JOÃO CARLOS SALAMANI

**Análise de Risco e Aumento da Confiabilidade de Motores Otto com
Relação às Falhas Esporádicas e de Difícil Diagnóstico**

**São Paulo
2018**

JOÃO CARLOS SALAMANI

**Análise de risco e aumento da confiabilidade de motores Otto com
relação às falhas esporádicas e de difícil diagnóstico**

**Tese apresentada como à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção de título de Doutor
em Ciências**

**São Paulo
2018**

JOÃO CARLOS SALAMANI

**Análise de risco e aumento da confiabilidade de motores Otto com
relação às falhas esporádicas e de difícil diagnóstico**

**Tese apresentada como à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção de título de Doutor
em Ciências**

**Área de concentração:
Engenharia Mecatrônica**

**Orientador:
Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de
Souza**

**São Paulo
2018**

CATALOGAÇÃO NA FONTE EPUSP

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Salamani, João Carlos

Análise de risco e aumento da confiabilidade de motores Otto com relação às falhas esporádicas e de difícil diagnóstico / J. C. Salamani -- versão corr. -- São Paulo, 2018.
203 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1.Sistemas Elétricos (Confiabilidade) 2.Simulação e Testes 3.Estudo de casos I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos II.t.

Ao meu pai George, em memória, e à minha mulher Liamara.

AGRADECIMENTOS

Sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza pela seriedade e pela atenção incondicional a mim prestada.

Aos engenheiros Henrique Destro e Fernando Gonzalez e aos analistas Paulo Engelmann e Luiz Calaça pela fundamental contribuição na construção do equipamento de teste.

É impossível evitar falhas, no entanto, permanece nossa missão evitá-las, se possível. (Sir Karl R. Popper)

RESUMO

O objetivo do presente trabalho de pesquisa é o desenvolvimento de uma metodologia de monitoramento e detecção de defeitos esporádicos e de difícil diagnóstico, bem como o estudo de caso de sistemas de ignição de motores de combustão interna do ciclo Otto. O estudo visa aumentar a robustez do sistema perante falhas esporádicas de difícil detecção, reduzindo drasticamente o tempo de determinação da origem da falha. Através de testes acelerados e simulados em bancadas, a metodologia indica o estado atual dos componentes do sistema de ignição no tocante ao potencial de ocorrência de falhas esporádicas que afetam a combustão e também a confiabilidade do veículo. Os componentes e sistemas objetos da pesquisa são identificados por meio de um processo de análise de risco e de fatores como: ocorrência de muitos anos de histórico de campo, indicadores de reparos repetitivos, falhas esporádicas e de difícil diagnóstico, quebras de qualidade e do comportamento do sistema de diagnóstico OBD Br-2 (*On-Board Diagnostic* versão 2) diante de falhas intermitentes. A metodologia também proporciona uma ferramenta de análise de interfaces de componentes, que são fontes de falhas potenciais nem sempre consideradas nos processos de análise. Por meio de testes acelerados desses componentes críticos, é proposta metodologia para análise e correção imediata do processo produtivo de tais componentes, culminando na melhoria da confiabilidade dos processos críticos. A metodologia visa a aumentar a robustez do sistema de ignição, detectando rapidamente potenciais falhas esporádicas de difícil diagnóstico oriundas dos processos de fabricação e corrigindo-as imediatamente, introduzindo, assim, um fator de confiabilidade a um componente ou a um processo crítico cuja criticidade era até então desconhecida. Tal criticidade passa a ser gerenciada com impacto positivo nas emissões de poluentes e na confiabilidade global do conjunto.

Palavras-chave: Confiabilidade. Sistema de ignição. Processos. Produtos. Motores de combustão. Emissões de Poluentes. OBD Br-2. Componentes críticos.

ABSTRACT

The objective of this research work is the development of a methodology to monitor and identify sporadic and difficult to detect failures as well as present a case study on the ignition system of internal combustion engines. Such study aims to increase the system reliability. It also helps to reduce dramatically the time to define the failure root cause.

Using accelerated test benches, the methodology will indicate the current situation of the components related to the potential of intermittent failure occurrence which affect the combustion and vehicle reliability.

The components and systems of this study are identified by a process risk analysis as well as factors like: occurrence time history, repetitive repair index, sporadic and difficult to detect failures, quality breakdown index, and the behavior of the OBD-2 diagnostic system (*On-Board Diagnostic* version 2)

The methodology will also provide a tool to analyze the components interfaces. Such interfaces are a source of potential failures but are not considered in the analysis process. By means of accelerated tests of such critical parts it will be proposed an analysis methodology and a prompt interference at the production process, increasing the reliability of the critical processes.

The methodology aims the system robustness increase of the ignition system detecting very fast the sporadic failure potential on the manufacturing process. By introducing a reliability degree of a component or process it will be managed with a benefic impact on emissions and overall reliability of the ignition system.

Keywords: Ignition system reliability. Process reliability. Product reliability. Internal combustion engines. Emissions. OBD Br-2.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxo de atividades da concepção, fabricação e uso, bem como as retroalimentações para melhoria da confiabilidade.....	34
Figura 2 – Determinação quantitativa da confiabilidade de um sistema.....	37
Figura 3 – Curva da vida de um componente ou sistema elétrico.....	38
Figura 4 – Extrapolação dos dados em sobrecarga para a situação em carregamento normal.....	45
Figura 5 – Modelos de dependência da tensão com o tempo.....	47
Figura 6 – Fluxo de análise da verificação e teste acelerado.....	49
Figura 7 – Curva da distribuição de Weibull para diferentes ângulos de flexão.....	51
Figura 8 – Exemplo de Aceleração Uniforme – β constante.....	52
Figura 9 – Exemplo de Aceleração Não Uniforme – β diferente.....	53
Figura 10 – Comportamento do componente diante da falha ao longo do tempo, via teste qualitativo.....	54
Figura 11 – Gráfico probabilidade da falha versus consequência da ocorrência.....	56
Figura 12 – Fluxo de análise de risco.....	57
Figura 13 – Eventos de falha em série e em paralelos e as respectivas composições Booleanas	61
Figura 14 – Pressão na câmara de combustão versus posição do virabrequim e o instante necessário de se obter a centelha.....	66
Figura 15 – Esquema técnico do funcionamento de uma bobina de ignição.....	67
Figura 16 – Esquema elétrico indicando as possibilidades de arranjo entre os induzidos primário e secundário.....	68
Figura 17 – Esquema elétrico indicando arranjo módulo eletrônico, bateria e conjunto vela, bobina e cabos de vela em uma única peça.....	69
Figura 18 – Diversas formas de se estabelecer a centelha entre eletrodo e isolante.....	70
Figura 19 – Gráfico mostrando a relação entre tempo e tensão entre os eletrodos..	71
Figura 20 – Gráficos mostrando a relação entre o tempo e a corrente primária e a de ignição.....	72
Figura 21 – Tipos de folga entre o eletrodo e o isolante nas velas de ignição.....	75
Figura 22 – Gráfico ilustrando a relação entre a folga no eletrodo e a tensão de ignição.....	75
Figura 23 – Perfil esperado da erosão e do desgaste do eletrodo.....	76
Figura 24 – Gráfico do tempo de operação do motor versus tensão de ignição.....	76
Figura 25 – Flange traseira que faz a vedação do óleo lubrificante do motor e acomoda o sensor de rotação do virabrequim.....	80
Figura 26 – Esquema mostrando o gráfico rotação versus tempo nos casos em que houve falha de combustão e nos casos de combustão normal	81
Figura 27 – Esquema mostrando cada cilindro, onde o módulo recebe informação de dois sensores de posição	81
Figura 28 – Dois ciclos do motor são apresentados para o evento <i>misfire</i> no primeiro e no quinto cilindro. O sinal de falha do motor é apresentado em linhas pontilhadas para o cilindro 5 e em linha contínua para o cilindro 1	82

Figura 29 – Fluxo de atividades sugeridas para a identificação e o tratamento de falha esporádica.....	90
Figura 30 – Fluxo de atividades para planejamento do teste até a reprodução da falha.....	94
Figura 31 – Fluxo de análise para definição dos parâmetros de teste.....	95
Figura 32 – Fluxo de análise envolvendo a comprovação da eficácia.....	97
Figura 33 – Fluxo de análise envolvendo a elaboração de uma instrução técnica para o campo.....	98
Figura 34 – Modos de falha do sistema de acordo com DIN 25424-1.....	100
Figura 35 – Símbolos da Árvore de Falhas.....	101
Figura 36 – Resumo das conexões básicas.....	102
Figura 37 – Diagrama de Venn para as configurações básicas.....	103
Figura 38 – Procedimento básico para estruturar uma árvore de falha, conforme a norma DIN 25424-1.....	104
Figura 39 – Falha esporádica e de difícil diagnóstico.....	106
Figura 40 – Defeitos na bobina.....	107
Figura 41 – Falha nos cabos de ignição.....	108
Figura 42 – Falhas nas velas de ignição.....	109
Figura 43 – Bancada de teste acelerado para bobinas de ignição.....	114
Figura 44 – Bancada para teste de velas de ignição e cabos de velas.....	115
Figura 45 – Esquema da relação entre corrente no primário, tensão no secundário e pulso do módulo de potência.....	116
Figura 46 – Esquema elétrico da geração de sinais e de teste de bobina.....	115
Figura 47 – Gerador de funções e a função pulso de onda quadrada.....	119
Figura 48 – Osciloscópio e as quatro saídas dos parâmetros de teste.....	120
Figura 49 – Esquema da medição da tensão no secundário.....	120
Figura 50 – Teste de avaliação de uma peça em boas condições e em conformidade com as especificações.....	121
Figura 51 – Teste de avaliação de uma peça em más condições e em não conformidade com as especificações.....	122
Figura 52 – Bancada para teste de velas de ignição e cabos de velas.....	124
Figura 53 – Compressor elétrico de 20 bar.....	124
Figura 54 – Bancada de teste acelerado para velas e cabos.....	125
Figura 55 – Detalhe do cabeçote para teste de velas e cabos de velas.....	125
Figura 56 – Velas de ignição em funcionamento observadas pela parte inferior do equipamento.....	126
Figura 57 – Recipiente de aço inox e esferas de inox para forçar a ruptura do isolamento.....	128
Figura 58 – Cuba com esferas de inox para teste de velas de ignição e cabos velas.....	129
Figura 59 – Experimento em que a peça é aquecida, a falha, evidenciada a 100 °C.....	133
Figura 60 – Raios X do terminal de contato em perfeita condição.....	134
Figura 61 – Fio interno torcido, cuja falha só se manifesta em altas temperaturas.....	134
Figura 62 – Mau contato do terminal da bobina e do estágio de potência.....	135
Figura 63 – Peça danificada por batida, queda ou choque, cujo desempenho será afetado.....	136

Figura 64 – Osciloscópio mostra que impacto ou choque pode levar à alteração da disponibilidade de tensão no terminal secundário.....	136
Figura 65 – Falha no processo de enrolamento.	137
Figura 66 – Dano no transistor do módulo de potência e a consequente alteração da tensão da bobina.....	138
Figura 67 – Bolha de encapsulamento levando à geração de calor na região.....	139
Figura 68 – Avaliação dos valores de temperatura que podem ser atingidos na região da bolha.....	139
Figura 69 – Desvio da trajetória do bobinamento com consequências na ignição.....	140
Figura 70 – Oxidação nos terminais causando perda de potência.....	141
Figura 71 – Impacto da oxidação: osciloscópio mostra perda de tensão no secundário.....	141
Figura 72 – Raios X mostrando a crimpagem incorreta do cabo.....	142
Figura 73 – Falhas por excesso e fios residuais.....	142
Figura 74 – Raios X mostram a falha encontrada na solda do transistor do módulo de potência. Macrografia mostra a comparação entre a solda correta e a solda incompleta.....	143
Figura 75 – Macrografia mostra o curto-circuito do carretel secundário, gerando redução da tensão de oferta.....	144
Figura 76 – Macrografia mostra o curto-circuito do carretel secundário, gerando redução da tensão de oferta.....	145
Figura 77 – Raios X mostram o curto-circuito do carretel secundário, gerando redução da tensão disponível no secundário por causa de fio solto no processo.....	145
Figura 78 – Porosidades nos carretéis plásticos por falhas na injeção.....	146
Figura 79 – Fuga de corrente gera oscilações de tensão e corrente no primário e interferência eletromagnética que causam os distúrbios.....	147
Figura 80 – Raios X da falta de contato elétrico. Do lado esquerdo, o correto assentamento.....	148
Figura 81 – Furo na região do conector originado por falha na montagem.....	148
Figura 82 – Deformação do metal de proteção por seguidas desmontagens.....	149
Figura 83 – Resistores danificados e que levam a alterações nos valores de resistência.....	149
Figura 84 – Falhas mecânicas nos componentes metálicos, em especial trincas, levam a falhas na condução e no isolamento.....	150
Figura 85 – Porosidades em componentes metálicos.....	150
Figura 86 – Região oxidada nos terminais.....	151
Figura 87 – Região contaminada por óleo.....	151
Figura 88 – No isolador, trinca que afeta a qualidade da centelha.....	152
Figura 89 – Falha na compactação no processo do isolador e que pode provocar perda de energia na centelha	152
Figura 90 – Deficiência na microestrutura da cerâmica.....	153
Figura 91 – Vazios identificados no material cerâmico que podem causar falhas na ignição.....	153
Figura 92 – Arranjo geral da motorização, objeto da análise de risco e esquema técnico dos sistemas envolvidos na formação do evento indesejável.....	156
Figura 93 – Diagrama de falha para todo o arranjo geral de motorização.....	159
Figura 94 – Gráfico Consequência versus probabilidade.....	160
Figura 95 – Bobina de um motor 1,6 litro que apresentou falha em campo.....	172

Figura 96 – Estufa a 100 °C levou a peça a aquecimento e posterior teste em bancada.....	172
Figura 97 – Raios X da peça identificando fio com falha no enrolamento.....	173
Figura 98 – Falha no contato do terminal entre a bobina e o módulo de potência.....	174
Figura 99 – Proposta a alteração do projeto do terminal.....	174
Figura 100 – Fixação de eletrodo com formato circular.....	175
Figura 101 – Fixação de eletrodo com formato retangular	176
Figura 102 – Falta de oferta de tensão na torre D por curto-circuito por fio mal cortado no processo.....	177
Figura 103 – Raios X da peça mostra pedaços de fios residuais por falha no corte do fio durante o processo.....	177
Figura 104 – Bolha de ar oriunda do processo de aplicação de resina.....	178
Figura 105 – Região da bolha de ar, oriunda do processo de aplicação de resina, tem temperatura mais elevada.....	178
Figura 106 – Carretel com rebarba que potencializa a falha.....	179
Figura 107 – Oxidação de terminal	180
Figura 108 – Baixa disponibilidade de tensão nos terminais D e C.....	180
Figura 109 – Crimpagem errada de cabo Crimpagem errada de cabo.....	181
Figura 110 – Espaços vazios de compactação.....	182
Figura 111 – Fios soltos no bobinamento.....	183
Figura 112 – Falha na solda dos terminais.....	184
Figura 113 – Falha na injeção do plástico do carretel	185
Figura 114 – Oscilações de corrente e tensão causam interferência no painel de instrumentos.....	185
Figura 115 – Trinca cerâmica.....	186
Figura 116 – Manuseio e/ou montagem.....	187
Figura 117 – Cuba com esferas de inox para teste de velas de ignição e cabos velas.....	188
Figura 118 – Modificação do conceito de bobina com cabo e sem cabo incorporado à vela de ignição	188

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Número de flexões do clipe antes da ruptura	50
Quadro 2 – Valores típicos encontrados nos atuais sistemas de ignição.....	73
Quadro 3 – Valores correntes de pressão atuante sobre as velas encontrados nos atuais sistemas de ignição.....	74
Quadro 4 – Medição de tensão no secundário.....	121
Quadro 5 – Tempo de carregamento.....	127
Quadro 6 – Temperatura.....	127
Quadro 7 – Frequência de acionamento.....	127
Quadro 8 – Pressão de carregamento.....	128
Quadro 9 – Alta tensão.....	128
Quadro 10 Variáveis aceleráveis versus falhas que precipitam o surgimento.....	130
Quadro 11 – Análise de risco de falha esporádica e de difícil diagnóstico do motor completo.....	162
Quadro 12 – Análise de risco de falha esporádica e de difícil diagnóstico.....	163
Quadro 13 – Análise de risco de falha esporádica e de difícil diagnóstico.....	164
Quadro 14 – Análise de risco de falha esporádica e de difícil diagnóstico do sistema de partida a frio.....	165
Quadro 15 – Análise de risco de falha esporádica e de difícil diagnóstico do sistema de bombeamento de combustível.....	166
Quadro 16 – Análise de risco do sistema de gerenciamento do motor.....	167
Quadro 17 – Análise de risco de falha esporádica e de difícil diagnóstico do sistema completo.....	168
Quadro 18– Valores de baixa resistência.....	182
Quadro 19 – Variáveis aceleráveis versus falhas que precipitam o surgimento.....	189
Quadro 20 – Proposta final de lista de verificação.....	195

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Condições iniciais	24
1.2 Objetivo	27
1.3 Escopo do trabalho	27
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	30
2.1 Confiabilidade	30
2.1.1 Conceitos de confiabilidade e a definição de falha	30
2.2 Estudo analítico do crescimento da confiabilidade	39
2.2.1 Modelos preditivos para o crescimento da confiabilidade	39
2.3 Testes de vida altamente acelerados	42
2.3.1 Introdução	43
2.3.2 Tipos de testes acelerados	43
2.3.3 Testes qualitativos	43
2.3.4 Testes ESS e <i>burn-in</i>	44
2.3.5 Teste acelerado de vida quantitativo	44
2.3.6 Teste de Vida Altamente Acelerado (HALT)	49
2.3.7 Fases	50
2.3.8 O teste de degradação	54
2.4 Análise de risco	56
2.4.1 Objetivo e metodologia da análise do risco	58
2.4.2 Levantamento das informações	58
2.4.3 Identificação dos eventos iniciadores	59
2.4.4 Desenvolvimento do cenário	60
2.4.5 Levantamento de dados das falhas e avaliação do desempenho	60
2.4.6 Quantificação e integração	61
2.4.7 Análise das incertezas	62
2.4.8 Análise da sensibilidade	63
2.4.9 Classificação dos riscos e da importância das análises	63
2.4.10 Interpretação dos resultados	63
3 O SISTEMA DE IGNIÇÃO DO MOTOR CICLO OTTO	64
3.1 Velas de ignição	70
3.2 Transformadores de ignição	72
3.3 Materiais dos eletrodos	75
3.4 Processos produtivos das velas de ignição	78
3.5 Modos de falha das bobinas de ignição	78
3.5.1 Falha total da bobina	78
3.5.2 Falha esporádica na bobina	79
3.5.3 Conectores elétricos	79
3.6 O fenômeno da falha de combustão	80
3.6.1 A influência da falha de ignição nas emissões de poluentes	85
3.7 O controle de emissões de poluentes no Brasil	88
4 MÉTODO DE ANÁLISE DE FALHAS ESPORÁDICAS E DE DIFÍCIL DIAGNÓSTICO	89
4.1 Distinguindo falhas esporádicas e de difícil diagnóstico das falhas constatáveis e determinísticas	91
4.2 Análise e classificação das falhas	92
4.3 Definição dos procedimentos de ensaio para reprodução das falhas esporádicas em laboratório	932

4.4 Proposta de projeto do equipamento de ensaio	95
4.5 Relação dos modos de falhas críticos que geram falhas intermitentes.....	97
4.6 Elaboração de diagrama de falhas esporádicas e instrução técnica para as assistências técnicas em campo	98
4.7 Projeto do equipamento de teste.....	99
4.7.1 Elaboração da árvore de falhas.....	99
4.7.2 Elaboração da árvore de falhas para falhas esporádicas.....	104
4.7.3 Descrição do equipamento de teste.....	110
4.7.4 Execução e análises do ensaio.....	112
4.7.5 Desenvolvimento do programa de monitoramento do desempenho.....	112
4.7.6 Taxa de falhas para sistemas elétricos de ignição.....	112
4.7.7 Acelerar a degradação ou o surgimento das falhas.....	113
4.7.8 Teste de rampa até a falha.....	113
4.7.9 Descrição do equipamento de teste.....	113
4.7.10 Certificação e calibração do equipamento.....	126
4.7.11 Os parâmetros de aceleração do teste (HALT e/ou ALT).....	127
5 ESTUDO DE CASO.....	133
5.1 Etapa 1: Análise do risco das falhas visando à hierarquização	133
5.1.1 Falhas no sistema de ignição.....	133
5.1.2 Falhas nas bobinas de ignição.....	133
5.1.3 Falha na ignição por deficiência de montagem.....	135
5.1.4 Falhas por trincas oriundas de quedas ou batidas	136
5.1.5 Falha ou deficiência no processo de bobinamento	137
5.1.6 Falha por sobrecarga externa.....	139
5.1.7 Falha por falta da aplicação de resina.....	140
5.1.8 Falha por perda de potência	141
5.1.9 Falha por oxidação	141
5.1.10 Falha no processo de crimpagem	142
5.1.11 Falhas no processo por excesso de fios residuais	143
5.1.12 Falha no processo de solda	144
5.1.13 Falha por contaminação do enrolamento secundário.....	145
5.1.14 Falhas no processo por formação de bolhas na peça injetada	147
5.1.15 Falhas por deficiência de contato elétrico	148
5.1.16 Falhas nos cabos de vela.....	149
5.1.17 Falhas por fragilização da resistência elétrica	150
5.1.18 Falhas no revestimento de poliéster.....	150
5.1.19 Falha por oxidação e contaminações	151
5.1.20 Falhas nas velas de ignição	152
5.2 Etapa 2: Estudo do caso do motor de combustão ciclo Otto – falhas esporádicas e de difícil diagnóstico.....	15554
5.2.1 Análise de risco e o evento indesejado.....	15554
5.2.2 Impacto das falhas nas emissões de poluentes e o sistema OBD-Br2...	155
5.2.3 Resumo da análise de risco.....	1700
5.2.4 Resultados alcançados.....	170
5.3 Etapa 3: Análise da confiabilidade por ensaios acelerados.....	170
5.4 Etapa 4: Verificação dos resultados da alteração.....	171

5.5 Etapa 5: Aplicação e estudo de caso.....	171
6 LISTA DE VERIFICAÇÃO EM CAMPO.....	191
6.1 Proposta de uma lista de verificação para o campo.....	191
6.1.1 Definição de lista de verificação.....	191
6.1.2 <i>Checklist</i> da bobina.....	186
6.1.3 <i>Checklist</i> dos cabos de ignição.....	186
6.1.4 <i>Checklist</i> das velas de ignição.....	187
6.1.5 <i>Checklist</i> das interfaces.....	187
6.1.6 <i>Checklist</i> de agentes externos.....	187
6.1.7 <i>Checklist</i> do conjunto.....	187
7CONCLUSÃO.....	196
REFERÊNCIAS.....	199

INTRODUÇÃO

1.1 Condições iniciais

O estudo das falhas esporádicas, em especial nos motores ciclo Otto, é importante por diversas razões. A principal, é a possível demora de meses ou até de anos para a correção de uma falha esporádica, principalmente por causa da dificuldade de diagnóstico e identificação de sua origem ou causa. Além disso, sem o uso de dispositivos de simulação e detecção, faz-se necessário ter disponível o sistema reclamado defeituoso, no caso, o veículo do cliente, o que nem sempre é simples ou possível.

A legislação brasileira, através do código de defesa do consumidor, é muito clara quanto ao prazo de solução de um problema. As empresas dispõem de 30 dias corridos para solucionar um problema, somando-se, inclusive, o tempo de todos os reparos repetitivos, quando em garantia.

A empresa, além de ser obrigada a recomprar o veículo ou os veículos, tem no reparo repetitivo um dano à sua imagem e à de seu produto. Qualquer problema deve ser resolvido rapidamente sob pena de destruir a reputação de um novo produto ou a da própria empresa, mesmo que a incidência desse problema seja muito baixa.

Dessa forma, as causas da falha esporádica precisam ser rapidamente diagnosticadas para sua imediata correção, retroalimentando os processos produtivos e os novos projetos com soluções que evitem novas ocorrência de falhas intermitentes.

A análise de falhas intermitentes tem sido estudada de forma clássica, ou seja, identifica-se o aumento de casos em campo, obtêm-se veículos e peças para análise ou recebe-se a informação da existência de uma falha de difícil resolução; os componentes e veículos são analisados com o objetivo de se reproduzir a falha; e, uma vez identificada a causa raiz, uma solução é proposta, e a necessária alteração de produto ou de processo é executada.

As falhas esporádicas e de difícil detecção são caracterizadas pelo caráter intermitente, pelas baixas probabilidades de ocorrência e detecção e pela elevada dificuldade de reprodução em serviço. Isso porque, para sua manifestação, há a

necessidade da conjunção de diversos fatores externos, simultâneos ou não, incontroláveis ou mesmo desconhecidos. Por fatores externos pode-se entender variáveis como pressão, temperatura, umidade, vibração, dentre outros. Observa-se que primeiro é necessário identificar um veículo com problema intermitente, retirar o veículo do cliente, trazendo-o para análise, fazer as análises dos componentes individuais e do funcionamento do veículo e aguardar os testes para se reproduzir a falha. As falhas têm sido estudadas sob o ponto de vista clássico, ou seja, analisam-se os componentes de forma individual em ensaios de análise que reproduzem testes de funcionamento, sem levar em conta o conjunto de alguns sistemas e utilizando-se de prazo ilimitado, até que em eventual situação aleatória a falha se reproduza.

Dessa forma, considera-se que o mercado e os clientes possam esperar a falha ser reproduzida e que, em campo, enquanto ela continua a surgir, pode-se substituir a peça-problema por outra, talvez e muito provavelmente, com o mesmo defeito. Os fornecedores de componentes investem em análises de suas próprias peças sem levar em conta os demais subsistemas ou mesmo as novas legislações de emissões poluentes e de defesa do consumidor. Anderson (2007) e Haiyu, Ganesan e Pecht (2008) mostram a importância da confiabilidade em sistemas eletromagnéticos e apresentam casos reais de falha da integridade do sistema.

A grande lacuna observada na metodologia tradicional de avaliação de falha em veículos provém da necessidade de se ter disponível o veículo com falha para análise. Anderson (2007) mostra que um distúrbio eletromagnético causado por uma falha de um conector em um terminal acarreta severos danos a um veículo em consequência do surgimento de um falso sinal, por exemplo, no painel de instrumentos e no piloto automático.

Os testes realizados para identificar a falha são focados nos componentes individualmente, e não em um subsistema; o tempo de detecção da falha é grande; e, ao fim da análise, não existe uma retroalimentação dos processos produtivos e dos produtos para acelerar sua melhoria contínua e aumentar a confiabilidade.

O tempo de solução de problemas intermitentes ainda é muito grande; muitas vezes dura até um ano. O número de reparos repetitivos também se torna grande, pois não se obtém a curto prazo a solução do problema. Tudo isso, em conjunto, afeta a imagem da empresa, gera custos adicionais e consome muito tempo, além de consistir em uma forma limitada de abordagem do problema. Tais fatores são

atualmente inaceitáveis pelo mercado e pelos clientes, bem como pela legislação em vigor.

Identificar por meio de testes acelerados a causa raiz de uma falha esporádica requer estudo profundo. Entendendo a importância disso, estrutura-se este trabalho de forma a reduzir o tempo de análise e a aumentar a abrangência dos fenômenos estudados, sempre visando reduzir o tempo empregado, a proteger a imagem da empresa e a garantir o atendimento às legislações pertinentes.

A contribuição deste trabalho reside na redução drástica do tempo de análise – de até um ano para poucas semanas; na ampliação do escopo do estudo de componentes isolados para um conjunto ou um sistema completo; na retroalimentação dos processos produtivos com as ações de melhoria contínua; bem como na orientação do desenvolvimento de futuros produtos, propiciando melhor preparo para atender às legislações do código de defesa do consumidor e de emissões de poluentes.

Além dos fatos acima apresentados, não há a necessidade de veículo em situação real para análise, pois as condições de falha são simuladas e aceleradas em bancada específica. Os testes de desenvolvimento de produto não são orientados nem focados à precipitação das falhas esporádicas, mas, sim, visam a entender a durabilidade ou os limites de solicitação do produto.

Essas falhas precisam ser estudadas ao longo do pós-lançamento do produto e seguidas de acompanhamento da situação em campo.

A inovação desta pesquisa trabalha está na análise do sistema de ignição como um conjunto, pois anteriormente as falhas eram vistas isoladamente. Cada fornecedor de componentes trata a falha sob o aspecto do seu produto e não sob o do conjunto. Para esta análise foi dimensionada uma bancada de testes. A própria bancada é inédita pelo mesmo motivo. É inovador também a aceleração e os testes forçados para reduzir o tempo de análise, bem como o *check list* para auxílio do grupo de análise de problemas de campo e a retroalimentação das falhas para o grupo de projeto e manufatura.

1.2 Objetivo

Este trabalho de pesquisa tem como objetivo desenvolver uma metodologia abrangente de abordagem do estudo de falhas esporádicas em sistemas elétricos de ignição de motores, bem como construir uma bancada de diversos testes acelerados e um sistema de monitoramento para o sistema de ignição de motores ciclo Otto que permita identificar o estado dos componentes e sistemas, desenvolver sua robustez perante as falhas esporádicas ou as identificáveis e que requeiram imediata ação no processo produtivo ou revisão da técnica de projeto. Além disto é apresentado um *check list* para ajudar o grupo de campo a identificar as falhas intermitentes, reduzindo o tempo de determinação da causa raiz da falha.

Será dada ênfase ao tratamento do componente, não só de modo isolado, mas também dentro do sistema como um todo, englobando todas as interfaces possíveis.

Uma vez que até então a análise concentrasse apenas nos componentes isolados e não no conjunto ou sistema completo.

A metodologia também tem como objetivo a retroalimentação dos processos produtivos e da Engenharia de Desenvolvimento com subsídios para garantir uma taxa de melhoria da confiabilidade ao longo do tempo, proporcionando a melhoria dos índices de confiabilidade.

O estudo busca inovar e melhorar o atual estado da arte, de forma a eliminar as lacunas da metodologia clássica convencional de análise de falhas esporádicas e de difícil diagnóstico.

1.3 Escopo do trabalho

Uma vez apresentados no Capítulo 1 os objetivos e a inovação pretendida, o trabalho se desenvolverá em sete capítulos.

O Capítulo 2 aborda os conceitos de confiabilidade, apresentando a definição de falha, conforme a norma ABNT NBR 5462/1994 (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Ainda nesse capítulo são apresentados os conceitos dos ensaios acelerados, tais como HALT (Highly Accelerated Life Test) , ALT (Accelerated Life Test) ou ESS (Environment Stress Screening), que são a base da metodologia proposta, a ser desenvolvida para precipitar os modos de falha. São também

apresentados os conceitos para verificação do crescimento da confiabilidade bem como o conceito de análise de risco e sua aplicação, visando apresentar a técnica para identificar os componentes de maior risco e os potenciais de risco do sistema envolvido.

O Capítulo 3 apresenta os fundamentos do motor de combustão interna ciclo Otto e os principais sistemas envolvidos nas falhas de ignição. Ainda no capítulo, uma vez concluída a revisão dos motores de ignição por centelha, é feita uma explicação mais detalhada da influência da falha esporádica nas emissões de poluentes pelo escapamento evidenciando a importância de se mitigar tais falhas em função de seu impacto em emissões veiculares.

O Capítulo 4 propõe um método de análise das falhas esporádicas, sugerindo os procedimentos e o planejamento dos testes, bem como a retroalimentação dos processos produtivos, uma vez identificada a causa raiz do defeito. Esse capítulo descreve detalhadamente o que é e o que caracteriza esse tipo de falha intermitente e as dificuldades de diagnóstico em campo. Sugerem-se também uma classificação e uma forma de procura e detecção para assim encaminhar melhor a solução, propondo procedimentos de ensaios e estudando quais variáveis podem e devem ser aceleradas para precipitar os principais e mais críticos modos de falha. São apresentadas também as principais formas de retroalimentação dos processos produtivos bem como as técnicas de projetos e o acompanhamento da situação de campo para se constatar a eficácia das ações corretivas e, principalmente, o aumento da confiabilidade. Neste capítulo também é apresentada e detalhada a proposta de projeto do equipamento de teste e sua calibração, bem como da árvore de falhas que irá ajudar na correta compreensão do conceito de falha intermitente e suas principais causas.

Uma vez definido o método, é possível a aplicação em um caso real: o do motor de combustão interna ciclo Otto. No Capítulo 5, é apresentado um estudo do caso, começando com a análise de risco de um sistema, passando pela definição dos sistemas críticos e pela escolha de um deles para aplicação dos ensaios acelerados, seguindo com o projeto e a construção da bancada de testes e a identificação das principais falhas e a retroalimentação dos processos.

No Capítulo 6, é apresentada uma lista de verificação (*checklist*) com o objetivo de ajudar o diagnóstico em campo ou mesmo projetar um experimento específico.

Por fim, no Capítulo 7 apresentam-se as conclusões e as indicações para futuros trabalhos.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Quantitativamente, a confiabilidade pode ser associada a uma grandeza numérica que caracteriza a possibilidade de um bem funcionar sem falhas e é um ramo de atividade científica com métodos para prever, estimar, controlar e aperfeiçoar essa possibilidade de bom funcionamento.

A norma NBR 5462 (ABNT, 1994) define a confiabilidade como sendo a:

Característica de um item eventualmente expressa pela probabilidade de que ela preencherá uma função dada sob condições definidas e por um período de tempo definido, dado que estava funcionando no instante inicial t_0 .

Assinale-se que a palavra item é tomada em seu sentido mais amplo, podendo ser um componente, um subconjunto, um conjunto, um subsistema ou um sistema completo.

2.1 Confiabilidade

Em termos abrangentes, a confiabilidade se caracteriza pela aptidão de um item não falhar durante sua utilização. O problema do desenvolvimento de sistemas ou equipamentos capazes de funcionar sem falhas deve ser tão antigo como sua concepção e construção, uma vez que o primeiro passo após a criação do produto é a garantia de seu bom funcionamento (RODRIGUES, 2011).

A necessidade de abordar esse assunto de modo quantitativo e não apenas do ponto de vista qualitativo é ainda muito recente.

2.1.1 Conceitos de confiabilidade e a definição de falha

Foi somente há quatro décadas que começou o desenvolvimento de um conjunto de técnicas para prever, medir, controlar e melhorar essa aptidão ao bom funcionamento (RODRIGUES, 2011).

De início, essas técnicas se restringiram, em razão de sua importância estratégica, ao domínio militar e, em seguida, foram aplicadas a outros setores; hoje, praticamente, se difundiram a todos os ramos das atividades produtivas.

A complexidade técnica e operacional dos artefatos bélicos aumentou de modo considerável e implica, como resultado, a maior dificuldade de se assegurar seu bom funcionamento. Some-se a isso tudo o fator segurança e a necessidade de se completar a missão.

A mesma situação pode ser observada nos equipamentos eletrônicos, nos sistemas de geração de energia, nos sistemas elétricos e nos motores de combustão. Generalizando, em todos os setores, a confiabilidade tornou-se fator imprescindível.

As atividades de manutenção de um sistema, incluindo pessoal, troca de peças, estoque de reposição, dependem diretamente da confiabilidade do componente; e não é novidade que os custos de manutenção de um sistema complexo, calculados ao longo de sua vida útil, chegam a atingir dez vezes ou mais o custo de sua aquisição (DHILLON, 2002).

Além disso, em equipamentos ou sistemas que funcionam continuamente por necessidade operacional, cada falha causa a imobilização do item e acarreta perdas financeiras e de imagem. Em todas as circunstâncias, as consequências econômicas de uma missão frustrada oneram sobremaneira o custo e a imagem do produto e, em alguns casos, chegam a arruinar um projeto.

A confiabilidade tem sido sempre considerada como característica essencial de um produto.

O conceito de confiabilidade compreende quatro elementos significativos que deverão ser avaliados:

- a) probabilidade;
- b) função dada e conteúdo operacional com desempenho específico;
- c) condições dadas: definição das características das instalações e manutenção do item;
- d) tempo de operação.

A confiabilidade é uma característica de um equipamento ou de um sistema assim como a potência, o ganho, a rotação, o torque, por exemplo; apenas seu aspecto probabilístico é que lhe confere uma natureza diferente.

Os conceitos de confiabilidade, disponibilidade e capacidade produtiva tornaram-se o principal foco das indústrias em face do presente cenário econômico. A maior concorrência de mercado, a redução de desperdícios e o aumento da demanda têm gerado a crescente necessidade de aplicação de ferramentas de confiabilidade para alcançar o eficaz desempenho dos sistemas industriais.

A confiabilidade é o principal ponto de referência para o planejamento, pois analisa previamente as consequências das falhas e os riscos envolvidos nas

atividades de manutenção a fim de minimizar suas ocorrências, indicando as melhores políticas de manutenção e conferindo a disponibilidade, a segurança e a qualidade do processo (EISINGER; RAKOWSKY, 2000).

Lewis (1996), Dhillon (2005), Hayworth (2008) e Faulin (2010) definem o conceito de confiabilidade como a probabilidade de um dispositivo operar com desempenho satisfatório, sem a ocorrência de falhas, quando usado sob as condições especificadas e dentro de determinado período de tempo.

Moubray (2000), Lafraia (2001) e Myers (2010) explicam que a falha consiste na interrupção ou na alteração da capacidade de um item desempenhar as funções para as quais ele foi projetado. A falha é o resultado do desvio de características além dos limites especificados, causando perda total ou parcial da função requerida do equipamento, sendo a ocorrência da falha ocasionada por diversos fatores, denominados mecanismos de falha ou modos de falhas.

Tem-se ainda pela NBR 5462 (ABNT, 1994) a definição de disponibilidade como a capacidade de um item estar em condições de executar certa função em dado instante, levando em conta os aspectos combinados de confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados.

No sentido mais amplo, a confiabilidade pode estar associada com a segurança em sistemas críticos, com a operação bem-sucedida e com a ausência de falhas ou avarias; por isso, em Engenharia de Confiabilidade, o foco principal é a análise de falhas e o desenvolvimento de métodos e ferramentas para sua prevenção (LEWIS, 1996).

A falha ocorre quando o sistema não desempenha sua função de acordo com o previsto. É necessário definir de modo preciso o que se entende por desempenhar uma função bem como indicar de que função se trata. Entre todas as falhas, pode-se propor uma classificação considerando os seguintes pontos:

- a) segundo o grau de influência na capacidade de trabalho: total, incompleta ou parcial;
- b) segundo o caráter físico de aparecimento da falha: catastrófica ou paramétrica;
- c) em consequência de outras falhas: dependente ou independente;
- d) segundo o caráter do processo de aparição: repentino ou gradual;

- e) segundo o tempo de existência da falha: estável, temporária ou intermitente.

Um mesmo sistema poderá não falhar sob a mesma sistemática se estiver situado numa sala climatizada ou ainda apresentar problemas se submetido a intempéries. Essas evidências significam que não se pode falar de confiabilidade de um equipamento sem indicar as condições ambientais em que ele deve ser utilizado, a mecânica da sua utilização e compatibilidade magnética. A meta estabelecida para a confiabilidade deve ser acompanhada, de forma racional, das condições de utilização do produto. É assim que se estabelecem dois tipos de confiabilidade: a intrínseca – correspondente ao funcionamento em laboratório em condições normais e a operacional – correspondente às condições reais de uso.

A confiabilidade faz com que se some ao conceito de qualidade um aspecto temporal: é uma espécie de projeção da qualidade no futuro. A confiabilidade é considerada como a característica de um item funcionar sem falhas e pode ser definida por uma série de parâmetros, naturalmente inter-relacionados. Esses parâmetros se impõem pela necessidade de caracterizar determinadas particularidades ligadas ao tempo de vida, ao modo como essa vida se processa e ao mecanismo observado nas falhas.

I — Métodos objetivos da confiabilidade segundo a NBR 5492 (ABNT, 1994):

A confiabilidade é uma disciplina que tem seus métodos próprios, suas teorias e suas técnicas. Suas teorias de base são o cálculo de probabilidades, a análise estatística e a pesquisa operacional. As técnicas repousam no estudo físico-químico das falhas, na tecnologia dos componentes e nas regras habituais do controle da qualidade.

II — Metas da confiabilidade segundo a NBR 5492 (ABNT, 1994):

Trata-se essencialmente de parte da avaliação da confiabilidade e de sua melhoria (não de modo absoluto, mas em função de outros aspectos, em particular os econômicos). Contudo, esses dois aspectos estão longe de ser completamente distintos.

É evidente que os esforços para melhorar a confiabilidade devem ser direcionados a todos os níveis, sem dúvida, para se conseguir estabelecer diretrizes

e métodos de modo a intervir em todos os estados da vida de um sistema ou equipamento.

III — Causas da confiabilidade inadequada:

Para se conhecer as causas da confiabilidade inadequada é necessário a criação de um programa de monitoramento. Procura-se determinar quais seriam as causas principais de confiabilidade inadequada em relação à concepção, à fabricação e à utilização. A confiabilidade insuficiente pode originar-se de má administração de custos e do tempo do projeto, além do desconhecimento das condições ambientais e de utilização. Mais precisamente, encontra-se sobretudo:

- a) na concepção: preocupação com o desempenho em detrimento da confiabilidade; pesquisa de novas alternativas de projeto se sobrepondo à segurança; e a falta de habilidade e experiência;
- b) na fabricação: descuidar da confiabilidade para diminuir os custos, adotar valores insuficientes de confiabilidade, desconsiderar os fatores humanos.

IV — Sistemática a ser observada na confiabilidade:

Definição de valor a ser adotado de confiabilidade quantitativa; para confirmar essa hipótese inicial, deve-se desenvolver ensaios de confiabilidade para confirmar os valores adotados em projeto e posterior controle e monitoramento durante a vida de um projeto. Em síntese, a avaliação da confiabilidade deve prever:

- a) cálculo preditivo de confiabilidade;
- b) ensaios de confiabilidade (foco desta tese);
- c) controle e avaliação durante a utilização.

V — Melhoria da confiabilidade:

É fundamental um programa de melhoria da confiabilidade. Esse programa deve conter ações para componentes, concepção do sistema, processo de fabricação e uso do equipamento:

- a) componentes: a melhor forma são as pesquisas tecnológica e de desenvolvimento do produto. Além dessas, é fundamental o estudo físico das falhas, a inspeção retificadora (seleção dos componentes em

- cem por cento) e a depuração ou seleção (eliminação dos elementos fora de especificação);
- concepção do sistema ou equipamento: o projeto inicial de concepção deve levar em conta a disposição e o conceito geral dos circuitos e dos subconjuntos. Deve estudar e propor o estudo de um modelo de confiabilidade. Além disso, torna-se fundamental o acompanhamento dos modos de falhas;
 - fabricação do sistema ou equipamento: aperfeiçoamento dos processos de fabricação, controle da qualidade, depuração (eliminação das falhas de infância), ensaios de confiabilidade;
 - utilização do equipamento: definição das condições ambientais, melhoria das condições de emprego, eliminação dos erros humanos (manipulações, reparos, colocação em marcha).

A Figura 1 mostra um fluxograma representativo do ciclo necessário às fases de concepção, fabricação e operação e a retroalimentação necessária das ações corretivas para assegurar o crescimento da confiabilidade de um produto ou sistema.

Figura 1 – Fluxo de atividades da concepção, fabricação e uso, bem como as retroalimentações para melhoria da confiabilidade

Fonte: Rodrigues (2011).

A confiabilidade é a medida quantitativa mais efetiva da integridade de uma peça, de um componente, de um produto ou de um sistema projetado. Ela fornece a probabilidade de que todos os elementos anteriormente citados desempenhem as

funções para as quais foram concebidos sem falha em ambientes especificados, por períodos desejados, a um dado nível de confiança (RODRIGUES, 2011).

As funções de um programa de Engenharia da Confiabilidade são múltiplas e somente serão abordadas aqui as mais importantes:

- a) incluir a confiabilidade no projeto significa projetar com base nos conceitos de confiabilidade;
- b) assegurar a confiabilidade pela fabricação adequada;
- c) assegurar a confiabilidade por meio de Controle de Qualidade e Inspeção eficientes;
- d) verificação da confiabilidade por meio de um elaborado programa de ensaios;
- e) manter a confiabilidade por meio de práticas eficientes na embalagem e na remessa;
- f) assegurar a confiabilidade operacional por meio de instruções de uso, operação e manutenção do bem em serviço;
- g) melhorar a confiabilidade pela análise do desempenho do produto em campo.

Um dos fatores que impactam a disponibilidade de um equipamento é a manutenibilidade, conceito o qual deve ser intrínseco desde o projeto da máquina, pois tem por objetivo analisar e otimizar as características do projeto quanto à sua manutenção, determinando a facilidade de, em maior e menor grau, realizar as ações de manutenção por meio de procedimentos e normas, com mão de obra habilitada, custos minimizados e tempos reduzidos (LAFRAIA, 2001; DHILLON, 2006; EBELING, 2010).

Uma função importante da Engenharia da Confiabilidade é a realimentação dos dados de confiabilidade e a sistemática de ação corretiva e sua implementação (GUIDA; PULCINI; VIANELLO, 2002).

O objetivo primário é assegurar que todas as falhas que porventura ocorram, quer no campo, quer na fábrica, sejam adequadamente registradas. As falhas de maior incidência são investigadas, e a responsabilidade por essas em termos de engenharia, fabricação, controle da qualidade, inspeção, vendas, assistência técnica, compras, fornecedores e usuários são identificadas e ações corretivas são tomadas

pelos departamentos responsáveis. Além disso, mecanismos de verificação são acionados para se ter certeza de que as ações corretivas foram implementadas e monitoradas de modo a se comprovar que as medidas corretivas tomadas foram as que realmente adotadas. As lições tiradas de tais medidas corretivas são então documentadas e utilizadas onde e quando se fizer necessário.

Processos adequados resultam em um produto produzido de acordo com as normas e especificações e apresenta seu desempenho balizado pelos limites especificados, com o percentual de defeituosos em campo dentro de limites previsíveis e aceitáveis. As variáveis relacionadas à mão de obra, à máquina, ao material e ao método de fabricação devem estar sob controle. O desempenho isento de falhas é alcançado quando o produto final estiver de acordo com as especificações de engenharia cuja variação deve atender aos limites especificados em projeto.

Em casos específicos, uma falha pode ser associada também a determinado estágio da vida do produto. Um produto pode possuir três períodos marcantes de desempenho: o período das falhas precoces ou infância; o período das falhas aleatórias ou vida útil; e finalmente o período das falhas pelo desgaste ou envelhecimento. As falhas precoces ocorrem por causa da presença de componentes ou da execução de montagens fora de especificação. Essas falhas devem ser eliminadas ou minimizadas pela adequação dos processos produtivos e aplicação do controle de qualidade.

As falhas aleatórias ocorrem quando o componente é submetido a uma demanda associada ao carregamento que supera a sua capacidade. Essa situação pode ocorrer de forma aleatória longo da vida deste. As falhas por desgaste estão associadas a mecanismos de danos cumulativos, como fadiga de desgaste e frequência de ocorrência aumenta em função da utilização do componente.

Existe uma diversidade muito grande de modelos matemáticos para analisar as distribuições estatísticas do comportamento de um produto diante das falhas. Esses modelos matemáticos, conforme a Figura 2 apresenta, servem a uma grande variedade de aplicações e são o resultado de um desenvolvimento na área da Matemática com suas teorias de estatística descritiva. Em componentes mecânicos, a distribuição de Weibull e o modelo Booleano são os mais usados e apropriados. Para os componentes elétricos e eletrônicos, o modelo exponencial, com taxas de falhas constantes, é o mais apropriado (BERTSCHE, 2008). Os modelos representam a variação da probabilidade da falha em função do tempo de operação do componente.

Os resultados das análises podem ser usados para melhorar pontos fracos dos produtos e sua confiabilidade no que se refere aos componentes ou aos custos envolvidos (BERTSCHE, 2008). Ainda na Figura 2, pode-se ver a teoria do sistema ou modelamento *versus* o comportamento da falha e sua distribuição estatística.

Figura 2 – Determinação quantitativa da confiabilidade de um sistema

Modelamento / Teoria do Sistema	Comportamento da Falha / Distribuição
<p>Modelo Booleano</p> $R_s(t) = \sum_{j=1}^m \varphi_s^{(j)}(x^{(j)}) \prod_{i=1}^n (R_i(t))^{x_i^{(j)}} (1-R_i)^{1-x_i^{(j)}}$	<p>Distribuição de Weibull</p> $R(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b}$
<p>Processos de Markov</p> $\frac{dP_i(t)}{dt} = -\sum_{j=1}^n \alpha_{ij} \cdot P_i(t) + \sum_{j=1}^n \alpha_{ji} \cdot P_j(t)$	<p>Distribuição Exponencial</p> $R(t) = e^{-\lambda t}$
<p>Simulação de Monte Carlo</p> $A(t) = \sum_{B \in \Gamma_s} \int_0^1 \psi(B, \tau) R_s(B, t-\tau) d\tau$	<p>Distribuição de Gauss</p> $R(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_t^{\infty} e^{-\frac{(\tau-\mu)^2}{2\sigma^2}} \cdot d\tau$
<p>Teoria da Renovação</p> $h(t) = f(t) + \int_0^t h(\tau) f(t-\tau) d\tau$	<p>Distribuição Lognormal</p> $R(t) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_t^{\infty} \frac{1}{(\tau-t_0)} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(\tau-t_0)-\mu}{\sigma} \right)^2} \cdot d\tau$

Fonte: Bertsche (2008).

Os métodos quantitativos, com o auxílio de modelos de cálculos, são capazes de calcular valores de probabilidade e da confiabilidade esperada de um sistema. Estes métodos são baseados em procedimentos oriundos das teorias da estatística e da probabilidade. Vários modelos matemáticos existem para descrever o comportamento e a distribuição bem como para o modelamento de um sistema. Estes modelos matemáticos tem uma gama extensa de aplicação e são muito sofisticados graças aos desenvolvimentos na área da matemática descritiva. Estas análises podem descrever a confiabilidade esperada de um componente bem como de todo sistema. O capítulo 6 mostra que a árvore de falhas descreve um sistema não só de modo qualitativo, mas também de modo quantitativo com relação ao comportamento das falhas. Os parâmetros de confiabilidade podem ser calculados com a ajuda de modelos booleanos

Birolini (2004) mostra que para componentes ou sistemas elétricos e eletrônicos existem as fases da mortalidade prematura, ligadas ao processo de produção; a da vida útil, ligada ao projeto e à robustez do produto; e a fase final, do

desgaste ou envelhecimento, ligada à durabilidade, conforme mostra o gráfico da Figura 3. O objetivo deste trabalho está ligado a algo fora das teorias apresentadas até agora: a falha esporádica de difícil detecção e diagnóstico. Esse tipo de falha depende de fatores ambientais e de utilização para surgir. Não basta apenas a existência da falha, mas essa deve necessariamente estar associada a uma condição adicional ambiental ou à forma de utilização.

Figura 3 – Curva da vida de um componente ou sistema elétrico

Fonte: Birolini (2004).

2.2 Estudo analítico do crescimento da confiabilidade

O modelamento preditivo para o crescimento da confiabilidade é importante para esse trabalho, pois comprova a importância do teste acelerado como meio de criar as bases de um programa de aumento da robustez de um sistema eletromecânico.

2.2.1 Modelos preditivos para o crescimento da confiabilidade

Gates, Gibson e McLain (1989) mostram que diversos modelos matemáticos foram propostos, cada um com características específicas, para a previsão do crescimento da confiabilidade de um sistema complexo. O modelamento do crescimento da confiabilidade tem como principal fundamento a retroalimentação das ações corretivas das falhas encontradas em campo, incorporando-as ao produto na

série. Os três principais modelos existentes são: o modelo de Duane (DUANE, 1962), o modelo AMSAA (*Army Material Systems Analysis Activity*) (MIL-STD-1635 *Dept. of Defense, 1984*) ; MIL-HDBK-189, *Dept. of Defense, 1981*) e o modelo da IBM (GATES; GIBSON; MCLAIN, 1989).

A análise de dados inclui testes estatísticos e ajustes de curva, bem como o desenvolvimento de relações entre parâmetros dos modelos de crescimento e características dos equipamentos. Esse trabalho não detalhará os modelos, apenas vai mencioná-los como fontes de referência para os modelos de melhoria e crescimento da confiabilidade.

O modelo de Duane e o AMSAA conduzem a um bom ajuste dos conjuntos de dados, no entanto, ambos apresentaram limitações como ferramentas preditivas em razão da natureza empírica dos parâmetros. Características da falha e seu histórico tendem a mascarar e a subestimar as relações entre os parâmetros e os equipamentos (GATES; GIBSON; MCLAIN, 1989).

O modelo da IBM propicia uma maior flexibilidade na metodologia para a previsão do aumento da confiabilidade, pois seus parâmetros são mais suscetíveis a uma boa interpretação sob o ponto de vista da Engenharia.

Com base nessas interpretações e análises, desenvolveu-se um procedimento de previsão do crescimento da confiabilidade. O procedimento prevê o crescimento da confiabilidade com base na informação disponível no início de um programa de testes e nas avaliações de um produto.

Uma importante conclusão de todos os modelos é que a previsão de crescimento da confiabilidade deve ter foco na classificação das falhas e nas ações corretivas.

Nos últimos anos, tem-se observado o aumento da ênfase dada aos testes de aumento da confiabilidade em sistemas eletroeletrônicos (VASSILIOU; METTAS; EL-AZZOUZI, 2008).

Tal ênfase resulta do reconhecimento de que uma das formas mais eficazes de redução de custos é a maturidade dos sistemas. Testes de aumento da confiabilidade submetem os produtos a um período prolongado de ensaios, levando a ações corretivas e modificações de produtos e de processos de manufatura.

Na maioria dos casos, os produtos são submetidos a solicitações de temperatura, tensão, vibração, campos elétrico e magnético conduzidos ou irradiados que aceleram o surgimento das falhas.

Uma questão fundamental passa a ser: qual o grau de confiabilidade alcançado em tais testes? A resposta é construída basicamente a partir de dois passos técnicos:

- a) formulação de modelos matemáticos para suportar o processo de análise do crescimento da confiabilidade;
- b) estudos de caso para sistemas específicos.

Os dois modelos mais comuns são (GATES; GIBSON; MCLAIN, 1989):

- a) modelo de Duane;
- b) modelo AMSAA.

Ambos os modelos são associados com a medida do número cumulativo de casos de falhas *versus* o tempo acumulado em operação, visualizados graficamente como uma linha reta no gráfico di-log.

A principal diferença é que, para o modelo de Duane, o crescimento da confiabilidade é um fenômeno determinístico por natureza; e para o AMSAA, a consideração é probabilística, podendo ser conduzida em uma série de estágios. Ambos foram institucionalizados como uma extensão da MIL-STD-1635 (*Dept. of Defense 1989*) e da MIL-HDBK-189 (*Dept. of Defense 1981*), respectivamente.

Os modelos de Duane e AMSAA são paramétricos, e seu principal parâmetro é a taxa de crescimento de falhas. A estimativa dos parâmetros dos modelos é acompanhada pelo ajuste desses aos dados do crescimento da confiabilidade usando ferramentas estatísticas que determinarão os parâmetros por meio do ajuste de curvas. Esse procedimento é satisfatório para a previsão do crescimento da confiabilidade uma vez que se tenha quantidade suficiente de dados para suportar o ajuste dos dados em uma reta (função linear).

O objetivo do estudo da melhoria da confiabilidade é desenvolver um procedimento para previsão do aumento da confiabilidade em um equipamento ou sistema por meio de testes e de melhoria de atributos.

Em cada programa de desenvolvimento, uma base de dados deve ser analisada: histórico de falhas, processos envolvidos, falhas aleatórias. Tudo isso deve formar uma lista dos modos de falha a serem melhorados por meio de um programa de ações corretivas. Uma métrica interessante e geralmente aceita é o MTBF (*Mean*

Time Between Failure) ou o seu inverso, a taxa de falhas, $MTBF = 1/\lambda$ (BENBOW; BROOME, 2009).

Os modelos de Duane e AMSAA sempre foram reconhecidos e muito utilizados, no entanto, o modelo da IBM mostra algumas vantagens. (DUANE J. T., 1962).

O modelo da IBM é baseado na premissa de que a qualquer instante de tempo há dois modos de falha que os sistemas ou equipamentos apresentam:

- a) falhas aleatórias a uma taxa constante de falha;
- b) falhas não aleatórias de projeto, de manufatura e/ou de operação.

Mais adiante, assume-se que uma taxa de falha aleatória sempre estará presente nos equipamentos e não pode ser reduzida por meio de testes e ações corretivas. Já, por outro lado, a componente não aleatória é progressivamente reduzida à medida que testes e/ou ações corretivas forem ocorrendo, defeitos e falhas forem surgindo e ações corretivas forem devidamente identificadas.

O modelo da IBM assume que o número de falhas não aleatórias presentes no sistema no início de um teste é fixo, mas desconhecido.

Se $N(t)$ denota o número de falhas não aleatórias remanescentes após t horas de teste, assume-se que a taxa de variação de $N(t)$ com relação ao tempo de teste é proporcional ao número de falhas ou defeitos remanescentes.

2.3 Testes de vida altamente acelerados

Os testes de vida acelerados são um importante instrumento na detecção e solução das falhas esporádicas e intermitentes, uma vez que podem ajudar na avaliação do sistema visando a detectar os modos de falhas e a aumentar os indicadores de confiabilidade. Por meio dos testes acelerados, pode-se simular a avaliação da vida de conjuntos ou sistemas sob condições forçadas, muitas vezes superando os limites de resistência do produto. Modelos físicos podem ajudar a estruturar os testes acelerados, e obviamente as condições de aceleração não podem introduzir outras anomalias no modo de falha, sendo esse o princípio básico dos testes acelerados.

2.3.1 Introdução

O uso de testes acelerados tem crescido muito na indústria por causa da necessidade de se obter dados e respostas muito rapidamente. Testes de produtos sob solicitação elevada propiciam ganhos, tanto em relação ao tempo, quanto em relação aos custos dos testes. A análise adequada dos dados dos testes acelerados gera informações relevantes sobre o comportamento dos produtos. Os ensaios tradicionais são sempre muito difíceis de concluir a curto prazo, ou seja, são muito demorados.

As razões para essa dificuldade são os longos tempos de vida operacional dos produtos, associados ao menor intervalo de tempo entre os lançamentos de novos projetos, bem como a necessidade de respostas rápidas sobre a vida do novo produto. Tudo isso torna os testes em condições normais um desafio de viabilidade, principalmente por causa do fator “tempo de execução”. Diante dessas dificuldades, juntamente com a necessidade de se observar os diversos modos de falha, suas características e confiabilidade, entendeu-se relevante criar testes para forçar esses produtos a falhar de forma prematura. Em síntese, a ideia é acelerar o surgimento da falha, evidenciando seu mecanismo principal, sem introduzir outras variáveis.

2.3.2 Tipos de testes acelerados

Vários tipos de testes têm sido designados como testes acelerados, oferecendo diferentes informações sobre os mecanismos de falhas. Em geral, os testes acelerados se dividem em três categorias, apresentadas adiante.

2.3.3 Testes qualitativos

Em geral os testes qualitativos não são projetados para levantar dados quantitativos de vida do produto, mas podem ser usados principalmente nas análises do modo de falha (VASSILIOU; METTAS; EL-AZZOUZI, 2008). No entanto, como mencionado anteriormente, se não forem projetados adequadamente, tais testes podem causar falhas adicionais que não seriam encontradas em situações reais. Os testes qualitativos têm sido denominados de diversas formas tais como: tortura, elefante ou teste de vida altamente acelerado.

2.3.4 Testes ESS e *burn-in*

O teste ESS (*Environmental Stress Screening*) é um processo envolvendo a aplicação de condições ambientais ao produto (geralmente produtos eletrônicos ou eletromecânicos) em ensaios rápidos. O objetivo é expor, identificar e eliminar defeitos latentes que não possam ser detectados por inspeção visual ou teste elétrico e que causarão falhas em campo. O teste *burn-in* é considerado um caso particular do ESS. De acordo com a *military standard* MIL-STD-883E (Dept. of Def.1996), o teste *burn-in* tem como objetivo eliminar equipamentos marginais antes de o cliente final recebê-los. Equipamentos marginais são aqueles com defeitos oriundos de falhas de manufatura e que causarão problemas ao longo do tempo. Esse tipo de teste é realizado em toda a população e não é feito por amostragem (MIL-STD-883E Dept. of Def.1996) .

2.3.5 Teste acelerado de vida quantitativo

Os testes de vida quantitativos, diferentemente dos qualitativos, visam a quantificar as características de vida do produto e, dessa forma, conhecer e controlar a confiabilidade por meio da determinação da probabilidade de falha em circunstâncias específicas, definindo a vida média ou os custos esperados de garantia.

Podem também ser de valia para a avaliação de riscos, projetos e/ou comparações. Os testes de vida acelerados podem ser apresentados pela taxa de uso acelerado ou da aceleração em sobrecarga, descritas adiante.

Por causa do uso, a taxa de aceleração do teste pode ser analisada com métodos típicos de análise de dados. Para entender, medir e prever um evento de falha, deve-se observar o fenômeno detalhadamente para se projetar como será feita a aceleração. A aceleração do teste com sobre tensão é um dos focos do presente trabalho.

I — Taxa de uso acelerado

Para produtos que não operam com sobrecarga, se o teste for feito de modo contínuo, as falhas ocorrerão prematuramente com relação às unidades testadas sob condições normais de uso. Por exemplo, um equipamento utilizado durante 6 horas

semanais pode ser testado continuamente em todas as 24 horas do dia. Os dados obtidos via uso contínuo podem ser analisados pelos mesmos métodos usados para analisar os dados de falhas sob condições normais de uso. Também é possível, no caso de produtos que operam em determinada frequência, o aumento do valor dessa frequência de operação, criando uma taxa acelerada pela maior frequência.

II — Aceleração do carregamento

Para produtos com grande utilização ou utilização praticamente contínua, o teste de vida acelerado deve estimular o produto a falhar em determinado tempo do teste. Isso é obtido ao aplicar uma solicitação que exceda o nível encontrado sob as condições normais de uso.

O tempo para a falha é usado para extrapolar as condições de uso. Esses testes podem ser feitos sob altas ou baixas temperaturas, umidade, tensão elétrica, pressão, vibração e carregamento externo ou sob combinações desses parâmetros para estimular o aparecimento dos mecanismos de falhas.

Conforme dito anteriormente, as solicitações do teste acelerado de falha devem ser escolhidas de forma a acelerar os modos de falha, mas nunca devem introduzir novos mecanismos que não ocorreriam em condições normais de uso. Normalmente esses níveis de solicitação devem exceder as especificações do produto, mas devem estar de acordo com as especificações máximas de projeto. A escolha das solicitações, bem como a dos níveis e a do processo de ajuste do experimento, é da maior importância. É claro que à medida que a solicitação aumenta, o tempo de teste diminui. No entanto, à medida que o nível de solicitação aumenta, se afastando da condição normal, as incertezas da extrapolação da vida esperada para a condição de uso também aumentam.

Na análise do teste acelerado de vida, há o desafio de interpretar dados e resultados, em vez de analisar apenas o tempo total do teste de vida. Para isso deve-se elaborar um método que permita extrapolar os dados obtidos de forma acelerada e chegar a uma estimativa das características sob uso normal. O ensaio acelerado propicia ciclos de vida obtidos com solicitações em sobrecarga, pontos 2 e 3 da Figura 4. Conhecidas a natureza do fenômeno e a possível função da curva de extrapolação, o ponto 1 pode ser obtido e representa o valor esperado dos ciclos de vida para o

carregamento normal previsto na especificação. Os pontos 3 e 2 são obtidos pelo ensaio acelerado e mediante o estudo da função de extrapolação pode-se obter uma previsão de vida em condições normais de uso.

Figura 4 – Extrapolação dos dados em sobrecarga para a situação em carregamento normal

Fonte: Figura elaborada pelo autor em 2017.

III – Carregamento

Diversos tipos de carregamentos podem ser considerados ao se realizar um teste acelerado. Testes acelerados podem ser classificados como: sob solicitação constante, escalonados, cíclicos ou aleatórios— sempre relacionados à dependência da solicitação em relação ao tempo. Existem dois tipos de esquema de aplicação de forças: carregamentos cuja solicitação é independente do tempo e carregamentos cuja solicitação é dependente do tempo. O tratamento matemático varia dependendo da relação solicitação *versus* tempo.

IV — Carregamento independente do tempo

Na situação de independência do tempo, a solicitação aplicada é constante. Por exemplo, se a temperatura é o fator de tensão, a temperatura deve ser constante no teste. Esse tipo de teste tem muitas vantagens com relação ao teste com dependência do tempo.

Durante a fase de projeto ou simulação, muitos produtos são assumidos como operantes sob tensões constantes quando em uso. É mais fácil conduzir um teste quando se mantém uma mesma condição, de modo a se ter menos variáveis interferindo no fenômeno. Ou seja, é mais fácil estabelecer funções e quantificar um experimento quando as tensões são constantes do que quando as tensões são variáveis, uma vez que a extrapolação de testes e funções matemáticas sob tensões constantes é mais simples do que sob tensões variáveis. Amostras menores são necessárias em testes constantes.

V — Carregamento dependente do tempo

Nos ensaios com solicitação dependente do tempo, o sistema é submetido a níveis de solicitação que variam com o tempo. Muitas vezes o teste se torna bem mais complexo e necessita de *software* mais avançados para processar os carregamentos atuantes. A Figura 5 mostra, respectivamente, modelos de carregamentos de tempo dependente com escalonamento por patamar; de tempo dependente com escalonamento por patamar e rampa de tensão; de crescimento constante da tensão ao longo do tempo; e por crescimento totalmente dependente do tempo.

Figura 5 – Modelos de dependência da tensão com o tempo

Fonte: Vassilou; Mettas; El-Azzouzi (2008).

VI – Fator de aceleração

McPherson (2010) apresenta um procedimento prático que consiste em gravar o perfil de carregamento durante um teste em operações sob condições normais de funcionamento, e, a partir desses perfis de tempo e com o uso de frequências ou ciclos, é possível determinar espectros acelerados de carga. Finalmente, por meio da interpolação desses histogramas, o tempo de vida pode ser verificado. A reprodução do carregamento com cargas maiores e do uso de modelos resultam em um fator de aceleração do modelo analisado. Com cargas aumentadas, ocorrem durante os testes maiores danos do que ocorreriam em avaliações reais, levando obviamente o produto a uma vida menor. A relação entre vida sob uso normal e acelerado é descrita no teste acelerado e definida como fator de aceleração do teste F_A :

$$F_A = t / t_{ac}$$

É de fundamental importância que o ensaio não crie novas falhas. O teste acelerado diminui o tempo para precipitar a falha, mas não deve introduzir novos tipos importantes de falhas, de modo que a probabilidade de ocorrer a falha no teste acelerado se altera, mas sem novos modos de falha.

2.3.6 Teste de Vida Altamente Acelerado (HALT)

Desde 1993, métodos de aceleração de testes têm sido discutidos na literatura. *Highly Accelerated Life Test* (HALT) refere-se a um método para assegurar a confiabilidade de produtos em fase de desenvolvimento. Esse método é aplicado principalmente em componentes eletromecânicos e eletrônicos e em menor quantidade em montagens mecânicas.

Por meio do carregamento incrementado, falhas relevantes são aperfeiçoadas, e seus mecanismos são acelerados a um custo mínimo e ao menor tempo possível. O HALT funciona com níveis de carregamento que excedam consideravelmente os níveis de carregamento aplicados sob condições normais de funcionamento. O processo começa com a análise do carregamento possível, tais como tensão de operação, frequência, potência, vibração, temperatura, entre outros.

Esse nível de carregamento é estabelecido individualmente para cada produto. Para essa determinação, não existem níveis preestabelecidos, uma vez que muitos mecanismos de falha podem ser provocados. O objetivo é a falha em si, e não o aumento ou a avaliação da durabilidade. O componente deve ser monitorado ao longo do teste por um processo iterativo. A Figura 6 mostra o fluxo de análise proposto com o planejamento de um teste acelerado.

Figura 6 – Fluxo de análise da verificação e teste acelerado

Fonte: Bertsche (2008).

2.3.7 Fases da Elaboração de um Teste Acelerado

Bertsche (2008) apresenta que os limites operacionais e os limites de destruição são determinados entre os limites reais incrementados. Ao exceder os limites em condições de funcionamento, o produto reage com a apresentação dos defeitos. É necessário atingir o limite e voltar aos estados e limites fundamentais da tecnologia (*Limits of the Fundamentals Technology* – LFT). Um teste acima do limite de destruição do componente provoca a destruição contínua, e a falha se torna irreversível.

Principais fases do HALT:

- teste com aumento incremental da carga;
- análise dos resultados de cada nível de carregamento;
- implementação de ações corretivas de projeto, material e montagem;
- renovação de todo o teste.

Os resultados do HALT devem ser reintroduzidos:

- a) no cálculo de dimensionamento e projeto;
- b) nos processos produtivos;
- c) na determinação do perfil de carga.

O HALT é um método muito eficiente, pois pode:

- a) reconhecer no projeto e no desenvolvimento a imperfeição ou defeitos de produção;
- b) determinar e expandir limites de projeto;
- c) aumentar a confiabilidade de produtos e processos;
- d) reduzir o tempo de desenvolvimento;
- e) estimar o efeito de modificações.

A principal desvantagem do HALT é a impossibilidade de criar uma previsão de aumento de confiabilidade baseada em fundamentos estatísticos. Gates, Gibson e McLain (1989) demonstram que o programa de aumento da confiabilidade obedece a um modelo di-log, conforme mencionado nos capítulos anteriores.

No exemplo a seguir, analisa-se o comportamento de um clipe de papel fletido diversas vezes em determinado ângulo α , conforme mostra o Quadro 1.

No experimento, o ângulo de flexão varia em três diferentes valores para seis cliques diferentes. O tempo de falha dado em ciclos de carga até a ruptura está resumido no Quadro 1.

Quadro 1 – Número de flexões do clipe antes da ruptura

Nº	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	$\alpha = 180^\circ$
1	58	16	4
2	63	17	5
3	65	18	5
4	72	21	5,5
5	78	22	6
6	86	23	6,5

Fonte: Bertsche (2008).

Bertsche (2008) mostra que todas as distribuições possuem a mesma forma, o que significa que o mecanismo de falha não varia com o ângulo de flexão como

indicado na Figura 7. A curva da distribuição de Weibull para os diferentes ângulos de flexão são paralelas. Com base nos tempos de vida e na aceleração imposta, o fator de aceleração a 180° com relação a 45° é:

$$F_{A\ 180^\circ} = \frac{t_{45^\circ}}{t_{180^\circ}} = \frac{74,85}{5,72} = 13$$

Ao se testar os cliques com um ângulo de flexão de 180°, o tempo de teste pode ser reduzido por uma aceleração de fator 13 em comparação ao teste com ângulo de 45°. O tempo de aceleração do teste com relação a um ângulo de 90° (baseado no de 45°) é dado por:

$$F_{A\ 90^\circ} = \frac{t_{45^\circ}}{t_{90^\circ}} = \frac{74,85}{20,78} = 3,6$$

O clipe testado com a flexão de 90° reduz o tempo em um fator de aceleração de 3,6 se comparado ao de 45°.

Fonte: Adaptado de Bertsche (2008).

Com relação aos testes acelerados, dois cuidados devem ser tomados. Primeiro, a aceleração deve acelerar apenas a física da falha, nunca modificá-la. Uma história simples serve como ilustração. Ovos recém-fertilizados, se submetidos a uma temperatura de 40 °C por 21 dias, produzirão pintinhos, mas, se submetidos a 100 °C, em apenas 7 minutos teremos ovos cozidos. Ou seja, houve modificação da física do fenômeno em razão da aceleração. Além disso, a aceleração deve ser uniforme. A aceleração deve acelerar todas as partes da distribuição (Weibull ou log-normal). A Figura 8 mostra um exemplo de aceleração uniforme, e a Figura 9 mostra um claro exemplo de aceleração não uniforme, em que F é a probabilidade de falha (MCPHERSON, 2010). Na aceleração não uniforme há mudança no mecanismo de falha com a mudança na inclinação da reta que representa a distribuição no perfil probabilístico.

Fonte: Figura elaborada pelo autor com base em McPherson (2010).

Figura 9 – Exemplo de Aceleração Não Uniforme – β diferente

Fonte: Figura elaborada pelo autor com base em McPherson (2010).

2.3.8 O teste de degradação

É possível que, dentro da duração do teste, nenhuma falha seja observada. Nesse caso, não é possível fazer afirmações referentes ao comportamento da falha ou à confiabilidade do teste de forma estatística. No entanto muitas causas podem ser rastreadas e que ocorreram em determinado componente. Desgaste ou erosão podem ser causas que levam o componente a falhar; informações sobre seu comportamento ao longo do tempo podem ser aproveitadas com essa metodologia.

Um teste específico de degradação pode ser interessante se o comportamento do componente ou da máquina puder ser conhecido em função do tempo. Muitas vezes, a determinação do comportamento do componente ao longo do tempo pode ser conhecida sem a necessidade de levar o componente à falha.

Uma vez correlacionado ao tempo de exposição, o comportamento da falha é determinado criando-se uma função de Weibull. Se a relação entre tempo de carga e dano puder ser estabelecida, pode-se determinar um limite para o componente em termos de vida útil.

O resultado pode ser uma função do dano ao longo do tempo estabelecendo-se uma correlação. Existem outras formas ou valores que podem ajudar a medir o desempenho, por exemplo, a funcionalidade. A erosão ou o desgaste podem ser verificados de forma contínua ou em intervalos de tempo, definindo-se a função do desgaste ou da erosão com o tempo. Várias formas de desgaste podem ser estabelecidas em função do tempo. Alguns materiais apresentam um período inicial de maior desgaste, outros apresentam comportamento inverso, ou seja, menor desgaste no início. A Figura 10 apresenta o comportamento do componente perante a falha ao longo do tempo, via teste qualitativo.

O teste de degradação é baseado em condição anormal de funcionamento.

Figura 10 – Comportamento do componente diante da falha ao longo do tempo, via teste qualitativo

Fonte: Figura elaborada pelo autor com base em McPherson (2010).

2.4 Análise de risco

A análise probabilística de risco é um procedimento para investigar como sistemas mais complexos podem ser avaliados sob o ponto de vista do risco de um fenômeno indesejável. O modelamento permite entender como diversas variáveis se inter-relacionam, bem como identificar qual a contribuição de cada sistema para o risco e a integridade do conjunto em relação a um comportamento indesejável.

Algumas perguntas fazem parte da avaliação e são de suma importância:

- a) O que pode dar errado e levar à falha ou ao efeito indesejado?
- b) Qual a probabilidade de isso ocorrer?
- c) Se ocorrer, qual a consequência esperada?
- d) Pode-se concluir e avaliar os efeitos sobre a saúde, a segurança, a legislação, o meio ambiente, os custos e a imagem da companhia?

Especial atenção será dada ao resultado frequência *versus* consequência da falha. A principal observação não é a probabilidade de falha no sistema, mas sim determinar qual subsistema deve receber atenção redobrada em relação à otimização e à deficiência operacional. Na Figura 11, pode-se observar uma região que, embora apresente baixa probabilidade de ocorrência de falha, sua consequência é bastante severa. Ou seja: $\text{risco} = p(f) \times C$, onde C é consequência grave com baixa incidência e $p(f)$ é a probabilidade de ocorrência (KUMAMOTO; HENLEY, 1996).

Figura 11 - Gráfico probabilidade da falha *versus* consequência da ocorrência

Fonte: Figura elaborada pelo autor com base em Kumamoto e Henley (1996).

Conforme mostra a Figura 12, a análise de risco segue uma metodologia com um fluxo padrão. Inicia com a definição dos objetivos, seguida pelo levantamento das informações, conhecimento dos eventos inicializadores e cenário, levantamento do desempenho atual, quantificação, análise das incertezas e sensibilidade, classificação dos riscos e, por fim, a interpretação dos resultados.

Figura 12 – Fluxo de análise de risco

Fluxo da análise de Risco

Fonte: Figura elaborada pelo autor em 2017.

2.4.1 Objetivo e metodologia da análise do risco

O início da análise de risco normalmente se dá com a revisão dos objetivos e de que conclusão pretende-se obter com a análise. Conclusões diversas podem ser desdobradas em ações, como: melhoria do projeto e/ou processo, definição do grau aceitável de risco, adequação a leis e normas reguladoras e gerenciamento do ciclo de vida. Modarres (2006) e Aven (2008) mostram a capacidade da ferramenta para a avaliação de riscos de projetos e bons exemplos de aplicação da ferramenta.

2.4.2 Levantamento das informações

O conhecimento geral e profundo do sistema como um todo deve estar presente na análise. Fatores como projeto, processos, controles, manutenção, procedimentos de teste e adequação de subsistemas certamente farão parte da decisão final do estudo de risco. O objetivo é prevenir falhas e minimizar danos e

exposições ao risco. Dentro da fase de levantamento de informações, deve-se analisar informações relativas aos (MODARRES; KAMINSKIY; KRIVTSOV, 2009):

- a) sistemas de emergência, segurança e fatores humanos;
- b) integração entre os subsistemas e partes;
- c) falhas, eventos observados no passado e histórico de campo;
- d) alicerces técnicos e fundamentação.

Ainda nessa fase, o apoio de projetistas, usuários e analistas deve orientar e determinar o foco e o objeto da análise. Devem-se determinar as condições e os modos de falhas a serem necessariamente incluídos ou descartados. A análise de risco é válida para um projeto em um momento específico e com foco em determinado evento indesejado.

2.4.3 Identificação dos eventos iniciadores

Essa parte da análise envolve a identificação de potenciais eventos anormais que levam à exposição ao risco. É necessário identificar no sistema um ou mais modos operacionais que levem a essa condição final indesejada, ou seja, quais situações funcionam como inicializadoras.

O primeiro passo consiste em identificar eventos que possam levar ou se constituir em ameaças à integridade do sistema. Durante o período de funcionamento normal, algo leva o sistema a transgredir em direção ao evento indesejado. A perda de uma função, de um sistema ou de diversos deles simultaneamente é considerada como um evento inicializador (MODARRES, 2008).

Uma forma de determinar o evento inicializador é analisar o diagrama funcional dos sistemas envolvidos. Cada função deve ser decomposta em seus subsistemas, identificando os eventos que possam resultar em falhas. Esses eventos podem ser agrupados por similaridade funcional e tratados como um grupo inicializador.

O procedimento abaixo pode ser adotado para subsidiar e analisar os riscos (MODARRES, 1992):

- a) usar uma lista de eventos inicializadores;
- b) identificar um grupo de eventos inicializadores;
- c) agrupar os eventos inicializadores que apresentem o mesmo efeito.

2.4.4 Desenvolvimento do cenário

O objetivo aqui é o desenvolvimento de um cenário completo que leve à exposição ao risco. O diagrama de falhas é uma técnica que pode ser utilizada para melhor compreender os fatores. Nele os subsistemas são apresentados, inclusive falhas de *hardware* e *software*. Devem ser considerados eventos internos e externos ao processo de análise:

- a) identificar as funções de cada sistema inicializador ou grupo deles;
- b) associar aspectos humanos e *hardware* envolvidos;
- c) desenvolver uma árvore de eventos ou grupos de eventos.

2.4.5 Levantamento de dados das falhas e avaliação do desempenho

Coit e Dey (1999) e Guimeka e Coffelt (2008) mostram que a análise de dados e o histórico de falhas normalmente ajudam muito a melhorar ou a definir os futuros problemas ou riscos. *Hardware*, *software* e aspectos humanos são, dentre outros, dados de entrada para podermos avaliar possíveis barreiras. No entanto, deve-se atentar para que as condições do passado estejam ainda presentes e válidas na análise atual garantindo que as condições anteriores sejam consistentes. Os dados históricos de campo ou dados do passado podem ser agrupados como dados genéricos das falhas, dados estatísticos das falhas e sua distribuição estatística, entre outros. O diagrama de falhas deve analisar basicamente três tipos de ocorrências:

- a) evento inicializador;
- b) componentes envolvidos;
- c) fatores humanos.

Tipicamente deve-se analisar o tempo para ocorrência das falhas, o número de reparos ocorridos e a frequência de ocorrências. Igualmente deve-se conhecer as incertezas associadas a todos esses dados. Para se atingir baixo nível de risco, os sistemas e equipamentos devem ter alto nível de desempenho para a confiabilidade. O objetivo deve ser a obtenção de sistemas adequadamente projetados, com confiabilidade e baixas incertezas.

Aspectos como os apresentados a seguir devem ser considerados nessa fase:

- a) determinação de valores de durabilidade e resistência dos materiais, cargas, agentes agressivos, número de falhas, ocorrências e taxas de falhas;
- b) reunião de todos os dados, dados de reparos, barreiras, oriundas das experiências existentes;
- c) acesso à frequência dos eventos inicializadores e a outras probabilidades de falhas oriundas da experiência com esse sistema;
- d) determinação de causas comuns para componentes similares.

2.4.6 Quantificação e integração

O diagrama de falhas e os eventos de falhas são integrados e quantificados para conhecer as frequências envolvidas associadas a incertezas.

Normalmente a quantificação envolve um processo de representação Booleana. Cada evento deverá ter a probabilidade associada e deve-se compor a expressão geral Booleana. A Figura 13 mostra eventos de falhas em série e em paralelos e como a composição booleana é feita para cada caso. Ao final, como cada evento tem uma probabilidade associada, é possível se compor a expressão geral Booleana.

Figura 13 – Eventos de falha em série e em paralelos e as respectivas composições Booleanas

Fonte: Figura elaborada pelo autor em 2017.

2.4.7 Análise das incertezas

Incerteza faz parte de toda e qualquer medição. É muito comum, às vezes, negligenciar as incertezas associadas ao modelo. Normalmente, acabam-se supondo os números como absolutos e precisos, quer por desconhecimento do fenômeno, quer por excessiva confiança nos valores obtidos. É comum se ter uma análise conservadora com o uso de fatores de segurança superdimensionados e margens confortáveis de projeto.

No entanto, na tomada de decisão, é fundamental analisar as incertezas. A probabilidade de falha de um sistema pode ser representada por uma associação de probabilidades. O diagrama de falhas e de eventos usado para estimar o risco pode ser ou conter uma fonte de incerteza. Outra causa de incerteza é o modelo poder estar incompleto ou o nível de detalhes na decomposição dos subsistemas ser insuficiente, ou mesmo não apresentar considerações importantes.

2.4.8 Análise da sensibilidade

Nessa fase, é necessário verificar a possibilidade de modificação na escolha do modelo ou dos parâmetros e quais os elementos mais sensíveis da análise. Deve-se rever a contribuição de cada valor dos parâmetros iniciais de análise e verificar o impacto de uma modificação nos elementos básicos e nas principais hipóteses.

2.4.9 Classificação dos riscos e da importância das análises

A classificação dos elementos e sistemas quanto ao risco ou à segurança é um dos mais importantes resultados da avaliação de risco. Trata-se de simplesmente classificar os sistemas com relação à sua contribuição final ao risco total. O processo de seleção deve ser feito com muito cuidado.

Deve-se atentar para:

- a) determinar o objetivo da classificação dos sistemas;
- b) fazer a classificação do risco;
- c) identificar os elementos mais críticos e importantes com respeito ao risco.

2.4.10 Interpretação dos resultados

Ao concluir os valores do risco, deve-se interpretar os resultados para determinar se revisões ou reavaliações são necessárias para refinar resultados e conclusões. É necessário, então, caracterizar a importância de cada elemento do sistema no resultado final.

Assim, deve-se atentar para os seguintes passos de análise do resultado:

- a) determinar o modelo lógico, estruturas de cenário, hipóteses e objetivo da análise de risco;
- b) identificar elementos do sistema para o qual melhores informações seriam necessárias para reduzir incertezas;
- c) revisar a análise e reinterpretar os resultados.

3 O SISTEMA DE IGNIÇÃO DO MOTOR CICLO OTTO

Heywood (2003) mostra os fundamentos do fenômeno da ignição nos motores de ignição por centelha, em particular o fenômeno da descarga elétrica entre os eletrodos das velas, produzida pelo sistema de ignição, que inicia o processo de combustão próximo do fim da fase de compressão, conforme figura 14.

Um arco entre um eletrodo e o outro se forma quando uma tensão elétrica suficientemente alta é aplicada. Um núcleo de plasma de alta temperatura, criada pela centelha, desenvolve uma chama autossustentada e provoca a propagação de uma frente de chama onde ocorre uma reação química exotérmica de combustão.

A descarga entre os eletrodos é sucedida pelo crescimento deste núcleo e surge na sequência uma propagação da frente de chama.

Os sistemas de ignição, comumente usados para promover a centelha, normalmente são a bateria e uma bobina de ignição responsável pela alta tensão.

Essa seção revê os conceitos básicos de descargas elétricas em misturas com gases inflamáveis, importantes para a ignição do motor, bem como os métodos para produzir uma chama em propagação. O arco da centelha, de um eletrodo a outro, só se forma se houver uma tensão suficientemente alta aplicada. Em uma descarga típica, o potencial elétrico através da folga do eletrodo aumenta até que ocorre uma ruptura do dielétrico. Uma frente de ionização se propaga de um eletrodo para outro.

A impedância da folga diminui drasticamente quando o fluxo atinge o eletrodo oposto e a corrente através da folga aumenta rapidamente, este estágio se chama de fase de ruptura. É seguido pela fase de arco onde uma estreita camada do plasma cilíndrico se expande devido a condução de calor e difusão, com reações exotérmicas que levam ao desenvolvimento da chama.

Essa fase é seguida por uma fase de descarga intensa onde o sistema de armazenamento de energia irá descarregar-la. Essa fase de ruptura apresenta uma alta tensão (10 KV) e alta corrente elétrica (200 A) em uma duração extremamente curta (10ns). Neste instante surge um pequeno cilindro ionizado (diâmetro de 40 μm). Nesta situação, a energia fornecida é transferida praticamente sem perdas. A temperatura e pressão sobem rapidamente para valores de até 60.000 K e algumas centenas de atmosferas. Um forte choque ocorre e uma onda de explosão se propaga e a temperatura do plasma diminui assim como a pressão. Cerca de 30 % da energia do plasma é levada adiante pela onda de choque. A fase de ruptura sempre precede

o arco e a descarga do fluxo que cria um caminho eletricamente condutivo entre os eletrodos. Na fase de arco a tensão é baixa, abaixo de 100V. Por outro lado, na fase de ruptura, onde o gás é ionizado, a tensão cai no catodo e no anodo.

O arco consiste de um ponto no catodo muito quente o que faz com que o material evapore. O arco inicia e aumenta em tamanho devido à condução de calor e difusão de massa. Nessa situação a temperatura do gás é de cerca de 6000 K.

Correntes abaixo de 200 mA, com uma tensão no eletrodo de cerca de 300 a 500 V, um catodo frio e menos de 0,01 por cento de ionização são valores típicos para a descarga do fluxo.

Perdas de energia são mais altas na fase de arco onde as temperaturas de pico são de cerca de 3000 K e a energia requerida para propiciar a ignição da mistura estequiométrica em condições normais do motor por meio de uma faísca é de cerca de 0,2 mJ. Para misturas ricas um nível maior de energia é necessário cerca de 3 mJ. Sistemas convencionais de ignição oferecem cerca de 30 a 50 mJ de energia elétrica à centelha. Devido as características físicas do modo de descarga somente uma fração de energia fornecida à centelha é transmitida à mistura do gás. As perdas por radiação são pequenas ao longo do processo. O fim da fase de ruptura ocorre quando no catodo quente se desenvolve em uma descarga em arco. Perdas de calor para o eletrodo se tornam então substancial. A fase de ruptura atinge um nível de potência de 1MW, mas a energia oferecida é baixa (0,3 a 1 mJ). A descarga do fluxo tem o menor nível (10W) mas tem alta energia (30 a 100mJ), devido ao longo tempo de descarga. A fase de arco fica entre estes valores.

Do total de energia elétrica fornecida à centelha, somente uma fração contida dentro do limite da superfície do plasma é disponível para iniciar a propagação da chama. A densidade de energia e o gradiente de temperatura nesta camada depende do modo de descarga. Mais altos níveis de energia e gradientes de temperatura são alcançados se a energia de ignição é fornecida em um intervalo de tempo mais curto. É necessário um raio mínimo do plasma da centelha para a inflamação da mistura ar-combustível. Este raio aumenta rapidamente conforme a mistura se dilui e diminui à medida que aumenta a pressão e aumenta a velocidade de expansão do plasma.

Depois da combustão, a taxa de queima é proporcional à área da superfície da chama. Assim, descarga e geometria que produzem maior zona de queima e maior superfície de forma mais rápida são mais vantajosas.

Gollin (2003) mostra que o instante, a duração e a intensidade da ignição são fundamentais no projeto e no desenvolvimento dos motores de combustão por ignição. O sistema de ignição é formado pela bobina ou pelo transformador de ignição, pelas velas de ignição e pelos cabos das velas. Da intensidade e do instante adequados da centelha dependem o torque, o consumo e os níveis legais de emissões de poluentes. A centelha precisa ocorrer em instante e intensidade bem estabelecidos para o correto funcionamento do motor, conforme mostra a Figura 14.

O gerenciamento do motor usa dados de sensores e os envia para o módulo do sistema de ignição (MILHOR, 2002). O módulo de controle do motor possui mapas e curvas armazenadas na memória para calcular o início da ignição e seu ângulo de duração no circuito primário, chamado *dwell*.

A corrente elétrica vinda da bateria percorre o circuito primário da bobina, e a ignição se faz por meio de um acionador, que é a vela de ignição. Um campo magnético é gerado à medida que a corrente percorre o circuito primário. No instante esperado da ignição, a corrente elétrica é interrompida, e o campo eletro magnético se extingue. A rápida mudança no campo induz uma alta tensão no circuito secundário da bobina. No instante em que a tensão atinge o valor de ignição, uma centelha é gerada na vela provocando a combustão da mistura ar/combustível, previamente dosada pelo módulo e pelas válvulas injetoras.

O estágio de controle da ignição, também chamado de estágio de potência, controla o fluxo da corrente no induzido. Esse estágio consiste em um transistor de potência de três estágios, cujo funcionamento será explicado ao longo do capítulo.

Figura 14 – Pressão na câmara de combustão *versus* posição do virabrequim e o instante necessário de se obter a centelha

Fonte: Figura elaborada pelo autor em 2017.

As funções de limitação da corrente e da tensão do circuito primário protegem os componentes de sobrecarga. O estágio de controle e a bobina se aquecem com o funcionamento e precisam ser refrigerados para evitar seu superaquecimento. Os estágios de controle são incorporados à bobina.

O estado da arte em bobinas de ignição consiste em dois enrolamentos magneticamente acoplados e um núcleo de ferro alojados em uma caixa plástica, conforme mostra a Figura 15.

Existem também bobinas do tipo *pencil coil*, nas quais o alojamento é preenchido com epóxi para isolar seu enrolamento. O funcionamento da bobina de ignição é baseado no fenômeno da indução magnética. É por meio dele que a energia armazenada no primário é transferida ao enrolamento secundário. A amplificação da corrente no induzido primário e a tensão que surge no secundário são proporcionais ao número de espiras existentes em cada lado.

Figura 15 – Esquema técnico do funcionamento de uma bobina de ignição

Fonte: Gollin (2003).

Nos circuitos mais simples, um terminal do primário é conectado a um terminal do secundário e ambos são ligados à chave de ignição. O outro terminal é ligado ao estágio de controle. O enrolamento secundário é ligado diretamente à vela de ignição. Nos demais casos, os terminais primário e secundário não são ligados entre si. Nesse caso, o enrolamento do secundário é ligado ao fio terra (massa) e à vela de ignição. A Figura 16 mostra um esquema elétrico indicando as possibilidades de arranjo entre os induzidos primário e secundário do funcionamento da bobina de ignição.

Figura 16 – Esquema elétrico indicando as possibilidades de arranjo entre os induzidos primário e secundário

Fonte: Gollin (2003).

O módulo de controle ativa o estágio de potência para iniciar o tempo de *dwell* calculado, ou seja, quanto tempo de energização teremos. Nesse período a corrente no primário sobe para um valor específico para gerar um fluxo de campo. O nível da corrente primária e a indutância da bobina determinam a energia armazenada. O estágio de potência, então, interrompe a corrente no instante de ignição. A variação do campo magnético induz uma tensão no enrolamento secundário (GOLLIN, 2003).

A tensão no circuito secundário deve obrigatoriamente exceder o nível necessário para criar um arco entre os eletrodos da vela. A energia liberada entre os eletrodos da vela deve assegurar que a mistura entre em ignição mesmo com a ocorrência de arcos secundários.

Esses arcos secundários ocorrem quando a turbulência da mistura na câmara de combustão interrompe a centelha. A Figura 17 mostra um esquema elétrico indicando o arranjo com o módulo eletrônico, a bateria e o conjunto vela, bobina e cabos de vela em uma única peça.

Os antigos sistemas mecânicos foram abolidos para o controle de distribuição de corrente. Atualmente as bobinas são ligadas diretamente às velas via cabo de velas ou via conexão direta tipo *pencil coil*, conforme pode ser visto na Figura 17.

Figura 17 – Esquema elétrico indicando arranjo módulo eletrônico, bateria e conjunto vela, bobina e cabos de vela em uma única peça

Fonte: Gollin (2003).

3.1 Velas de ignição

A vela de ignição produz um arco entre seus eletrodos para queimar a mistura na câmara, gerando a combustão. Ela inclui, além do isolador cerâmico, um eletrodo central e um ou vários eletrodos massa ou terra.

A vela que possui o eletrodo terra centralizado é chamada de vela com folga do tipo *air gap plug*. Quando os eletrodos massa estão localizados lateralmente, são chamados de tipo semi-superfície ou superfície. Quando a corrente primária é interrompida no ponto de ignição, a corrente no secundário da bobina sobe e atinge a tensão de ignição (cerca de 30 microssegundos) e o dielétrico se rompe e se torna condutivo, disparando a centelha. Durante a subsequente duração da centelha (1 μ s), a energia armazenada é liberada, mas existe uma fase de pós-oscilação, que é a oscilação após a centelha da corrente.

Durante a operação do motor, existe a erosão da vela por causa da corrente e da corrosão ocasionada pela presença dos gases quentes. Nessa fase a folga no eletrodo aumenta, elevando conseqüentemente a tensão necessária para a ignição. Na Figura 18, podemos ver um esquema que apresenta as diversas formas de se estabelecer a centelha entre eletrodo e isolante na vela de ignição. A descarga pode

ocorrer no topo de eletrodo, e ou nas laterais do eletrodo. Na Figura 19, pode-se ver a relação entre o tempo (duração da centelha) e a tensão entre os eletrodos. A Figura 19 mostra o gráfico entre o tempo de variação da tensão no primário e da tensão no secundário, em que K é a tensão de pico que provoca a combustão e S é a tensão de combustão que permanece algum tempo após a tensão de ignição. O estabelecimento da centelha entre eletrodo e isolante pode ocorrer de diversas formas. As diversas formas se alternam propiciando um desgaste erosivo homogêneo do eletrodo e do isolante.

Figura 18 – Diversas formas de se estabelecer a centelha entre eletrodo e isolante

Fonte: Gollin (2003).

Figura 19 – Gráfico mostrando a relação entre tempo (duração da centelha) e tensão entre os eletrodos

Fonte: Gollin (2003).

3.2 Transformadores de ignição

Nos sistemas em que a bobina é montada diretamente na vela, é necessário um meio para conduzir a alta tensão gerada na bobina. Nos sistemas em que a bobina não é montada diretamente na vela, existem cabos isolados para conduzir altas correntes. Esses cabos devem ter o menor comprimento possível, pois podem atuar como resistores e reduzir a tensão no secundário.

O pulso gerado pela descarga é um emissor de radiofrequência, e os cabos devem conter um supressor que iniba esse fenômeno. A utilização de resistores reduz a corrente, mas diminui a tensão no secundário. A maior contribuição para eliminar a radiofrequência deve vir da blindagem eletromagnética do sistema de ignição. (GOLLIN 2003)

Existem fatores que afetam a energia nos eletrodos e, em especial, o funcionamento e a solicitação dos transformadores de ignição:

- a) densidade da mistura ar/combustível na câmara de combustão;
- b) fator lambda excessivo (composição da mistura);
- c) velocidade e turbulência;
- d) geometria do eletrodo;
- e) material do eletrodo;
- f) folga do eletrodo.

Em condições ideais, a energia requerida para queimar uma mistura homogênea e estequiométrica é de 2 MJ. Sob condições de mistura rica ou pobre, são necessários 3 MJ. Se houver turbulência muito elevada dentro da câmara de combustão, pode ocorrer a extinção da centelha, levando ao fenômeno da falha de ignição. (GOLLIN 2003)

A bobina precisa estar adequada aos demais componentes, como o módulo de potência e as velas. Na Figura 20 pode-se ver graficamente a relação entre o tempo (duração da faísca), a corrente primária e a de ignição. Seguindo as instruções do módulo de controle, a corrente no primário sobe e depois é cortada, gerando uma corrente induzida de ignição no secundário.

Figura 20 – Gráficos mostrando a relação entre o tempo (duração da faísca) e a corrente primária e a de ignição

Fonte: Gollin (2003).

A energia W_{Fu} disponível na vela, a corrente I_{Fu} disponível na vela, a duração do arco t_{Fu} e a tensão de ignição U_z são parâmetros fundamentais do sistema.

A bobina é submetida a condições severas de operação:

- temperatura de operação de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$... $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- tensão no secundário de até 30.000 V;
- corrente no primário de 7 amperes a 15 amperes;
- vibrações de até 50 vezes a aceleração da gravidade;
- resistência a ações de gasolina, óleo, fluidos de freios etc.

O Quadro 2 mostra valores típicos dos principais parâmetros de um transformador de ignição.

Quadro 2 – Valores típicos encontrados nos atuais sistemas de ignição

I_1	Corrente primária (pico)	7 amperes a 9 amperes
T_1	Tempo de acréscimo	1,5 μs a 4 μs
U_2	Tensão no secundário	29 KV a 35 KV
t_{fu}	Duração da centelha	1,3 μs a 2,0 μs
W_{Fu}	Energia da centelha	30 μJ a 50 μJ até 10 μJ para motores de injeção direta
I_{Fu}	Corrente da centelha	80 a 120 mA
R_1	Resistência do primário	0,3 Ω a 0,6 Ω
R_2	Resistência do secundário	5 Ω a 15 Ω
N_1	Número de espiras no enrolamento primário	150 a 200
N_2	Número de espiras no enrolamento secundário	8.000 até 22.000

Fonte: Gollin (2003).

As primeiras velas de ignição tinham uma expectativa de centelhar cerca de 15 a 25 vezes por segundo. No Quadro 3 pode-se encontrar valores correntes de pressão atuante sobre as velas encontrados nos atuais sistemas de ignição. Atualmente a expectativa de centelhamento é de até 100 vezes por segundo. As temperaturas de pico subiram de $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ para $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, e a tensão de ignição foi de 10.000 V para 30.000 V. No caso de testes acelerados, pode-se chegar até 47.000 V.

O Quadro 3 mostra valores de solicitação em termos de pressão e temperatura em função da posição do virabrequim ao longo de um ciclo do motor.

Quadro 3 – Valores correntes de pressão atuante sobre as velas encontrados nos atuais sistemas de ignição

Fase do Motor	Compressão	Combustão e expansão	Escape	Admissão
Temperatura do gás	300 °C a 600 °C	3.000 °C	900 °C	120 °C
Pressão dos gases	8 bar a 15 bar	30 bar a 50 bar	1 bar a 5 bar	0,9 bar
Posição do pistão
Posição do virabrequim	PMS Ponto morto superior 0°	PMI Ponto morto inferior 180°	PMS Ponto morto superior 360°	PMI Ponto morto inferior 540°

Fonte: Milhor (2002).

3.3 Materiais dos eletrodos

Gollin (2003) afirmam que o níquel é muito usado como material dos eletrodos das velas juntamente com o manganês e o silício para melhoria da resistência ao ataque químico, em particular ao dióxido de enxofre. O alumínio aumenta a resistência à oxidação, bem como um núcleo de cobre também pode ser usado para melhorar a condutibilidade térmica. Além desses, a prata também pode ser usada por causa de suas boas características elétricas e térmicas. A platina e suas ligas apresentam alta resistência à corrosão, à oxidação e à erosão e, por isso, são usadas em velas de alta durabilidade. A vida da vela está diretamente ligada à erosão do eletrodo e à sua crescente necessidade de maior energia. Chega-se a um ponto em que a demanda é maior do que a capacidade da bobina, e a falha então ocorre. A Figura 21 mostra os tipos de folgas existentes entre o eletrodo e o isolante nas velas de ignição. A Figura 22 ilustra a relação entre a folga no eletrodo e a tensão de ignição. Envelhecimento, corrosão, carbonização e contaminações afetam o desempenho da vela, conforme pode ser visto na Figura 23, onde existe um perfil esperado de erosão da vela que compromete seu funcionamento. A Figura 24 apresenta o gráfico do tempo de

operação do motor *versus* tensão de ignição e a influência do material na durabilidade.(GOLLIN, 2003)

Figura 21 – Tipos de folga entre o eletrodo e o isolante nas velas de ignição

Fonte: Gollin (2003).

Figura 22 – Gráfico ilustrando a relação entre a folga no eletrodo e a tensão de ignição

Fonte: Gollin (2003).

Figura 23 – Perfil esperado da erosão e do desgaste do eletrodo

Fonte: Gollin (2003).

Figura 24 – Gráfico do tempo de operação do motor *versus* tensão de ignição

Fonte: Gollin (2003).

3.4 Processos produtivos das velas de ignição

Os isolantes das velas de ignição são feitos de um pó bastante fino de óxido de alumínio, posteriormente moldados em alta temperatura em fornos a 1.600 °C. Os isolantes são fundamentais na formação da centelha e apresentam enorme potencial para provocar falhas esporádicas caso o processo conduza a porosidades no isolante e à consequente falha de isolamento.

O sistema de gerenciamento do Motor *On-Board Diagnostic* (OBD) não necessariamente vai ser capaz de identificar falhas de funcionamento da bobina ou da vela. Uma falha de processo interno pode levar a um arco na parte interna da bobina, aumentando as chances de falhas esporádicas. Nem o OBD, nem a inspeção visual vão detectar a falha.

3.5 Modos de falha das bobinas de ignição

Nos modernos sistemas de gerenciamento do motor, quando ocorre falha de ignição, ou ainda para preservar o catalizador, o módulo eletrônico desativa o cilindro que apresentou algum problema, colocando o veículo em modo de proteção, ou seja, reduzindo sua potência. Mesmo com a potência reduzida, o veículo pode prosseguir até a manutenção para identificação e correção da causa da falha de ignição.

3.5.1 Falha total da bobina

O módulo eletrônico do motor é programado para atender a essa exigência legal do sistema *On-Board Diagnostic* versão 2 para o Brasil (OBD Br-2). Conforme será exposto nos capítulos a seguir, existem vários níveis de estratégia de segurança, dependendo do tipo de falha detectada pelo módulo e pelo seu *software*. Em virtude da necessidade de alta tensão no terminal secundário do motor, quando em alta potência e em caso de ocorrer arcos elétricos com energia abaixo do necessário, haverá falha de funcionamento nos motores em razão da baixa disponibilidade de tensão para a vela de ignição.

Nessas circunstâncias, os modernos sistemas de diagnóstico conseguem identificar falha na bobina, mas não o tipo de falha, apenas registram como falha de combustão.

3.5.2 Falha esporádica na bobina

Os *softwares* de diagnóstico conseguem identificar falhas no sistema de ignição, mas não conseguem definir qual o tipo de falha, apenas em qual cilindro o problema aconteceu. Quando surge uma falha na bobina, o módulo eletrônico consegue apenas identificar falhas no sistema de ignição e não consegue informar detalhes da falha, principalmente no caso de essas serem intermitentes.

As principais falhas observadas no motor são:

- a) falhas na centelha;
- b) circuito primário com falha;
- c) conexão ou cabos com falha;
- d) módulo de potência com falha;
- e) curtos-circuitos diversos;
- f) sobreaquecimento de bobina.

Todos esses sintomas serão diagnosticados pelo sistema OBD Br-2 como falha de ignição ou *misfire*. O equipamento de auto diagnose do módulo mostrará apenas o código de avaria correspondente à falha de ignição, mas sem qualquer indicação da origem do problema.

3.5.3 Conectores elétricos

Falhas nos contatos elétricos reduzem a tensão de ignição e podem prejudicar o desempenho de todo o sistema de ignição. Os fornecedores das velas, cabos e bobinas nem sempre são os mesmos, ou seja, o fornecedor da vela é um; o dos cabos, outro; e o da bobina, outro. Em produção seriada, cada um testa seu componente individualmente, e não o conjunto completo montado, como um sistema único.

É aqui que entra a metodologia proposta, cujo objetivo é definir um teste, ou um conjunto de testes, não com o objetivo de avaliar a durabilidade do projeto do conjunto ou de cada componente isoladamente, mas, sim, a integridade do conjunto.

Para o teste proposto, o objetivo não é acelerar a durabilidade, mas acelerar o aparecimento de falha esporádica, normalmente oriunda de um processo produtivo,

permitindo corrigir e evitar uma falha esporádica e, posteriormente, transformar esse teste em requisito da qualidade do conjunto.

3.6 O fenômeno da falha de combustão

Falha de combustão ou *misfire* é o estado de um motor quando a combustão não ocorre em razão de falhas de injeção ou ignição. Como consequência, essas falhas de combustão afetam o desempenho do sistema de controle de emissões de poluentes. A falha de combustão provoca mudanças na taxa de rotação do virabrequim pois o correspondente cilindro não é capaz de produzir torque. Stotsky (2009) mostra várias formas de se estimar e detectar a falha de combustão via modelos matemáticos de análise da variação da rotação e do torque. As funções de diagnóstico de essa falha são baseadas, na maioria das vezes, no monitoramento da flutuação da velocidade do cilindro por meio de um sinal de alta resolução da velocidade do motor ou do tempo de passagem entre dentes subsequentes do volante do motor.

Abadi (2011), Ball (2000) e Lo Bue (2007) desenvolveram diversas teorias e aplicações para medição e cálculo do fenômeno de falha de combustão. Existem diversas formas de modelar, medir e simular o fenômeno. O escopo desse trabalho não é o da detecção, mas, sim, o de evitar o fenômeno.

O sinal de alta resolução da velocidade do motor é definido como o quociente entre o valor do segmento angular desenvolvido no volante e o tempo de passagem desse segmento. O tempo de passagem se torna menor à medida que a velocidade aumenta. A Figura 25 mostra a flange traseira que faz a vedação do óleo lubrificante do motor e acomoda o sensor de rotação do virabrequim.

Figura 25 – Flange traseira que faz a vedação do óleo lubrificante do motor e acomoda o sensor de rotação do virabrequim

Fonte: Gollin (2003).

No entanto, oscilações de baixa frequência em virtude de torção do virabrequim associadas aos distúrbios oriundos de vibrações produzidas pela pista de rodagem afetam o funcionamento e o movimento do virabrequim. As Figuras 26 e 27 mostram o gráfico rotação *versus* tempo nos casos em que houve falha de combustão (gráfico à direita) e nos casos de combustão normal (gráfico à esquerda), bem como a comunicação e a identificação pelo módulo de controle eletrônico. A figura 27 mostra que o módulo eletrônico recebe as informações de rotação e posição do comando de válvulas e do virabrequim, e as sincroniza para o surgimento da centelha de ignição. Esses distúrbios influenciam diretamente o desempenho do sinal de velocidade do motor e, por consequência, o monitoramento do torque e das funções de diagnóstico de falha de combustão.

Figura 26 – Esquema mostrando o gráfico rotação *versus* tempo nos casos em que houve falha de combustão (à direita) e nos casos de combustão normal (à esquerda)

Fonte: Gollin (2003).

Figura 27 – Esquema mostrando cada cilindro, onde o módulo recebe informação de dois sensores de posição (comando de válvulas e virabrequim)

Fonte: Gollin (2003).

A forma de detecção de falha de combustão pode ser baseada, dentre outras formas, no monitoramento da amplitude em duas frequências. A primeira é a frequência de ignição e de explosão da mistura dentro da câmara de combustão do motor e a segunda é a componente da velocidade do motor com período de 720° , para o motor de quatro cilindros.

Uma vez que o cilindro é impulsionado a cada 720° de rotação do virabrequim, uma queda de torque associada ao *misfire* ou à falha de ignição e que ocorra a cada 720° gera um componente de velocidade com período de 720° . A oscilação do comportamento do torque associada ao *misfire* ocorre a cada ciclo de rotação do virabrequim.

A localização do valor mínimo desse componente no ciclo do motor mostra qual cilindro está apresentando *misfire*. Considerando, por exemplo a sequência de ignição de um motor 6 cilindros é 1-5-3-6-2-4, a Figura 28 mostra duas ocorrências de *misfire*, ou falha de combustão, em vez de duas combustões vizinhas no primeiro e no quinto cilindro. Essa situação corresponde a um erro persistente ou no sistema de injeção, ou no sistema de ignição. A figura mostra também que a falha de ignição pode ser detectada monitorando a amplitude da frequência de combustão e a amplitude da frequência de meia ordem (harmônico de meia ordem).

Na Figura 28 pode-se ver a amplitude na frequência de combustão e comparar a média da amplitude com o valor objetivo para a detecção da falha de combustão.

Figura 28 – Dois ciclos do motor são apresentados para o evento *misfire* no primeiro e no quinto cilindro. O sinal de falha do motor é apresentado em linhas pontilhadas para o cilindro 5 e em linha contínua para o cilindro 1

As oscilações de baixa frequência do trem de força e as de alta frequência da torção do virabrequim e de irregularidades da rodovia provocam distúrbios no virabrequim. Esses distúrbios influenciam diretamente o desempenho do sinal e consequentemente a função de monitoramento do torque. Existem formas de identificar e compensar tais distúrbios para o diagnóstico de falha de combustão. O comportamento do motor é aprendido durante o estado de *cut-off* (corte da injeção quando o corpo de borboleta está totalmente desacelerado e fora da marcha lenta) e compensado quando o motor recebe a injeção novamente (KLENK, 1999).

Ainda segundo Abadi (2011), Ball (2000), Klenk (1999), além de Lo Bue (2007), pode-se simular e calcular a ocorrência de falha de combustão e suas oscilações de diversas formas.

A detecção da falha de combustão nos motores de ignição tem se tornado cada vez mais importante porque a legislação de emissões de poluentes se torna cada vez mais restritiva. Uma falha de combustão leva à formação de hidrocarbonetos não queimados no catalisador. Nessa situação, a mistura ar/combustível no cilindro ou queima parcialmente, ou não queima. Na fase de exaustão do motor, esse combustível parcial ou totalmente não queimado flui no sentido do conversor catalítico causando a queima do catalisador.

Por essa razão, os sistemas de diagnósticos embarcados enviam um alarme ao motorista e desligam o cilindro com a falha de combustão. Como visto anteriormente, a detecção convencional da falha de combustão é feita pelo monitoramento da velocidade do virabrequim. No entanto, podem ser avaliadas também pela concentração de oxigênio no sistema de exaustão, pela temperatura do catalisador ou mesmo pela medição da pressão de pico no cilindro. A análise da variação angular do virabrequim é o método comum, pois avalia uma perturbação repentina no diagrama de velocidade do motor. Essa variação se dá pela redução do torque positivo na árvore de manivelas e a consequente queda na velocidade do motor. Esse método requer um equipamento adicional; sinais convencionais do sensor de velocidade do volante podem ser usados.

No entanto, muitas vezes são verificados alarmes falsos de falha de ignição por causa da deformação torcional do virabrequim ou de vibrações externas. Acelerômetros adicionais podem subtrair do sinal final os sinais oriundos da vibração do piso (KLENK, 1999).

Existem outras formas mais fáceis de detecção da falha de combustão baseadas na medição da temperatura de escape do motor; no entanto, sua resposta em frequência é muito baixa, e, por isso, constitui-se em um método de detecção de falha de combustão pouco eficaz. Abadi (2011), Ball (2000), Klenk (1999) bem como Lo Bue (2007) desenvolveram métodos de detecção baseados no modelamento dinâmico e na simulação do torque e da velocidade angular, mas igualmente inadequados ao trabalho em andamento.

3.6.1 A influência da falha de ignição nas emissões de poluentes

Os motores de combustão interna, por meio de seu módulo eletrônico de controle, possuem diversas funções relacionadas ao diagnóstico de falhas que ocorrem em seus próprios dispositivos. O conjunto dessas funções compõe o sistema de diagnóstico embarcado (*On-Board Diagnostic* ou OBD) do veículo. Esse sistema é capaz de identificar a natureza de um problema por meio da análise dos sintomas observados. Contudo, na maioria das vezes, nem sempre vem acompanhado de uma explicação ou de uma justificativa do problema ocorrido, e sim, apenas de uma causa provável.

O objetivo principal desses sistemas ainda não é identificar o componente defeituoso para que possa ser reparado, mas monitorar os sistemas do veículo, detectando falhas e notificando ao motorista, via sinal no painel de controle, da necessidade de efetuar reparos. Além disso, ele executa rotinas de recuperação que garantem o funcionamento do veículo até que a manutenção possa ser realizada. Dentre as regulamentações ambientais, podemos destacar a estabelecida pela agência governamental estadunidense *California Air Resources Board* (CARB), que em 1996 definiu limites rígidos para a quantidade de poluentes emitida pelos veículos automotores, estabelecendo novos processos de monitoramento e de diagnóstico de falhas, que levaram ao surgimento da segunda geração de sistemas de diagnósticos embarcados, denominada OBD-2 (AIR RESOURCES BOARD, 1996). Posteriormente, essas leis foram estendidas para os demais estados norte-americanos e incorporadas pelos países da União Europeia conforme pode se ver no *Technical Status Update and Proposed Revisions to Malfunction and Diagnostic System Requirements Applicable to 1994 and Subsequent California Passenger Cars, Light-Duty Trucks, and*

Medium-Duty Vehicles – (OBDII), CARB staff report California Air Resources Board (1991).

Segundo Belo (2003), uma pesquisa da *Colorado State University* mostrou que em mais de 20% das vezes que o sistema OBD detecta uma falha, ele não provê informações suficientes para identificar o componente defeituoso ou a falha ocorre de forma esporádica e o aviso do painel desaparece. Pode-se concluir então que, apesar de o sistema de diagnóstico embarcado facilitar a manutenção de um veículo automotor, os recursos providos por ele não são suficientes para resolver problemas complexos. Assim, a detecção precisa do tipo de falha ainda depende de uma análise da causa, pois o sistema de diagnóstico não atinge tal precisão de diagnóstico.

O aumento da robustez do sistema de ignição perante as falhas para garantir os níveis de emissões de poluentes e melhorar a tendência de deterioração dos componentes ao longo da vida do veículo depende de diagnóstico profundo e preciso da causa raiz do problema. Processos de solda, injeção de materiais e crimpagens são processos que pela própria natureza levam a falhas esporádicas. O melhor a fazer é garantir o controle do processo produtivo interferindo imediatamente nas operações que gerem maior risco ao produto. A esses processos críticos deverão ser atribuídos índices de confiabilidade a serem gerenciados. Anderson (2007) mostra um caso muito representativo da problemática aplicada ao piloto automático de um veículo.

Ainda segundo Belo (2003), uma das principais funções dos sistemas de diagnósticos embarcados é a de manter o nível de emissões de poluentes dos veículos automotores dentro de padrões e normas estabelecidas. Os sistemas de primeira geração (OBD Br-1) realizavam essa tarefa de maneira relativamente eficiente, mas possuíam algumas deficiências importantes. A principal delas relacionava-se à incapacidade de detectar falhas antes da deterioração do componente, que ficava inoperante, permitindo, por grande período, a operação do veículo em condições que gerassem maior emissão de poluentes. Outra deficiência era a dificuldade de acesso às informações providas por esses sistemas para o diagnóstico de falhas, uma vez que cada fabricante disponibilizava um conjunto de diagnósticos diferente, cada qual possuindo protocolos de acesso não padronizados. Geralmente o acesso a esses serviços era feito apenas por ferramentas comercializadas pelos próprios fabricantes de sistema de diagnóstico embarcado.

O sistema de diagnóstico embarcado *On-Board Diagnostic Generation 2* (OBD-2) constitui a segunda geração dos sistemas de diagnósticos embarcados e foi

definido pela CARB, sendo incorporado a todos os veículos fabricados nos Estados Unidos a partir de 1996. Ele possui, como requisitos adicionais básicos, a redução do tempo entre a ocorrência de uma falha, sua detecção e a definição de um conjunto de diagnósticos, acessados de maneira padronizada por uma ferramenta de diagnóstico genérica. Assim, logo que um veículo começa a exceder os padrões de emissões de poluentes definidos, o sistema OBD-2 deve detectar falha e acender a lâmpada indicadora de avarias no painel, avisando a existência da falha. O sistema OBD-2 adiciona novos recursos de *hardware* e *software* aos sistemas de controle eletrônicos de um veículo, cuja função é monitorar todos os componentes relacionados à emissão de poluentes e detectar a existência de falhas que possam fazer o veículo alcançar níveis de emissão 50% maiores que os estabelecidos. Todos os componentes relacionados ao funcionamento do motor, desde a formação da mistura ar/combustível a ser queimada, até a descarga dos gases através do conversor catalítico, são monitorados.

O *software* do sistema OBD-2 usa uma estratégia operacional, denominada monitores, para testar a operação de sistemas, componentes ou funções específicas do veículo (AIR RESOURCES BOARD, 1996).

O catalisador, conhecido também como conversor catalítico trivalente, é assim chamado porque reduz em cerca de 70% os três principais poluentes produzidos pelos motores a álcool e a gasolina: o monóxido de carbono, os hidrocarbonetos e os óxidos de nitrogênio. O seu perfeito funcionamento é essencial para que se atinjam os padrões de emissões de poluentes regulamentares ao longo da vida do veículo.

Assim, o monitor de eficiência do catalisador avalia frequentemente a sua eficiência, usando as medidas feitas pelos dois sensores de oxigênio aquecidos, localizados na entrada e na saída do catalisador.

A estratégia de monitoramento baseia-se na comparação do nível de O_2 que entra no conversor catalítico e do que sai através do escapamento do veículo. O funcionamento baseia-se no fato de que a maioria das moléculas de O_2 deve ser gasta durante os processos de oxidação efetuados pelo conversor. Dessa forma, se são identificados níveis mais altos do que aqueles estabelecidos para o veículo pelos regulamentos ambientais, realizam-se os procedimentos relacionados à detecção de falha, ou seja, armazenamento de informações para diagnóstico da falha e iluminação da lâmpada indicadora de avarias (ISO/DIS 14230-1, 1995).

Uma falha de ignição consiste na falta de combustível em um cilindro do motor provocada por desgaste nos componentes da ignição, por mistura de combustível muito pobre (muito ar e pouco combustível) ou por falhas no sistema elétrico que levam ao excesso de combustível no escape. As falhas de ignição, mesmo em pequeno número, provocam grande aumento na emissão de poluentes pelo veículo. Assim, o monitor de falhas de ignição verifica as flutuações de velocidade do eixo da manivela do motor e determina se uma falha de ignição acontece por causa dessas variações (SAE J1979, 1998).

O Brasil foi o primeiro país a adotar uma legislação específica para reduzir as emissões veiculares na América do Sul. O Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve) foi criado com o objetivo de reduzir os níveis de emissão de poluentes por veículos automotores, visando ao atendimento dos Padrões de Qualidade do Ar, especialmente nos centros urbanos (BELO, 2003).

3.7 O controle de emissões de poluentes no Brasil

Segundo a Secretaria de Estado do Meio Ambiente de São Paulo¹, a estratégia do Proconve (instituído pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente, Resolução Conama n.º 18, de 6 de maio de 1986) objetiva o controle das emissões de poluentes de veículos leves e pesados, estabelecendo limites máximos, que foram implantados em fases sucessivas, cada vez mais severas, com prazos para a adequação dos veículos.

A Resolução CONAMA nº. 354, de dezembro de 2004, estabeleceu para veículos leves de passageiros e leves comerciais, nacionais e importados, destinados ao mercado brasileiro, equipados com motores do ciclo Otto, a utilização de sistema de diagnóstico embarcado (OBD) introduzido em duas etapas consecutivas e complementares denominadas OBD Br-1 e OBD Br-2. O sistema OBD Br-1 deve possuir as características mínimas para a detecção de falhas nos componentes dos sistemas de ignição e de injeção de combustível para a correta avaliação do funcionamento do veículo e controle de emissões de poluentes.

¹ Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br>. Acesso em: 29 jan. 2018.

A norma OBD Br-2 define que, além das funções e características do sistema OBD Br-1, deve-se detectar e registrar a existência de falhas de ignição *misfire*, a deterioração dos sensores de oxigênio (diagnose da sonda lambda) e o monitoramento da eficiência do catalisador, que acarretam o aumento de emissões gasosas.

No entanto, o sistema OBD Br-2, mesmo reconhecendo e gravando uma falha esporádica, a desconsidera caso não haja nova ocorrência, apagando a indicação do painel. Ainda assim, pequenas falhas de combustão toleráveis pela especificação de engenharia, mesmo que esporádicas, não são detectadas pela diagnose do veículo.

Logo se faz necessária a robustez do processo produtivo dos componentes críticos para, adicionalmente ao OBD Br-2, garantir robustez aos sistemas de ignição e injeção, assim como, às emissões de poluentes a longo prazo.

4 MÉTODO DE ANÁLISE DE FALHAS ESPORÁDICAS E DE DIFÍCIL DIAGNÓSTICO

As falhas esporádicas e de difícil detecção são caracterizadas pelo seu caráter intermitente, pela baixa probabilidade de ocorrência, bem como pelas elevadas dificuldades de reprodução em serviço e de definição da causa raiz. Isso porque, para sua manifestação, há a necessidade da conjunção de diversos fatores externos simultâneos ou mesmo desconhecidos.

A manifestação, ou ocorrência, está fortemente influenciada por condições externas ou internas de forma combinada, tais como temperatura e peculiaridades da solicitação, sendo associadas normalmente a um conjunto de condições improváveis de ocorrência simultânea. A falha esporádica tem como característica em campo o reparo repetitivo, ou seja, supõe-se que houve o reparo efetivo, porém, na prática ele não ocorreu. Sendo assim, o problema não foi solucionado em razão de a causa raiz não ter sido detectada ou mesmo por ter ocorrido a substituição de uma peça com defeito por outra com o mesmo defeito. Faz-se, então, necessária uma tratativa especial para identificar a falha, reproduzi-la e, somente depois de rigorosa análise, corrigi-la. Lembrando-se de que a única forma de evitar a falha esporádica é conhecer a combinação dos fatores de verificação e de não conformidade nos processos produtivos que levam à sua ocorrência, bem como garantir a confiabilidade do processo de fabricação para evitar processos inseguros. Cabe ressaltar que, por não estar mais na fase de desenvolvimento, a peça já foi submetida a testes de durabilidade acelerada e que o fator intermitente normalmente está ligado a uma condição específica de processo produtivo e a uma combinação de solicitação e uso.

A Figura 29 mostra o fluxo geral de análise proposto para atuar na detecção de falhas esporádicas. Pode-se observar que o primeiro aspecto da falha esporádica é o aumento do número de casos, acompanhado do aumento do número de reparos repetitivos e da verbalização do usuário de que a mesma falha ainda persiste. Faz-se então necessário o isolamento de casos comprovados com a falha para que especialistas consigam isolar os sistemas com potencial problema e planejar quais testes deverão ser aplicados para levar à reprodução e à efetiva correção da falha.

Figura 29 – Fluxo de atividades sugeridas para a identificação e o tratamento de falha esporádica

Fonte: Figura elaborada pelo autor em 2017.

4.1 Distinguindo falhas esporádicas e de difícil diagnóstico das falhas constatáveis e determinísticas

Conforme visto anteriormente, uma falha esporádica se caracteriza por seu conteúdo predominantemente intermitente, ou seja, ela se manifesta e desaparece em função da dependência da conjunção de aspectos externos (ambiente e carregamento) e/ou internos (falha no produto). Essa característica é que a faz ser de difícil diagnóstico, pois, para a determinação da causa raiz, é imprescindível a reprodução prévia da falha sob as mesmas condições do campo, o que nem sempre é imediato.

Assim, para forçar a ocorrência da falha, se faz necessário recriar as condições específicas em que ela se reproduz, quer em frequência, quer em intensidade.

Uma falha determinística é a falha em que a causa é passível de ser determinada por ensaios e testes metalográficos, dimensionais e elétricos. A ruptura

de um parafuso é detectável e analisável, basta saber o que houve e o que conduziu à ruptura. Se o parafuso quebrou é porque a tensão admissível foi ultrapassada. Uma vez rompido, ele não se reconstitui mais. Isso não ocorre na falha intermitente, nem sempre detectável.

A maior parte do tempo de análise de uma falha detectável está na verificação das possíveis causas e condições para se concluir o diagnóstico. O tempo de análise passa a ser um fator importantíssimo, em função de atender à legislação, preservar a imagem do produto e da empresa e eliminar reparos repetitivos; ou seja, o próprio usuário e a legislação são fatores de pressão na obtenção rápida da solução.

Existe um roteiro possível de se estabelecer para a busca de falhas esporádicas. Inicialmente, é necessário constatar o aumento em campo do número de reparos repetitivos, ou seja, a falha está sendo supostamente corrigida, mas, na verdade, como a causa raiz é desconhecida, a falha apenas foi protelada e surgirá novamente. Outro modo é a identificação da descrição verbal por parte do usuário. Ninguém convive mais com o produto em campo do que o proprietário ou usuário, e ele pode verbalizar se a falha é intermitente, e em que condições ele fazia uso do sistema quando a falha surgiu. Para tanto, é necessária a existência de um sistema de suporte e atendimento ao cliente com uma via de contato com ele. Nem sempre isso é simples, pois o usuário nem sempre está disponível para fornecer tais informações. Obviamente existem falhas esporádicas de imediata detecção, pois são facilmente constatáveis, quer por simples inspeção visual, quer por ensaios simples de verificação da especificação de engenharia. Exemplo disso é um cabo elétrico apenas mal conectado.

4.2 Análise e classificação das falhas

Uma vez constatados o aumento dos casos de campo, a incidência de reparos repetitivos e a verbalização do usuário, associados à dificuldade de solução, a metodologia de solução de problemas precisa ser redirecionada. Faz-se necessário identificar os sistemas envolvidos, colocá-los em observação por um tempo prolongado e com condições controladas para tentar reproduzir a falha. Esses são os primeiros passos para isolar o problema. Quanto maior o número de sistemas disponíveis comprovadamente com a falha intermitente para análise, melhor a condição de sua solução. A verbalização do usuário é fundamental. O usuário pode

trazer indícios claros das situações em que a falha ocorra ou qual a conjunção de fatores que leva ao fenômeno. Faz-se necessário, no entanto, traduzir a verbalização do leigo em análise ou na tecnologia do produto para sua linguagem técnica.

Uma vez claramente identificada a falha como intermitente, o próximo passo será a alocação dos especialistas para a elaboração de um diagrama completo de potenciais causas. O objetivo é isolar um subsistema ou um componente crítico para a falha em questão. Somente depois de isolá-los, podemos prosseguir para os procedimentos de laboratórios. Muitas vezes, uma entrevista direta com os usuários é extremamente esclarecedora.

4.3 Definição dos procedimentos de ensaio para reprodução das falhas esporádicas em laboratório

A precipitação da falha esporádica requer um estudo profundo dos modos de falhas dos componentes envolvidos e que possam causar o problema a ser solucionado. Primeiramente, é necessário definir os sistemas críticos envolvidos, bem como os subsequentes componentes e suas interfaces. Vale ressaltar que muitas vezes os componentes não apresentam falhas, mas, sim, a interface entre eles. O procedimento então parte de um diagrama geral de falhas, incluindo-se todos os sistemas com potencial de contribuição com o modo de falha, analisando cada um dos componentes envolvidos e sua interface, pois é nela que podem aparecer oscilações, por falha de montagem ou assentamento, sendo fundamental analisar o conjunto ou o subconjunto completo. As interfaces serão consideradas como um sistema isolado que contribui para a falha do mesmo modo que um sistema isolado.

Assim, os ensaios de laboratório devem necessariamente incluir o sistema ou o subsistema, depois, os componentes e suas interfaces. A análise crítica tem por objetivo transformar indícios, experiências anteriores e todo o conhecimento dos especialistas para definir quais variáveis e parâmetros podem ser acelerados em um ensaio de HALT para aumentar a probabilidade de detecção da falha. Em paralelo, busca-se também a reprodução da falha sem acelerar variáveis apenas para se confirmar em que situações ela ocorre.

Em geral, os testes acelerados visam à determinação da vida de um sistema ou componente, reduzindo-se o tempo total de ensaio, ou mesmo a definição de um limite de carga a que ele possa ser submetido em uso. A proposta deste trabalho

busca algo diferente dos ensaios de durabilidade: a precipitação do principal modo de falha, evitando tempo desnecessário de testes e análise. Uma vez isolado o componente ou o sistema criador da falha, o próximo passo é identificar a falha que ele contém. Nessa fase deve-se apresentar possíveis falhas que levem ao fenômeno esporádico e quais variáveis de teste devem ser observadas. A elaboração do diagrama de todos os potenciais modos potenciais de falha (diagrama de Ishikawa) é fundamental. É a partir desses dados que se identificam causas potenciais e, com base nessas causas potenciais, quais testes podem ser planejados para precipitar a falha (FERJENCIK, 2014).

Por exemplo, qual a contribuição da temperatura, da vibração, da frequência, da tensão, da variação de tensão, do tempo de aplicação da carga, do campo magnético, entre outros. Aqui é de relevante importância o conhecimento dos especialistas de modo a não se incluir variáveis em excesso, inviabilizando o experimento, nem se negligenciar variáveis importantes.

Variáveis em excesso inviabilizariam a conclusão dos testes a curto prazo, e a negligência de parâmetros, levaria ao insucesso do teste acelerado.

Sendo assim, quais são os parâmetros de testes a serem verificados, quais os valores nominais, quais valores forçados e os limites de solicitação da peça devem ser determinados. Lembrando que o objetivo não é conhecer a durabilidade do sistema, uma vez que isso já foi feito no desenvolvimento da peça, e sim achar e precipitar o modo de falha procurado. A Figura 30 mostra o fluxo proposto de análise para determinar e planejar as variáveis que devem ser consideradas para o projeto do experimento.

Figura 30 – Fluxo de atividades para planejamento do teste até a reprodução da falha

Fonte: Figura elaborada pelo autor em 2017.

4.4 Proposta de projeto do equipamento de ensaio

Uma vez definidos o diagrama de falhas, o evento indesejado, os sistemas e subsistemas críticos, é necessário desenvolver uma proposta de equipamento focado no problema no sentido de se acelerar a diagnose, ou seja, aumentar as chances de reproduzir a falha sem jamais introduzir novos fatores. Desse modo, traduzimos o planejamento dos testes em equipamentos para a realização dos ensaios em laboratórios. O principal fundamento dos testes acelerados é diminuir o tempo de resposta sem acrescentar novos fatores ou modos de falha. A Figura 31 mostra um fluxograma para tratamento de falhas esporádicas.

A peça, após o teste acelerado, pode ser reutilizada, uma vez que não são desenvolvidos novos modos de falha e o limite de tensão que destrói a peça nunca foi ultrapassado.

O equipamento proposto deverá ter condições de simular o funcionamento do sistema ou sistemas em análise, levando-se em conta o trabalho em serviço normal

dos sistemas, subsistemas e componentes. Em muitos casos, apenas o tempo de exposição e o funcionamento prolongado do sistema em bancada conseguem precipitar o modo de falha. A simples exposição em condições nominais de serviço por um tempo mais prolongado já deixa evidente o modo de falha. No entanto, essa não é a regra.

O equipamento, deverá então, estar apto a simular situações com variáveis que acelerem a precipitação da falha ou simulem condições cuja ocorrência seja pouco provável, mas que ocorrem em campo. Assim, o equipamento de ensaio deve ser capaz de simular as principais variáveis de teste e de falha e ter condições de aplicá-las por algum tempo. Esse tempo de aplicação deve ser tal de modo a não introduzir novos modos de falha. Ou seja, o equipamento de teste deve poder forçar as variáveis definidas na etapa anterior, buscando acelerar ou precipitar o surgimento do problema. A Figura 31 mostra um fluxo de análise em que, após o planejamento dos testes, definem-se os limites de engenharia, sobrecarga, tempo de teste e forma da curva até a análise do resultado encontrado.

Figura 31 – Fluxo de análise para definição dos parâmetros de teste

Fonte: Figura elaborada pelo autor em 2017.

4.5 Relação dos modos de falhas críticos que geram falhas intermitentes

Uma vez definidos os sistemas críticos a serem analisados, definidos os parâmetros e equipamentos capazes de acelerar o surgimento das falhas, bem como os procedimentos de testes, tem-se a fase de conhecer em profundidade a falha ocorrida e sua influência no caráter intermitente da falha.

Esses fatores devem se aproximar das condições em campo e serem associados entre si, buscando a condição de baixa probabilidade de ocorrência em campo. Como conclusão dessa fase, tem-se a elaboração de um catálogo de falhas encontradas e que conduzam ao caráter intermitente do problema. É certo que falhas de outros tipos que não as intermitentes serão encontradas e, embora não contribuam para o caráter esporádico, devem compor igualmente as ações para aumento da robustez e da confiabilidade do processo ou projeto.

Uma vez encontrada a falha, é possível identificar no processo produtivo ou na técnica de projeto o que originou o problema e o que precisa ser modificado para corrigi-lo.

O plano de ação no projeto ou processo deve contemplar a ação corretiva, que, posteriormente, deve ser acompanhada em campo para verificação de sua eficácia. Muitas vezes a ação corretiva não fica comprovada, pois o indicador de campo, após a data da correção, permanece inalterado. Se isso ocorrer, é sinal de que a ação não foi eficaz, e o processo de análise precisa recomeçar novamente até a comprovação da eficácia. O indicador de campo deve voltar aos valores iniciais e, se possível, apresentar redução, pois podemos aproveitar a oportunidade de modificação do produto ou processo para implementar outras melhorias que, por si só, não se justificariam economicamente, mas associadas a outras falhas sim. A retroalimentação do processo é responsável pelo aumento contínuo da confiabilidade do conjunto final.

A Figura 32 mostra o fluxo de análise que contempla o acompanhamento da eficácia em campo.

Figura 32 – Fluxo de análise envolvendo a comprovação da eficácia

Fonte: Figura elaborada pelo autor em 2017.

Ao final da retroalimentação do sistema e do acompanhamento em campo, é possível elaborar uma instrução ao grupo de assistência técnica para ajudar a melhorar a capacitação de detecção de falhas de difícil diagnóstico.

4.6 Elaboração de diagrama de falhas esporádicas e instrução técnica para as assistências técnicas em campo

O conhecimento dos mecanismos de formação de falhas críticas pode ajudar a minimizar o tempo das análises feitas pela assistência técnica em campo ou mesmo ajudar a capacitação técnica para analisar essas falhas. Embora essas áreas possuam menos recursos em termos de equipamentos de análises, engenheiros e

laboratórios que possibilitem análises mais profundas, algumas análises visuais, inspeções adicionais ou mesmo com equipamentos mais simples, podem ser feitas para evitar a troca de peças sem critério ou e também reduzir o tempo de análise, quando o sistema ou produto ainda não tiver sido reenviado para a fábrica. A elaboração de um conjunto de instruções técnicas preliminares para as equipes de trabalho em campo também faz parte do escopo deste trabalho e vai certamente otimizar muitas horas e custos com reparos repetitivos. A Figura 33 mostra o fluxo de análises nessa fase, de modo a melhorar o diagnóstico em campo e a possibilitar a capacitação da área de assistência técnica.

Figura 33 – Fluxo de análise envolvendo a elaboração de uma instrução técnica para o campo

Fonte: Figura elaborada pelo autor em 2017.

4.7 Projeto do equipamento de teste

4.7.1 Elaboração da árvore de falhas

A técnica da árvore de falhas é um procedimento estruturado para a identificação de causas internas e externas que, caso ocorram isolada ou combinadamente, podem levar a um estado final de falha. A árvore de falhas, do inglês *Fault Tree Analysis* (FTA), define o comportamento de um sistema com relação a um evento ou a uma falha.

O procedimento de elaboração da árvore de falhas foi desenvolvido em 1962 por H. A. Watson, da *Bell Laboratories*, por solicitação da Força Aérea Norte-Americana. A Boeing foi a primeira empresa comercial a ver os benefícios do método e começou a usá-lo no processo de desenvolvimento de aviões. Nos anos 1970, o método foi usado na área de energia nuclear, e em 1980 seu uso começou a se expandir pelo mundo. Atualmente, o método é usado em diferentes áreas para mostrar as funcionalidades de um sistema e quantificar a sua confiabilidade. (BERTSCHE, 2008).

O método pode ser aplicado como ferramenta de diagnóstico e desenvolvimento e oferecer resultados quantitativos e qualitativos.

O método FTA é baseado na álgebra booleana e na teoria de probabilidades, de modo que, com um conjunto simples de regras e símbolos, é possível analisar sistemas e dependências complexas tais como *hardware*, *software* e aspectos humanos.

I - Modos de falhas

A norma DIN 25424-1 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 1981), do Instituto Alemão de Normalização, separa claramente as falhas em primárias, secundárias e de comando. A falha primária é associada à falha do componente; a falha secundária é a causada por condições operacionais incorretas; e a falha de comando é causada por um sistema auxiliar de um sistema principal, embora o componente esteja em perfeito funcionamento.

A Figura 34 mostra os principais tipos de falhas, classificadas em primária, secundária e de comando.

Figura 34 – Modos de falha do sistema de acordo com DIN 25424-1

Fonte: Figura elaborada pelo autor em 2017.

II - Simbologia

Com o objetivo de descrever sistematicamente um sistema na árvore de falha, diversos símbolos são usados para visualizar a rede que representa o sistema.

A lista a seguir é usada para visualizar essas redes e descreve os símbolos mais comuns, cuja visualização é feita na Figura 35.

- Entrada-padrão: esse símbolo representa a falha primária em um elemento funcional. Descreve a causa de uma falha.
- Entrada e saída de transferência: esse símbolo indica que a árvore de falha é interrompida ou continuada em outro lugar.
- Comentário: símbolos usados para a descrição de entradas e saídas entre símbolos da rede.
- E-Operações: o evento na saída só ocorre se todos os eventos na entrada ocorrerem.
- OU-operações: só ocorrerá um evento na entrada para ocorrer o evento na saída.

Figura 35 – Símbolos da Árvore de Falhas

Fonte: Figura elaborada pelo autor em 2017.

III - Análise qualitativa

A análise qualitativa lida com eventos indesejáveis que podem ocorrer em um sistema. Esses eventos, denominados *TOPO*, são os estados indesejáveis de um sistema que podem ser rastreados pelas falhas nos componentes.

A árvore de falhas é um modelo que ilustra de modo gráfico e propõe combinações lógicas de todos os estados indesejáveis do sistema.

Assim, os objetivos da análise da árvore de falha são:

- identificação sistemática de todas as falhas bem como de suas combinações e causas que podem levar ao evento indesejável, ou seja, ao evento principal;
- seleção de eventos críticos e/ou combinação de eventos;
- obtenção de critério de avaliação objetiva do conceito de um sistema;

- d) documentação clara e concisa do mecanismo de falha e suas relações funcionais.

IV - Análise quantitativa

A árvore de falhas descreve um sistema não só de modo qualitativo, mas também de modo quantitativo com relação ao comportamento das falhas. Os parâmetros de confiabilidade podem ser calculados com a ajuda de modelos booleanos, conforme mostra a Figura 36.

Assim, fatores que afetam o sistema de modo mais severo podem ser analisados, bem como modificações para melhorar o sistema podem ser sugeridas. Os símbolos da análise de falhas podem ser transformados em símbolos e regras simples de cálculo conforme mostra a Figura 36, a seguir:

Figura 36 – Resumo das conexões básicas

nome	sinônimo	Equação Booleana	Operador	Função			Símbolos	
				x_1	x_2	y	DIN 25424	
Negação	Não	$y = \bar{x}$	$\bar{x}$	0	-	1
				1	-	0	$\bar{y} = x$	$\bar{y} = x$
Disjunção	OU	$y = x_1 \vee x_2$ $= x_1 + x_2$	+	0	0	0
				0	1	1		
				1	0	1		
				1	1	1		
Conjunção	E	$y = x_1 \wedge x_2$ $= x_1 \cdot x_2$ $= x_1 x_2$ $= x_1 \& x_2$	&	0	0	0
				0	1	0		
				1	0	0		
				1	1	1		

Pode-se graficamente ilustrar o diagrama de Venn, que descreve as conexões básicas das operações booleanas. Assim, todas as possibilidades são mostradas em um retângulo, e as possibilidades de ocorrência, mostradas na área hachurada, conforme ilustra a Figura 37.

Figura 37 – Diagrama de Venn para as configurações básicas

Fonte: Figura elaborada pelo autor em 2017.

Axiomas da álgebra booleana:

- Regra cumulativa

$$x_1 \wedge x_2 = x_2 \wedge x_1$$

$$x_1 \vee x_2 = x_2 \vee x_1$$

- Regra associativa

$$x_1 \vee (x_2 \vee x_3) = (x_1 \vee x_2) \vee x_3$$

$$x_1 \wedge (x_2 \wedge x_3) = (x_1 \wedge x_2) \wedge x_3$$

- Regra distributiva

$$x_1 \vee (x_2 \wedge x_3) = (x_1 \vee x_2) \wedge (x_1 \vee x_3)$$

$$x_1 \wedge (x_2 \vee x_3) = (x_1 \wedge x_2) \vee (x_1 \wedge x_3)$$

V - Procedimento básico

Com o objetivo de determinar o comportamento da falha de um sistema e/ou de elementos do sistema (montagem e componentes) com suas conexões, o evento indesejável deve ser inicialmente definido (evento topo).

Em razão do processo dedutivo da árvore de falha, no próximo passo, as possíveis falhas esperadas são analisadas. Esse passo é repetido até o nível mais baixo do sistema. O nível mais baixo corresponde aos possíveis modos de falhas, assim determinando o comportamento completo de todo o sistema. Esse processo é indicado na Figura 38.

Figura 38 – Procedimento básico para estruturar uma árvore de falha, conforme a norma DIN 25424-1

Fonte: DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (1981).

4.7.2 Elaboração da árvore de falhas para eventos esporádicos

A seguir é apresentada a árvore de falhas para o caso em estudo de falhas intermitentes. Conhecidos os principais modos de falha, pode-se elaborar um conjunto de árvores de falhas que possibilitam a criação de um sistema de diagnóstico a ser aplicado pelas equipes técnicas, minimizando a necessidade de análises específicas em laboratórios do fabricante.

Na Figura 39, é apresentada a árvore de falhas para o evento topo “Falhas esporádicas e de difícil diagnóstico”. Verifica-se que essa é constituída unicamente de um portal composto por defeitos no sistema de ignição (falha primária) e por condições operacionais desfavoráveis que induzem à precipitação da falha no sistema, as quais não podem ser controladas pelo usuário, mas podem ser consideradas no projeto do sistema de ignição. As árvores de falha para os eventos defeitos na bobina, velas e cabos são apresentadas nas Figuras 40, 41, 42, respectivamente.

Figura 39 – Falha esporádica e de difícil diagnóstico

Fonte: Figura elaborada pelo autor em 2017.

Figura 40 – Defeitos na bobina

Fonte: Figura elaborada pelo autor em 2017.

Figura 41 – Falha nos cabos de ignição

Fonte: Figura elaborada pelo autor em 2017.

Figura 42 – Falhas nas velas de ignição

Fonte: Figura elaborada pelo autor em 2017.

Dessa forma, uma vez concluída a árvore de falhas, pode-se ter o comportamento probabilístico de toda a cadeia de eventos e do evento final indesejado. Essa análise não será realizada em razão da escassez de dados de campo que possibilitaria a estimativa das chances de ocorrência dos eventos básicos. A árvore de falhas contribui ainda mais para, juntamente com os ensaios acelerados, conhecer em profundidade o fenômeno físico em estudo e possibilita uma última contribuição ao estudo do fenômeno, que é a elaboração de uma lista de verificação, ou *checklist*, para as ações realizadas nas concessionárias.

4.7.3 Descrição do equipamento de teste

I Proposta do projeto de equipamentos e dos testes acelerados

Uma vez conhecidos os componentes críticos, os modos de falha e as características principais envolvidas, propõe-se um conjunto de bancadas de testes para simular e pesquisar possíveis modos de falhas que se apresentam de modo intermitente e são de difícil diagnóstico. Nessa etapa, além do projeto dos equipamentos e ensaios, define-se as características a serem aceleradas e os métodos de ensaio, a fim de propiciar um programa de evolução contínua da confiabilidade, facilitando o gerenciamento da sua evolução via ações de melhoria.

Para cada um dos ensaios de bancada, vai-se determinar as principais falhas esporádicas e quais os pontos dos processos têm potenciais de melhoria e também encaminhar as correções.

II HALT x ALT ou HALT + ALT

Silverman (2015) mostra que os métodos HALT e *Accelerated Life Test* (ALT) são muito usados para a metodologia de testes, mas empregam diferentes conceitos para alcançar resultados e objetivos.

HALT é o processo de aumento da confiabilidade de um produto por meio do aumento gradual da solicitação aplicada até surgir a falha final deste. É muito apropriado para encontrar vulnerabilidades de projeto e pode ser usado tanto em sistemas quanto em componentes individualizados.

ALT é o processo para determinar a confiabilidade de um produto em um curto período de tempo por meio da aceleração das solicitações; também é um bom método para caracterizar componentes.

HALT é uma técnica de ensaio de confiabilidade para detectar o mecanismo predominante de falhas. Quando essa for a situação, devemos ser capazes de prever ou caracterizar a falha final. Normalmente a técnica é empregada nas fases de desenvolvimento do produto pelas áreas de engenharia de projeto.

Muitas vezes, a melhor técnica a ser usada é um teste ALT menos severo. Essa técnica é mais branda com relação aos limites superiores da peça e visa a conhecer modos de falhas mais associados ao ambiente ou à situação operacional.

Em muitos casos, o mais apropriado é o uso de ambos os testes, pois cada técnica provoca modos diferentes de falhas. O uso adequado de ambas as técnicas oferece uma visão mais ampla da confiabilidade do produto. O teste HALT é mais usado para verificar a durabilidade projeto, enquanto o teste ALT é usado para identificar os modos predominantes de falha. Lembrando que o nosso escopo é precipitar os principais modos de falha e que a durabilidade da peça já é conhecida.

O método HALT inicia-se a um baixo nível de solicitação e gradativamente o valor é aumentado e o produto tem sua operacionalidade avaliada em cada situação carga. Isso posto, avalia-se a falha, efetuam-se as melhorias, e assim recomeça-se o ciclo. Normalmente são utilizados equipamentos de aumento de temperatura, vibração, espectros de frequência e alterações rápidas da condição de funcionamento para simulação das solicitações.

No método ALT, ao contrário, atinge-se um nível de solicitação em que é sabido que o produto não apresentara falha imediata, mas tem a vida operacional reduzida. Caracteriza-se como o processo de determinação de confiabilidade a curto período de tempo. O foco é o produto isolado. Quando o interesse do estudo é, mais que medir a confiabilidade, transformar o produto no mais confiável possível, o método ALT se mostra muito vantajoso.

A combinação de ALT e HALT é interessante, pois muitas vezes testa-se o conjunto via HALT e o subconjunto via ALT, ou vice-versa.

Um dos fatores-chave nos procedimentos é a determinação do fator de aceleração, que, na maioria das vezes, é de difícil obtenção. Nesses casos, nos resta apenas acelerar o ciclo de carga. Por exemplo, aumentar a velocidade de uma bomba ou o número de vezes que um botão é apertado.

Assim, o HALT é muito indicado quando a falha dominante não é um desgaste e o objetivo é determinar, a curto prazo, a vulnerabilidade e a fraqueza do produto.

4.7.4 Execução e análises do ensaio

Nesta fase, são previstas a montagem dos equipamentos, a calibração, a condução dos testes de funcionamento, a elaboração dos procedimentos de manuseio e da certificação e, o mais importante, a definição da metodologia dos ensaios. A princípio serão testados: as velas de ignição, os cabos de vela e as bobinas de ignição. Cada um desses testes deverá ter metodologia desenvolvida e certificada. Trata-se de uma das fases mais importantes do projeto, pois envolve a definição de procedimento e a avaliação da representatividade do teste com relação à situação real de funcionamento.

4.7.5 Desenvolvimento do programa de monitoramento do desempenho

Nesta etapa, prevê-se, o monitoramento não só operacional dos diversos equipamentos, mas também de cálculo dos índices de desempenho determinados na etapa anterior, a fim de garantir preventivamente a robustez do sistema de combustão e gerar os dados para a melhoria e o crescimento da confiabilidade. Ou seja, os processos produtivos e os produtos devem ser retroalimentados, e as ações corretivas, geradas.

4.7.6 Taxa de falhas para sistemas elétricos de ignição

As falhas elétricas prematuras são dominadas por defeitos de manufatura. Essas falhas são um verdadeiro transtorno em termos de confiabilidade, pois o período de garantia é de um a três anos, e a tendência é que esse período aumente cada vez mais.

Os fornecedores de conjuntos elétricos muitas vezes executam o que se chama de teste *burn-in*, ou seja, os equipamentos são mantidos em funcionamento por certo tempo para evitar sua falha prematura nas mãos dos consumidores. Na verdade, esse teste se mostra inviável, pois, em condições normais de teste, poderia durar de 1 a 15

anos. A ideia é acelerar o tempo para a falha surgir. Sob condições aceleradas, pode-se precipitar o aparecimento da falha em dias, horas ou minutos, ou seja, um teste *burn-in* acelerado.

4.7.7 Acelerar a degradação ou o surgimento das falhas

A degradação de materiais ou de componentes pode ser acelerada por meio da elevação do estresse mecânico, elétrico e eletromecânico, por meio da temperatura ou de outros parâmetros. O objetivo do teste acelerado é diminuir o tempo da falha sem alterar a física do fenômeno, de modo a conhecer melhor a dinâmica da tensão, da temperatura e dos mecanismos de falha e assim aprimorar a seleção de materiais, os processos produtivos e, principalmente, os controles de processos, reduzindo assim os defeitos.

4.7.8 Teste de rampa até a falha

A aplicação de carga constante para se aguardar a falha consome muito tempo e normalmente leva à seguinte pergunta: é possível um teste rápido que monitore a confiabilidade via amostragem? Geralmente a resposta é sim, e se chama teste de rampa até a falha. Embora o teste seja destrutivo, geralmente é rápido e permite agrupar e formar um banco de dados com uma base estatística.

4.7.9 Descrição do equipamento de teste

O equipamento de teste proposto e construído constitui-se de duas bancadas distintas, sendo uma para teste de bobinas de ignição 4x1, 4x2 ou tipo *pencil coil*, conforme mostra a Figura 43. A outra bancada testa o conjunto completo bobina, cabo de ignição, velas e, principalmente, as interfaces de contato eletromecânico, conforme mostra a Figura 44.

Figura 43 – Bancada de teste acelerado para bobinas de ignição

Fonte: Autor (2017).

Figura 44 – Bancada para teste de velas de ignição e cabos de velas

Fonte: Autor (2017).

A bancada de teste de bobinas referida na Figura 43 trabalha alimentada por uma fonte que fornece corrente contínua de 14V e de até 70 amperes.

O fornecimento da tensão e da corrente ao induzido primário é chaveado pelo chamado módulo de controle de potência, ou apenas módulo de potência, conforme mostra a Figura 45. Constitui-se de um circuito integrado que chaveia a corrente no primário emitindo um pulso de tempo definido que possibilita a energização do primário e o corte dessa corrente, criando uma tensão induzida no secundário.

Figura 45 – Esquema da relação entre corrente no primário, tensão no secundário e pulso do módulo de potência

Fonte: Autor (2017).

O pulso do módulo de potência é emitido por um equipamento de geração de sinais Tektronix AFG3021B simulando uma onda quadrada com duração de 3,2 m/s a 3,5 m/s, com frequência de 50 Hz e tensão de 4V, cujas especificações seguem :

- Gerador de Função Arbitrária
- 50 MHz;
- Um canal de saída;
- Display Monocromático de 5,6 polegadas que exhibe a forma de onda gerada e as informações do sinal;

- Gera formas de onda senoidais (1uHz a 25 MHz), quadrada (1u Hz a 12,5 MHz), pulso (1m Hz a 12,5 MHz), rampa, (seno x)/x, gaussiana, lorentz, exponencial de subida e descida, ruído e nível contínuo (1 mHz a 250 kHz);
- Registro de 128.00 pontos e amostragem e 250 milhões de amostras por segundo;
- Resolução vertical de 14bits;
- Memória não volátil para 4 formas de onda;
- Amplitude de saída em 50 ohms de 10 mV a 10 V de pico a pico;
- Modos de operação: contínuo, modulado, varredura e rajadas;
- Modulação Interna e Externa;
- Deve permitir *sweep* linear e logaritmo das formas de onda;
- Interface USB no painel frontal para armazenamento de fomas de onda e configurações;
- Programa para criação e edição de forma de onda;
- Dimensões: 329,6 mm (largura) x 156,3 mm (altura) x 168 mm (profundidade);
- Alimentação 110/220 V 60 Hz;

A Figura 46 mostra o esquema de geração de sinais e da tensão no secundário; e a Figura 47 mostra a geração do pulso de onda quadrada.

Um osciloscópio Tektronix faz a leitura de quatro variáveis, uma em cada canal.

Especificações das principais funções do Osciloscópio:

- Modelos com 4 canais analógicos
- Modelos 1 GHz, 500 MHz, 350 MHz, 200 MHz, 100 MHz de largura de banda
- A largura de banda é atualizável (até 1 GHz)
- Taxa de amostragem de até 5 GS / s
- Comprimento de registro de 10 M em todos os canais
- Taxa máxima de captação da forma de onda > 280.000 WFM / s
- Sondas de tensão passiva padrão com 3,9 pF de carga capacitiva e 1 GHz, 500MHz, 250 MHz de largura de onda analógica

- Analisador de Espectro
- Faixa de frequência
- Padrão : 9 kHz - largura de banda do osciloscópio
- Opcional: 9 kHz - 3 GHz
- Largura de banda de captação ultra larga até 3 GHz
- Gerador de função arbitrária (Opcional)
- 13 tipos de forma de onda pré-definidos
- Geração de forma de onda 50 MHz
- Comprimento de registro do gerador arbitrário 128 k
- Taxa de amostragem do gerador arbitrário 250 MS/s
- Analisador Lógico (Opcional)
- 16 canais digitais
- 10 M comprimento de registro em todos os canais
- Resolução de temporização 121,2 ps
- Analisador de Protocolo (Opcional)
- Voltímetro digital
- Medições de tensão de 4 dígitos AC RMS, DC, e AC + DC RMS
- Medições de frequência de 5 dígitos
- Monitor com tela colorida de 9 polegadas (229 mm) WVGA.
- Peso de 9,2 libras (4,2 kg)

O canal 1 lê a tensão no induzido secundário; o canal 2 lê a corrente no secundário; o canal 3 lê a corrente no primário; e o canal 4 lê a tensão do pulso no módulo de potência. A Figura 46 mostra o esquema elétrico da geração de sinais de teste da bobina. As Figuras 47 e 48 mostram o osciloscópio e os quatro canais de monitoramento.

A medição da corrente e da tensão no secundário é feita com uma ponta de prova de alta potência e uma carga simulada capacitiva mais uma resistiva de acordo com o Quadro 11 e a especificação de teste da bobina segundo o fabricante, conforme mostra a Figura 49. A análise da falha é feita por meio da análise da corrente no induzido primário e da tensão no induzido secundário, comparando-as com a especificação de engenharia do produto. A Figura 50 mostra o resultado de um teste de avaliação de uma peça em boas condições e em conformidade com as especificações de projeto, em comparação com a Figura 51 que mostra o resultado

de um teste de avaliação de uma peça em más condições e em não conformidade com as especificações. Pode-se ver que que nas torres AD a tensão induzida no induzido secundário está fora da especificação

Figura 46 – Esquema elétrico da geração de sinais e de teste de bobina

Fonte: Figura elaborada pelo autor em 2017.

Figura 47 – Gerador de funções e a função pulso de onda quadrada

Fonte: Autor (2017).

Figura 48 – Osciloscópio e as quatro saídas dos parâmetros de teste

Fonte: Autor (2017).

Figura 49 – Esquema da medição da tensão no secundário

Exemplo de ligação em um trafo 2x2 (trafo de centelha dupla – positiva e negativa). Todos os componentes eletrônicos devem estar afastados ao menos 40 cm de qualquer superfície metálica

Fonte: Figura elaborada pelo autor em 2017.

No quadro 4 pode-se ver o esquema de Medição de tensão no induzido secundário

Quadro 4 – Medição de tensão no secundário

Medição de tensão no secundário			
Corpo de Prova/Peça	Medição	C	R
Bobina compacta do tipo Pencil Coil ou Top Plug Coil (sem cabo de vela)	1	25 pF	∞
	2	25 pF	1 M Ω
	3	25 pF	100 k Ω
Trafo de ignição convencional com cabo de vela	1	50 pF	∞
	2	50 pF	1 M Ω
	3	50 pF	100 k Ω
(Medição no lado negativo; positivo)			

Fonte: Quadro elaborado pelo autor em 2017.

Figura 50 – Teste de avaliação de uma peça em boas condições e em conformidade com as especificações

Fonte: Figura elaborada pelo autor em 2017.

Figura 51 – Teste de avaliação de uma peça em más condições e em não conformidade com as especificações

Fonte: Figura elaborada pelo autor em 2017.

A segunda bancada é formada por um conjunto de cabos, velas e uma bobina, acionados por uma fonte que recebe 220V alternados e libera 14V com corrente de até 70 amperes, conforme mostra a Figura 52. Aqui o intento é a análise de todo o conjunto de ignição. As velas de ignição são montadas em um cabeçote de alumínio com ar sob pressão oriundo de um compressor, com capacidade de até 20 bar de pressão, conforme mostra a Figura 53. Embora a pressão do compressor possa chegar a 20 bar, utiliza-se no máximo 8 bar. O cabeçote possui visores de policarbonato que permitem visualizar o centelhamento da vela e analisar a qualidade e a continuidade da centelha, conforme pode ser visto nas Figuras 54, 55 e 56. A pressão no cabeçote atinge no máximo 8 bar, pois, diferentemente do motor, aqui o dielétrico é ar, mais difícil de romper na formação da centelha do que a mistura ar-

combustível. A pressão é regulada por uma válvula reguladora de pressão. O sistema possui a regulação da duração do pulso (*dwell*) variando de 0 a 10 m/s. O nominal é de 3,2 m/s a 3,5 m/s e aqui há outro fator de aceleração. Ao se utilizar a pressão máxima do compressor de 20 bar, o dielétrico não se rompe mais no ar, e a centelha não ocorre. Em condições ideais, a energia requerida para queimar uma mistura homogênea e estequiométrica é de 2 mJ. Sob condições de mistura rica ou pobre, são necessários 3 mJ. O ar puro com pressão acima de 8 bar extingue a centelha e aumenta a demanda de todo o sistema elétrico ao máximo. A bobina dessa bancada pode ser a mesma testada na banca anterior ou outra bobina igualmente em análise. O objetivo dessa bancada é o teste do conjunto completo, incluindo interfaces eletromecânicas como conectores, crimpagens, montagens, sempre relativas ao conjunto. Essa bancada representa uma das inovações do trabalho, pois possibilita conhecer, estudar e corrigir falhas nos processos dos conjuntos completos e montados com relação às interfaces, algo que os fabricantes dos componentes isolados não fazem. Os fabricantes de componentes testam suas peças individualmente e possuem um programa de melhoria para cada peça, mas não para o conjunto. Problemas relacionados às interfaces de contato e à montagem são oriundos dos processos produtivos de fabricação, e não são aperfeiçoados apenas com o controle isolado dos componentes. Boa parte dos problemas em campo é oriunda da interface dos componentes.

Figura 52 – Bancada para teste de velas de ignição e cabos de velas

Fonte: Autor (2017).

Figura 53 – Compressor elétrico de 20 bar

Fonte: Autor (2017).

Figura 54 – Bancada de teste acelerado para velas e cabos

Fonte: Autor (2017).

Figura 55 – Detalhe do cabeçote para teste de velas e cabos de velas

Fonte: Autor (2017).

Figura 56 – Velas de ignição em funcionamento observadas pela parte inferior do equipamento

Fonte: Autor (2017).

4.7.10 Certificação e calibração do equipamento de ensaio

Há algumas décadas a expectativa de centelhamento era de cerca de 15 a 25 vezes por segundo. Atualmente, a expectativa é de até 100 vezes por segundo em função do aumento da rotação dos motores. As temperaturas de pico subiram de 600 °C para 900 °C, e a tensão de ignição foi de 10.000V para 30.000 V. No caso de testes acelerados, pode-se chegar a 45.000V.

Um conjunto de peças foi produzido com a função de ser um conjunto padrão. Cada componente foi rigorosamente controlado quanto a suas especificações com o objetivo de se obter um conjunto padrão como um gabarito.

Este conjunto, antes de qualquer medição, é montado e as especificações do conjunto são confirmadas.

4.7.11 Os parâmetros de aceleração do teste (HALT e/ou ALT)

Os Quadros 5, 6, 7 e 8 mostram os principais parâmetros de aceleração dos testes. Esses parâmetros foram desenvolvidos e certificados com os fornecedores dos componentes de forma que não sejam considerados abusivos e que os valores aplicados sejam aceitáveis de modo a não introduzir falhas adicionais por sobrecarga.

Quadro 5 – Tempo de carregamento

	Nominal	Sobrecarga
<i>Dwell</i> [ms]	2,2	4,8
Corrente [A] RMS	8,5	22,0

Fonte: Quadro elaborado pelo autor em 2017.

Obs.: Alimentação da bobina = 14V e a corrente do primário é a função do *dwell*.

Quadro 6 – Temperatura

	Nominal	Sobrecarga
Temperatura interna [°C]	+130,0	+160,0

Fonte: Quadro elaborado pelo autor em 2017.

Quadro 7 – Frequência de acionamento

	Nominal	Sobrecarga
Freq. acionamento [Hz]	50	100
Rotação do motor [rpm]	6.000	12.000

Fonte: Quadro elaborado pelo autor em 2017.

Quadro 8 – Pressão de carregamento

	Nominal	Sobrecarga	Sobrecarga com extinção do dielétrico
Pressão [bar]	Abaixo de 8	8	20

Fonte: Quadro elaborado pelo autor em 2017.

Para um motor de quatro cilindros, a rotação do motor é equivalente à frequência de pulsos em cada bobina.

Quadro 9 – Alta tensão

	Nominal	Sobrecarga
Alta Tensão de saída [KV]	35	45

Fonte: Quadro elaborado pelo autor em 2017.

➤ Teste de banho de esferas

Para severizar o teste, deve-se mergulhar a bobina aterrada na fonte de alimentação em um banho de esferas de 3 mm de diâmetro. Assim, a bobina estará envolta pelo fio-terra, enquanto a alta tensão gerada internamente tende a escapar, forçando a ruptura do isolamento. A saída de alta tensão deve ser tampada com uma vela falsa e isolante ou ligada na própria vela de ignição da bancada. As Figuras 57 e 58 mostram o esquema do ensaio.

Figura 57 – Recipiente de aço inox e esferas de inox para forçar a ruptura do isolamento

Fonte: Autor (2017).

Figura 58 – Cuba com esferas de inox para teste de velas de ignição e cabos velas

Fonte: Autor (2017).

O teste apresentado nas Figuras 57 e 58 têm como objetivo verificar o isolamento, a ruptura ou os traços de condutividade na superfície de bobinas. Nesse caso podemos ter um desvio das especificações de engenharia para forçar o teste a 37kV em vez de a 35kV. A frequência é de 50 Hz, e o teste pode durar até 300 horas. Após 300 horas, a bobina é analisada visualmente para verificação dos traços de condutibilidade na superfície. Além disso, em operação entre 35kV e 37KV, é possível escutar os estalos da ruptura dielétrica entre as esferas.

O Quadro 10 mostra as variáveis aceleráveis e as respectivas falhas que precipitam o surgimento do defeito.

Quadro 10 – Variáveis aceleráveis *versus* falhas que precipitam o surgimento

Variáveis aceleradas	Falhas									
	Fios internos danificados na bobina	Falhas dos terminais internos de contato na bobina	Falhas de soldagem interna na bobina	Fios residuais dentro da bobina	Falhas na aplicação de resina na bobina	Fios cruzados internamente a bobina	Oxidação do terminal	Falhas de crimpagens internas da bobina	Falha de compactação isolante da vela	Excesso de fios soltos no processo
Bancada 1										
Dwell	x	x	x	x	x	x	Bancada 2	x	Bancada 2	x
Temperatura	x				x	x	Bancada 2		Bancada 2	
Frequência							Bancada 2		Bancada 2	
Tensão	x	x	x	x	x	x	Bancada 2	x	Bancada 2	x

Variáveis aceleradas	Falhas									
	Fios internos danificados na bobina	Falhas nos terminais internos de contato bobina	Falhas de soldagem interna da bobina	Fios residuais na bobina	Falhas na aplicação de resina na bobina	Interferência eletromagnética nos demais dispositivos eletrônicos	Falhas de injeção de plástico do carretel	Trincas cerâmicas das velas	Falhas em borrachas e silicone das velas e cabos de velas	Falhas nos eletrodos metálicos das velas
Bancada 1										
Dwell	x	x	x	x	x	Bancada 2	x	Bancada 2	Bancada 2	Bancada 2
Temperatura					x					

	Falhas				
	Interferência eletromagnética nos demais dispositivos eletrônicos do veículo	Trincas na cerâmica isoladora das velas	Interfaces de montagem entre velas, cabos e bobinas	Falhas em borrachas e silicone da velas e cabos de velas	Falhas nos eletrodos metálicos das velas
Variáveis aceleradas Bancada 2					
<i>Dwell</i>	x	x	x	x	x
Pressão	x	x	x	x	x
Frequência					x
Tensão	x	x	x	x	x

Fonte: Quadro elaborado pelo autor em 2017.

5 ESTUDO DE CASO

Este capítulo aplica a metodologia de abordagem do tema falha intermitente. Ele definirá os passos de análise e preparará os próximos tópicos, em que um caso real será analisado. Ao final, será possível identificar dezenas de falhas que originaram outras dezenas de ações de manufatura e projeto, a fim de criar robustez às falhas esporádicas e crescimento da confiabilidade em campo.

5.1 Etapa 1: Análise do risco das falhas visando à hierarquização

O sistema de ignição, dentro do escopo deste trabalho, é constituído pela bobina, vela, cabos de conexão e todas as suas interfaces. O teste a ser proposto bem como o equipamento construído deverão ter a capacidade de identificar as falhas esporádicas de difícil diagnóstico que ocorrem no conjunto elétrico do motor. Para isso, ao longo de 10 anos, foi feito um levantamento extenso das ocorrências em campo nesse conjunto e seus componentes.

5.1.1 Falhas no sistema de ignição

O teste a ser desenvolvido deverá acelerar o aparecimento dessas falhas sem, no entanto, introduzir novos modos de falhas. A seguir, serão apresentadas as principais falhas estudadas e identificadas nesse período, baseadas em um sistema computacional de abrangência mundial e corporativa, de controle e gerenciamento de falhas em campo.

5.1.2 Falhas nas bobinas de ignição

A bobina de ignição é muito sensível a falhas nos processos de fabricação. Aspectos ligados à crimpagem, às soldas e à injeção de plásticos determinam a robustez do seu funcionamento. Esse histórico foi objeto de anos de pesquisa em campo. O trabalho se dedicará a desenvolver um teste para acelerar o surgimento de tais falhas, com a posterior retroalimentação do processo, diminuindo o tempo e

aumentado a amplitude da análise. A seguir são descritos os principais modos de falha, que serão detectados no ensaio a ser desenvolvido.

- Falha interna no fio do carretel primário. Esse tipo de falha não é facilmente identificado sob temperatura normal de funcionamento, somente a quente. Sem o devido aquecimento, o teste dependeria da análise em veículo – teste demorado e dependente da alta temperatura do motor. No processo seriado de fabricação, a peça é submetida ao teste funcional de corrente e tensão a temperatura ambiente e apresentou valores funcionais de acordo com as especificações. Ao ser realizado o ensaio funcional com a peça armazenada em estufa por 1 hora em temperatura elevada (100 °C) e posterior teste elétrico, a peça apresentou a falha na ignição. Ao ser realizada a análise do enrolamento primário, foi verificado o rompimento parcial do fio do carretel primário próximo a seus terminais de alojamento. A Figura 59 mostra o experimento em que a peça é aquecida, e a falha, evidenciada. Sem o aquecimento da peça, o teste seria feito em veículo, o que tomaria muito tempo e dependeria da condição do teste, que necessariamente deveria levar o motor a uma situação de alta temperatura. A identificação da falha seria, nessa situação, mais difícil e demorada.

Figura 19 – Experimento em que a peça é aquecida, a falha, evidenciada a 100 °C

Fonte: Autor (2017).

Conforme mostra a Figura 60, os terminais de contato se mostram em boas condições, no entanto, é possível ver na peça um fio interno rompido causando a falha na ignição. A Figura 61 mostra raios X da peça evidenciando o fio cortado causador de falha intermitente.

Figura 60 – Raios X do terminal de contato em perfeita condição

Fonte: Autor (2017).

Figura 61 – Fio interno torcido, cuja falha só se manifesta em altas temperaturas

Fonte: Autor (2017).

5.1.3 Falha na ignição por deficiência de montagem

Uma falha na ignição pode ocorrer por causa da deficiência de montagem e em função da variação de condições de montagem do transformador no bloco do motor. A Figura 62 mostra que o terminal fêmea pode sofrer deformação e redução da pressão de contato. O terminal fêmea será modificado, garantindo melhor pressão no

contato elétrico, como será mostrado no próximo capítulo, no estudo de caso número 2.

Figura 62 – Mau contato do terminal da bobina e do estágio de potência

Fonte: Autor (2017).

5.1.4 Falhas por trincas oriundas de quedas ou batidas

Em consequência de quedas ou batidas, em teste no osciloscópio, pode-se verificar a falha na formação de corrente elétrica na bobina secundária. Durante o transporte ou a montagem, podem ocorrer quedas ou batidas que posteriormente afetam o desempenho da bobina. As Figuras 63 e 64 mostram peças com defeito e

sua consequência sobre a tensão disponível no terminal secundário. Os processos produtivos devem prever e considerar essas quedas ou impactos. O processo de análise é feito por meio da análise da peça em veículo e em equipamento de teste de série do fornecedor.

Figura 63 – Peça danificada por batida, queda ou choque, cujo desempenho será afetado

Fonte: Autor (2017).

Figura 64 – Osciloscópio mostra que impacto ou choque pode levar à alteração da disponibilidade de tensão no terminal secundário

Fonte: Autor (2017).

5.1.5 Falha ou deficiência no processo de bobinamento

Falhas ou deficiências no processo de enrolamento do fio, quando ocorrem, não permitem a formação de tensão em intensidade adequada na bobina secundária. O processo de enrolamento é muito importante para a robustez da bobina, pois, se o processo não for adequado, pode causar e originar falhas intermitentes, e, por isso, requer atenção para ferramentas e equipamentos produtivos. Na Figura 65, observa-

se uma falha no enrolamento do fio capaz de impedir o surgimento de tensão no secundário e a consequente falta de oferta de tensão para a ignição correta do motor. Ainda na Figura 65, observa-se a inexistência de tensão elétrica no terminal secundário. Esse tipo de falha, caracterizada por curto-circuito interno entre espiras ou entre espiras e carcaça, é diagnosticada por análise em veículo e em bancada de fornecedores para detectar o modo de falha, é igualmente difícil de diagnosticar e demanda enorme tempo de análise. Figura 2 mostra o dano no transistor do módulo de potência e a consequente alteração da tensão da bobina, a figura 67 mostra a bolha de encapsulamento levando à geração de calor na região. Na figura 3 pode-se observar os valores de temperatura que podem ser atingidos na região da bolha

Figura 65 – Falha no processo de enrolamento. Comparativo de uma bobina com disponibilidade correta de tensão *versus* bobina com falha no enrolamento e sem tensão no secundário em razão de fios residuais em curto-circuito

Fonte: Autor (2017).

5.1.6 Falha por sobrecarga externa

A sobrecarga elétrica de origem externa, como curto-circuito na bateria, falha no regulador de tensão, recarga irregular de bateria, pode danificar o transistor do módulo de potência, ocasionando danos ao módulo (vista em raios X). A Figura 66 mostra que, nesse caso, houve perda de potência do veículo em consequência da baixa disponibilidade de tensão no secundário.

Figura 66 – Dano no transistor do módulo de potência e a consequente alteração da tensão da bobina

Fonte: Autor (2017).

5.1.7 Falha por falta da aplicação de resina

Os induzidos primário e secundário são recobertos por uma resina epóxi com função isoladora, cujo processo é chamado de encapsulamento. A resina é aplicada e requer criterioso processo de aplicação e cura. A formação de bolhas causa importante falha no componente, em especial com relação à perda de potência do veículo em funcionamento e à alta potência do motor. As figuras 67 mostra uma bolha devido á falha de encapsulamento levando à geração de calor na região. Esta falha pode ser identificada com o uso de um termo visor que possibilita a avaliação dos valores de temperatura que podem ser atingidos na região da bolha como pode ser visto na figura 68.

Figura 67 – Bolha de encapsulamento levando à geração de calor na região

Fonte: Autor (2017).

Figura 68 – Avaliação dos valores de temperatura que podem ser atingidos na região da bolha

Fonte: Autor (2017).

5.1.8 Falha por perda de potência

A falha por fios cruzados durante o bobinamento causa curto-circuito interno na bobina. O carretel plástico danificado da bobina forma uma rebarba que prende o fio e é um tipo de falha a ser evitado, pois causa uma das falhas de caráter esporádico e de difícil diagnóstico. Conforme mencionado anteriormente, os processos de enrolamento e bobinamento são da maior importância para a robustez da bobina. Qualquer pequena falha no bobinamento ou desvio da trajetória do fio pode levar a falhas na ignição e na disponibilidade de tensão no secundário. A Figura 69 mostra um fio do bobinamento preso a uma rebarba do carretel criando enorme potencial de falha, em especial em alta potência do motor

Figura 69 – Desvio da trajetória do bobinamento com consequências na ignição

Fonte: Autor (2017).

5.1.9 Falha por oxidação

A oxidação dos terminais causa aumento da resistência de contato e a consequente falta de potência na bobina. As Figuras 70 e 71 mostram, respectivamente, o fenômeno da oxidação e a perda causada na disponibilidade de tensão no secundário, e é fenômeno típico de ocorrência nas interfaces dos componentes do sistema.

Figura 70 – Oxidação nos terminais causando perda de potência

Fonte: Autor (2017).

Figura 71 – Impacto da oxidação: osciloscópio mostra perda de tensão no secundário

Fonte: Autor (2017).

5.1.10 Falha no processo de crimpagem

O processo de crimpagem de cabos e fios é importante não só nas bobinas, mas também nos cabos de ignição. A deficiência mecânica da crimpagem causa irregularidade na condução elétrica. A Figura 72 mostra a foto em raios X evidenciando crimpagem deficiente. Os processos produtivos devem ser suficientemente robustos para garantir a continuidade elétrica e devem ser acompanhados de testes que garantam o processo.

Figura 72 – Raios X mostrando a crimpagem incorreta do cabo

Fonte: Autor (2017).

5.1.11 Falhas no processo por excesso de fios residuais

A existência de fios residuais nos processos produtivos pode resultar em falhas no funcionamento, pois, ao se misturarem com os fios do bobinamento, podem causar curtos de atuação intermitente. A Figura 73, uma foto em raios X, mostra a existência de fios misturados e bobinados erroneamente junto do processo normal de enrolamento.

Figura 73 – Falhas por excesso e fios residuais

Fonte: Autor (2017).

5.1.12 Falha no processo de solda

Igualmente os processos de solda também são importantes para a continuidade dos sistemas elétricos. Como não podem ser vistos a frio e a falha pode ocorrer sob diversas temperaturas ou tensões, são um dos mais difíceis de diagnosticar. A falha pode se manifestar apenas em alta temperatura ou apenas em altas tensões, sendo de caráter totalmente intermitente. A Figura 74 mostra uma falha em corte de solda no transistor de alta potência.

Figura 74 – Raios X mostram a falha encontrada na solda do transistor do módulo de potência. Macrografia mostra a comparação entre a solda correta e a solda incompleta

Fonte: Autor (2017).

5.1.13 Falha por contaminação do enrolamento secundário

Este tipo de falha, conforme mostram as Figuras 75, 76, 77 é denominada de falha em consequência da baixa disponibilidade de tensão oriunda da contaminação no enrolamento secundário. Muitas vezes, por causa do término do fio que é bobinado nos carretéis secundários do transformador de ignição ou por causa da quebra deste durante a realização da operação, pequenos contaminantes oriundos da quebra do fio são gerados. Com o tempo e o uso, a camada isolante do verniz não resiste à alta tensão aplicada ocasionando a queima do componente e, conseqüentemente, do produto.

Figura 75 – Macrografia mostra o curto-circuito do carretel secundário, gerando redução da tensão de oferta

Fonte: Autor (2017).

Figura 76 – Macrografia mostra o curto-circuito do carretel secundário, gerando redução da tensão de oferta

Fonte: Autor (2017).

Figura 77 – Raios X mostram o curto-circuito do carretel secundário, gerando redução da tensão disponível no secundário por causa de fio solto no processo

Fonte: Autor (2017).

5.1.14 Falhas no processo por formação de bolhas na peça injetada

Bolhas no plástico injetado do carretel secundário podem causar falhas pela fuga de corrente interna na bobina, ocasionando baixa disponibilidade de tensão no secundário. A Figura 78 mostra as porosidades que levam à baixa disponibilidade de tensão, responsável pela perda de rendimento do veículo. A fuga de corrente gerou oscilações de tensão e corrente do primário e geraram interferência eletromagnética que causam o distúrbio percebido no painel de instrumentos do veículo. A Figura 79 mostra correntes parasitas oriundas de interferência magnética.

Figura 78 – Porosidades nos carretéis plásticos por falhas na injeção

Fonte: Autor (2017).

Figura 79 – Fuga de corrente gera oscilações de tensão e corrente no primário e interferência eletromagnética que causam os distúrbios

Fonte: Autor (2017).

5.1.15 Falhas por deficiência de contato elétrico

Deficiência de contato elétrico por problema dimensional, montagem ou mesmo projeto pode causar a falta de disponibilidade de tensão esporádica, igualmente de difícil diagnóstico, e requer ou a reavaliação do projeto, ou a melhoria de processos, como pode ser visto na Figura 80.

Figura 80 – Raios X da falta de contato elétrico. Do lado esquerdo, o correto assentamento

Fonte: Autor (2017).

5.1.16 Falhas nos cabos de vela

Um dos principais modos de falha nos cabos de vela ocorre por descarga de alta tensão na região do conector da luva de proteção e isolamento. A proteção de silicone apresenta marcas de queimadura e furos em consequência da descarga de alta tensão. A origem dessa falha é a deficiente montagem do conector à vela e a consequente redução da capacidade de isolamento provocando descargas de alta tensão. A Figura 81 mostra uma falha nos cabos de vela por perfuração do isolamento do silicone protetivo; a Figura 82 mostra a falha originada da deformação do metal de proteção do cabo.

Figura 81 – Furo na região do conector originado por falha na montagem

Fonte: Autor (2017).

Figura 82 – Deformação do metal de proteção por seguidas desmontagens

Fonte: Autor (2017).

5.1.17 Falhas por fragilização da resistência elétrica

A falha no valor da resistência em consequência de resistor fragilizado pode ocorrer por causa da montagem forçada nos conectores e é um fenômeno importante, uma vez que também leva a falhas intermitentes do sistema de ignição. A Figura 83 mostra a falha por danos nos resistores dos cabos de vela.

Figura 83 – Resistores danificados e que levam a alterações nos valores de resistência

Fonte: Autor (2017).

5.1.18 Falhas no revestimento de poliéster

O revestimento de poliéster deve estar isento de riscos, rebarbas e trincas. A Figura 84 mostra o tipo de trinca mais comum. Os conectores devem apresentar acabamento superficial brilhante e isento de manchas. O ponto de quebra do canal de transferência deve ser livre de rebarbas e falhas. A Figura 85 mostra as porosidades encontradas em componentes metálicos.

Figura 84 – Falhas mecânicas nos componentes metálicos, em especial trincas, levam a falhas na condução e no isolamento

Fonte: Autor (2017).

Figura 85 – Porosidades em componentes metálicos

Fonte: Autor (2017).

5.1.19 Falha por oxidação e contaminações

A oxidação e/ou a contaminação por óleo lubrificante ou líquidos facilitadores de montagem são também fenômenos importantes. Tais eventos provocam falhas na ignição, muitas vezes de difícil diagnóstico. Esse tipo de falha pode ser visto na Figura 86 a seguir, bem como na Figura 87, na qual se pode observar a contaminação por óleo.

Figura 86 – Região oxidada nos terminais

Fonte: Autor

Figura 87 – Região contaminada por óleo

Fonte: Autor (2017).

5.1.20 Falhas nas velas de ignição

As velas de ignição são, dentro do sistema elétrico do motor, uma fonte de falhas esporádicas e de difícil diagnóstico. Por serem as velas componentes diretamente expostos ao combustível e à combustão, as falhas podem se confundir entre falhas nos processos ou no projeto com falhas associadas a combustível adulterado ou de baixa qualidade. Por exemplo, as trincas nos isoladores podem ser

oriundas do processo produtivo do isolador ou de um aperto errado na vela, vide figuras 88, 89, 90. Falhas na compactação do isolador também causam falhas esporádicas no sistema de ignição, conforme mostra a Figura 91.

Figura 88 – No isolador, trinca que afeta a qualidade da centelha

Fonte: Autor (2017).

Figura 89 – Falha na compactação no processo do isolador e que pode provocar perda de energia na centelha

Fonte: Autor (2017).

Figura 90 – Deficiência na microestrutura da cerâmica

Fonte: Autor (2017).

Figura 91 – Vazios identificados no material cerâmico que podem causar falhas na ignição

Fonte: Autor (2017).

5.2 Etapa 2: Estudo do caso do motor de combustão do ciclo Otto – falhas esporádicas e de difícil diagnóstico

A análise de risco tem a função de identificar os eventos indesejáveis e seu impacto no funcionamento do produto. O diagrama de falha é a ferramenta inicial de análise e identificação dos grupos funcionais de maior risco. Uma vez definidos os grupos de maior risco, podem-se desenvolver os ensaios acelerados específicos para o grupo em análise.

5.2.1 Análise de risco e o evento indesejado

Para iniciar o estudo dos eventos indesejados, será feita a análise de risco do motor de combustão interna com estudo criterioso dos componentes, dos sistemas críticos e das características a serem analisadas. Aqui os objetivos são identificar grupos e subgrupos que levam ao risco do evento indesejado, identificar o sistema e criar um ensaio forçado a ser empregado no monitoramento das condições dos componentes, visando à diagnose de anormalidades em sua operação.

5.2.2 Impacto das falhas nas emissões de poluentes e o sistema OBD-Br2

Ainda com o objetivo de justificar a escolha dos sistemas críticos, faremos um estudo detalhado do sistema de diagnóstico de falhas e de gerenciamento do motor. O objetivo é entender o sistema de diagnóstico e de emissões, que também é um dos fatores de risco. Uma falha no sistema de ignição cortará a injeção do cilindro com defeito e levará o veículo a um modo de segurança indesejado, por determinação da norma e da legislação vigentes.

A falha na combustão leva ao acendimento da luz de alerta do *Electronic Power Control* (EPC), a princípio sem iniciar o modo de segurança do veículo. Posteriormente, em modo de segurança, o módulo eletrônico limita ou restringe a rotação e a velocidade do motor. O veículo fica limitado a, por exemplo, 80 km/h de velocidade ou a um valor predeterminado de rpm. Em modo de segurança mais avançado, a restrição é ainda maior, e o motor não ultrapassa um valor muito baixo de rpm, suficiente apenas para manobrar o veículo até local seguro.

Essas situações são extremamente indesejáveis, pois levam o ocupante a ter de parar o veículo em local ou instante nem sempre previsível e ao maior consumo de combustível. Fitzgerald (2008) mostram a importância de se desenvolver projetos e produtos com responsabilidade ambiental e os impactos indesejáveis em caso de falhas importantes nesse aspecto.

Além disso, os sistemas de proteção podem automaticamente desligar um cilindro do motor para proteger o catalisador ou garantir os níveis de emissões, ocasionando perda de potência. A hipótese mais simples é o acendimento da luz no painel indicando a necessidade de revisão do veículo.

Ou seja, o principal dano é a entrada em modo de segurança por uma falha na combustão e, em menor proporção, o reparo repetitivo antes da descoberta final da falha. Além disso, sob o ponto de vista do fabricante e à luz do código de defesa do consumidor brasileiro, é previsto o prazo de 30 dias para a solução de uma falha, seja ela falha contínua, seja falha esporádica, somando-se aqui todos os tempos de veículo parado, ainda que não contínuos, mas com o mesmo defeito. A Figura 92 mostra o arranjo geral da motorização (ciclo Otto), objeto da análise de risco, e o esquema técnico dos sistemas envolvidos na formação do evento indesejável.

Figura 92 – Arranjo geral da motorização (ciclo Otto), objeto da análise de risco e esquema técnico dos sistemas envolvidos na formação do evento indesejável

Fonte: Gollin (2003).

Ao falhar, alguns componentes críticos da injeção obrigam, por força de lei, a parada imediata da linha de produção. Caso haja a quebra de qualidade em um componente que afete as emissões de poluentes, há motivo de impedimento da produção. Em caso de falha em campo em algo que afete as emissões, tem-se igualmente motivo de interrupção da produção.

O diagrama de falhas descreve os eventos que levam às falhas esporádicas e de difícil detecção e que eventualmente colocam o ocupante em situação de modo de segurança em seus diversos níveis de severidade.

O julgamento dos engenheiros é fundamental para a classificação e a determinação dos sistemas críticos, e a maior incerteza está nos julgamentos feitos nessa fase. O motor de combustão interna, associado a um veículo automotor, pode apresentar falhas esporádicas e de difícil diagnóstico.

As falhas inicialmente são divididas em três grupos: as mecânicas e as elétricas e de gerenciamento eletrônico do motor.

Os grupos afetam o desempenho do veículo e estão distribuídas em cerca de 65% para o grupo eletroeletrônico e 35% para o mecânico, segundo estudos de 10 anos em campo. Em particular, para o efeito falha na combustão, o diagrama de Ishikawa ou diagrama de falhas da Figura 68 mostra a sequência de eventos indesejáveis que disparam a falha final, que é a falha na combustão.

Ocorre que as falhas mecânicas são facilmente identificáveis, bastando a análise dimensional dos componentes, testes específicos, análise visual, análise metalográfica, metrologia etc. A Figura 93 apresenta o gráfico “Consequência *versus* Probabilidade”, no qual pode-se ver que uma falha, ainda que com baixa probabilidade de ocorrência, se torna importante em função das consequências envolvidas, em especial quando existem aspectos legais associados.

Os modos de falha foram divididos em seis grupos de eventos inicializadores, incluindo *hardware*, *software* e falha humana, conforme se segue:

- a) motor completo: cabeçote, injetores, corpo de borboleta, catalisador, conjunto do bloco, coletor de admissão, refrigeração, sincronismo mecânico, bobina, sonda lambda, cabos de vela e roda fônica;
- b) unidade de controle eletrônico: *hardware* e *software*;
- c) bombeamento de combustível: bomba e tanque;
- d) interface com o veículo: bateria, imobilizador, alternador e motor de partida;

- e) lubrificação: qualidade do combustível, óleo lubrificante e reservatório de partida a frio;
- f) sistema de partida a frio: bomba de partida a frio e canister.

Figura 93 – Diagrama de falha para todo o arranjo geral de motorização (ciclo Otto)

Fonte: Figura elaborada pelo autor em 2017.

Figura 94 – Gráfico Consequência *versus* Probabilidade

Fonte: Figura elaborada pelo autor em 2017.

5.2.3 Resumo da análise de risco

Os Quadros 11 a 17, a seguir, mostram o resumo da análise de risco para cada grupo funcional e, ao final, o Quadro 11 mostra o resumo final das falhas esporádicas e de difícil diagnóstico. Os dados de campo dos últimos 10 anos mostram que 65% das falhas nos motores são oriundas de problemas elétricos; dessas, cerca de 3,5 % são repetitivas e menos de 1% são de difícil diagnóstico e com características esporádicas ou que levem aos diversos modos de proteção.

Isso indica que a probabilidade de falha é muito pequena, mas suas consequências são extremamente importantes, conforme mostra a Figura 94, principalmente em razão de reparos repetitivos, da entrada em modo de segurança ou da complexidade de diagnóstico.

Indica também que a única maneira de eliminar o problema é robustecer os sistemas envolvidos levando-os à condição de falha zero. Por menor que seja a probabilidade, como a consequência é grande, o risco sempre é crítico. Além disso, os modelos preditivos de crescimento da confiabilidade preconizam a necessidade de existência de um programa de testes e avaliações para criar um programa contínuo

de análise de falhas com a determinação de causas raiz e foco na correção e no crescimento da confiabilidade.

Quadro 11 – Análise de risco de falha esporádica e de difícil diagnóstico do motor completo

Grupo 1	Crítico	Importante	Fácil detecção ou detectável	Difícil detecção	Ocorrência de falhas esporádicas relevantes	Probabilidade (análise de dados do passado)
Motor completo						
Cabeçote		X	x			Média/Alta >1F/1000
Injetores	x		x			Média ~0,5F/100
Corpo de borboleta	x			x	x	Baixa <0,5F/1000
Catalizador	x		x			zero
Conjunto Bloco do motor		X	x			Baixa <0,5F/1000
Coletor de admissão		X	x			Muito Baixa <<0,5 R/1000
Refrigeração		X	x			Média ~0,5F/1000
Ponto mecânico		x	x			zero
bobina	x			x	x	Baixa <0,5F/1000
Sonda lambda	x			X	X	Muito Baixa <<0,5 R/1000
Cabos de vela	x			x	x	Baixa <0,5F/1000
Sensores magnéticos	x			x	x	Muito Baixa <<0,5F/1000
Velas de Ignição	x				X	Média ~0,5F/1000

Fonte: Quadro elaborado pelo autor em 2017.

Quadro 12 – Análise de risco de falha esporádica e de difícil diagnóstico

Grupo2 Interface com o veículo	Crítico	Importante	Fácil detecção ou detectável	Difícil detecção	Ocorrência de falhas esporádicas relevantes	Probabilidade (análise de dados do passado)
Bateria	-	X	X	-	-	Alta >1F/1000
Imobilizador	-	X	X	-	-	Média ~0,5F/100
Alternador	-	X	X	-	-	Média ~0,5F/1000
Motor de partida	-	X	x	-	-	Alta >1F/1000

Fonte: Quadro elaborado pelo autor em 2017.

Quadro 13 – Análise de risco de falha esporádica e de difícil diagnóstico

Grupo3 Combustível e lubrificante	Crítico	Importante	Fácil detecção ou detectável	Difícil detecção	Ocorrência de falhas esporádicas relevantes	Probabilidade (análise de dados do passado)
Qualidade do combustível do tanque principal	-	X	X	-	-	Alta >1F/1000
Qualidade do combustível do tanque auxiliar	-	X	X	-	-	Média ~0,5F/100
Qualidade do óleo	-	X	-	-	-	Média ~0,5F/1000

Fonte: Quadro elaborado pelo autor em 2017.

Quadro 14 – Análise de risco de falha esporádica e de difícil diagnóstico do sistema de partida a frio

Grupo 4 Partida a frio refrigeração	Crítico	Importante	Fácil detecção ou detectável	Difícil detecção	Ocorrência de falhas esporádicas relevantes	Probabilidade (análise de dados do passado)
Bomba de combustível	-	X	X	-	-	Baixa <0,5F/1000
Canister	-	X	X	-	-	Baixa <0,5F/1000
Sensor de temperatura	-	X	X	-	-	Baixa <0,5F/1000
Reservatório de partida a frio	-	X	X	-	-	Média ~0,5F/1000

Fonte: Quadro elaborado pelo autor em 2017.

Quadro 15 – Análise de risco de falha esporádica e de difícil diagnóstico do sistema de bombeamento de combustível

Grupo5 Bombeamento de combustível	Crítico	Importante	Fácil detecção ou detectável	Difícil detecção	Ocorrência de falhas esporádicas relevantes	Probabilidade (análise de dados do passado)
Bomba de combustível	-	X	X	-	-	Alta >1F/1000
Regulador de pressão	-	X	X	-	-	Baixa <0,5F/1000

Fonte: Quadro elaborado pelo autor em 2017.

Quadro 16 – Análise de risco do sistema de gerenciamento do motor

Grupo 6 Unidade de Controle Eletrônico	Crítico	Importante	Fácil detecção ou detectável	Difícil detecção	Ocorrência de falhas esporádicas relevantes	Probabilidade (análise de dados do passado)
Hardware	X			X	X	Baixa <0,5F/1000
Software	X			X	X	Média ~0,5F/1000

Fonte: Quadro elaborado pelo autor em 2017.

Quadro 17 – Análise de risco de falha esporádica e de difícil diagnóstico do sistema completo

Resultado da Análise Probabilística de Risco	Crítico	Importante	Fácil detecção ou detectável	Difícil detecção	Ocorrência de falhas esporádicas relevantes	Probabilidade (análise de dados do passado)
Corpo de borboleta	X			X	X	Baixa <0,5F/1000
bobina	X			X	X	Média ~0,5F/1000
Sonda lambda	X			X	X	Muito Baixa <<0,5 R/1000
Cabos de vela	X			X	X	Média ~0,5F/1000
Velas de Ignição	X			X	X	Baixa <0,5F/1000
Módulo Eletrônico	X			X	X	Muito Baixa <<0,5 R/1000
SW	X			X	X	Baixa <0,5F/1000
Sensores magnéticos	X			X	X	Baixa <0,5F/1000

Fonte: Quadro elaborado pelo autor em 2017.

5.2.4 Resultados alcançados

Ao fazer essas análises, algumas incertezas devem ser consideradas:

- a) o modelo geral do sistema ou a descrição dos sistemas;
- b) falha nas hipóteses de análise dos dados de campo que orientaram a análise da árvore de falhas;
- c) a interpretação dos resultados.

O modelamento geral do sistema pode ter desconsiderado alguns fatores que alimentam o diagrama de falhas. Fatores novos ou mal avaliados podem ter sido negligenciados. Além disso, dentre os fatores considerados no diagrama de falhas, pode ter ocorrido uma avaliação equivocada dos fatores que levam ao evento indesejável.

O histórico de campo foi bastante relevante na escolha dos eventos críticos, e embora apenas algumas mudanças tecnológicas tenham ocorrido, não houve estudos a respeito em profundidade e adotou-se um valor médio das probabilidades.

A principal conclusão é a de que a probabilidade de ocorrer uma falha esporádica na ignição é muito pequena, mas suas consequências são extremamente importantes. Reparos repetitivos, veículos que entram em modo de segurança ou apresentam diagnóstico de falha complexo acabam por afetar a confiabilidade, a imagem do produto e podem levar a fatores que afetam as emissões de poluentes. Na prática, cada vez mais, a consequência desse tipo de falha tende a aumentar por influência de diversos fatores como força de mercado, legislação e/ou imagem.

Outra conclusão é que a única maneira de eliminar o problema é robustecer os sistemas envolvidos, levando-os à condição de falha zero, pois, por menor que seja a probabilidade, como a consequência é grave, o risco sempre é crítico. Ou seja, corpo de borboleta, bobina, sonda lambda, cabos de vela, velas de ignição e sensores magnéticos devem ser classificados como componentes que requerem níveis máximos de controle e confiabilidade. Na prática, processos de soldagem, enrolamento de fios isolados, crimpagem, conexões de terminais, injeção de borrachas ou plásticos e isolamentos são processos sensíveis que necessitam de rígidos parâmetros de controle, uma vez que levam a falhas do tipo esporádica, influenciadas por vibrações, calor, umidade e outros fatores. O estudo da situação em campo indica que o conjunto bobina, cabo de vela e velas de ignição é um dos mais

importantes – se não o mais importante – fatores a ser desenvolvidos. Os demais são igualmente importantes e seriam temas viáveis para trabalhos similares a este.

5.3 Etapa 3: Análise da confiabilidade por ensaios acelerados

Esta etapa prevê a utilização do equipamento de testes acelerados para precipitar as falhas anteriormente identificadas. Esta fase também prevê o planejamento dos testes para que o equipamento possa, da melhor forma, acelerar o aparecimento das falhas. Lembrando-se de que o objetivo não é a análise da durabilidade, e sim a identificação mais rápida das falhas em comparação ao tempo necessário a essa mesma identificação em campo. Todo novo produto deverá necessariamente conter as correções de desenvolvimento obtidas ao longo das melhorias.

5.4 Etapa 4: Verificação dos resultados da alteração

Feitas as correções, a eficácia das ações deve ser acompanhada em campo. Para isso, é importante o monitoramento do produto e o seguimento da eficácia das alterações. Caso os defeitos se repitam e continuem a aparecer em campo, significa que as ações foram ineficazes e que novas ações corretivas devem ser indicadas.

5.5 Etapa 5: Aplicação e estudo de caso

Um dos quesitos para o aumento da confiabilidade de um produto é a retroalimentação das ações corretivas de produto e processo. A adoção dos ensaios acelerados e de bancadas de teste geram diversas oportunidades de melhoria. Todas essas melhorias, uma vez implementadas, foram acompanhadas em campo, e os defeitos não mais voltaram a ocorrer, demonstrando a eficácia das ações e o aumento da robustez como desejado.

Serão apresentados 15 casos de falhas de difícil diagnóstico, tratados como um conjunto e cujo tempo de solução seria normalmente longo (superior a 30 dias).

Todas as falhas foram rapidamente detectadas e retroalimentadas nos processos, como será apresentado.

- **Caso 1** – Análise de falha da bobina de ignição. Reclamação de um motor 4 cilindros, 1,6 litro, falhando os cilindros 1 e 4, especialmente em alta potência e alta temperatura.

Nesse caso, foi feita a medição da resistência nos enrolamentos primário e secundário, e o resultado foi o perfeito funcionamento, pois os valores estavam conforme as especificações. A peça foi submetida ao teste funcional a temperatura ambiente segundo o processo de fabricação do fornecedor e na bancada de testes do fornecedor. Em ambos os testes, a peça apresentou valores funcionais em conformidade com as especificações, e não foi evidenciada a falha.

Teste acelerado na bancada proposta: foi realizado ensaio funcional sob temperatura elevada. A peça foi armazenada em estufa por 1 hora a temperatura elevada (100 °C) e realizado teste elétrico. As condições de ensaio em bancada foram de dwell de 2,2 ms, com corrente de 8,5 A, frequência de 50 Hz e temperatura de 100° C em tensão nominal de 35 KV. Esta condição é a que mais se aproxima da situação da reclamação do campo, ou seja, alta potência e alta temperatura e foi obtida através do teste com aumento gradual em rampa. A figura 5 mostra o modelo utilizado denominado de modelo por patamar e rampa de tensão elétrica.

Como resultado, as torres A-D não funcionaram, pois a tensão e a corrente estavam zeradas. Ficando evidenciado que a falha ocorre apenas em altas temperaturas, o que na prática seria difícil de diagnosticar sem o ensaio forçado. Observe as Figuras 95 e 96, a seguir.

Figura 95 – Bobina de um motor 1,6 litro que apresentou falha em campo

Fonte: Autor (2017).

Figura 96 – Estufa a 100 °C levou a peça a aquecimento e posterior teste em bancada

Fonte: Autor (2017).

A Figura 97 mostra os raios X da peça identificando fio com falha no enrolamento, defeito que se manifesta apenas sob altas temperaturas. A restrição da área é crítica sob altas tensões, e sob baixa tensão a falha passa imperceptível.

Ação no processo do fabricante: alerta de qualidade para dobramento do cabo, que ocorre eventualmente na alimentação da máquina.

Figura 97 – Raios X da peça identificando fio com falha no enrolamento

Fonte: Autor (2017).

Caso 2 – Análise de falha da bobina de ignição. Reclamação do motor 4 cilindros, 1,6 litro falhando. Inicialmente foi feita a medição de resistência nos enrolamentos primário e secundário, e o resultado foi o perfeito funcionamento, pois os valores estavam em conformidade com as especificações. A peça fora submetida ao teste funcional em veículo a temperatura ambiente e a peça apresentou valores funcionais em conformidade com as especificações, e não foi evidenciada a falha. Com o teste acelerado na bancada 2 (figura 98), foi identificado mal contato no terminal entre a bobina e o módulo de potência. As condições de ensaio em bancada foram de dwell de 3,5 ms, com frequência de 50 Hz e temperatura ambiente de 30° C em tensão nominal de 35 KV. Esta condição foi a que reproduziu a falha, em condições normais a falha não se reproduziu. O tempo do dwell foi aumentando gradativamente de 2,5 para 3,5 ms, quando a falha reproduziu. Neste caso foi utilizado o modelo denominado de modelo por patamar e rampa de tensão elétrica, vez que não se conhece as demais condições em que a falha ocorre

- O terminal se deformava no processo de montagem conforme é visto na Figura 99. Como ação de correção, apresentada na Figura 100, desenvolveu-se uma nova geometria do terminal (à direita) e alterações no processo de montagem, reduzindo a pressão de crimpagem. A falha não voltou a ocorrer, conforme indicaram o número de reparos em campo e os reparos repetitivos.

Figura 98 – Falha no contato do terminal entre a bobina e o módulo de potência

Fonte: Autor (2017).

Figura 99 – Proposta a alteração do projeto do terminal (antigo *versus* novo)

Fonte: Autor (2017).

- Caso 3** – Reclamação do motor 4 cilindros, 1,6 litro falhando em alta potência. Inicialmente foi feita a medição de resistência nos enrolamentos primário e secundário, e o resultado foi o perfeito funcionamento, pois os valores estavam em conformidade com as especificações. A peça fora submetida ao teste funcional a temperatura ambiente na bancada de testes. A peça apresentou valores funcionais em conformidade com as especificações, e não foi evidenciada a falha. Com o teste acelerado na bancada 2 (figura 101), foi identificado mal contato no terminal entre a bobina e o módulo de potência. As condições de ensaio em bancada foram de dwell de 3,5 ms, frequência de 50 Hz e temperatura de 25° C em tensão

nominal de 35 KV e pressão de 8 bar. Esta condição é a que mais se aproxima da situação da reclamação do campo. O tempo do dwell foi aumentando gradativamente de 2,5 para 3,5 ms, quando a falha reproduziu. Falha na soldagem entre o terminal e a bobina primária, falha no ajuste e na solda. O ajuste do eletrodo fica mais difícil se ele for circular. Se a forma for retangular, o ajuste ocorre de modo mais estável. Além disso, foi feita a manutenção da fonte do equipamento de solda, e a falha não ocorreu mais. As Figuras 91 e 92 mostram, respectivamente, a situação com problema e a solução.

Figura 100 – Fixação de eletrodo com formato circular

Fonte: Autor (2017).

Figura 101 – Fixação de eletrodo com formato retangular

Fonte: Autor (2017).

- **Caso 4** – Falha na disponibilidade de tensão e curto-circuito entre o enrolamento secundário e o núcleo ferroso gerou curto-circuito aterrando a torre D. Dessa forma, essa torre não ofereceu energia para abastecimento do eletrodo da vela e provoca falha de ignição e perda de potência do motor. A Figura 102 mostra a constatação da falta de tensão, e a Figura 103 mostra os fios residuais dispersos pelo processo.

Curto-circuito ocorrido por falha no corte por não aferição das lâminas de corte do fio. Falha operacional na aferição do sistema. As condições de ensaio em bancada foram de corrente de 3,5 A, frequência de 50 Hz e temperatura de 30° C em tensão nominal de 10 KV, esta condição foi a do início do teste de rampa por patamar. Esta condição foi suficiente para reproduzir a falha sem aceleração em rampa. Foi proposta a melhoria do processo de verificação das lâminas de corte do fio.

Figura 102 – Falta de oferta de tensão na torre D por curto-circuito por fio mal cortado no processo

Fonte: Autor (2017).

Figura 103 – Raios X da peça mostra pedaços de fios residuais por falha no corte do fio durante o processo

Fonte: Autor (2017).

- **Caso 5** – Reclamação em campo de perda de potência em um motor 4 cilindros, 1,6 litro. Foi constatada bolha de ar entre as espiras do enrolamento secundário, permitindo a fuga de corrente e a consequente queima do enrolamento secundário, conforme pode ser visto nas Figuras

104 e 105. A formação de bolhas de ar é inerente ao processo de encapsulamento, e o agravamento da incidência se deve à baixa temperatura do enrolamento secundário quando comparado à temperatura da resina no ato do encapsulamento. A resina está a 60 °C e o enrolamento deve estar a 90 °C. Variações de temperatura podem intensificar a falha. A falha foi identificada com o uso de um termo visor em teste funcional em veículo

Figura 104 – Bolha de ar oriunda do processo de aplicação de resina

Fonte: Autor (2017).

Figura 105 – Região da bolha de ar, oriunda do processo de aplicação de resina, tem temperatura mais elevada

Fonte: Autor (2017).

Ações no processo visando minimizar a incidência desse modo de falha foram realizadas e geraram grande impacto no retorno das peças em campo. As principais ações tomadas foram com relação à divisão do forno de produção em duas zonas de

aquecimento, além do aumento na temperatura de aquecimento para cura da resina. Infelizmente não é possível eliminar 100% da incidência desse modo de falha, uma vez que é inerente ao processo de fabricação, mas a incidência pode ser minimizada.

- **Caso 6** – Baixa disponibilidade de tensão no secundário detectada em função de fio cruzado no bobinamento gerando curto-circuito na bobina. As condições de ensaio em bancada foram de corrente de 3,5 A, frequência de 50 Hz e temperatura de 30° C. O tempo do dwell foi aumentando gradativamente de 2,5 para 3,5 ms, quando a falha reproduziu. Constatou-se a falha no carretel por rebarba segurando o fio, conforme mostra a Figura 106 a seguir.

Figura 106 – Carretel com rebarba que potencializa a falha

Fonte: Autor (2017).

A queda é responsável pela formação da falha no carretel. No processo foi feita a colocação de manta de borracha para amortecer eventuais quedas da peça após a injeção plástica do carretel. Também foi feita a instalação de nova calha para amortecer possíveis quedas da peça após a injeção plástica do carretel.

- **Caso 7** – Motor de 4 cilindros e 1,6 litro apresentava falha em consequência de oxidação do terminal do cabo de vela. O cabo foi mal conectado no processo de montagem, e as Figuras 107 e 108 ilustram bem a situação de baixa disponibilidade de tensão nos terminais D e C.

Figura 107 – Oxidação de terminal

Fonte: Autor (2017).

Figura 108 – Baixa disponibilidade de tensão nos terminais D e C

Fonte: Autor (2017).

Inicialmente a falha foi reproduzida na bancada 2 e identificada visualmente . Na sequência foi testada em condições próximas da normal , ou seja, com 35KV e 50 Hz e dwell de 2,5 ms, como início do teste usando o modelo de patamar e rampa de tensão.

Esta condição foi suficiente para detectar a falha em osciloscópio na torre C, conforme mostra a figura 108. Para a solução do problema no processo produtivo, foram criados alertas de qualidade aos operadores da montagem para que efetuem o procedimento de montagem corretamente.

- **Caso 8** – Motor de 4 cilindros e 1,6 litro, falha em alta potência. Terminal do conector primário não foi crimpado, . Para simular este tipo de falha é feito o teste com a tensão elevada a 45.000KV para forçar a falta de corrente e foi possível reproduzir a falha. O tempo do *dwell* foi aumentando gradativamente de 2,5 para 3,5 ms, quando a falha reproduziu. A operação de prensagem não foi realizada, conforme mostra a Figura 109. A falha ocorreu por causa de erro operacional. As principais ações de contenção foram o alerta de qualidade no posto de trabalho e a orientação aos operadores. Foram criados pontos de apoio sob o terminal primário, no posto de teste elétrico, a fim de garantir a prensagem nesse posto mesmo que a operação não fosse realizada.

Figura 109 – Crimpagem errada de cabo

Fonte: Autor (2017).

- **Caso 9** – Velas do 3º e 4º cilindros com resistência alta e falhas elétricas ocasionam falha no motor de 4 cilindros e 1,0 litro. Os valores das resistências ôhmicas das velas C e D encontram-se fora da tolerância exigida para o produto, conforme evidencia o Quadro 18. Na Figura 110, é possível ver espaços vazios na compactação do isolante, que geram valor

de resistência acima do especificado. Este tipo de falha é facilmente detectado visualmente na bancada 2 . É possível identificar a falta de intensidade das velas com defeito quando comparadas as duas em condições normais. Foram feitas correções no processo de compactação.

Quadro 18– Valores de baixa resistência

Vela	Folga (mm)	Toque (Nm)	Resistência em k Ω
1	0,86	30	1,57
2	0,85	30	1,36
3	0,85	30	4,10
4	0,87	30	4,08

Fonte: Quadro elaborado pelo autor em 2017.

Figura 110 – Espaços vazios de compactação

Fonte: Autor (2017).

Caso 10 – Motor falha, curto-circuito interno. Fios soltos dentro das peças produzem curtos-circuitos internos intermitentes. O curto-circuito do carretel secundário, causado por pedaços de fios soltos presos ao carretel da bobina, ocasiona a redução da oferta de tensão. O pedaço de fio solto ficou preso ao carretel do secundário em consequência da falta de proteção contra resíduos provenientes de quebra de fio e término do carretel nos fusos de bobinamento. As condições de ensaio em bancada foram de corrente de 3,5 A, frequência de 50 Hz e temperatura de 30° C em tensão nominal de 35 KV. Esta condição é a que mais se aproxima da situação da

reclamação do campo, obtida em teste usando o modelo de patamar e rampa de tensão.

No processo de fabricação, foram instaladas proteções para os carretéis e criados procedimentos para a troca de carretel. Tais proteções possuem a função de evitar o efeito de chicoteamento do fio quando este se rompe. Na ocorrência do rompimento sem proteção, o fio é quebrado em muitas partes e pode contaminar o ambiente interno da bobinadeira, causando o fenômeno de fio solto, uma partícula que pode ficar presa ao carretel de outra bobina, conforme mostra a Figura 111.

Figura 111 – Fios soltos no bobinamento

Fonte: Autor (2017).

Caso 11 – Falha intermitente do motor. Detectada falha na solda entre um dos terminais de um dos transistores do estágio de potência, conforme mostra a Figura 112, a qual faz com que o funcionamento do produto seja intermitente. As condições de ensaio em bancada foram de corrente de 3,5 A, frequência de 50 Hz e temperatura de 30° C em tensão nominal de 35 KV. Esta condição é a que mais se aproxima da situação da reclamação do campo e conforme os demais experimentos, foi obtida em teste usando o modelo de patamar e rampa de tensão.

- Foi constatada a falha no sistema de refrigeração da base dos eletrodos. No processo foi feita a modificação do sistema de refrigeração do eletrodo. Antes, a circulação de água era indireta. Foi proposta a circulação de água direta até a base dos eletrodos na máquina de solda.

Figura 112 – Falha na solda dos terminais

Fonte: Autor (2017).

- **Caso 12** – Funcionamento intermitente do painel de instrumentos do veículo. A bobina foi testada em bancada, e foram medidos os valores de disponibilidade de tensão (torres A, B, C e D). Foi constatada baixa tensão na torre A (16kV). As condições de ensaio em bancada foram de corrente de 3,5 A (em teste de rampa), frequência de 50 Hz e temperatura de 30° C em tensão nominal de 35 KV. Esta condição é a que mais se aproxima da situação da reclamação do campo. Após o teste em bancada, a peça foi testada em banho de esfera para identificação de possível falha na isolação externa e houve a comprovação do fenômeno. Foram feitas correções no processo de injeção plástica do carretel secundário no subfornecedor, bem como a correção e a padronização dos parâmetros do processo de injeção (temperatura do molde e câmara de injeção).

Essas oscilações geraram interferências eletromagnéticas que causaram o distúrbio percebido no painel. A Figura 113 mostra a falha na injeção do polímero, e a Figura 114 mostra a interferência magnética oriunda da falha na isolação.

Figura 113 – Falha na injeção do plástico do carretel

Fonte: Autor (2017).

Figura 114 – Oscilações de corrente e tensão causam interferência no painel de instrumentos

Fonte: Autor (2017).

Caso 13 – Falha intermitente do motor de 4 cilindros e 1,6 litro. Foi identificada trinca na cerâmica da vela por causa do esforço lateral no processo de montagem da vela no motor. Este tipo de falha é facilmente detectado visualmente na bancada 2 com corrente de 3,5 A (em teste

usando o modelo de patamar e rampa de tensão, sempre partindo da condição nominal até a de máxima sobre carga.

- de rampa), frequência de 50 Hz e temperatura de 30° C em tensão nominal de 35 KV. É possível identificar a falta de intensidade das velas com defeito quando comparadas com as demais em condições normais. Foi corrigido o processo de montagem e feita a orientação aos montadores. A Figura 115 mostra a trinca oriunda da montagem da vela.

Figura 115 – Trinca cerâmica

Fonte: Autor (2017).

Caso 14 – Motor falhando. Foi constatada falha na montagem do cabo: um corte no isolamento de borracha ocasiona a falha na isolação, conforme mostra a Figura 116. Este tipo de falha é facilmente detectado visualmente na bancada 2. As condições de ensaio em bancada foram de corrente de 3,5 A, frequência de 50 Hz e temperatura de 30° C em tensão nominal de 35 KV .Os testes são realizados usando-se o modelo de patamar e rampa de tensão, sempre partindo da condição nominal até a de máxima sobre carga. Foram feitos ajustes nas ferramentas e alertas aos montadores, bem como melhorias nos processos de transporte das peças.

Figura 116 – Manuseio e/ou montagem

Fonte: Autor (2017).

- Caso 15** – Um dos grandes progressos no projeto do sistema de ignição foi a incorporação do sistema composto de vela e bobina sem cabo de velas, integrando tudo em uma única peça. A maior modificação oriunda das análises foi a proposta de eliminação de cabos e bobinas separados e a utilização da vela integrada com bobina e sem cabo *pencil coil* nos novos motores. Os riscos de falha na interface, desse modo, foram eliminados. Muitos motores tiveram seus projetos antigos atualizados com esse conceito, e todos os novos projetos só recebem esse tipo de sistema de ignição. A Figura 118 mostra o novo conceito de projeto integrado, vela e bobina individual, sem cabo de vela. Na verdade, eliminou-se uma grande fonte de falhas intermitentes oriunda dos processos produtivos dos cabos de vela de ignição. O banho de esferas é um dos procedimentos usados para identificar falhas de alimentação ou fuga de corrente . Conforme mostra a figura 117. Ao alimentar a bobina em tensão normal de 40 KV pode-se observar que em caso de perda de isolamento da carcaça a lâmpada piloto se ascende com a corrente que se forma com a terminal massa .

Figura 117 – Cuba com esferas de inox para teste de velas de ignição e cabos velas

Fonte: Autor (2017).

Figura 118 – Modificação do conceito de bobina com cabo e sem cabo incorporado à vela de ignição

Fonte: Autor (2017).

O Quadro 19 mostra as variáveis aceleráveis e as respectivas falhas que precipitam o surgimento do defeito.

Quadro 19 – Variáveis aceleráveis *versus* falhas que precipitam o surgimento

Variáveis aceleradas	Falhas									
	Fios internos danificados na bobina	Falhas dos terminais internos de contato na bobina	Falhas de soldagem interna na bobina	Fios residuais dentro da bobina	Falhas na aplicação de resina na bobina	Fios cruzados internamente a bobina	Oxidação do terminal	Falhas de crimpagens internas da bobina	Falha de compactação isolante da vela	Excesso de fios soltos no processo
Bancada 1										
Dwell	x	x	x	x	x	x	Bancada 2	x	Bancada 2	x
Temperatura	x				x	x	Bancada 2		Bancada 2	
Frequência							Bancada 2		Bancada 2	
Tensão	x	x	x	x	x	x	Bancada 2	x	Bancada 2	x

Variáveis aceleradas	Falhas									
	Fios internos danificados na bobina	Falhas nos terminais internos de contato bobina	Falhas de soldagem interna da bobina	Fios residuais na bobina	Falhas na aplicação de resina na bobina	Interferência eletromagnética nos demais dispositivos eletrônicos	Falhas de injeção de plástico do carretel	Trincas cerâmicas das velas	Falhas em borrachas e silicone das velas e cabos de velas	Falhas nos eletrodos metálicos das velas
Bancada 1										
Dwell	x	x	x	x	x	Bancada 2	x	Bancada 2	Bancada 2	Bancada 2
Temperatura					x					

	Falhas				
	Interferência eletromagnética nos demais dispositivos eletrônicos do veículo	Trincas na cerâmica isoladora das velas	Interfaces de montagem entre velas, cabos e bobinas	Falhas em borrachas e silicone da velas e cabos de velas	Falhas nos eletrodos metálicos das velas
Variáveis aceleradas Bancada 2					
<i>Dwell</i>	x	x	x	x	x
Pressão	x	x	x	x	x
Frequência					x
Tensão	x	x	x	x	x

Fonte: Quadro elaborado pelo autor em 2017.

6 LISTA DE VERIFICAÇÃO EM CAMPO

6.1 Proposta de uma lista de verificação para o campo

A elaboração da árvore de falhas, além de estruturar as probabilidades do fenômeno, ajuda a estruturar e a entender o fenômeno das falhas esporádicas.

Pode-se ver que as falhas estão estruturadas em grupos envolvendo o produto, suas interfaces e agentes externos. O conhecimento profundo e detalhado do fenômeno leva à pergunta: é possível, com base em observações empíricas e experimentais, criar uma lista de verificação que ajudará na identificação da causa raiz em campo?

Isso seria bastante interessante, pois ajudaria as atividades de análise em campo mesmo sem equipamentos sofisticados e testes acelerados, porém subsidiando inclusive uma solução para o problema.

6.1.1 Definição de lista de verificação

Algumas falhas possuem identificações típicas e podem ser consideradas como causa raiz dos problemas de ignição.

As bobinas de ignição trabalham com alta tensão. Em caso de porosidade na carcaça da bobina, ocorrerá a fuga de corrente e é possível observar no local da porosidade uma pequena região chamuscada pela alta tensão e pela corrente elétrica. Igualmente, em caso de trincas superficiais na carcaça, ocorrerá fuga de corrente. Portanto, porosidades e trincas oriundas de impactos podem ser visualmente observadas e diagnosticadas como uma causa imediata da falha e não há a necessidade de envolver equipamentos de análise. Ainda com relação aos produtos, os cabos de ignição podem apresentar porosidade na injeção do silicone bem como cortes ou batidas nos materiais isolantes levando também à perda de potência elétrica. Ou seja porosidades, cortes e batidas nos cabos de ignição são visualmente identificáveis e diagnosticados como causas imediatas de falhas na ignição. Seguindo o mesmo raciocínio, as velas de ignição podem apresentar porosidade nos isoladores e trincas que geram irregularidade no funcionamento. Assim, é possível fazer uma análise visual em busca de falhas no material ou porosidades, batidas ou descontinuidades que levam a falhas na ignição. Seguindo a estrutura da árvore de

falhas, as falhas ocorrem também em consequência das interfaces entre componentes. Isso posto, pode-se procurar nas interfaces marcas e evidências de falhas. É possível identificar erosão dos materiais metálicos dos conectores quando houver menor área de contato elétrico ou mesmo contato elétrico insuficiente, apresentando marcas de erosão e/ou corrosão. Terminais com dimensões erradas também elevam a intensidade da erosão por falha no contato. E, por fim, a árvore de falha mostra a importância dos agentes externos: penetração de água, óleo e montagem errada; tais agentes externos afetam a potência elétrica transmitida.

Nenhum dos problemas apresentados necessita de equipamentos sofisticados para sua identificação, bastando apenas a observação visual conforme uma lista de verificação simples, mas de muito auxílio na identificação da causa raiz da falha na ignição.

6.1.2 *Checklist* da bobina

- Procurar por porosidades superficiais: essas interrompem o isolamento, e em alta tensão haverá fuga de corrente e consequente perda de potência do motor.
- Procurar por áreas chamuscadas: são evidências de fuga de corrente normalmente ao redor de microfissuras, bolhas ou descontinuidades.
- Procurar por trincas superficiais que podem ter surgido por falha no processo.
- Procurar por marcas de batida e regiões lascadas que causam perda intermitente de potência.

6.1.3 *Checklist* dos cabos de ignição

- Procurar por porosidades nas borrachas ou nos silicones injetados. Os processos de injeção de borrachas ou silicones podem gerar porosidades e falhas na injeção por diversas razões, tais como temperatura e/ou pressão de injeção inadequadas.
- Procurar por cortes ou fissuras superficiais. Os processos de movimentação e transporte das peças muitas vezes danificam os terminais por corte ou batidas.

- Procurar por marcas de amassado ou esmagamento que podem prejudicar o assentamento e a condutibilidade de conectores.

6.1.4 *Checklist* das velas de ignição

- Procurar por porosidades nos isoladores cerâmicos, as quais provocam falhas intermitentes ao longo do funcionamento do motor.
- Observar trincas nos isoladores, que podem ser geradas por falhas no processo ou no transporte das peças.

6.1.5 *Checklist* das interfaces

- Procurar por marcas de erosão em consequência de mau contato entre os terminais. Isso pode ocorrer por falha no processo, falha no projeto ou falha no transporte das peças.
- Procurar por marcas de corrosão nas interfaces, evidenciando problemas de materiais ou falha na estanqueidade.
- Os encaixes dos terminais ocorrem com força de montagem e desmontagem especificados. Deve-se verificar se existem marcas de entrada de agente externos.

6.1.6 *Checklist* de agentes externos

- Observar a entrada de água e de óleo nas interfaces.
- Observar a existência de poeira e abrasivos nas interfaces.
- Observar a condição correta de montagem dos conectores.

6.1.7 *Checklist* do conjunto

- Em uma sala escura e com o motor em alta rotação com o veículo parado, pode-se observar visualmente a fuga de corrente (*flash* de luz).

Como se pode verificar, existem cerca de 16 pontos, todos apenas de natureza visual, mas que ajudam muito a iniciar a análise. De imediato, é possível identificar uma causa. Ainda assim, a inexistência de qualquer desses pontos já direciona a continuidade da análise aos demais pontos vistos neste trabalho, por exemplo, bolhas na resina interna (invisível externamente). Ou seja, este *checklist* é fundamental e deve iniciar todo e qualquer processo de análise de falha. O *checklist* proposto é apresentado no Quadro 20.

Quadro 20 – Proposta final de lista de verificação

Verificação:	S	N
Verifique se há porosidades na superfície das bobinas		
Verifique se há chameamento na superfície das bobinas		
Verifique se há trincas na superfície das bobinas		
Verifique se há marcas de batida nas bobinas		
Verifique se há porosidades nas borrachas ou no silicone dos cabos de ignição		
Verifique se há fissuras ou cortes nas superfícies dos cabos de ignição		
Verifique se há amassamentos dos terminais, esmagamentos dos cabos ou quebra de resistores		
Verifique se há porosidades nos isoladores cerâmicos das velas de ignição		
Verifique se há trincas nos isoladores cerâmicos das velas		
Verifique se há marcas de erosão e mau contato nas interfaces elétricas e terminais		
Verifique se a força de montagem e desmontagem e a estanqueidade estão corretas		
Verifique se há entrada de água ou óleo		
Verifique a existência de abrasivos		
Verifique se a condição de montagem está adequada		
Verifique, no escuro, a fuga geral de corrente do conjunto		

Fonte: Quadro elaborado pelo autor em 2017.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho propôs uma metodologia para tratar as falhas esporádicas e de difícil diagnóstico buscando conhecer suas causas raiz e assim poder minimizá-las em campo, melhorando as técnicas de projeto e manufatura, além de oferecer um *check list* para auxiliar os grupos de campo nas vendas a identificar possíveis falhas intermitentes. Esta metodologia tem como resultado a redução drástica do tempo de definição da causa raiz de uma falha, bem como apresenta um *checklist* para ajudar as análises em campo, além de mostrar a importância de retroalimentação das causas raiz nos processos produtivos e projetos. Os testes realizados para identificar as falhas são focados em subsistemas e interfaces, e não apenas nos componentes de forma individual. Para os testes propostos, o objetivo não é definir a confiabilidade ao longo da vida operacional, mas acelerar o aparecimento de falhas esporádicas, normalmente introduzida pela variação do processo produtivo, permitindo corrigir e evitar uma falha esporádica e, posteriormente, transformar esse teste em requisito da qualidade do conjunto. A construção da bancada de testes é inovadora e aborda os testes de forma inédita em especial com relação aos testes de rampa e da análise do conjunto total e não apenas dos componentes individuais.

O tempo de detecção da falha é bastante reduzido e, ao fim da análise, existe a retroalimentação dos processos produtivos e do projeto do produto para proporcionar a sua melhoria contínua bem como o aumento da confiabilidade.

A metodologia envolve a análise preliminar das causas raiz das falhas definidas como esporádicas, buscando definir potenciais combinações de condições operacionais que possam influenciar sua ocorrência, bem como modos de falha potenciais que possam estar relacionados com essas falhas esporádicas.

Nesta análise deve-se averiguar as interfaces entre subsistemas que, em caso de falha, podem influenciar a ocorrência de falhas esporádicas.

O método propõe a execução de ensaios altamente acelerados (HALT) devidamente planejados para definir a causa raiz mais provável.

Conclui-se também que processos de fabricação são determinantes no surgimento de falhas intermitentes. Os processos de solda são de grande importância pois falhas na temperatura do processo levam a problemas intermitentes de diagnóstico muito difícil. Os processos de enrolamento dos fios na produção de bobinas devem ser isentos de fios residuais, pois igualmente consistem em potencial

enorme de falha. No caso da aplicação da resina interna das bobinas, deve-se ter temperatura otimizada para evitar bolhas de ar. Os componentes cerâmicos devem ser isentos de porosidades bem como os processos de crimpagem devem ser garantidos evitando falhas no contato elétrico, também difíceis de diagnosticar.

Além disso, com relação à montagem dos conjuntos, a estanqueidade entre as interfaces deve ser garantida para evitar oxidação e entrada de impurezas. Soma-se a isso a necessidade de que componentes que sofreram quedas na produção não devem ser recolocados na linha de montagem, evitando-se trincas na peça.

A contribuição desse trabalho reside no fato de que a metodologia proposta reduz drasticamente o tempo de análise de até um ano para poucas semanas, amplia o escopo do estudo de componentes isolados para um conjunto ou subsistema completo, incluindo as interfaces entre componentes. Além disso, as bancadas representam uma das inovações, pois possibilitam conhecer, estudar e corrigir falhas nos conjuntos completos e montados com relação às interfaces, algo que os fabricantes dos componentes isolados não fazem. Os fabricantes de componentes testam suas peças individualmente e possuem um programa de melhoria para cada peça, mas não para o conjunto. Problemas relacionados às interfaces de contato e à montagem são oriundos dos processos produtivos de fabricação, e não são aperfeiçoados apenas com o controle isolado dos componentes. Boa parte dos problemas em campo é oriunda da interface dos componentes.

O método orienta a retroalimentação dos processos produtivos com as ações de melhoria contínua, bem como o desenvolvimento dos futuros produtos, propiciando melhor preparação para atender às legislações do código de defesa do consumidor e de emissões de poluentes. Por fim, propõe um *checklist* simples para ajudar a melhorar o diagnóstico em campo.

Observou-se, após detalhada e profunda análise do fenômeno de falhas esporádicas, que processos de soldagem, enrolamento de fios, crimpagem, conexões de terminais, injeção de borrachas ou isolamentos são processos sensíveis que necessitam de rígidos parâmetros de controle de processo, pois levam a falhas do tipo esporádica, influenciadas por vibrações, calor, umidade e geram falhas de difícil diagnóstico.

Como recomendação para futuros trabalhos, entende-se que o sistema de ignição dos motores é um dos mais críticos e inspirou este trabalho, mas, conforme já mencionado, existem outros, a saber: sensor de oxigênio, corpo de borboleta, módulo

eletrônico de controle e principalmente sensores magnéticos que necessitam de análise com procedimento similar ao proposto neste estudo. Este último, o sistema de sensores magnéticos, tem grande potencial de estudo e de minimizar falhas. Cada um desses sistemas poderia ter seu funcionamento e ambiente de operação experimentalmente simulados e acelerados para forçar o surgimento de falhas e facilitar o diagnóstico.

REFERÊNCIAS

ABADI, M. B.; HOSEINGHOLIZADEH, A. Single and Multiple misfire detection in internal combustion engines using Vold-Kalman filter order-tracking. **SAE Technical Paper**, n. 2011-01-1536: Detroit, 2011.

AIR RESOURCES BOARD. **Malfunction and Diagnostic System Requirements** – 1994 and subsequent model-year passenger cars, light-duty trucks, and medium-duty vehicles and engines (OBD II). Califórnia, 1996.

ANDERSON, A. F. Reliability in electromagnetic systems: the role of electrical contact resistance in maintaining automobile speed control system integrity. In: **2007 IET Colloquium on Reliability in Electromagnetic Systems**. Glasgow: IEEE, 2007.

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

AVEN, T. Risk Management. In: MISRA, K. B. (Org.). **Handbook of Performability Engineering**. Londres: Springer, 2008. p. 719-742.

BALL, J. BOWE, M. Torque estimation and misfire detection using block angular acceleration. **SAE Technical Paper**, Detroit, n. 2000-01-0560: 2000.

BELO, P. V. **Sistema para Diagnóstico Automático de Falhas em Veículos Automotores OBD-2**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

BENBOW, D. W.; BROOME, H. W. **The Certified Reliability Engineer Handbook**. Milwaukee: Quality Press, 2009. 320 p.

BERTSCHE, B. **Reliability in Automotive and Mechanical Engineering**: determination of component and system reliability. Berlin/Heidelberg: Springer, 2008.

BIROLINI, A. **Reliability Engineering**: theory and practice. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2004.

CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD. **Technical Status Update and Proposed Revisions to Malfunction and Diagnostic System Requirements Applicable to 1994 and Subsequent California Passenger Cars, Light-Duty Trucks, and Medium-Duty Vehicles** – (OBDII). Califórnia, 1991.

COIT, D. W.; DEY, K. A. Analysis of grouped data from field-failure reporting systems. **Reliability Engineering & System Safety**, New Jersey, v. 65, p. 95 -101, 1999.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 354, de 13 de dezembro de 2004 dispõe sobre os requisitos para adoção de sistemas de diagnose de bordo - OBD nos veículos automotores leves. **Diário Oficial da União**, de 14 de dezembro de 2004, Seção 1, páginas 62-63

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução n. 18, de 6 de maio de 1986. Dispõe sobre a Criação do Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores-PROCONVE. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 de junho de 1986. Seção 1, p. 8792.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (INSTITUTO ALEMÃO DE NORMALIZAÇÃO). **DIN 25424-1**: fault tree analysis: method and graphical symbols. Berlin, 1981.

DHILLON, B. S. **Engineering Maintenance**: a modern approach. Nova York: CRC PRESS LLC, 2002. 224 p.

DHILLON, B. S. **Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers**. Nova York: CRC Press Book, 2006. 228 p.

DHILLON, B.S. **Reliability, Quality, and Safety for Engineers**. Nova York: CRC Press Book, 2005. 240 p.

DUANE, J. T. **Duane Model** General Electric 1962. Applied R&M Manual for Defense Systems – Part D – Supporting Theory. Chapter 8.

EBELING, C. E. **An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering**. Illinois: Waveland Press Incorporated, 2010. 544 p.

EISINGER, S.; RAKOWSKY, U. K. Modeling of uncertainties in reliability centered maintenance: a probabilistic approach. **Reliability Engineering & System Safety**, Londres, n. 71, p. 159-164, 2000.

FAULIN FAJARDO, J. **Simulation Methods for Reliability and Availability of Complex Systems**. Londres: Springer-Verlag, 2010. (Springer Series in Reliability Engineering).

FERJENCIK, M. IPICA Lite-Improvements to root cause analysis. **Journal Reliability Engineering and System Safety**, London, n. 131, p. 1-13, 2014.

FITZGERALD, D. P. Constructing a product design for the environment process. In: MISRA, K.B. **Handbook of Performability Engineering**. Londres: Springer, 2008.

GATES, R. K.; GIBSON G. J.; MCLAIN, K. K. **Reliability Growth Prediction**: the analytic sciences corporation. Air Force Systems Command. Nova York: Griffins Air Force Base, 1989.

GOLLIN, W. **Ignition Systems for Gasoline Engines**. Stuttgart: Robert Bosch Publication, 2003.

GUIDA, M.; PULCINI, G.; VIANELLOC, M. Early Inference on Reliability of Upgraded Automotive Components by Using Past Data and Technical Information. **Journal of Statistical Planning and Inference**, 2002, p.129-137.

GUIMEKA, S. D.; COFFELT, J. P. Modeling Count Data in Risk Analysis and Reliability Engineering. In: MISRA, K. B. **Handbook of Performability Engineering**. Londres: Springer, 2008.

HEYWOOD, J. B. L. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. New York : McGraw-Hill, Inc., 1988. 427 p.

HAYWORTH, G. I. **Reliability Engineering Advances**. Nova York: Nova Science, 2008. 441 p.

HAIYU QI; GANESAN S.; PECHT M. No Fault Found and Intermittent Failures in Electronic Products. **Microelectronics Reliability**. Maryland: Elsevier, 2008 663-674p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION ISO/DIS 14230-1 - **Road Vehicles – Diagnostic systems – Keyword Protocol 2000 – Part 1: Physical Layer**. ISO, 1995.

KLENK, M. Misfire Detection by Evaluating Crankshaft Speed – A Means to Comply with OBD II. **SAE Paper**, Detroit, n. 930399, 1999.

KUMAMOTO, H.; HENLEY, E. J. **Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists**. Nova York: IEEE Press, 1966.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001. 388 p.

LEWIS, E. E. **Introduction to Reliability Engineering**. 2. ed. Nova York: John Wiley & Sons; Toronto: John Wiley & Sons; Singapore: John Wiley & Sons, 1996. 464 p.

LO BUE, F. Misfire detection system based on the measure of crankshaft angular velocity. **Advanced Microsystems for Automotive Applications 2007**. Berlin/Heidelberg: Springer, 2007. p. 149-161.

MCPHERSON, J.W. **Reliability Physics and Engineering**: time-to-failure modeling. Londres: Springer, 2010.

MILHOR, C. E. **Sistema de Desenvolvimento para Controle Eletrônico para Motores de Combustão Ciclo Otto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

MODARRES, M. Probabilistic risk assessment. In: MISRA, K.B. (Org.). **Handbook of performability engineering**. Londres: Springer, 2008.

MODARRES, M. . **Probabilistic Risk Assessment**. Reliability Engineering Program, Universidade de Maryland. Maryland, 2006.

MODARRES, M.. **What Every Engineer Should Know about Reliability and Risk Analysis**. Nova York: CRC Press, 1992. 351 p.

MODARRES, M.; KAMINSKIY, M. P.; KRIVTSOV, V. **Reliability Engineering and Risk Analysis**: a practical guide. 2. ed. Nova York: Taylor and Francis Group LLC, 2009. 471 p.

MOUBRAY, J. **RCM II: reliability centered maintenance** second edition. 2. ed. Nova York: Industrial Press Incorporation, 2000. 426 p.

MYERS, A. **Complex System Reliability**: multichannel systems with imperfect fault coverage. 2. ed. Londres: Springer-Verlag, 2010. 238 p. (Springer Series in Reliability Engineering).

RODRIGUES, R. S. **Confiabilidade do produto e administração da qualidade**. Mogi das Cruzes: Formacon, 2011.

SALAMANI, J.C.; SOUZA, G.F.M. Risk Analysis and Reliability improvement in spark ignition engines associated to sporadic failures. **Safety and Reliability of complex engineered systems**. Zürich, 2015

SÃO PAULO (Estado). Secretaria do Meio Ambiente. <http://www.ambiente.sp.gov.br>

SILVERMAN, M. **Highly Accelerated Life Test and Accelerated Life Test**. Santa Clara (Califórnia): IEEE, 2015.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. SAE J1979 - E/E **Diagnostic Test Modes**. SAE, Detroit, 1998.

STOTSKY, A. A. **Automotive Engines**: control, estimation, statistical detection. Berlin/Heidelberg: Springer, 2009.

U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE. **MILITAR STANDARD MIL-STD-1635**: reliability growth testing. Washington DC, 1989.

U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE. **MILITAR STANDARD MIL-HDBK-189**: reliability growth management, Washington DC, 1981.

U.S. DEPARTMENT OF DEFENSE. **MILITAR STANDARD MIL-STD-883E**. Washington DC, 1996

VASSILIOU, P.; METTAS, A.; EL-AZZOUZI, T. Quantitative accelerated life-testing and data analysis. In: MISRA, K. B. **Handbook of Performability Engineering**. Londres: Springer, 2008.