustão, úmida;

$WCO_2$ : concentração de CO<sub>2</sub> na exaustão, úmida;

$DCO$ : concentração de CO na exaustão, seca;

$DCO_2$ : concentração de CO<sub>2</sub> na exaustão, seca;

$WHC$ : concentração volumétrica de HC na exaustão, ppmC úmida;

$WNOx$ : concentração volumétrica de NOx na exaustão, ppm úmida;

$K$ : fator de correção usado para converter medições de base seca para base úmida, calculado conforme a Equação 33. Portanto, multiplica-se a concentração seca pelo fator K para obter a concentração úmida.

$$K = \frac{1}{1 + 0,005 \times (DCO + DCO_2) \times \alpha - 0,01DH_2} \quad (31)$$

Onde:

$DH_2$ : concentração de H<sub>2</sub> na exaustão, seca, calculado conforme a Equação 34.

$$DH_2 = \frac{0,5 \times \alpha \times DCO \times (DCO + DCO_2)}{DCO + (3 \times DCO_2)} \quad (32)$$

Onde:

$W_{CO}$ : vazão em massa de CO na exaustão [g/h];

$M_{CO}$ : peso molecular do CO = 28,01 [g/mole];

$W_{NOx}$ : vazão em massa de NOx na exaustão [g/h];

$M_{NO_2}$ : peso molecular do  $NO_2$  = 46,01;

$K_H$ : fator de correção dos efeitos da umidade na formação de  $NO_2$  para pequenos motores de quatro tempos à gasolina, calculado conforme a Equação 33. Para motores de dois tempos à gasolina o fator  $K_H$  equivale a 1.

$$K_H = (9,953 \times H + 0,832) \quad (33)$$

Onde:

H: quantidade de água em um gás ideal, cujo cálculo está descrito em 40 CFR 1065.645 onde é chamado de  $x_{H_2O}$ .

Finalmente calcula-se o valor final ponderado da taxa de emissão específica quanto à potência para cada poluente de forma individual conforme a Equação 34.

$$A_{WM} = \frac{\sum_i^n (W_i \times WF_i)}{\sum_i^n (P_i \times WF_i)} \quad (34)$$

Onde:

$A_{WM}$ : valor final ponderado da taxa de emissão de (HC, CO, NOx) em massa específica quanto a potência [g/kWh];

$W_i$ : vazão em massa de emissão durante o modo i [g/h];

$WF_i$ : peso de cada modo de acordo com a Tabela 20;

$P_i$ : potência média gerada durante o modo i [kW], calculado conforme a Equação 35. A potência gerada durante o modo de lenta não deve ser considerada no cálculo dos resultados de emissões.

$$P_i = \frac{2\pi}{60000} \times \text{rotação} \times \text{torque} \quad (35)$$

Onde:

rotação: rotação média do motor medida durante o modo i [rpm];

torque: torque médio do motor medido durante o modo i [Nm].

## APÊNDICE B: Estrutura e padrões de emissões do Regulamento CARB (CCR 13)

A estrutura do regulamento CCR Título 13, Divisão 3, Capítulo 9, Artigo 1 é mostrada na Tabela 22. Os padrões de emissões definidos neste texto estão na Tabela 23.

Tabela 22 Estrutura do regulamento CARB

§	Título
2400	Aplicabilidade
2401	Definições
2402	Procedimentos de Teste
2403	Padrões de Emissões de Exaustão e Procedimentos de Teste – SORE
2404	Rótulos de Controle de Emissões e Informação ao Consumidor – SORE a partir de 1995
2405	Requisitos para Garantia contra Defeitos para SORE a partir de 1995
2406	Declaração de Sistema de Garantia do Sistema de Controle de Emissão
2407	Conformidade de Motores Novos e Teste de Linha de Produção – Seleção, Avaliação e Fiscalização de SORE's novos
2408	Créditos de Redução de Emissões – Diretrizes para Compensação, Acúmulo e Troca de Certificação
2409	Créditos de Redução de Emissões – Programa de Créditos de Produção para Motores Novos

Tabela 23 Padrões de emissões CARB para motores de ignição por centelha [g/kWh]

Ano modelo	Categoria de cilindrada	Períodos de durabilidade (horas)	HC+NOx <sup>(1)(3)</sup>	CO	PM
2005 e subsequente	<50 cc	50/125/300	50	536	2,0 <sup>(2)</sup>
	50-80 cc, inclusive	50/125/300	72	536	2,0 <sup>(2)</sup>
2005	> 80 cc - < 225 cc eixo horizontal	125/250/500	16,1	549	
	> 80 cc - < 225 cc eixo vertical	NA	16,1	467	
	≥ 225 cc	125/250/500	12,1	549	
2006	> 80 cc - < 225 cc	125/250/500	16,1	549	
	≥ 225 cc	125/250/500	12,1	549	
2007	> 80 cc - < 225 cc	125/250/500	10,0	549	
	≥ 225 cc	125/250/500	12,1	549	
2008 e subsequente	> 80 cc - < 225 cc	125/250/500	10,0	549	
	≥ 225 cc	125/250/500/1000	8,0	549	

(1) A agência pode permitir que famílias de motor movidas a gás (por exemplo: propano, gás natural), que satisfaçam as exigências do regulamento, sejam certificadas quanto aos padrões para HC+NOx ou HC, conforme aplicável, com base na porção de NMHC das emissões totais de HC.

(2) Aplicável a todos os motores de dois tempos.

(3) Motores usados exclusivamente no inverno, a opção do fabricante, não precisam atender os padrões de HC+NOx

Fonte: CCR 13

## **APÊNDICE C: Resumo das particularidades das Diretivas 97/68/EC e 2002/88/EC**

A Diretiva 2002/88/EC é uma atualização da Diretiva 97/68/EC. A atualização traz somente adições e alterações, portanto, o texto da Diretiva 97/68/EC que não tenha sido alterado pela Diretiva 2002/88/EC continua válido.

A Figura 28 e a Figura 29 trazem as estruturas das Diretivas 97/68/EC e 2002/88/EC, respectivamente, e tem por objetivo facilitar a consulta à Legislação da UE. Ao pesquisar Artigos, recomenda-se percorrer a estrutura da Diretiva 97/68/EC e ao encontrá-lo verificar na estrutura da Diretiva 2002/88/EC se este foi alterado. Ao pesquisar Anexos, recomenda-se percorrer a estrutura da Diretiva 2002/88/EC. No caso do Anexo ter sido alterado, recorre-se ao texto da Diretiva 97/68/EC em busca de possíveis seções ou apêndices inalterados. No caso do Anexo ter sido adicionado pela Diretiva 2002/88/EC não há necessidade de consulta a Diretiva 97/68/EC. Há ainda Anexos da Diretiva 2002/88/EC que equivalem a Anexos da Diretiva anterior na íntegra, apenas com outro número, levando a consulta do texto anterior.

Para fins da diretiva os motores de ignição por centelha devem ser divididos nas classes mostradas na Tabela 24. Os valores limite para emissões do estágio I e estágio II da União Européia são mostrados na Tabela 25 e na Tabela 26, respectivamente.

A seguir são apresentadas algumas exigências específicas da UE quanto a equipamentos e procedimentos de teste. A UE exige a realização de algumas verificações dos equipamentos, além daquelas exigidas pela EPA, como a verificação da resposta do analisador de HC a diferentes hidrocarbonetos, como metano, propileno e tolueno. Conseqüentemente, estes gases analíticos se fazem necessários, além daqueles exigidos pela EPA.

Artigo 1 - Objetivos
Artigo 2 - Definições
Artigo 3 - Pedido de certificação
Artigo 4 - Procedimento de certificação
Artigo 5 - Alteração da certificação
Artigo 6 - Conformidade
Artigo 7 - Aceitação de certificações equivalentes
Artigo 8 - Registro e colocação no mercado
Artigo 9 - Calendário
Artigo 10 - Isenções e processos alternativos
Artigo 11 - Disposições relativas à conformidade da produção
Artigo 12 - Não-conformidade com o tipo ou família certificados
Artigo 13 - Requisitos em matéria de proteção de trabalhadores
Artigo 14 - Adaptação ao progresso técnico
Artigo 15 - Procedimento do comité
Artigo 16 - Autoridades de certificação e serviços técnicos
Artigo 17 - Transposição para o direito nacional
Artigo 18 - Entrada em vigor
Artigo 19 - Reduções adicionais dos valores-limite das emissões
Artigo 20 - Destinatários
ANEXO I -
1. ÂMBITO DE APLICAÇÃO
2. DEFINIÇÕES, SÍMBOLOS E ABREVIACÕES
3. MARCAÇÕES DE MOTORES
4. ESPECIFICAÇÕES E ENSAIOS
5. ESPECIFICAÇÃO DAS AVALIAÇÕES DA CONFORMIDADE DA PRODUÇÃO
6. PARÂMETROS DE DEFINIÇÃO DA FAMÍLIA DE MOTORES
7. ESCOLHA DO MOTOR PRECURSOR
ANEXO II - FICHA DE INFORMAÇÕES No. . . .
Apêndice 1 - CARACTERÍSTICAS ESSENCIAIS DO MOTOR (PRECURSOR)
Apêndice 2 - CARACTERÍSTICAS ESSENCIAIS DA FAMÍLIA DE MOTORES
Apêndice 3 - CARACTERÍSTICAS ESSENCIAIS DO TIPO DE MOTOR DENTRO DA FAMÍLIA
ANEXO III - PROCEDIMENTO DE ENSAIO
1. INTRODUÇÃO
2. CONDIÇÕES DE ENSAIO
3. ENSAIO
Apêndice 1      1. MÉTODOS DE MEDIÇÃO E COLETA DE AMOSTRA
Apêndice 2      1. CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS ANALÍTICOS
2. CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE PARTICULADO
Apêndice 3      1. AVALIAÇÃO DOS DADOS E CÁLCULOS
ANEXO IV - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO COMBUSTÍVEL DE REFERÊNCIA PRESCRITO PARA OS ENSAIOS DE CERTIFICAÇÃO E PARA VERIFICAR A CONFORMIDADE DA PRODUÇÃO
ANEXO V -      1. SISTEMA ANALÍTICO E DE COLETA DE AMOSTRAS
ANEXO VI - CERTIFICADO DE APROVAÇÃO
Apêndice 1 - RESULTADOS DOS ENSAIOS
ANEXO VII - SISTEMA DE NUMERAÇÃO DOS CERTIFICADOS DE APROVAÇÃO
ANEXO VIII - LISTA DE CERTIFICAÇÕES EMITIDAS PARA MOTORES/FAMÍLIAS DE MOTORES
ANEXO IX - LISTA DOS MOTORES PRODUZIDOS
ANEXO X - FOLHA DE DADOS RELATIVOS AOS MOTORES CERTIFICADOS

Figura 28 Sumário da Diretiva 97/68/EC

Fonte: o autor

Artigo 1 - Alterações aos Artigos 2, 4, 7, 9, 10, 14, 15 e Anexos; adição do Artigo 9a e Lista de Anexos	
Artigo 2 - Transposição para o direito nacional	
Artigo 3 - Reduções adicionais dos valores-limite de emissões de motores pequenos de ignição por centelha, veículos recreativos, motores de ignição por compressão abaixo 18kW e motores com ignição por compressão de locomotivas.	
Artigo 4 - Entrada em vigor	
Artigo 5 - Destinatários	
ANEXO I - Alterações nos pontos 1, 2, 3, 4 e 6	
ANEXO II - Alterações aos Apêndices 2 e 3	
ANEXO III - MÉTODO DE ENSAIO – MOTORES COM IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO	
Alterações nos pontos 2 e 3; e no Apêndice 1	
ANEXO IV - MÉTODO DE ENSAIO PARA OS MOTORES COM IGNIÇÃO POR CENTELHA (novo)	
1. INTRODUÇÃO	
2. CONDIÇÕES DE ENSAIO	
3. ENSAIO	
Apêndice 1	1. MÉTODOS DE MEDIÇÃO E COLETA DE AMOSTRAS
Apêndice 2	1. CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS ANALÍTICOS
Apêndice 3	1. AVALIAÇÃO DOS DADOS E CÁLCULOS
	2. EXEMPLOS
Apêndice 4	1. CONFORMIDADE COM PADRÕES DE EMISSÕES
	2. PERÍODOS DE DURABILIDADE DAS EMISSÕES PARA MOTORES DA FASE II
ANEXO V - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO COMBUSTÍVEL DE REFERÊNCIA PRESCRITO PARA OS ENSAIOS DE CERTIFICAÇÃO E PARA VERIFICAR A CONFORMIDADE DA PRODUÇÃO (antigo Anexo IV)	
Adição de nova tabela e notas de rodapé relacionadas a motores com ignição por centelha	
ANEXO VI - (antigo Anexo V)	
ANEXO VII - CERTIFICADO DE APROVAÇÃO (antigo Anexo VI com as seguintes alterações)	
Apêndice 1 - RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO	
Apêndice 2 - RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA MOTORES DE IGNIÇÃO POR CENTELHA (novo)	
	1. INFORMAÇÕES RELATIVAS À CONDUÇÃO DO ENSAIO
Apêndice 3 - EQUIPAMENTOS E DISPOSITIVOS AUXILIARES A INCLUIR PARA O ENSAIO COM VISTA À DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA DO MOTOR (novo)	
ANEXO VIII - antigo Anexo VII	
ANEXO IX - antigo Anexo VIII	
ANEXO X - antigo Anexo IX	
ANEXO XI - antigo Anexo X	
ANEXO XII - RECONHECIMENTO DE CERTIFICAÇÕES ALTERNATIVAS (novo)	

Figura 29 Sumário da Diretiva 2002/88/EC

Fonte: o autor

Tabela 24 Classificação dos motores por tipo e cilindrada conforme UE

Tipo	Cilindrada [cm <sup>3</sup> ]	Classe
Portátil	< 20	SH:1
	≥ 20 e < 50	SH:2
	≥ 50	SH:3
Não portátil	<66	SN:1
	≥ 66 e < 100	SN:2
	≥ 100 e < 225	SN:3
	≥ 225	SN:4

Fonte: o autor

Tabela 25 Padrões de emissões para motores UE Estágio I

Classe	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NOx [g/kWh]	HC+NOx [g/kWh]
SH:1	805	295	5,36	
SH:2	805	241	5,36	
SH:3	603	161	5,36	
SN:1	519			50
SN:2	519			40
SN:3	519			16,1
SN:4	519			13,4

Fonte: União Européia (2003)

Tabela 26 Padrões de emissões para motores UE Estágio II

Classe	CO [g/kWh]	HC + NOx [g/kWh]
SH:1	805	50
SH:2	805	50
SH:3	603	72
SN:1	610	50
SN:2	610	40
SN:3	610	16,1
SN:4	610	12,1

Fonte: União Européia (2003)

O procedimento de linearização dos analisadores definido na Diretiva exige um número maior de pontos do que a EPA. Para a UE, deve-se utilizar 10 pontos igualmente espaçados (excluindo-se o zero). Para a menor faixa de cada instrumento, deve-se utilizar 10 pontos, espaçados de forma que 5 pontos estejam abaixo de 15% do fundo de escala (FE) e o restante acima de 15% do FE, sendo que a maior concentração deve ser maior ou igual a 90% do FE. O critério para aceitação de cada ponto para uma curva ajustada por mínimos quadrados, é que o desvio deve ser menor que  $\pm 2\%$  do ponto ou  $\pm 0,3\%$  do FE, o que for maior.

Para a UE, o tempo de amostragem para cada modo de operação deve ser de, no mínimo, 180 s. O registro dos dados para cálculo da média do modo deve ser realizado nos últimos 120 s deste período de amostragem. Isto equivale a um período de 60s de estabilização antes de iniciar o registro dos dados.

O parâmetro  $f$  (usado para verificar se as condições de temperatura e pressão da sala atendem os requisitos) é calculado conforme a Equação 36 e deve estar entre 0,93 e 1,07 para que um teste seja válido.

$$f = \left(\frac{99}{p_s}\right)^{1,2} \cdot \left(\frac{T}{298}\right)^{0,6} \quad (36)$$

Onde:

$p_s$ : pressão atmosférica seca em kPa;

$T$ : temperatura absoluta em K.

A diretiva europeia define equações diferentes da EPA para cálculo do fator de correção quanto à umidade das concentrações de CO e CO<sub>2</sub> para método *raw gas*.

Se a medição da concentração de um poluente for realizada em base seca (água retirada da amostra por meio de um condensador), o valor medido deve ser convertido para base úmida multiplicando este pelo fator  $k_w$  calculado conforme a Equação (37).

$$k_w = \frac{1}{1 + \alpha \times 0,005 \times (\%CO[dry] + \%CO_2[dry]) - 0,01 \times \%H_2[dry] + k_{w2}} \quad (37)$$

Onde:

$\alpha$ : razão entre as massas de hidrogênio e carbono no combustível;

$H_2$ : concentração de hidrogênio nas emissões, calculada conforme a Equação (38);

$k_2$ : fator calculado conforme a Equação (39).

$$H_2[dry] = \frac{0,5 \times \alpha \times \%CO[dry] \times (\%CO[dry] + \%CO_2[dry])}{\%CO[dry] + (3 \times \%CO_2[dry])} \quad (38)$$

$$k_{w2} = \frac{1,608 \times H_a}{1000 + (1,608 \times H_a)} \quad (39)$$

Onde:

$H_a$ : umidade absoluta no ar admitido em g de água por kg de ar seco.

O fator  $k_w$  é aplicado no cálculo das vazões em massa de emissão  $Gas_{mass}$  [g/h], calculados conforme a Equação (40), para cada modo.

$$Gas_{mass} = \frac{MW_{Gas}}{MW_{FUEL}} \times \frac{1}{\{(\%CO_2[wet] - \%CO_{2,AIR}) + \%CO[wet] + \%HC[wet]\}} \times \%conc \times G_{FUEL} \times 1000 \quad (40)$$

Onde:

$MW_{Gas}$ : peso molecular do gás individual dado na Tabela 27;

$MW_{Fuel}$ : peso molecular do combustível em [kg/kmole] calculado conforme a Equação

$CO_{2AIR}$ : concentração de  $CO_2$  no ar admitido (assumido igual a 0,04% se não medido);  
 $G_{FUEL}$ : vazão de combustível em massa [kg/h].

Tabela 27 Pesos moleculares dos gases de exaustão

Gás	$MW_{Gas}$ [kg/kmol]
NO <sub>x</sub>	46,01
CO	28,01
HC	$MW_{HC} = MW_{FUEL}$
CO <sub>2</sub>	44,01

$$MW_{FUEL} = 12,011 + 1,00794\alpha + 15,9994\beta \quad (41)$$

Onde:

$\beta$ : razão entre as massas de oxigênio e carbono no combustível.

## APÊNDICE D: Matriz de Comparação dos Requisitos dos Regulamentos

Itens dos Regulamentos	EPA/40 CFR 90	CARB/13 CCR	UE/Diretiva 2002/88/EC
PLT	Subparte H	2407(c) e (d)	I - 5.
A. Equipamentos de teste	Subparte D	2403(d)	VI
1. Dinamômetro	90.305	90.305	IV - App 1 - 1.1
2. Sistema de resfriamento do motor	90.307; 90.404(c)(2)	90.307 <sup>(1)</sup> ; 90.404(c)(2)	IV - 2.4
3. Estação meteorológica			
(a) Temperatura	90.309	90.309	IV - App. 1 - 1.3
(b) Umidade	90.310	90.310	IV - App. 1 - 1.3
4. Sistema de medição do consumo de combustível	90.417	90.417	IV - App 1 - 1.2 e 1.3
5. Sistema de amostragem de emissões	90.304(b); 90.414(a), (f), (g) e (h)	90.304(b); 90.414(a), (f), (g) e (h)	IV - App 1 - 1.; VI - 1.1; IV - App.1 - 1.4.4
(a) Componentes aquecidos	90.327(a)	90.327(a)	VI - Fig. 2
(b) Condensador	90.327(b)	90.327(b)	VI - Fig. 2 - B
(c) Sonda	90.414(b)	90.414(b)	VI - Fig. 2 - SP1
(d) Linha de transferência	90.414(d); 90.415	90.414(d); 90.415	VI - Fig. 2 - HSL1, HSL2 e SL
(e) Filtro aquecido	90.415	90.415	VI - Fig. 2 - F1 e F2
(f) Secagem da amostra	90.313(e)	90.313(e)	IV - App 1 - 1.4.2; VI - Fig. 2 - B
(g) Descarte	90.414(e)	90.414(e)	
6. Analisadores de gases	90.304(c); 90.313; 90.414(a), (f) e (g)	90.304(c); 90.313; 90.414(a), (f) e (g)	IV - App 1 - 1.4 e 1.4.3; VI - 1. até 1.1.1
(a) CO	90.313(a)(1) e (c)(1)	90.313(a)(1) e (c)(1)	IV - App 1 - 1.4.3.1
(b) CO <sub>2</sub>	90.313(a)(2)	90.313(a)(2)	IV - App 1 - 1.4.3.2
(c) O <sub>2</sub>	90.313(a)(3)	90.313(a)(3)	IV - App 1 - 1.4.3.3
(d) HC	90.313(a)(4)	90.313(a)(4)	IV - App 1 - 1.4.3.4
(e) NO <sub>x</sub>	90.313(a)(5)	90.313(a)(5)	IV - App 1 - 1.4.3.5
(f) Requisitos gerais	90.314	90.314	IV - App 1 - 1.4.1
(i) Exatidão	90.314(a)	90.314(a)	IV - App 1 - 1.4.1.1
(ii) Repetitividade	90.314(a)(1)	90.314(a)(1)	IV - App 1 - 1.4.1.2
(iii) Ruído	90.314(a)(2)	90.314(a)(2)	IV - App 1 - 1.4.1.3
(iv) Estabilidade do zero	90.314(a)(3)	90.314(a)(3)	IV - App 1 - 1.4.1.4
(v) Estabilidade do fundo de escala	90.314(a)(4)	90.314(a)(4)	IV - App 1 - 1.4.1.5
(vi) Faixa de operação	90.314(d); 90.413(d)(5)	90.314(d); 90.413(d)(5)	IV - App 1 - 1.4.1

(vii) Registro dos dados	90.413(a)(4)	90.413(a)(4)	IV - App 3 - 1.1
7. Sistema de aquisição de dados	90.412; 90.413	90.412; 90.413	
B. Materiais de referência			
1. Combustível e lubrificante	90.308	90.308 <sup>(2)</sup>	IV - 2.5; 2.7; V <sup>(9)</sup>
2. Gases analíticos	90.312	90.312	IV - App 2 - 1.2 até 1.2.2 <sup>(10)</sup>
C. Controle de sistemas de medição			
1. Exatidão e frequência de calibração	90.328	90.328	IV - App 1 - 1.4.1.1; IV - App 2 - 1.11
2. Calibração do dinamômetro	90.306	90.306	IV - App 1 - 1.3
3. Estandarização do sistema de amostragem de emissões	90.324(a); 90.413(d)(2)	90.324(a); 90.413(d)(2)	IV - App 2 - 1.4
4. Controle dos analisadores de gases			
(a) Calibração			
(i) CO	90.317(c)	90.317(c)	IV - App 2 - 1.5 até 1.5.4 e 1.6
(ii) CO <sub>2</sub>	90.320	90.320	IV - App 2 - 1.5 até 1.5.4 e 1.6
(iii) HC	90.316	90.316	IV - App 2 - 1.5 até 1.5.4 e 1.6
(iv) NOx	90.318(c)	90.318(c)	IV - App 2 - 1.5 até 1.5.4 e 1.6
(b) Linearização			
(i) CO	90.317(c); 90.321	90.317(c); 90.321	IV - App 2 - 1.5.5 até 1.5.5.2 <sup>(11)</sup>
(ii) CO <sub>2</sub>	90.320; 90.321	90.320; 90.321	IV - App 2 - 1.5.5 até 1.5.5.2 <sup>(11)</sup>
(iii) HC	90.316(c)	90.316(c)	IV - App 2 - 1.5.5 até 1.5.5.2 <sup>(11)</sup>
(iv) NOx	90.318(c)	90.318(c)	IV - App 2 - 1.5.5 até 1.5.5.2 <sup>(11)</sup>
(c) Controle específico do analisador de CO			
(i) Interferência com CO <sub>2</sub> e água	90.317(b); 90.325(b)	90.317(b); 90.325(b)	IV - App 2 - 1.10.1
(d) Controles específicos do analisador de HC			
(i) Ajuste do detector			IV - App 2 - 1.9 até 1.9.1
(ii) Fatores de resposta a hidrocarbonetos			IV - App 2 - 1.9.2
(iii) Otimização interferência O <sub>2</sub>	90.316(d)	90.316(d)	IV - App 2 - 1.2.3; IV - App 2 - 1.9.3
(e) Controles específicos do analisador de NOx			
(i) Eficiência do conversor de NO <sub>2</sub> em NO	90.318(b); 90.319	90.318(b); 90.319	IV - App2 - 1.8 até 1.8.10
(ii) Condicionamento do conversor de NO <sub>2</sub> em NO	90.323(b)	90.323(b)	
(iii) Interferência com CO <sub>2</sub>	90.325(c)(1)	90.325(c)(1)	IV - App 2 - 1.10.2.1
(iv) Interferência com H <sub>2</sub> O	90.325(c)(2)	90.325(c)(2)	IV - App 2 - 1.10.2.2
D. Procedimento de teste	Subparte E; 90.707(a)(2) e (g)	2403(d)	Anexo IV
1. Amostragem de motores			
(a) Geral	90.706(c) e (d)	2407(c)(2)(C) e (D), (d)(3) e (4)	I - 5.3.2.1
(b) Coleta			I - 5.3.2, 5.3.2.2 e 5.3.4 <sup>(12)</sup>
(i) Coleta inicial		2407(c)(2)(A)	

I. Famílias certificadas recentemente	90.706(a)(1)	2407(c)(2)(A)1.	
II. Famílias continuadas	90.706(a)(2)	2407(c)(2)(A)2.	
(ii) Coleta subsequente	90.706(b)(3), (5), (6) e (7)	2407(c)(2)(B)3., 5., 6. e 7.; (c)(3)(A)6. <sup>(3)</sup>	
(iii) Coleta adicional	90.706(b)(9)	2407(c)(2)(B)9. <sup>(4)</sup>	
(c) Tamanho de amostra	90.706(b)(1), (2), (4), (5) e (8)	2407(c)(2)(B)1., 2., 4., 5. e 8.	
(i) Em caso de alteração da certificação	90.708(c)(2) e (3)	2407(c)(3)(A)3.	
2. Condições de teste	90.703	2407(d)(1)	IV - 2.1 até 2.8
(a) Condições ambientais	90.311	90.311	IV - 2.1 <sup>(13)</sup>
(b) Motor	90.404(c)(1) e (d); 90.407; 90.707(d), (e) e (f)	90.404(c)(1) e (d); 90.407; 2407(d)(4)(A) e (C)	IV - 2.2; 2.3; VII - App. 3
(i) Alimentação de combustível	90.408(b)(1)	90.408(b)(1)	
(ii) Regulagem	90.409(a)(1); 90.703(b); 90.707(b)(1) e (2)	90.409(a)(1)	IV - 2.6
(iii) Sistema de amostragem de emissões	90.408(b)(2)	90.408(b)(2)	
(c) Dinamômetro			IV - 2.8
3. Seqüência de teste	90.404; 408; 409 e 410	90.404	IV - 3.
(a) Visão geral	90.404	90.404	
(b) Pré-teste	90.408	90.408	
(i) Amaciamento	90.408(a); 90.707(c)	90.408(a); 2407(d)(4)(B)	
(ii) Calibração dos analisadores	90.326	90.326	
(iii) Leak check	90.413(d)(2)	90.413(d)(2)	
(iv) Verificação dos analisadores	90.326(e)(3); 90.408(c); 90.413(d)(6)	90.326(e)(3); 90.408(c); 90.413(d)(6)	IV - 3.4
(c) Teste			
(i) Registro dos dados gerais	90.405(b); 90.409(b)(1)	90.405(b); 90.409(b)(1)	
(ii) Pré-condicionamento do motor	90.409(b)(2)	90.409(b)(2)	IV - 3.5.2
(iii) Registro de dados pré-teste	90.405(c); 90.409(b)(3) e (c)(2)	90.405(c); 90.409(b)(3) e (c)(2)	
(iv) Modos de teste	90.409(b)(4) até (15) e (c)(1); 90.410	90.409(b)(4) até (15) e (c)(1); 90.410	IV - 3.5
(v) Registro de dados de teste	90.405(d); 90.406; 90.412(b); 90.418	90.405(d); 90.406; 90.412(b); 90.418	IV - 3.5.4; 3.5.5 e App 3 - 1.1
I. Tempos de amostragem e registro	90.409(b)(8) e (9)	90.409(b)(8) e (9)	IV - 3.5.3 <sup>(14)</sup>
(d) Pós-teste			
(i) Hang-up de HC	90.411(a)	90.411(a)	
(ii) Verificação dos analisadores	90.326; 90.411(b); 90.413(d)(8)	90.326; 90.411(b); 90.413(d)(8)	IV - 3.6
(iii) Registro de dados pós-teste	90.405(e); 90.409(c)(2); 90.411(d);	90.405(e); 90.409(c)(2); 90.411(d)	
(iv) Cálculo do drift	90.411(e); 90.413(d)(9)	90.411(e); 90.413(d)(9)	
(v) Registro de dados em caso de AB, IN ou RT	90.709(e)(6)(iii) e (iv)		

(e) Reteste	90.707(h)	2407(d)(4)(D)	
(f) Avaliação dos resultados			
(i) Cálculos			
I. Potência	90.412(d)	90.412(d); 2407(d)(1)(A) <sup>(5)</sup>	
II. Emissões	90.412(e)	90.412(e); 2407(d)(1)(A)	IV – App 3 – 1.2 até 1.2.3 e 2.2 até 2.2.5 <sup>(15)</sup>
III. Resultado final	90.419; 90.709(a), (b) e (c)	90.419; 90.404(e) <sup>(6)</sup> ; 2407(c)(4)(A), (B) e (C)	IV – App 3 – 1.2.4 e 2.2.6
(ii) Critério de conformidade			I – 5
I. Critério para cada motor	90.710(a)	2407(c)(3)(A)4.	
II. Critério para família de motor	90.710(b); 90.709(d)	2407(c)(3)(A)5 e 8; (c)(4)(D)	IV – App 4 – 1 até 1.2; I – 5.3.2.1 até 5.3.4 <sup>(16)</sup>
III. CumSum	90.708(a) e (b)	2407(c)(3)(A)1, 2, 7 e 9 <sup>(7)</sup>	
IV. Em caso de alteração da certificação	90.708(c)	2407(c)(3)(A) 3.	
4. Documentação			
(a) Teste	90.405	90.405	VII – App 2
(i) Dados gerais	90.405(b); 90.704(a)(2) e (b)	90.405(b)	VII – App 2 – 1. até 1.3.2
(ii) Dados do pré-teste	90.405(c)	90.405(c)	
(iii) Dados do teste (por modo)	90.405(d); 90.406	90.405(d); 90.406	VII – App 2 – 1.4 até 1.5.2
(iv) Dados do pós-teste	90.405(e)	90.405(e)	
(b) Geral	90.704		I – 5.2.3 e 5.3.1
5. Ações em caso de não conformidade			I – 5.3.4 <sup>(17)</sup>
(a) Suspensão e revogação do certificado			
(i) Para um motor	90.711(a) e (e)	2407(d)(6)(A) e (E)	
(ii) Para uma família de motor	90.711(b), (c), (d), (e), (f), (k) e (l)	2407(d)(5)(A); (6)(B) <sup>(8)</sup> , (C), (D), (E), (F), (K) e (L)	
(b) Ações em caso de suspensão/revogação do certificado			
(i) Para um motor	90.711(g) e (j)	2407(d)(6)(G)	
(ii) Para uma família de motor			
I. Em caso de suspensão	90.711 (b), (f), (h), (j), (l) e (m)	2407(d)(6)(B), (F), (H), (J), (L) e (M)	
II. Em caso de revogação	90.711 (b), (f), (i), (j) e (l)	2407(d)(6)(B), (F), (I), (J) e (L)	
6. Relatórios trimestrais	90.709(e)	2407(c)(3)(B); 2407(c)(4)(E)	

(1) Na certificação deve-se demonstrar que o resfriamento suplementar resultante do uso de ventiladores externos é representativo da operação em uso;

(2) Especificações do combustível certificado diferentes da EPA. Caso não seja utilizado combustível certificado no acúmulo de serviço, o número de octanas do combustível é estabelecido pelo regulamento;

(3) Realização de no mínimo 2 PLT por trimestre, independente do cálculo de tamanho de amostra;

(4) Amostras além do tamanho máximo de amostra são consideradas no cálculo de N e C<sub>i</sub>;

(5) A potência medida na certificação pode ser usada como constante durante PLT;

(6) Cálculo da estimativa do material particulado (PM) a partir da concentração de HC e da razão da mistura óleo/combustível;

- (7) Em caso de retrabalho em uma família reprovada e reinício da produção, os testes anteriores serão descartados e o CumSum iniciará novamente no próximo teste;
- (8) A suspensão não ocorrerá antes de 15 dias (para EPA antes de 30 dias) a partir da determinação da não conformidade;
- (9) Especificações do combustível certificado diferentes da EPA;
- (10) Gases para verificação dos fatores de resposta a hidrocarbonetos (exclusiva da UE);
- (11) Linearização: 10 pontos igualmente espaçados (excluindo zero); Menor faixa de medição – 10 pontos espaçados de forma que 5 pontos estejam abaixo de 15% do FE; Para todas as faixas a maior concentração deve ser  $\geq 90\%$  do FE; Erro admissível:  $\pm 2\%$  da leitura ou  $\pm 0,3\%$  do FE, o que for maior;
- (12) Texto não determina datas ou número mínimo e máximo de amostras. Testes de acordo com procedimento da diretiva são realizados somente durante inspeções do órgão certificador, caso o inspetor considere necessário, ou conforme acordo entre fabricante e órgão certificador;
- (13) Fórmula para cálculo e limites para o parâmetro f diferentes da EPA;
- (14) Tempo de estabilização entre o início da coleta de emissões e início do registro do sinal deve ser de 60 s (a EPA só diz que o tempo de resposta do sistema deve ser levado em consideração antes de iniciar o registro do sinal, mas não fixa um valor). O tempo de registro do sinal em cada modo é de 120 s (igual para EPA e UE);
- (15) Considera em seus cálculos a concentração de CO<sub>2</sub> presente no ar admitido. O fator de correção da umidade para as concentrações de CO e CO<sub>2</sub> considera a umidade presente no ar admitido;
- (16)  $\bar{x} + k \cdot S_i \leq L$  (ver Anexo F);
- (17) Se os critérios de conformidade não forem atendidos, o órgão de certificação deve garantir que sejam tomadas todas as ações necessárias para restabelecer a conformidade o mais rápido possível.

## ANEXO A: Especificações do combustível de teste EPA

Item	Propriedade	Tolerância	Procedimento (ASTM) <sup>1</sup>
Enxofre, ppm max	339		D 2622-92
Benzeno, Max %	1,5		D 3606-92
RVP, psi	8,7	± 0,2	D 5191-93 <sup>a</sup>
Octanas, R+M/2	87,3	± 0,5	D 2699-92 / D2700-92
Ponto de ebulição inicial, °C	32,8	± 11,0	D 86-93
Ponto 10% , °C	53,3	± 5,5	D 86-93
Ponto 50%, °C	103,3	± 5,5	D 86-93
Ponto 90%, °C	165,6	± 5,5	D 86-93
Ponto final, máx °C	212,8	± 5,5	D 86-93
Fósforo, g/Litro, máx.	0,02		D 3231-89
Chumbo, g/Litro, máx.	0,02		
Manganês, g/Litro, máx.	0,004		
Aromáticos, %	32,0	± 4,0	D 1319-89
Olefinas, %	9,2	± 4,0	D 1319-89
Saturados, %	Remanescente		D 1319-89

<sup>1</sup>Todos procedimentos ASTM nesta tabela foram incorporados por referência

## ANEXO B: Exemplo de Plano de Amostragem para Auditoria de Fiscalização Seletiva da EPA

Plano de amostragem para famílias de motor com venda anual acima de 500 unidades.

Stage	Pass No.	Fail No.
1	(1)	(2)
2	(1)	(2)
3	(1)	(2)
4	(1)	(2)
5	0	(2)
6	0	6
7	1	7
8	2	8
9	2	8
10	3	9
11	3	9
12	4	10
13	4	10
14	5	11
15	5	11
16	6	12
17	6	12
18	7	13
19	7	13
20	8	14
21	8	14
22	9	15
23	9	15
24	10	16
25	11	16
26	11	17
27	12	17
28	12	18
29	13	19
30	13	19
31	14	20
32	14	20
33	15	21
34	15	21
35	16	22
36	16	22
37	17	23
38	17	23
39	18	24
40	18	24
41	19	25
42	19	26
43	20	26
44	21	27
45	21	27
46	22	28
47	22	28
48	23	29
49	23	29
50	24	30
51	24	30
52	25	31
53	25	31
54	26	32
55	26	32
56	27	33
57	27	33
58	28	33
59	28	33
60	32	33

<sup>1</sup> Test sample passing not permitted at this stage.

<sup>2</sup> Test sample failure not permitted at this stage.

## ANEXO C: Coeficientes para intervalos de confiança de 95% com uma cauda ( $t_{95}$ )

n: número de testes realizados

n	$t_{95}$	n	$t_{95}$	n	$t_{95}$
2	6,31	12	1,80	22	1,72
3	2,92	13	1,78	23	1,72
4	2,35	14	1,77	24	1,71
5	2,13	15	1,76	25	1,71
6	2,02	16	1,75	26	1,71
7	1,94	17	1,75	27	1,71
8	1,90	18	1,74	28	1,70
9	1,86	19	1,73	29	1,70
10	1,83	20	1,73	30	1,70
11	1,81	21	1,72	$\infty$	1,645

## ANEXO D: Especificações para Gasolina de Certificação para Califórnia

Propriedade do combustível <sup>(a)</sup>	Limite	Método de teste <sup>(b)</sup>
Octanas (R+M)/2	91 (min)	D 2699-88, D2700-88
Sensibilidade	7,5 (min)	D 2699-88, D2700-88
Chumbo	0-0,01 g/gal (max); sem adição de chumbo	§2253.4(c) CCR Título13
Faixa de destilação:		§2263 CCR Título13 <sup>(c)</sup>
Ponto 10%	130-150°F	
Ponto 50% <sup>(d)</sup>	200-210°F	
Ponto 90% <sup>(e)</sup>	290-300°F	
Ponto final, máximo	390°F	
Resíduo	2,0 vol% (max)	
Enxofre	30-40 ppm em massa	§2263 CCR Título13
Fósforo	0,005 g/gal (max)	§2253.4(c) CCR Título13
RVP	6,7-7,0 psi	§2263 CCR Título13
Olefinas	4,0-6,0 vol%	§2263 CCR Título13
Hidrocarbonetos aromáticos totais	22-25 vol%	§2263 CCR Título13
Benzeno	0,8-1,0 vol% <sup>(f)</sup>	§2263 CCR Título13
Hidrocarbonetos aromáticos alquila multisubstituídos	12-14 vol% <sup>(g)</sup>	
MTBE	10,8-11,2 vol%	§2263 CCR Título13
Aditivos	Suficientes para atender os requisitos de §2257 CCR Título 13	
Corrosão do cobre	No. 1	D 130-88
Goma, lavada	3,0mg/100mL (max)	D 381-86
Estabilidade a oxidação	1000 minutos (min)	D 525-88
Gravidade específica	Reportar <sup>(h)</sup>	
Calor de combustão	Reportar <sup>(h)</sup>	
Carbono	Reportar % em massa <sup>(h)</sup>	
Hidrogênio	Reportar % em massa <sup>(h)</sup>	

(a) A gasolina deve ser misturada a partir de estoques típicos de refinaria.

(b) Especificações ASTM ao menos que especificado em contrário. Métodos diferentes dos especificados podem ser usados se a Agência determinar que os resultados são equivalentes.

(c) Apesar do §2263 CCR Título 13 se referir a temperaturas dos pontos de 50 e 90 %, este procedimento pode ser estendido para as temperaturas dos pontos de 10% e final, e para determinação do conteúdo de resíduo.

(d) A faixa para teste interlaboratorial é de 195-215°F.

(e) A faixa para teste interlaboratorial é de 285-305°F.

(f) A faixa para teste interlaboratorial é de 0,7-1,1 em volume %.

(g) "Detailed Hydrocarbon Analysis of Petroleum Hydrocarbon Distillates, Reformates, and Gasoline by Single Column High Efficiency (Capillary) Column Gas Chromatography" por Neil Johansen, 1992, Boulder, CO.

(h) O fabricante do combustível deve relatar esta propriedade ao comprador. Qualquer método de teste geralmente aceito pode ser usado e deve ser identificado no relatório.

## ANEXO E: Critério de Avaliação da Auditoria de Fiscalização CARB

Os motores devem ser testados em grupos de cinco, até se obter uma decisão de “Aprovado” ou “Reprovado” para cada poluente independentemente, de acordo com a seguinte tabela:

Número de motores testados	Decisão de “Reprovado” se $U \geq$	Decisão de “Aprovado” se $U \leq$
5	2,18	-0,13
10	2,11	0,51
15	2,18	0,88
20	2,29	1,16

Onde:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_0)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_0)^2}}$$

$x_i$  = emissões de um poluente para o  $i$ -ésimo motor testado

$\mu_0$  = padrão de emissão aplicável àquele poluente

$n$  = número de motores testados

Se nenhuma decisão for possível após testar 20 motores, deve-se testar 10 motores adicionais. Se a média dos valores de emissões dos 30 motores exceder qualquer padrão de emissão, para o qual não havia decisão de aprovação anterior, a decisão será de reprovação.

## ANEXO F: Critério de Avaliação para Inspeção da Conformidade da Produção da UE

O fabricante deve determinar o tamanho de amostra  $n$  em acordo com o órgão de certificação. A média aritmética ( $\bar{x}$ ) dos resultados da amostra deve ser calculada para cada poluente. A produção estará em conformidade se a seguinte condição for atendida:

$$\bar{x} + k \cdot S_t \leq L^{(1)}$$

Onde:

$L$  é o valor limite que equivale aos padrões de emissões de cada poluente.

$k$  é um fator estatístico que depende de  $n$  e é dado na seguinte tabela:

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k	0,973	0,613	0,489	0,421	0,376	0,342	0,317	0,296	0,279
n	11	12	13	14	15	16	17	18	19
k	0,265	0,253	0,242	0,233	0,224	0,216	0,210	0,203	0,198

$$\text{se } n \geq 20, k = \frac{0,860}{\sqrt{n}}$$

<sup>(1)</sup>  $S_t^2 = \sum \frac{(x - \bar{x})^2}{n - 1}$  onde  $x$  é qualquer um dos resultados individuais obtidos com a amostra  $n$ .

## ANEXO G: Especificações para Combustível de Referência para Motores com Ignição por Centelha da Legislação Européia

Nota: o combustível para motores de dois tempos é uma mistura de óleo com gasolina, especificada a seguir. A razão da mistura combustível/óleo deve ser recomendada pelo fabricante, conforme indicado no ponto 2.7 do Anexo IV.

Parâmetro	Unidade	Limites <sup>(1)</sup>		Método de ensaio	Publicação
		Mínimo	Máximo		
Índice de octanas teórico, RON		95,0	-	EM 25164	1993
Índice de octanas motor, MON		85,0	-	EM 25163	1993
Densidade a 15°C	kg/m <sup>3</sup>	748	762	ISO 3675	1995
Pressão de vapor (método Reid)	kPa	56,0	60,0	EM 12	1993
Destilação					
Ponto de ebulição inicial	°C	24	40	EN-ISO 3405	1998
- Evaporação a 100°C	% v/v	49,0	57,0	EN-ISO 3405	1998
- Evaporação a 150°C	% v/v	81,0	87,0	EN-ISO 3405	1998
- Ponto de ebulição final	°C	190	215	EN-ISO 3405	1998
Resíduo	%	-	2	EN-ISO 3405	1998
Análise de hidrocarbonetos					
- Olefinas	% v/v	-	10	ASTM D 1319	1995
- Compostos aromáticos	% v/v	28,0	40,0	ASTM D 1319	1995
- Benzeno	% v/v	-	1,0	EM 12177	1998
- Saturados	% v/v	-	balanço	ASTM D 1319	1995
Razão carbono/hidrogênio		relatório	relatório		
Estabilidade de oxidação <sup>(2)</sup>	minutos	480	-	EN-ISO 7536	1996
Teor de oxigênio	5% m/m	-	2,3	EN 1601	1997
Goma existente	mg/ml	-	0,04	EN-ISO 6246	1997
Teor de enxofre	mg/kg	-	100	EN-ISO 14596	1998
Corrosão em cobre a 50°C		-	1	EN-ISO 2160	1995
Teor de chumbo	g/ml	-	0,005	EN 237	1996
Teor de fósforo	g/ml	-	0,0013	ASTM D 3231	1994

Nota 1: Os valores indicados na especificação são “valores reais”. Para fixar os valores-limite, aplicaram-se os termos da norma ISO 4259, *Petroleum products - Determination and application of precision data in relation to methods of test* e, para fixar um valor mínimo, tomou-se em consideração uma diferença mínima de 2R acima do zero; ao fixar um valor máximo e mínimo, a diferença mínima é de 4R (R = reprodutibilidade). Embora esta medida seja necessária por razões estatísticas, o fabricante de combustíveis deve, no entanto, tentar obter um valor nulo quando o valor máximo estipulado for 2R e um valor médio no caso de serem indicados os limites máximo e mínimo. Se for necessário determinar se um combustível satisfaz ou não as condições das especificações, aplicam-se os termos constantes da norma ISO 4259.

Nota 2: O combustível pode conter inibidores de oxidação e desativadores de metais normalmente utilizados para a estabilização das correntes de gasolina em refinarias, mas não devem ser adicionados aditivos detergentes/dispersivos nem óleos solventes.