

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

**SISTEMA DE PARTIDA A FRIO PARA MOTORES
FLEX FUEL COM AQUECIMENTO DO AR DE
ADMISSÃO E DO ETANOL INJETADO**
Núcleo Universitário Coração Eucarístico

LUÍS CARLOS MONTEIRO SALES

Belo Horizonte
2010

Luís Carlos Monteiro Sales

SISTEMA DE PARTIDA A FRIO PARA MOTORES *FLEX FUEL* COM AQUECIMENTO DO AR DE ADMISSÃO E DO ETANOL INJETADO

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: José Ricardo Sodré, Ph.D.

Belo Horizonte

2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

S679s Sales, Luís Carlos Monteiro
Sistema de partida a frio para motores *flex fuel* com aquecimento do ar de
admissão e do etanol injetado / Luís Carlos Monteiro Sales. Belo Horizonte,
2010.
162f. : Il.

Orientador: José Ricardo Sodré
Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

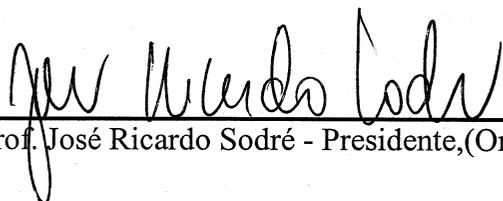
1. Álcool. 2. Automóveis - Motores. I. Sodré, José Ricardo. II. Pontifícia
Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 669.14

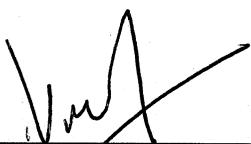
Luís Carlos Monteiro Sales
SISTEMA DE PARTIDA A FRIO PARA MOTORES FLEX FUEL COM AQUECIMENTO DO
AR DE ADMISSÃO E DO ETANOL INJETADO

Tese de Doutorado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica.

Belo Horizonte, 26 de novembro de 2010



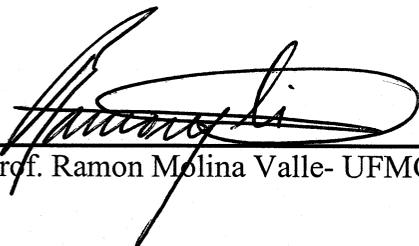
Prof. José Ricardo Sodré - Presidente,(Orientador) - PUC Minas



Prof. João Nildo de Souza Vianna – UnB



Prof. Rudolf Huebner- UFMG



Prof. Ramon Molina Valle- UFMG



Prof. Sérgio de Moraes Hanriot- PUC Minas

***À minha esposa Ana e aos meus filhos Luís Gustavo e Mariana,
que constituem a razão do meu esforço.
À minha mãe Laurita, a quem prometi esta conquista,
e ao meu pai Agílio (in memorian), um exemplo de persistência.
À minha querida irmã Maria das Graças (in memorian)
que me acompanhou desde o meu primeiro dia na escola.***

AGRADECIMENTOS

Ao Diretor de Engenharia do Produto da FPT – Powertrain Technologies, Eng. João Irineu Medeiros, pelo apoio e confiança em meu potencial.

Ao Superintendente da FPT – Powertrain Technologies, Dr. Franco Ciranni, que incentiva e apoia a inovação tecnológica como garantia do futuro.

Ao Prof. Dr. José Ricardo Sodré, pela orientação, aprendizado e incentivo.

Aos meus colegas professores, ex-alunos e alunos e todos os funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC Minas, que incentivaram e entenderam os momentos difíceis durante a realização deste trabalho.

Aos meus colegas da FPT – Powertrain Technologies, que se esforçaram em razão da amizade e vocação inovativa e tecnológica, constituindo de forma espontânea a equipe que colaborou para a execução deste trabalho: Wesley Ferreira Leal, Luciano Andrade Martins, Wesley Lino, Adão Quirino, Eng^o Robinson Ferrari Barbosa, Eng^o Frederico Mesquita Vilela Oliveira, Eng^o Mário Luciano Randazzo, Eng^a Daniela Pinto Cirilo, Eng^o Cláudio Santana, Eng^o Zozimo Valdivino da Silva, Eng^o Júlio César Duarte e ao Químico Luiz Akira Nakamura.

Ao Prof. Dr. Rudolf Hubner, pelos conhecimentos e conselhos durante o curso de Doutorado e parceira nas produções científicas e tecnológicas.

À equipe da Experimentação de Motores da FPT – Technologies que além de incentivar me apoiaram nos momentos mais difíceis ao longo desta jornada.

À FPT - Powertrain Technologies, pela oportunidade de desenvolvimento, superação de desafios e bolsa de estudos concedida.

Aos meus irmãos e irmãs e todos os familiares e amigos, que se preocupam comigo, meus sinceros agradecimentos.

Ao apoio dos meus grandes amigos e incentivadores, Dra. Ranice de Carvalho Machado (*in memoriam*) e Prof. José Clóvis Machado (*in memoriam*).

Tudo se realiza com devoção a Deus e a São Judas Tadeu.

***"Nunca ande pelo caminho traçado,
pois ele conduz somente até onde os
outros foram."***

Graham Bell

RESUMO

O sistema de partida a frio convencional de motores bi-combustível (*flex fuel*) introduz gasolina no sistema de admissão quando o veículo é abastecido somente com etanol hidratado ou com misturas gasolina-etanol com alta concentração de etanol. O sistema é necessário para possibilitar a ignição da mistura combustível-ar sob baixas temperaturas, devido à elevada energia de vaporização do etanol em relação à gasolina. A evolução de motores *flex fuel* aponta para a possibilidade de operação com etanol somente, sem necessidade da utilização de gasolina para a partida a frio. Esse trabalho apresenta uma análise experimental detalhada de um novo sistema de partida a frio para motores *flex fuel* com aquecimento do etanol injetado e do ar de admissão, sem o uso de gasolina. Os resultados experimentais demonstraram que o novo sistema possibilita partidas do motor utilizando etanol hidratado em menos de 2 s sob temperaturas de até 0°C, além de reduzir as emissões de hidrocarbonetos e monóxido de carbono na exaustão.

Palavras-chave: Etanol; Partida a Frio; Emissões; Motores de Combustão Interna

ABSTRACT

The conventional cold start system for flexible fuel engines introduces gasoline in the intake system when the vehicle is fueled with hydrous ethanol only or with high ethanol content gasoline-ethanol blends. The system is necessary to allow for ignition of the fuel-air mixture under low temperatures, due to the high vaporization temperature of ethanol in comparison with gasoline. The evolution of flexible fuel engines leads to the possibility to operate with ethanol only, without the need to use gasoline for cold start. This work presents a detailed experimental analysis of a new cold start system for flexible fuel engines with heating of the injected ethanol and the intake air, without the use of gasoline. The experimental results demonstrated that the new system makes possible engine start using hydrous ethanol in less than 2 s under temperatures as low as 0°C, apart from reducing hydrocarbons and monoxide carbon exhaust emissions.

Keywords: Ethanol; Cold Start; Emissions; Internal Combustion Engines

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Percentual de venda de veículos a etanol e <i>flex fuel</i> em relação ao total de vendas de veículos no Brasil.....	25
Fonte: Anuário da ANFAVEA – 2010	25
Figura 2: Evolução dos limites de emissões.....	31
Figura 3: Valores de pressão de vapor do etanol medidos e comparados com	35
Figura 4: Sistema de partida a frio com introdução de gasolina por furo calibrado.	40
Figura 5: Sistema de partida a frio com introdução de gasolina com eletroinjeter..	41
Figura 6: Comparativo dos tempos de partida a frio.....	41
Figura 7: Distribuidor de combustível com eletroinjeter.	42
Figura 8: Vista posterior do coletor de admissão com o distribuidor de combustível com o eletro-injetor (esquerda) e furos calibrados nos ramos do coletor (direita).....	43
Figura 9: Vista Lateral do coletor com o distribuidor.....	43
Figura 10: Características do jato de etanol sem aquecimento (esquerda) e aquecido (direita).....	45
Figura 11: Hidrocarbonetos provenientes da fenda no topo do cilindro e da camada de óleo.....	48
Figura 12: Comportamento das emissões de HC nos 10 primeiros ciclos após a partida a frio.	49
Figura 13: Comportamento das emissões de hidrocarbonetos 20 ciclos iniciais. ..	50
Figura 14: Variação da concentração de HC, CO, e NO na exaustão de um motor convencional com o ciclo Otto com a razão de equivalência combustível/ar.	51
Figura 15: Influência do combustível (etanol hidratado e gasolina E22) nas emissões de NO _x com motor aquecido em dinamômetro.	52
Figura 16: Comportamento das emissões acumuladas de THC antes e depois do catalisador das configurações com e sem aquecimento do Etanol.....	54
Figura 17: Comportamento das emissões acumuladas de CO antes e depois do catalisador das configurações com e sem aquecimento do Etanol.....	54
Figura 18: Emissões de HC antes do catalisador relativas à concentração total emitida na primeira fase do ciclo FTP-75, para duas configurações de sistema de partida a frio.	55

Figura 19: Emissões de CO antes do catalisador relativas à concentração total emitida na primeira fase do ciclo FTP-75, para duas configurações de sistema de partida a frio.	56
Figura 20: Emissões de NO _x antes do catalisador relativas à concentração total emitida na primeira fase do ciclo FTP-75, para duas configurações de sistema de partida a frio.	56
Figura 21: Emissões de aldeídos após o catalisador relativas à concentração total emitida na primeira fase do ciclo FTP-75	57
Figura 22: Eficiência de conversão de HC na primeira fase ciclo do ciclo FTP-75. 57	
Fonte: Sales (2001).....	57
Figura 23: Eficiência de conversão de CO na primeira fase do ciclo ciclo FTP-75. 58	
Fonte: Sales (2001).....	58
Figura 24: Efeito da razão de equivalência da mistura nas emissões de aldeídos. 59	
Figura 25: Volume de controle do ar no coletor de admissão.....	62
Figura 26: Coletor de admissão com o corpo de borboleta, a resistência elétrica para o aquecimento do ar e os condutos do cabeçote.....	62
Figura 27: Volume do ar dentro do coletor de admissão.	63
Figura 28: Corpo de borboleta e o detalhe do volume de controle.	63
Figura 29: Detalhe do volume do aquecedor de ar.....	64
Figura 30: Volume de controle do etanol.	64
Figura 31: Representação do volume de etanol dentro do porta-eletoinjeter.	65
Figura 32: Coletor de admissão com a galeria de combustível com os injetores, corpo de borboleta e entradas de gasolina do sistema partida a frio convencional. .	73
Figura 33: Cabeçote com os os respectivos condutos para cada cilindro motor. ...	73
Figura 34: Bancada de testes com o todos componentes. (1) detalhe do cabeçote, coletor de admissão e compressor de ar, (2) detalhe do aquecedor de ar abaixo do corpo de borboleta e (3) vista superior do corpo de borboleta com borboleta aberta e resistências do aquecedor de ar.	74
Figura 35: Detalhes do sistema de aquecimento do etanol no coletor admissão. .	74
Figura 36: Modulador da freqüência de abertura e fechamento eletroinjetores.....	75
Figura 37: Esquema elétrico do sistema de aquecimento do ar e do etanol da bancada testes.....	76
Figura 38: Esquema da instalação dos termopares para medição das temperaturas do ar e do etanol.	77

Figura 39: Seção de um duto do cabeçote na região de incidência do jato de etanol na entrada do cilindro.....	77
Figura 40: Esquema dos sistemas de partida a frio convencional e de alimentação de combustível.	80
Figura 41: Isolamento térmico com cortiça dos porta-eletoinjetores para os testes em veículo.	81
Figura 42: Esquema elétrico do sistema de aquecimento do ar e do etanol instalado no veículo.....	81
Figura 43: Comportamento da tensão e corrente elétrica de alimentação do aquecedor de ar e da resistência elétrica para aquecimento do etanol durante a partida (350 rpm).....	82
Figura 44: Pontos de medição de temperaturas ar, do etanol e velocidade do ar.	83
Figura 45: Laboratório para ensaios de emissões de poluentes.....	86
Figura 46: Laboratório para ensaios de emissões de poluentes.....	87
Figura 47: Esquema do sistema de amostragem de aldeídos.	89
Figura 48: Representação do ciclo urbano para determinação das emissões pelo escapamento de um veículo conforme a NBR 6601.	91
Figura 49: Temperaturas do ar no duto de saída, do etanol no acoplamento do eletroinjeter com o porta-eletroinjeter e da mistura ar/etanol na entrada do cilindro.	95
Figura 50: Temperaturas do ar no duto de saída, do etanol no acoplamento do eletroinjeter com o porta-eletroinjeter e da mistura ar/etanol na entrada do cilindro com o motor sem combustão.	97
Figura 51: Tempo de partida a 0 °C (800 rpm) e temperaturas do ar no duto de saída, do etanol no acoplamento do eletroinjeter com o porta-eletroinjeter e da mistura ar/etanol na entrada do cilindro.	98
Figura 52: Temperaturas do etanol e do ar em função da ativação e desativação do sistema de aquecimento durante os 150 s iniciais do “COLD” 505.	100
Figura 53: Temperaturas do ar aquecido e sem aquecimento na saída do duto durante os 150 s iniciais do “COLD” 505.....	101
Figura 54: Temperaturas da mistura ar/etanol com e sem aquecimento durante os 150 s iniciais do “COLD” 505.....	102
Figura 55: Temperaturas da mistura ar/etanol na entrada dos cilindros 1 e 4 com e sem aquecimento durante os 200 s iniciais do “COLD” 505.	103

Figura 56: Emissões relativas de hidrocarbonetos totais medidas antes do catalisador durante a fase I do ciclo de emissões.	104
Figura 57: Emissões relativas de monóxido de carbono medidas antes do catalisador na fase I do ciclo de emissões.	106
Figura 58: Razão de equivalência da mistura ar/combustível na fase I do ciclo de emissões.	107
Figura 59: Emissões relativas de óxidos de nitrogênio medidas antes do catalisador na fase I do ciclo de emissões.	108
Figura 60: Emissões totais de hidrocarbonetos, monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio medidas antes do catalisador na fase I (505 s) do ciclo de emissões.	109
Figura 61: Emissões totais de hidrocarbonetos, monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio medidas após o catalisador na fase I (505 s) do ciclo de emissões.	110
Figura 62: Emissões totais de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e aldeídos, medidas após o catalisador no ciclo de emissões FTP-75 completo.	111

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 Características físico-químicas da gasolina e do etanol.....	18
TABELA 2 Limites de emissões do PROCONVE nas Fases IV e V.....	31
TABELA 3 Comparativo das propriedades dos combustíveis.	34
TABELA 4 Resultados dos testes de partida a frio com aquecimento somente ar....	46
TABELA 5 Resultados dos tempos de partida a frio a 0°C.	125
TABELA 6 Resultados das temperaturas da mistura medidas nos testes em bancada a 0°C após 2,0 s do início do escoamento de ar e et anol aquecidos.....	126
TABELA 7 Resultados das emissões de THC, CO, e NO _x medidas antes do catalisador no ciclo “COLD” 505.....	126
TABELA 8 Resultados das emissões THC, CO, NO _x e aldeídos medidas depois do catalisador no ciclo “COLD 505.....	127
TABELA 9 Resultados das emissões THC, CO e NO _x , aldeídos e NMHC medidas depois do catalisador no ciclo FTP 75.....	128

LISTA DE SÍMBOLOS

% v/v	Partes por cento em volume
A/F	Relação ar/combustível (adimensional)
A/F _S	Relação ar/combustível estequiométrica (adimensional)
D	Distância (m)
$(dE/dt)_{acumulada}$	Energia térmica acumulada no volume de controle (kJ/s)
g	Aceleração da gravidade (m/s ²)
h_c	Entalpia específica de combustível (kJ/kg)
h	Coeficiente convectivo (W/m ² K)
k	Condutividade térmica (W/mK)
m	Massa (kg)
\dot{m}	Vazão mássica do fluido (kg/s)
m_f	Taxa de escoamento de massa (kg/h)
n	Rotação do motor (rev/min)
n	Número de medições realizadas
P	Potência do motor (kW)
p	Pressão (Pa);
\dot{q}	Taxa de calor absorvido e perdido (W/m ²);
Q	Calor (kJ)
Re _{FI}	Repetitividade da fonte de incerteza;
$\bar{s}(t)$	Desvio padrão experimental da variável tempo (t).
S _M	Somatório das forças (N)
T _{ar saída}	Temperatura nas saídas dos dutos nas válvulas de admissão (°C)
T _{etanol entrada}	Temperatura do etanol na entrada do porta eletro-injetor (°C)
T _{etanol acoplamento}	Temperatura do etanol na região interna do porta eletro injetor (°C)
T _{etanol mistura}	Temperatura do jato de etanol misturado com ar (°C)
t _{WOT}	Período mínimo de borboleta totalmente aberta (s)
U _{95%}	Incerteza expandida das medições com nível de confiança de 95%
V _{cil}	Volume total deslocado em um ciclo do motor (m ³)

v	Volume específico (m^3/kg)
V	Velocidade (m/s)
u	Vetor velocidade (m/s)
μ_T	Viscosidade turbulenta (kg/m.s)
c_p	Calor específico a pressão constante ($\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$)
β	Coeficiente de expansão térmica (adimensional)
$\Delta\chi$	Fração de combustível queimado (adimensional)
ϕ	Razão de equivalência da mistura combustível/ar (adimensional)
η_f	Eficiência de conversão de combustível (adimensional)
λ	Razão de equivalência da mistura ar/combustível (adimensional)
μ	Viscosidade dinâmica (kg/m.s)
ν	Viscosidade cinemática (m^2/s)
ρ	Massa específica (kg/m^3)
ρ_{cil}	Massa específica do ar no cilindro (kg/m^3)
ρ_a	massa específica do ar aquecido na admissão (kg/m^3);
Φ	Função da dissipação viscosa
$\sigma(t)$	Desvio padrão experimental da variável do tempo (t)
u_t	Energia interna específica total (kJ/kg)
ω	Frequência ou rotação do motor (rev/min).
\dot{W}	Trabalho específico transferido na fronteira do volume de controle (kJ/kg)
z	Coordenada de posição (m)

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACN	Acetonitrila
AEAC	Álcool Etílico Anidro Combustível
AF	relação estequiométrica ar / combustível
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
AVC	Amostragem de Volume Constante
BEN	Balanco Energético Nacional
bfsc	brake fuel specific consumption
bmep	brake mean effective pressure
CETESB	Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental
CFD	<i>Computacional Fluid Design</i>
CLD	<i>Chemiluminescent Detector</i>
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CVS	<i>Constant Volume Sampler</i>
DNPH	Dinitrofenilhidrazina
EU	União Européia
ECU	<i>Engine Control Unit</i>
EOBD	<i>European On-Board Diagnosis</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EUA	Estados Unidos da América
FID	<i>Flame Ionization Detector</i>
FOS	Fração Orgânica Solúvel
FPT	Fiat Powertrain Technologies
FTP	Federal Test Procedure
GNV	Gás Natural Veicular
HC	Hidrocarboneto
HPLC	Cromatografia Líquida de Alta Eficiência

IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IC	Índice de Cetano
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
INPI	Instituto Nacional de Propriedade Industrial
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LIF	fluorescência induzida a “laser”
LQ	Luminescência Química
MIC	Ministério da Indústria e Comércio
MON	Motor Octane Number
MPI	Multi Point Injection
MTBE	Metil-t-Butil-Éter
NDIR	<i>Non-Dispersive Infrared Detector</i>
NO _x	Óxido de Nitrogênio
OBD	On Board Diagnostic
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCMCIA	<i>Personal Computer Memory Card International Association</i>
PCS	Poder Calorífico Superior
PCT	Tratado de Cooperação em Patentes dos Países da Europa
PROÁLCOOL	Programa Nacional do Álcool
Proconve	Programa Nacional de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores
RON	Research Octane Number
rpm	Rotações por minuto
SAE	<i>Society of Automotive Engineering</i>
SPF	Sistema de Partida a Frio com Injetor - Ajuste do controle de injeção com menos álcool nas acelerações a frio
TDC	<i>Top Dead Cylinder</i>
THC	<i>Total Hydrocarbons</i>
UE	União Européia
USA	<i>United States of America</i>
USDA	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos
VVA	<i>Variable Valve Actuation</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos	16
1.3 Evolução e estado-da-arte dos sistemas de partida a frio	19
1.4 Novo sistema de partida a frio	21
1.5 Histórico da utilização do etanol como combustível no Brasil.....	22
1.6 Emissões de poluentes e gases de efeito estufa	27
1.7 Estrutura da tese	32
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1 Propriedades Físico-Químicas do Etanol.....	33
2.2 Partida e funcionamento a frio.....	36
2.3 Utilização da gasolina na partida a frio	39
2.4 Sistemas de partida a frio sem adição de substâncias voláteis ao etanol...44	
2.5 Efeitos da partida e funcionamento a frio nas emissões de poluentes.....46	
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	61
3.1 Volumes de controle do ar de admissão e do etanol.....	61
3.3 Equações de conservação de massa e energia para volumes de controle .65	
3.4 Formação de HC, CO, NO _x e CHO.....	68
4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	72
4.1 Testes em bancada	72
4.1.1 <i>Aparato experimental para testes em bancada</i>	72
4.1.2 <i>Procedimento experimental para os testes em bancada</i>	78
4.2 Análise experimental em veículo	79
4.2.1 <i>Sistema de aquecimento do ar de admissão e do etanol</i>	79
4.2.2 <i>Registro dos parâmetros do sistema de controle do motor</i>	84
4.2.3 <i>Procedimento dos testes de partida a frio</i>	84
4.2.4 <i>Aparato para os testes de emissões</i>	85

4.2.5 Procedimento dos testes de emissões	89
4.6 Análise de incerteza	92
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	94
5.1 Testes preliminares do sistema de partida a frio em bancada.....	94
5.2 Testes do sistema de partida a frio em veículo	96
5.3 Testes emissões de poluentes.....	99
6 CONCLUSÕES	112
6.1 Testes em bancada dentro da câmara fria.....	112
6.2 Testes de partida a frio em veículo.....	112
6.3 Testes de emissões de poluentes	113
6.4 Sugestões para trabalhos futuros	114
REFERÊNCIAS.....	115
APÊNDICE A – TABELAS DE RESULTADOS.....	125
APÊNDICE B – ANÁLISE DE INCERTEZAS.....	129
ANEXO I – ARTIGO SAE 2009	137
ANEXO II – ARTIGO SAE 2010	144
ANEXO III – CERTIFICADO DE PATENTE PARA PAÍSES DA EUROPA (PCT)..	160
ANEXO IV – PROCESSO DE PATENTE BRASIL (INPI).....	161
ANEXO V – CERTIFICADO DE PATENTE DO SISTEMA DE PARTIDA A FRIO COM 5º ELETRO-INJETOR - BRASIL.....	162

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os objetivos gerais e específicos e as justificativas que motivaram a realização deste trabalho. Para uma melhor contextualização do trabalho também são apresentados o estado da arte, a evolução dos sistemas de partida a frio e as contribuições científicas desta pesquisa. A abrangência do trabalho é consolidada por um breve histórico sobre a utilização do etanol no Brasil, acompanhado de considerações sobre as emissões de poluentes por veículos automotores e as relações com a utilização do etanol, além de uma abordagem sobre o programa de controle de emissões de poluentes, que impulsiona os avanços científicos e tecnológicos na indústria automotiva.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma avaliação experimental de um novo sistema de partida a frio para motores *flex fuel* que permite o aquecimento do ar de admissão e do etanol para auxílio na partida e operação com etanol hidratado (E100) sob baixas temperaturas ambiente. A maior parte da mistura ar-etanol é formada pelo ar (aproximadamente nove partes de ar para uma de combustível). Assim, ao aquecer o ar, será possível minimizar as perdas de calor do etanol em relação ao seu aquecimento isolado. Desta forma, será possível eliminar o sistema convencional de partida a frio que utiliza a gasolina introduzida no coletor de admissão dos motores. A finalidade do novo sistema é a obtenção de uma temperatura favorável à combustão da mistura ar-etanol sob baixas temperaturas. A análise experimental se concentra na análise conjunta dos volumes de controle compreendidos pelo ar no coletor de admissão e pelo porta-injetor de etanol.

Este trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar experimentalmente as condições de estado e movimento do ar de admissão e do etanol injetado para obtenção e controle da temperatura da

- mistura ar-etanol adequada para a operação do motor à temperatura ambiente de 0°C, com o auxílio de uma simulação numérica preliminar;
- b) Projetar e construir um protótipo de um novo sistema de partida a frio que permita o aquecimento do ar de admissão e do etanol para testes iniciais em bancada e, posteriormente, em veículo, sem utilização de gasolina;
 - c) Realizar testes de partida a frio à temperatura ambiente de 0°C em um veículo e comparar o sistema protótipo com o sistema convencional;
 - d) Verificar experimentalmente os efeitos do sistema protótipo nas emissões de poluentes na exaustão do veículo.

As contribuições científicas inéditas deste trabalho são:

- a) Estabelecimento do estado termodinâmico que deve ser atingido pelo ar de admissão e pelo etanol injetado para possibilitar a partida a frio do motor;
- b) Análise das taxas de calor que devem ser transferidas aos fluidos para a obtenção do estado termodinâmico propício à vaporização do etanol injetado;
- c) Determinação da influência da condição obtida com o aquecimento dos fluidos sobre as emissões de poluentes.

1.2 Justificativa

As propriedades físico-químicas do etanol influenciam diretamente no início de funcionamento de um motor de combustão interna sob baixas temperaturas. Comparado com a gasolina, o etanol necessita de aproximadamente o dobro de energia para vaporização (105 kcal/kg contra 237 kcal/kg). A temperatura na qual se inicia a vaporização do etanol é 13 °C, enquanto a gasolina se vaporiza a – 40 °C. O ponto de ebulição do etanol é 78 °C, ao passo que os hidrocarbonetos mais leves que constituem a gasolina entram em ebulição a 40 °C. Estas características, mostradas na Tab. 1, também contribuem para níveis elevados de emissões de poluentes como hidrocarbonetos (HC), monóxido de carbono (CO) e aldeídos (HCO) durante o período de aquecimento do motor.

Para superar esta deficiência os fabricantes atualmente utilizam um sistema auxiliar de alimentação de gasolina. A gasolina é adicionada no instante da partida a frio e durante acelerações enquanto o motor ainda não atingiu a temperatura ideal de operação. Apesar deste sistema reduzir os problemas relacionados ao funcionamento a frio de motores alimentados por etanol puro (E100) ou misturas de gasolina com alta concentração de etanol, a eliminação da necessidade de uso de gasolina na partida a frio de motores se constitui em um grande desejo. As principais razões são: envelhecimento da gasolina por falta de utilização do sistema fora do período de inverno, desconforto do usuário devido à necessidade de abastecimento de gasolina em um reservatório auxiliar e maior dificuldade para o cumprimento dos limites de emissões de poluentes. Pesquisas indicam que o aquecimento do etanol permite uma redução considerável nas emissões de hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO), mesmo após o período de aquecimento do motor (KABASIN et al. 2009, 2010). Além disso, é possível melhorar a dirigibilidade e utilizar misturas combustível/ar mais pobres, reduzindo o consumo de combustível.

TABELA 1
Características físico-químicas da gasolina e do etanol.

PARÂMETROS	GASOLINA	ETANOL
	COM 22% DE AEAC	HIDRATADO
Densidade absoluta (kg/l)	0,74	0,81
Poder calorífico inferior (kcal/kg)	9400	5970
Relação A/F estequiométrica	13,07 : 1	8,70 : 1
Estrutura química	$C_{6,39}H_{13,60}O_{0,61}$	$C_2H_{6,16}O_{1,08}$
Teor de carbono (% massa)	76,7	50,59
Teor de hidrogênio (% massa)	13,6	12,98
Teor de oxigênio (% massa)	9,7	36,42
Teor de enxofre (% massa)	0,09	0
Temperatura de autoignição (°C)	400	420
Ponto de ebulição (°C)	40 a 220	78
Calor latente de vaporização (kcal/kg)	105	237
Octanagem RON	-	106
Octanagem MON	80	87
Pressão de vapor (bar)	27,5	29

Fonte: Amaral, 2000.

No presente trabalho, o aquecimento do etanol visa atingir temperaturas acima do seu ponto de fulgor, de 13 °C. Abaixo desta temperatura a combustão do etanol ocorre de forma dificultosa, pois a quantidade de etanol evaporado pode não ser adequada para a combustão da mistura ar/combustível. O aquecimento do ar é necessário para minimizar a perda de calor do etanol aquecido após ser injetado no sistema de admissão.

1.3 Evolução e estado-da-arte dos sistemas de partida a frio

O sistema de partida a frio convencional é constituído por um pequeno reservatório de gasolina, uma eletrobomba e uma eletroválvula, que proporcionam a adição da gasolina no sistema de admissão de ar para o motor através de uma tubulação e um ou mais furos calibrados posicionados no coletor de admissão (SALES et al. 2007, 2009,). A gasolina é adicionada no instante da partida a frio, assim como em situações de aceleração enquanto o motor ainda não atingiu a temperatura ideal de trabalho. A temperatura do motor e a temperatura ambiente são monitoradas pelos sensores de temperatura da água do motor e sensor de temperatura do ar de admissão. Com estas informações, a central eletrônica de injeção e ignição comanda o funcionamento do sistema auxiliar de partida a frio, proporcionando o funcionamento da eletrobomba e a abertura do eletroválvula para a passagem da gasolina. A quantidade de gasolina é controlada pela central eletrônica de injeção e ignição através do tempo de funcionamento da eletrobomba.

Outra técnica de melhoria da partida e dirigibilidade a frio, que pode ser utilizada conjuntamente com a adição de gasolina, é o aquecimento do ar de admissão do motor pelo gás de exaustão (SALES et al. 2008, 2009). O ar quente gera um aumento da taxa de evaporação do etanol, proporcionando uma mistura ar-combustível em melhores condições para combustão e dirigibilidade. Este sistema normalmente é composto de um filtro de ar remoto, constituído por uma tomada dupla de ar (quente e frio), com uma válvula para dosagem da quantidade de ar quente ou frio destinado à admissão. A válvula permite a entrada de ar quente, se o motor estiver frio, e de ar frio após o adequado aquecimento do motor. Entretanto, no instante da partida não existe ar aquecido, ficando a partida a frio na

dependência da adição de gasolina. Este sistema de aquecimento de ar de admissão pelo gás de exaustão somente é eficaz para a dirigibilidade a frio.

Para a melhoria da partida a frio e dirigibilidade durante o aquecimento do motor, tendo por consequência a diminuição dos níveis de emissão de poluentes, foi desenvolvido um sistema de partida a frio para motores a álcool que utiliza um bico injetor para introduzir a gasolina no coletor de admissão (SALES, 2001; SALES; SODRÉ, 2002, 2010). Para coletores de admissão de ramos longos o sistema utiliza dois bicos injetores, um para cada dois cilindros, posicionados próximos à válvula de admissão, conforme as patentes registradas no INPI, PI 9905212-1 e C1 99052121. A introdução de gasolina no coletor de admissão através de bicos injetores permite um melhor controle sobre a quantidade e forma de injeção da gasolina no momento da partida a frio e durante o período de aquecimento do motor. Este controle da gasolina de forma otimizada não é possível com o sistema convencional, ou seja, com a introdução de gasolina no coletor de admissão através de um tubo com furo calibrado.

Uma evolução do sistema de partida a frio com eletro-injetor para introdução da gasolina no coletor de admissão é o sistema com um distribuidor de combustível equipado com um eletro-injetor (SALES et al., 2007, 2009). Neste sistema é possível um controle apurado da introdução de gasolina, realizado pelo injetor. Sob o efeito da pressão e da elevada frequência de abertura e fechamento do eletro-injetor e do reduzido diâmetro dos furos calibrados, a gasolina é pulverizada nas proximidades das válvulas de admissão. Desta forma, minimizam-se as perdas para as paredes dos condutos de admissão e é possível reduzir o volume de gasolina injetada. Alguns sistemas recentes contemplam o aquecimento do etanol e, conseqüentemente, a eliminação da gasolina e de todo aparato necessário para constituição de um sistema auxiliar de partida a frio convencional (BRUNOCILLA; LEPSCH 2006, KABASIN et al. 2009, 2010). No sistema descrito no pedido de patente no INPI sob o número MU-7502050-5, o tempo necessário para o completo aquecimento do etanol pode ser muito longo em função da necessidade de aquecer antes o óleo que envolve uma serpentina para obtenção de uma temperatura desejável do etanol contido na serpentina. Já no sistema descrito no pedido de patente no INPI sob o número PI 0700422-2, o etanol é aquecido na pequena porção formada na região de acoplamento dos bicos injetores com a galeria de combustível. A quantidade de combustível aquecida pode ser insuficiente para as

acelerações a frio. O maior fluxo de combustível necessário nesta operação a baixas temperaturas pode não ser prontamente aquecido dentro do pequeno volume que compreende a porção entre a galeria e os bicos injetores.

Nos sistemas dos pedidos de patentes no INPI sob os números PI 04005182-3 e PI 04005181-5, o etanol aquecido isoladamente é introduzido no coletor de admissão e distante das válvulas de admissão. Neste caso pode ocorrer perda de calor no interior dos dutos, impedindo o etanol de atingir uma temperatura adequada antes de entrar na câmara de combustão. O ponto de fulgor (temperatura a partir da qual pode haver quantidade suficiente de vapor de combustível para a combustão) do etanol é de 13°C e a sua combustão abaixo desta temperatura é dificultosa. Em situações de funcionamento do motor sob temperaturas muito baixas tais sistemas podem se tornar ineficazes, pois, devido à perda de calor, uma quantidade considerável de etanol pode ficar depositada nas paredes dos dutos.

1.4 Novo sistema de partida a frio

O novo sistema de partida a frio proposto é composto por um aquecedor de ar posicionado no coletor de admissão juntamente com o corpo de borboleta. O aquecedor de ar é formado por resistências elétricas que permitem uma eficiente transferência de calor para o fluxo de ar que passa em direção às válvulas de admissão. O aquecimento do etanol é realizado por resistências elétricas posicionadas nos porta-injetores, ou seja, na porção da galeria de injetores destinada ao acoplamento dos mesmos. O aquecedor de ar e as resistências elétricas para aquecimento do etanol são comandados através de um circuito eletrônico, e são energizados eletricamente segundos antes da partida. Desta forma, no instante da partida o etanol no interior da galeria de combustível estará aquecido e o aquecedor de ar pronto para transferir calor para o fluxo de ar. Em uma aplicação de série este controle pode ser realizado pela central eletrônica do sistema de controle do motor. Sendo assim, é possível controlar e monitorar o funcionamento do sistema em condições de temperaturas ambientes menos favoráveis à combustão do etanol.

No novo sistema de partida a frio apresentado neste trabalho, após o acionamento do motor de partida, o ar aquecido no corpo de borboleta é forçado através do coletor de admissão em direção às válvulas de admissão. A borboleta é mantida aberta para permitir a presença da massa de ar aquecida na entrada dos cilindros sem comprometimento do tempo de partida a frio. Desta forma, é possível obter ar aquecido em tempos menores. Após o aquecimento pleno do motor, o ar frio é admitido normalmente através do sistema de circulação de ar normal do motor e as resistências elétricas que aquecem o etanol são desativadas. É importante ressaltar que o ar e o etanol podem ser aquecidos simultaneamente (ANEXOS I e II) ou isoladamente, em função das condições ambientais e do controle apurado da central eletrônica do motor. Este novo sistema de partida a frio está descrito na patente PCT/BR2006/000189 (EP 06790475.5 – Europa, que corresponde ao pedido PI 0504047-7 / C1 05040047.7, registrado no INPI – Brasil, Estados Unidos da América, Japão, Argentina, Japão e China), conforme os Anexos III e IV.

1.5 Histórico da utilização do etanol como combustível no Brasil

A partir do início do século XXI, o etanol passou a figurar como uma das principais alternativas energéticas mundiais. O aumento do preço do petróleo, que impacta diretamente no custo final da gasolina e outros derivados, e a necessidade contínua de diminuir as emissões de poluentes e de gases que provocam o aquecimento global são os principais motivos da ascensão dos combustíveis alternativos, em especial o etanol. A utilização de etanol como combustível iniciou-se há mais de 70 anos, mas, como o petróleo era abundante na época, não houve interesse na sua ampliação e desenvolvimento. Entretanto, a grande crise do petróleo que aconteceu no início da década de 1970, quando os países pertencentes à OPEP (Organização dos Países Produtores de Petróleo) fizeram do petróleo uma arma política e aumentaram demasiadamente o seu preço, mudou definitivamente o quadro energético mundial. O consumo mundial do petróleo e de seus derivados, principalmente das grandes potências, era muito elevado, sendo grande parte atribuída ao automóvel. Além deste fator econômico e estratégico, houve a constatação da possibilidade de esgotamento das jazidas de petróleo em

um futuro próximo. Desta forma, surgiram incentivos às pesquisas visando a utilização de combustíveis alternativos para automóveis.

Os principais combustíveis alternativos estudados foram os oxigenados (álcoois, éteres, etc.), óleos vegetais, combustíveis gasosos (hidrogênio, gás liquefeito do petróleo, gás natural, etc.) e sintéticos derivados do carvão. Alguns países passaram a utilizar o metanol como fonte alternativa, porém em pequena escala. No Brasil, o etanol é amplamente utilizado em função da intensa produção dos veículos *flex fuel*. Os óleos de origem vegetal (biodiesel) aparecem como uma grande alternativa ou complemento ao óleo diesel.

Para alavancar e estimular a produção e utilização do etanol no Brasil, promovendo a substituição da gasolina por etanol como combustível para veículos automotivos, foi criado na década de 1970 o Programa Nacional do Álcool, o PROÁLCOOL. Entre 1977 e 1979 houve uma expansão da produção de etanol de cana-de-açúcar, que foi o vegetal escolhido para produção deste combustível alternativo no Brasil. As facilidades territoriais, os aspectos climáticos favoráveis para a cultura da cana-de-açúcar e o domínio da tecnologia fizeram do etanol um combustível tipicamente brasileiro. Dois tipos de álcool carburante passaram a ser produzidos: o etanol anidro, que é um aditivo misturado com a gasolina, e o etanol hidratado, que é usado como combustível no automóvel.

No final da década de 1970, precisamente em 1978, um novo aumento brutal no preço do petróleo gerou uma nova crise internacional, provocando no Brasil um aquecimento no mercado de veículos a etanol e uma queda nas vendas dos veículos a gasolina. Entretanto, os proprietários de veículos acostumados com o funcionamento dos motores a gasolina se deparavam com alguns problemas dos veículos movidos a etanol. Dentre os principais problemas destacava-se a dificuldade de partida e funcionamento a frio e corrosão de peças do motor. A dificuldade da partida e funcionamento a frio ocorre porque o etanol hidratado possui um elevado calor latente de vaporização (0,744 MJ/l). Comparando-se com a gasolina, que possui um calor latente de vaporização de 0,325 MJ/l, verifica-se que o etanol necessita do dobro de energia para a vaporização. Além disso, o ponto de fulgor do etanol, ou seja, a temperatura na qual se inicia sua vaporização é 13 °C. Isto significa que dificilmente ocorre a combustão do etanol abaixo desta temperatura. Para a gasolina, em função das diversas frações de hidrocarbonetos, a vaporização pode se iniciar a -40 °C.

O início da década de 1980 foi marcado pela grande desconfiança do consumidor brasileiro em relação aos veículos movidos a etanol. Destacaram-se os problemas de manutenção e os rumores de possibilidade de insuficiência de etanol para atender a demanda. Os níveis de produção dos veículos a etanol foram mantidos estagnados. A partir de 1982, o governo brasileiro reagiu no sentido de incrementar a produção e vendas dos veículos a etanol, criando facilidades de financiamento e incentivos fiscais. Os fabricantes de veículos também investiram no sentido de melhorar a qualidade dos motores a etanol.

Para minimizar o problema da partida e funcionamento a frio os fabricantes passaram a implementar sistemas auxiliares de partida a frio nos veículos, normalmente adicionando gasolina no sistema de admissão do motor, formando uma mistura que possibilita uma combustão mais rápida. Com a finalidade de evitar a corrosão, as peças envolvidas no sistema de alimentação de combustível passaram a ser revestidas com zinco ou fabricadas em aço inoxidável, e os tanques de combustível revestidos com estanho. Com todo este esforço do governo e dos fabricantes, a comercialização dos veículos movidos a etanol no Brasil em meados da década de 1980 chegou à impressionante marca de 90% do total.

A Fig. 1 mostra o percentual das vendas de veículos movidos a etanol pelo total de veículos vendidos no Brasil de 1979 e 2009. Observa-se que, de 1979 a 1982, houve um aumento das vendas de veículos movidos a etanol, devido ao preço deste combustível ter se situado em torno de 60% do preço da gasolina. De 1982 até o final de 1988, as vendas atingiram quase 85% do mercado. Porém, em 1989, as vendas começaram a cair vertiginosamente, principalmente devido ao aumento do preço do etanol, que atingiu 80% do preço da gasolina naquele ano, à falta de abastecimento de etanol e à consequente perda de confiança do consumidor.

A partir de 1999, com o preço do etanol atingindo 40% do preço da gasolina, a produção de veículos a etanol foi novamente estimulada pelo governo através de programas de renovação da frota pública e da frota de carros de aluguel. A indústria automotiva no Brasil assumiu compromissos em favor do etanol combustível, como atender à demanda do mercado e investir em pesquisa e desenvolvimento dos veículos movidos a etanol. Entretanto, a retomada da produção de veículos movidos a etanol não ocorreu conforme o esperado. Em meados de 2001, as vendas de veículos a etanol no Brasil voltaram a registrar uma significativa demanda por estes modelos, embora ainda pequena em relação aos modelos movidos a gasolina. O

motivo foi a isenção de impostos para os taxistas e o fato do preço do etanol ter se situado, em média, cerca de 60% do preço da gasolina.

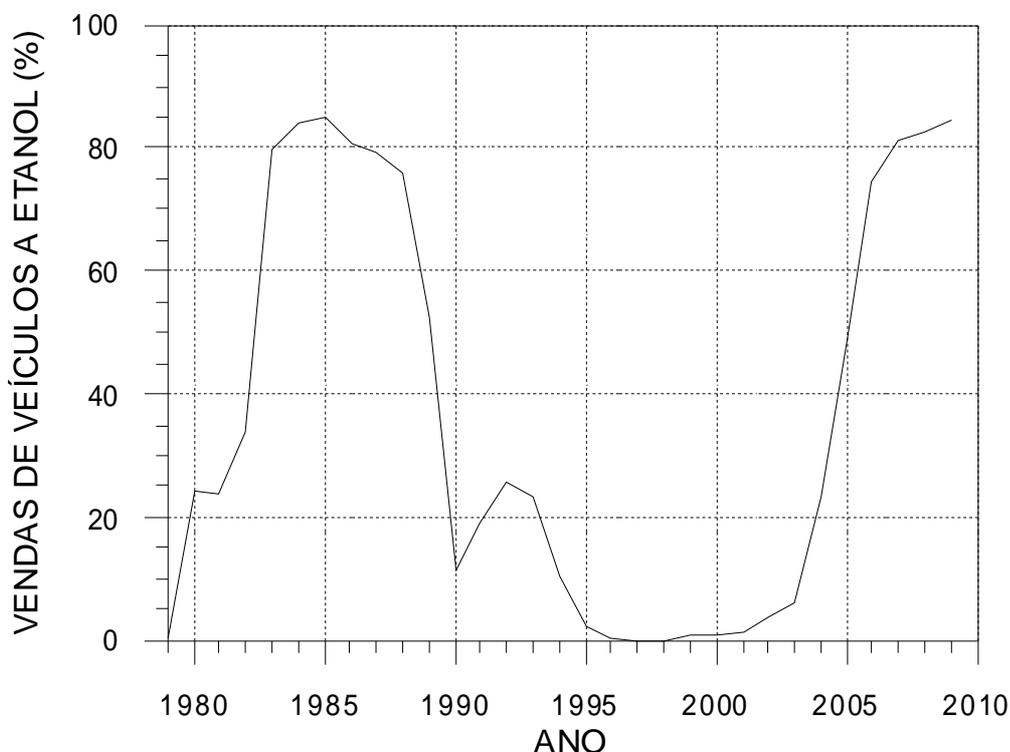


Figura 1: Percentual de venda de veículos a etanol e *flex fuel* em relação ao total de vendas de veículos no Brasil.

Fonte: Anuário da ANFAVEA, 2010

A partir de 2003, com o início da produção dos veículos *flex fuel* no Brasil, foram reacendidas a esperança e a confiança na possibilidade da utilização do etanol. A possibilidade de escolha entre gasolina ou etanol, além da mistura destes dois combustíveis, deixou os consumidores tranquilos com relação ao abastecimento de etanol, contrariamente ao ocorrido no final da década de 1980. A introdução do veículo bicombustível reverteu a tendência de decréscimo continuado no consumo de etanol hidratado. Esta retomada da demanda por etanol hidratado no Brasil iniciou uma nova fase com a produção crescente de veículos bicombustíveis, que alavancaram o mercado deste combustível e o crescimento das exportações. Eventuais aumentos de preço do etanol hidratado devido à redução de oferta apenas limitam momentaneamente a escolha deste combustível, mas não representa ameaça ao sucesso da tecnologia *flex fuel*. Costa e Sodré (2009) mostraram, através de análises do consumo específico de combustível, que a relação preço do etanol/preço da gasolina até 72% é o limite até o qual é mais

econômico o uso do combustível derivado da cana-de-açúcar. A Fig. 1 mostra a quase insignificante participação dos veículos a etanol de 1999 a 2003 e os expressivos e crescentes percentuais de venda dos veículos *flex fuel* de 2004 a 2009, evidenciando a confiança do consumidor brasileiro nesta tecnologia.

Com o sucesso da utilização do etanol no Brasil, vários países se voltaram para as possibilidades de produção em grande escala de combustíveis que podem fazer frente ao problema do aquecimento global e às oscilações e incertezas do preço do petróleo. Estados Unidos da América, México, Rússia, Austrália e Ucrânia são citados por Rasskazchikova et al. (2004) como seguidores do exemplo do Brasil. Neste sentido, o governo brasileiro avança em negociações para viabilizar a exportação do etanol e difusão da tecnologia produtiva a partir da cana-de-açúcar. Entretanto, entraves comerciais, o receio das implicações ambientais, como prejuízos às florestas nativas, e influência na produção alimentícia ainda não permitiram a proliferação mundial desta tecnologia genuinamente brasileiro.

O Brasil é um exemplo a ser seguido por outros países na utilização do etanol. Os veículos *flex fuel* participaram com 2,7 milhões dos 3,2 milhões de veículos leves comercializados no País em 2009. O aumento das vendas de veículos que utilizam etanol (ver Fig. 1) pode ser explicado principalmente pelo preço atrativo deste combustível em função dos incentivos do governo brasileiro para o aumento da sua produção de forma sustentável. A grande esperança de aceitação mundial do etanol brasileiro reside nas experiências deixadas pelas crises de preço e fornecimento dos derivados do petróleo nos últimos 40 anos. Os Estados Unidos também são um exemplo de utilização do etanol. Entretanto, o etanol utilizado naquele país é proveniente do milho e o combustível é denominado E85 (85% de etanol e 15% de gasolina). Em relação ao Brasil, a frota americana de veículos que utilizam etanol ainda é modesta e a produção do etanol a partir do milho, ao contrário da cana-de-açúcar, é realizada a um custo maior e uma produtividade menor. Conforme o estudo realizado por Balat e Balat (2009), o etanol proveniente da cana-de-açúcar no Brasil custa de US\$ 0,23 a US\$ 0,29 por litro, enquanto nos Estados Unidos da América o etanol produzido a partir do milho custa US\$ 0,53 por litro.

O Brasil conquistou, ao longo de mais de 30 anos, uma sólida estrutura tecnológica baseada em pesquisas para produção do etanol a partir da cana-de-açúcar e no desenvolvimento de motores adequados a este combustível. Como

resultado deste programa, o Balanço Energético Nacional (BEN, 2008) mostra que a cana-de-açúcar ultrapassou pela primeira vez, em 2007, a energia hidráulica como fonte de energia no país, ficando atrás apenas do petróleo e seus derivados. O cálculo contabilizou energia em geral, incluindo o setor de combustíveis, e não somente a geração de energia elétrica. A cana-de-açúcar atingiu um peso de 16% da matriz energética brasileira em 2008, deixando em terceiro lugar a energia hidráulica, com 14,7%. O petróleo e seus derivados tiveram peso de 36,7% na matriz energética brasileira. Este quadro qualifica o Brasil como protagonista mundial na utilização de fontes de energias renováveis.

1.6 Emissões de poluentes e gases de efeito estufa

Além dos fatores relacionados à economia mundial que reforçam as vantagens da utilização do etanol como combustível alternativo, outro aliado é a necessidade da redução das emissões de poluentes pelos veículos automotores. Este é um dos principais motivos para uma maior utilização de combustíveis alternativos como o etanol e o biodiesel. Os combustíveis derivados do petróleo são os vilões da economia mundial em função das crises que elevam os preços e, ao mesmo tempo, são mais poluentes que os combustíveis alternativos. Além da poluição atmosférica através das emissões de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), óxidos de nitrogênio (NO_x) e aldeídos (CHO), outra grande preocupação mundial é com as emissões de dióxido de carbono (CO₂), pois este é um agente causador do fenômeno climático conhecido por efeito estufa. Também neste aspecto a utilização do etanol da cana-de-açúcar se constitui em uma grande vantagem sobre os combustíveis fósseis, pois o CO₂ oriundo de sua combustão normalmente é reaproveitado pela própria cana-de-açúcar durante a fotossíntese.

O efeito estufa tem contribuído para o aumento da temperatura no globo terrestre nas últimas décadas. Pesquisadores do clima mundial afirmam que, o século XX foi o mais quente dos últimos 500 anos e que em um futuro próximo, o aumento da temperatura provocado pelo efeito estufa poderá favorecer o derretimento de gelo das calotas polares e o aumento do nível da água dos oceanos. Como consequência deste processo, muitas cidades localizadas no litoral poderão ser alagadas e desaparecer do mapa. O efeito estufa é em grande parte ocasionado pela derrubada de florestas e pela queimada das mesmas. As florestas

regulam a temperatura, os ventos e o nível de chuvas em várias regiões do planeta. A temperatura terrestre tem aumentado na mesma proporção em que as matas estão diminuindo no planeta.

O lançamento de produtos da queima de combustíveis fósseis, como o óleo diesel e a gasolina, é um fator importante que contribui para o efeito estufa. O CO₂ e o CO ficam concentrados em determinadas áreas da atmosfera, formando uma camada que bloqueia a dissipação do calor. Esta camada de poluentes, tão visível nos grandes centros urbanos, funciona como um isolante térmico do planeta Terra. A energia térmica fica retida nas camadas mais baixas da atmosfera, trazendo graves problemas climáticos e ecológicos ao planeta.

O etanol é considerado um combustível limpo, pois a sua utilização promove a obtenção de menores níveis de emissão de poluentes. Por ter adicionado de 20 a 25% de etanol anidro à gasolina, o Brasil passou a produzir um dos melhores combustíveis do mundo do ponto de vista ambiental, tornando-se pioneiro na utilização em larga escala da adição de compostos oxigenados à gasolina. Além disso, a compatibilidade entre o motor e o combustível é fundamental para o pleno aproveitamento dos benefícios, tanto no que se refere à redução das emissões quanto na melhoria do desempenho, dirigibilidade, consumo de combustível e manutenção mecânica. A disponibilidade no mercado brasileiro do etanol hidratado e da mistura de gasolina com etanol anidro desde o início da década de 1980 trouxe benefícios para o meio ambiente e para a saúde pública. Destaca-se a redução drástica das concentrações de chumbo na atmosfera, já que o etanol é também um antidetonante substituto dos aditivos à base de chumbo, retirados completamente do mercado brasileiro. A adição de etanol à gasolina, utilizada principalmente por veículos leves, trouxe reduções imediatas nas emissões de CO, CO₂ e outros gases que também colaboram para o efeito estufa.

Entretanto, durante a partida e o período de aquecimento, os motores operando com etanol apresentam níveis elevados de emissões de HC, CO e CHO, comparados aos níveis de emissões provenientes da combustão da gasolina. Esta constatação se deve principalmente às características físico-químicas do etanol, como o alto calor latente de vaporização, que dificultam a combustão a frio. Os recursos tecnológicos utilizados para corrigir os efeitos do etanol na partida e na dirigibilidade a frio também atenuam os níveis de emissões. A evolução dos sistemas de partida a frio dos veículos *flex fuel*, além de visar o maior conforto dos

usuários, minimizando as diferenças da utilização do etanol em relação à gasolina, também tem como foco a diminuição dos níveis de emissões de poluentes. Com o maior rigor das leis ambientais torna-se necessário um melhor controle das emissões veiculares, principalmente quando o motor e o catalisador ainda não atingiram temperaturas ideais de trabalho.

O Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE – foi instituído no Brasil em âmbito nacional pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA – em 1986. O PROCONVE estabeleceu um cronograma de redução gradual da emissão de poluentes para veículos leves (automóveis) e para veículos pesados (ônibus e caminhões). Baseado na experiência dos países desenvolvidos, o Programa adota procedimentos diversos para a implementação das tecnologias industriais já existentes, adaptadas às condições e necessidades brasileiras. O PROCONVE impõe ainda a certificação de protótipos e linhas de produção, a autorização especial do órgão ambiental federal para uso de combustíveis alternativos e o recolhimento e reparo dos veículos ou motores encontrados em desacordo com o projeto. O PROCONVE não permite a comercialização dos modelos de veículos não homologados conforme os critérios do programa legislativo.

O PROCONVE deu prioridade ao segmento de veículos leves devido ao seu grande número e utilização intensiva, o que o caracteriza como o maior problema em termos de poluição veicular. Para tanto, foram estabelecidos limites de emissão de poluentes no escapamento dos veículos. Para cumprir estes limites, foram necessários prazos para o desenvolvimento dos veículos e melhoria de especificações dos combustíveis. Consequentemente, possibilitou-se a aplicação de tecnologias e sistemas que aperfeiçoassem o funcionamento dos motores para proporcionar uma queima eficiente de combustível, obtendo-se a diminuição das emissões e do consumo de combustível.

A primeira fase implantada para os veículos leves (L-1 ou Fase I), em 1988, foi caracterizada pela eliminação dos modelos mais poluentes e aprimoramento da produção. Já na segunda fase (L-2 ou Fase II), em 1992, foram necessários o desenvolvimento e a introdução de novas tecnologias, em especial a injeção eletrônica de combustível e os conversores catalíticos. Nesta fase foi intensificado o desafio tecnológico, principalmente para permitir a adequação de catalisadores e sistemas de injeção eletrônica para uso com mistura de etanol e gasolina em

proporção única no mundo. Para a terceira fase (L-3 ou Fase III), que teve início em 1997, a indústria adicionou aos itens da segunda fase o sensor de oxigênio. Em 2007 foi concluída a quarta fase (L-4), e está prevista a implementação completa da quinta fase (L-5) para 2010. Essas duas últimas fases visam principalmente a redução de emissões de material particulado (MP), NO_x e HC.

A indústria automotiva trabalha no desenvolvimento de motores para atender aos níveis da quinta fase por meio da melhoria da combustão. Para tanto estão sendo adotadas novas tecnologias, como a melhoria da geometria da câmara de combustão e dos bicos, o aumento da pressão da bomba injetora e a injeção eletrônica. Para o futuro ainda está prevista a introdução de catalisadores de oxidação, filtro de material particulado e sistema de recirculação do gás de exaustão (EGR). A Fig. 2 apresenta a evolução dos limites de emissão de poluentes de acordo com as fases do PROCONVE.

A Tab. 2 apresenta os limites de poluentes para as fases IV e V, incluindo as emissões evaporativas. Os valores referentes à HC são aplicáveis somente a veículos com motores alimentados com gás natural veicular (GNV), enquanto os limites para hidrocarbonetos não metano (NMHC) referem-se aos veículos leves alimentados com qualquer combustível. Além do controle dos limites de emissões de poluentes pelos veículos, existe ainda o programa de monitoramento do sistema de controle de injeção de combustível e ignição do motor e dos componentes que impactam diretamente nas emissões de poluentes, conforme o estudo elaborado por Geraldo (2006). Para o mercado dos Estados Unidos da América o programa é denominado de OBD-II (*On Board Diagnostic*) e na Europa o programa recebe a denominação de EOBD (*European on Board Diagnostic*). No Brasil o programa é denominado de OBD-BR 1 e OBD-BR 2.

Na fase do OBD-BR1 o programa consiste no diagnóstico eletrônico dos seguintes componentes do motor: sensores de pressão e temperatura do ar, posição da borboleta, temperatura da água, teor de oxigênio, rotação e posição do eixo virabrequim, detonação e módulo de controle ou central eletrônica. O OBD-BR1 foi implementado em janeiro de 2007 para 40% do total de veículos produzidos e, em 2009, para 100% da produção. O OBD-BR2 consiste do conteúdo controlado no OBD-BR1, além do diagnóstico de funcionamento incorreto de componentes importantes para as emissões, como catalisadores e sensor de oxigênio (sonda

lambda). O OBD-BR2 foi implementado em janeiro de 2010 para 60% da produção de veículos leves e, a partir de janeiro de 2011, para 100%.

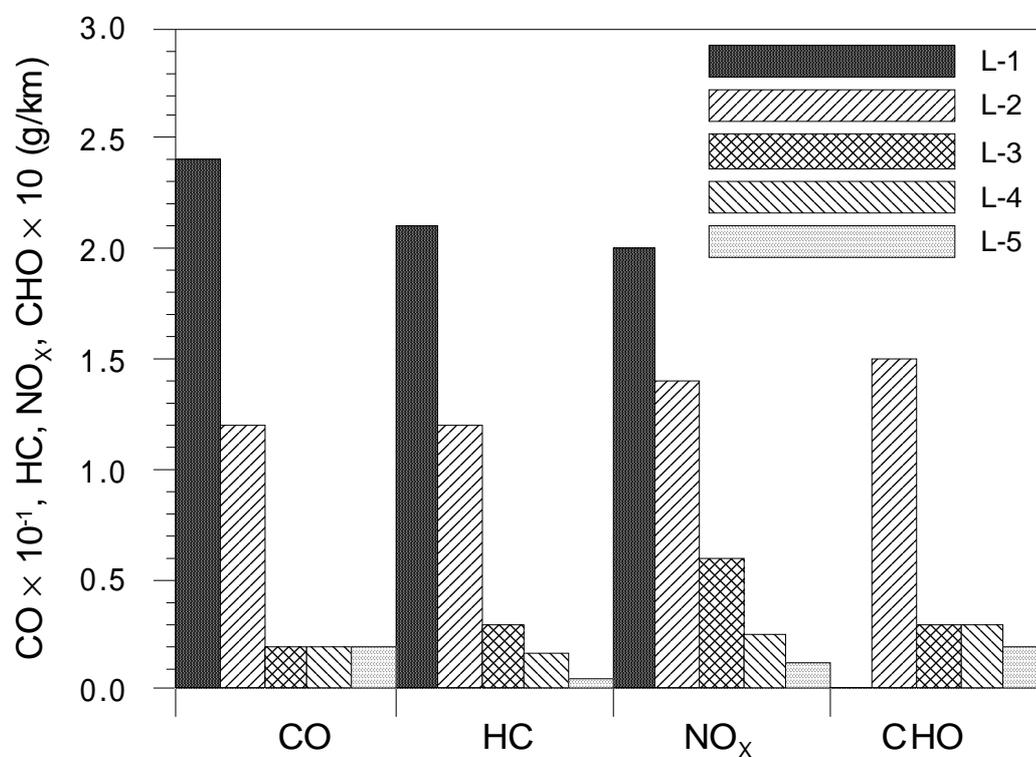


Figura 2: Evolução dos limites de emissões
Fonte: IBAMA, 2005.

TABELA 2
Limites de emissões do PROCONVE nas Fases IV e V.

FASE	ANO	VEÍCULOS VENDIDOS	CO (g/km)	HC (g/km)	NMHC (g/km)	NO _x (g/km)	HCO (g/km)	EMISSÕES EVAPORATIVAS (g/teste)
IV	005	40%						
	006	70%	2,00	0,30	0,16	0,25	0,03	2,00
	007	100%						
V	008	40%						
	009	70%	2,00	0,30	0,05	0,12	0,02	2,00
	010	100%						

Fonte: IBAMA, 2005

1.7 Estrutura da tese

No Capítulo 2 são revisados alguns trabalhos de pesquisadores que estudaram tanto a partida e funcionamento a frio quanto às emissões de poluentes proporcionadas por motores a etanol.

No Capítulo 3 são apresentados os fundamentos teóricos para a modelagem dos volumes de controle do ar e do etanol para melhor elucidar o entendimento dos aspectos relacionados à termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia experimental utilizada para a realização dos testes, além da estratégia de funcionamento do sistema.

Os resultados experimentais são apresentados no Capítulo 5, através de gráficos e ilustrações, acompanhados de comentários e análises pertinentes.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Os dados obtidos nos experimentos são apresentados no Apêndice A em forma de tabelas.

A análise de incerteza dos resultados experimentais é apresentada no Apêndice B.

O Anexo I apresenta um artigo técnico com publicação internacional com uma análise numérica e experimental do novo sistema de partida a frio objeto de estudo desta tese. A avaliação foi realizada com o sistema instalado em uma bancada de testes.

O Anexo II apresenta outro artigo técnico internacional que também contempla uma análise numérica e experimental do novo sistema de partida a frio objeto de estudo desta tese, mas aplicado em um veículo com motor *flex fuel*.

O Anexo III mostra o certificado de patente concedida para todos os países pertencentes ao PCT na Europa do novo sistema de partida a frio avaliado nesta tese.

O Anexo IV mostra o processo de patente do novo sistema de partida a frio registrado no INPI (Brasil). Esta solicitação de patente serviu para base de registro nos Estados Unidos da América, Japão, China e Argentina.

No Anexo V está o certificado de patente do sistema de partida a frio que utiliza um 5º eletro-injetor para pulverizar gasolina no co letor de admissão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados os estudos de pesquisadores que tratam de aspectos importantes relacionados à partida e funcionamento a frio dos motores a etanol e também das emissões de poluentes. Estes fatores estão ligados entre si, pois se o tempo de partida é longo ou a dirigibilidade é inadequada, haverá um aumento das emissões de poluentes, principalmente na fase fria de funcionamento do motor.

2.1 Propriedades Físico-Químicas do Etanol

O etanol é mais reativo que os combustíveis formados por hidrocarbonetos, como a gasolina. A estrutura molecular dos álcoois, como o etanol, possui em sua estrutura uma fração polar devido ao radical hidroxila e uma fração não polar em sua cadeia de carbonos. Esta característica pode explicar por que o etanol pode ser dissolvido em gasolina (não polar) e em água (polar). Devido à pequena cadeia de carbonos, as propriedades da fração polar do etanol se sobrepõem às propriedades não polares. A estrutura molecular simples do etanol faz com este combustível seja adequado aos motores de combustão interna (COSTA; SODRÉ, 2009).

Em um trabalho para avaliar a performance de motores de combustão interna com a utilização de combustíveis oxigenados, Turner et al. (2007) realizaram uma avaliação comparativa do etanol e do metanol com outros tipos de combustíveis (Tab. 4). O uso de álcoois potencializa o aumento da performance dos motores em comparação com a gasolina em função do menor valor da razão estequiométrica ar/combustível (AFR), da relação molar entre reagentes e produtos, da elevada octanagem e do elevado calor latente de vaporização. Entretanto, o baixo conteúdo energético volumétrico e o baixo calor específico são as principais desvantagens do uso dos álcoois, pois aumentam o consumo de combustível. O elevado número de octanas permite que a adição de álcool à gasolina favoreça o desempenho do motor devido ao aumento da resistência à detonação.

TABELA 3
Comparativo das propriedades dos combustíveis.

Propriedade	Isooctano	Gasolina (típico)	Etanol	Metanol	Gás Natural (Típico)	Hidrogênio
Fórmula Química	C ₈ H ₁₈	Vários	C ₂ H ₅ OH	CH ₃ OH	CH ₄ , C ₂ H ₆ ...	H ₂
Densidade a Pressão Atmosférica (Kg/l)	0.69	0.74	0.79	0.79	0.00083	0.00009
Valor Calorífico Inferior (MJ/Kg)	44.3	42.7	26.8	19.9	47	120
AFR Estequiométrico	15.1	14.7	9	6.5	17	33.4
Energia Específica (MJ/Kg mistura)	2.934	2.905	2.978	3.062	2.765	3.593
Taxa de Energia Específica*	1.000	0.990	1.015	1.043	0.942	1.225
Conteúdo de Energia Volumétrica (MJ/litros)	30.6	31.6	21.2	15.7	0.039	0.012
RON - Índice de Octano Pesquisado	100	95	109	106	120 [§]	130 [°]
MON - Índice de Octano do Motor	100	85	98	92	120 [§]	- [†]
Sensibilidade**	0	10	11	14	0	- [†]
Calor Latente de Vaporização (KJ/Kg)	270	180	930	1170	NA	NA
Razão molar dos Produtos Reagentes***	1.058	0.937	1.061	1.065	1 (CH ₄)	0.852
Teor de Oxigênio, em Peso (%)	0	0	34.8	50	0	0

* Em relação ao isooctano

** Definido como RON menos MON

*** Incluindo o nitrogênio atmosférico

§ Metano

° AtΦ = 0.4 (λ=2.5)

† Não foi possível encontrar fonte de dados confiáveis publicados deste item

Fonte: Turner et al. (2007)

Nan et al. (2004) determinaram o calor específico a pressão constante (c_p) do etanol, da gasolina e de um composto com 90% de gasolina e 10% de etanol. As determinações do calor específico em base molar foram realizadas utilizando um calorímetro adiabático em uma faixa de temperatura de 80 a 320 K. Para o etanol os pesquisadores verificaram que a temperatura de transição de sólido para líquido foi em torno de 158,94 K (-114,21°C). O calor específico aumenta com a temperatura, tendo sido observados valores em torno de 90 J/K mol a 158,14 K (-114,86°C) e de 110 J/K mol a 300 K (26,85°C).

Em relação à partida e funcionamento a frio, Turner et al. (2007) comentam que a utilização do etanol ou do metanol se constitui em uma grande desvantagem em relação à gasolina. As propriedades diretamente relacionadas a este problema são a volatilidade e a pressão de vapor. Quanto maior a pressão de vapor mais volátil é o líquido. Ou seja, quanto mais pressão o líquido faz contra a sua superfície,

mais este líquido passará para o estado de vapor, evaporando mais rápido (MUZIKOVÁ *et al.*, 2009).

Esta é uma das razões da adição de gasolina ao etanol. A mistura de 85% de etanol com 15% de gasolina (E85) é utilizada para reduzir os problemas de partida e dirigibilidade a frio em temperaturas ambiente desfavoráveis à combustão do etanol puro nos EUA e na Suécia. Atualmente, os padrões de qualidade da Europa limitam em 5% o conteúdo de etanol na gasolina. Entretanto, em um futuro próximo, o conteúdo de etanol poderá ficar acima de 10% na maioria dos países da Europa (MUZIKOVÁ *et al.*, 2009).

A influência da presença de etanol na mistura com gasolina sobre a pressão de vapor foi avaliada por Pumphrey *et al.* (2000). Misturas com aproximadamente 20% de etanol na gasolina apresentaram máxima pressão de vapor (Fig. 3). Entretanto, misturas com concentrações de etanol entre 20 e 60% apresentaram uma desprezível redução na pressão de vapor. A partir de 60% a redução na pressão de vapor é acentuada.

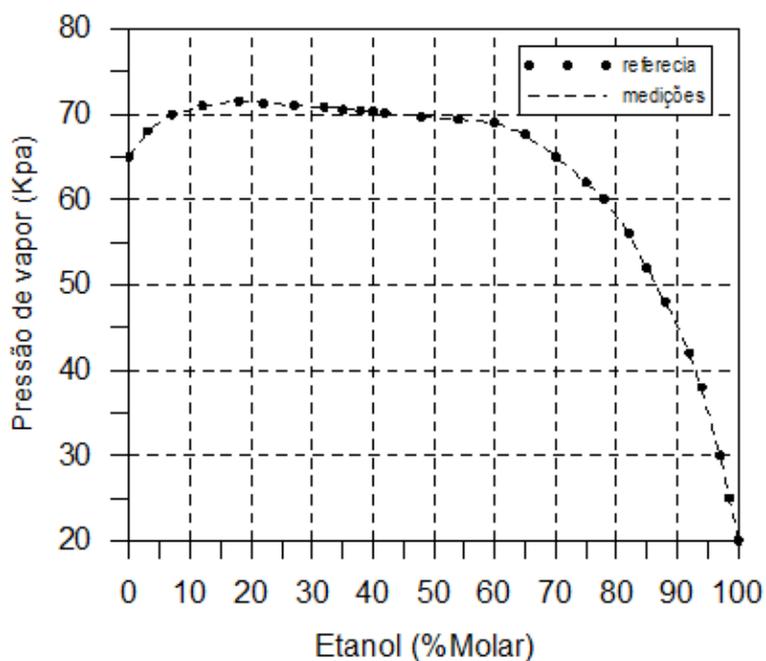


Figura 3: Valores de pressão de vapor do etanol medidos e comparados com
Fonte: Pumphrey *et al.*, 2000.

Brunocilla e Lepsch (2006) apresentaram as principais características que influenciam na partida a frio para a utilização do etanol puro (E100) em veículos bi-combustíveis. Se a partida a frio for realizada em temperatura ambiente igual à temperatura da mistura ar/combustível, a impossibilidade de troca térmica inibe a evaporação, que irá ocorrer somente se o combustível for suficientemente volátil. Nestas condições é necessário mais trabalho ou energia (tensão superficial) para trazer do interior do líquido uma quantidade de moléculas suficiente para formar uma nova unidade de área superficial. No caso da gasolina é possível ocorrer um processo de evaporação com uma quantidade suficiente de vapor de hidrocarbonetos leves na partida a frio. A partida a frio é mais difícil com etanol devido à sua volatilidade bem definida. O ponto de ebulição do etanol é de 78 °C, enquanto os hidrocarbonetos mais leves que constituem a gasolina entram em ebulição a 27 °C.

2.2 Partida e funcionamento a frio

Gao et al. (2007) realizaram uma análise comparativa do etanol, das misturas de etanol com gasolina e da gasolina em um estudo do jato de combustível injetado. A baixa qualidade da atomização do jato e a camada de combustível nas paredes dos condutos de admissão do cabeçote podem proporcionar uma formação de mistura heterogênea dentro da câmara de combustão (SENDA et al., 1999). As avaliações de Jian et al. (2007) concentraram-se no comprimento e no ângulo do jato em duas condições de pressão ambiente, 0,1 MPa e 0,5 MPa. Os testes foram realizados utilizando-se uma câmara de volume constante, um injetor e uma máquina fotográfica de alta frequência e resolução. Na condição de 0,1 MPa o comprimento e o ângulo do jato aumentam com a fração de etanol, indicando uma melhor vaporização. Por outro lado, se a pressão ambiente aumenta para 0,5 MPa, a diferença de jato entre as misturas e o etanol puro torna-se mínima. Estas conclusões são importantes para a partida a frio, pois a injeção de combustível nas proximidades da válvula de admissão ocorre sob condições de baixa pressão.

Witze e Green (1996, 1997) e Witze (1999) investigaram os efeitos da injeção de combustível relacionados à formação de hidrocarbonetos não queimados durante

a partida a frio. A pesquisa também incluiu a análise da formação do filme de fluido na região da válvula de admissão e no interior do cilindro. Nesta avaliação experimental foi utilizado um pistão com topo que possuía uma janela em quartzo para possibilitar a visualização dentro do cilindro. Os autores utilizaram recursos de visualização de imagens da câmara de combustão através de fluorescência induzida de *laser* (LIF). Não foi possível quantificar o conteúdo da camada de filme de combustível depositada nas paredes da câmara de combustão durante a partida a frio, mas foi possível detectar as áreas de maior presença de combustível não queimado. A metodologia de análise desenvolvida pelos autores permitiu a correlação da concentração de hidrocarbonetos não queimados com as áreas cobertas por filme de combustível na válvula de admissão e na câmara de combustão durante os 500 primeiros ciclos do motor após a partida a frio. Os pesquisadores confirmaram que a maior concentração de hidrocarbonetos não queimados na exaustão era uma consequência da grande presença de combustível depositado nas paredes.

Kito et al. (1998) realizaram estudos com a mistura etanol-Dietl éter-água como combustível auxiliar para aumentar a pressão de vapor e possibilitar partidas a frio de veículos a etanol em baixas temperaturas. Os pesquisadores constataram que a pressão de vapor do etanol puro é insuficiente para sustentar a chama em um vaso fechado contendo ar em temperaturas inferiores a 13 °C, sugerindo a impossibilidade de partidas de um motor nestas condições. Por outro lado o dietil éter é inflamável de -42 °C a oito °C devido à sua alta pressão de vapor. A adição de dietil éter ao etanol pode gerar uma pressão de vapor suficiente para ocasionar a combustão abaixo de 13 °C. Esta mistura é obtida através de um conversor que aquece o etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$), promovendo sua dissociação em dietil éter ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OCH}_2\text{CH}_3$) e água (H_2O). Para a partida foi utilizado o aquecimento do etanol através de uma resistência elétrica e, após o funcionamento do veículo, o aquecimento do etanol foi feito pelo calor liberado pelos gases de exaustão. O combustível composto por etanol, dietil éter e água possuía pressão de vapor suficiente para partidas e funcionamento a frio sob temperaturas inferiores a -30 °C. Com base nas relações entre temperatura ambiente, pressão de vapor e flamabilidade, os autores concluíram que é necessária a conversão de 40 a 80% de etanol em dietil-éter para a partida e operação do motor a frio.

Silva e Sodré (2000) avaliaram a melhoria da partida a frio de um veículo a etanol utilizando a adição de metil tert butil éter (MTBE). Os testes foram conduzidos de forma a se determinar a temperatura limite que o motor poderia funcionar para cada quantidade de MTBE adicionada no etanol. As quantidades de 10%, 15%, 20% e 25% de MTBE no etanol foram investigadas. O veículo foi testado a temperaturas ambientes de 20 °C, 15 °C, 10 °C, 5 °C, 0 °C e -6 °C para as quatro misturas com MTBE. Com a mistura contendo 25% de MTBE foi possível obter partidas a até -6 °C em um tempo de 2 s. Este resultado foi considerado satisfatório, pois os pesquisadores verificaram que, com uso do sistema auxiliar para adição de gasolina, utilizado em veículos de produção, a temperatura ambiente mínima para a partida foi de -1 °C. Para o etanol puro a partida não ocorreu em temperaturas ambiente abaixo de 13 °C, concordando com o resultado obtido por Quito et al. (1998).

Al-Baghdadi (2003) apresentou um estudo sobre consumo de combustível e emissões de um motor operando com um combustível alternativo composto de uma mistura de hidrogênio e etanol. Neste trabalho o autor relatou que, utilizando de forma suplementar combustíveis gasosos como o hidrogênio por pequenos períodos durante a partida e funcionamento a frio com etanol, evita-se os problemas relacionados à evaporação do combustível frio e a distribuição heterogênea em função do filme de combustível nas paredes do coletor de admissão. Estes efeitos são indesejáveis em regimes transientes como acelerações e desacelerações.

Liao et al. (2005) investigaram as características da combustão do etanol e de misturas de etanol com gasolina durante a partida a frio. O principal objetivo do estudo foi explorar as possibilidades de partidas a frio rápidas e confiáveis. Etanol, gasolina e misturas de gasolina com 15% (E15) e 30% (E30) de etanol, com várias razões de equivalência da mistura combustível/ar, foram avaliadas através da ignição dentro de uma câmara de combustão com volume constante. Para visualização dos processos utilizou-se uma câmera de elevada resolução e que operava com 5000 fotos/segundo. Os testes foram realizados à temperatura de 358 K (84,85 °C). Os resultados indicaram que as misturas combustível/ar mais pobres favorecem a queima mais rápida do etanol em relação à gasolina. Para misturas pobres o aumento da concentração de etanol no combustível proporciona queima mais rápida, mas, para misturas ricas, esta tendência é invertida.

2.3 Utilização da gasolina na partida a frio

A utilização de 15% de gasolina no etanol (E85) melhora a condição de partida e funcionamento a frio. Entretanto, mesmo com este percentual de gasolina no etanol, em temperaturas inferiores a 0°C a combustão pode não ocorrer ou acontecer de forma dificultosa. Delique et al. (1999) desenvolveram um sistema de partida a frio para um veículo operando com E85. O sistema separava os componentes mais voláteis do E85 através de uma coluna de destilação, objetivando obter um composto com o menor conteúdo possível de etanol. Basicamente o sistema era composto de uma coluna para destilação do combustível, um trocador de calor que utilizava água aquecida do sistema de arrefecimento do motor para aquecimento do combustível, um condensador e um tanque para receber o combustível condensado. A parcela separada era armazenada no tanque e utilizada como combustível auxiliar altamente volátil injetado no coletor de admissão quando a temperatura ambiente era menor que um dado valor. Com este sistema os pesquisadores conseguiram promover a partida a frio do motor com E85 sob temperaturas ambientes de até -7 °C.

A melhoria na pulverização e atomização da gasolina no coletor de admissão através do uso de injetores multifuros foi demonstrada por Tani et al. (1999). Os pesquisadores focaram no jato de combustível injetado para melhorar a performance da partida do motor em baixas temperaturas e diminuir as emissões de HC. O desempenho de injetores com 4, 8, 12 e 18 furos foi avaliado. O aumento da pressão e a diminuição do diâmetro dos furos mostraram-se fatores importantes para o bom controle da vazão de combustível e para obtenção de excelentes níveis de atomização do combustível.

Sales (2001) apresentou de forma detalhada um sistema convencional de partida a frio com utilização de gasolina em uma pesquisa relacionada à redução das emissões de veículos a etanol. O sistema é constituído de reservatório de gasolina, eletrobomba, eletroválvula e tubo com furo calibrado. O desempenho deste sistema em um veículo com motor de 1,0 litro a etanol foi comparado com o de um sistema evoluído, que apresentava um eletro injetor e dispensava a utilização da eletroválvula. O eletroinjetor é posicionado no coletor de admissão e permite uma adequada pulverização da gasolina, melhorando a eficiência da mistura

etanol/gasolina/ar. As Figs. 4 e 5 mostram um coletor de admissão equipado com um tubo com furo calibrado (sistema convencional) e com o eletro injetor (sistema evoluído), respectivamente.

Sales (2001) comparou o tempo de partida a frio de quatro configurações: sistema de partida a frio convencional com ajuste de referência (1), sistema de partida a frio com injetor e ajuste de referência (2), sistema de partida a frio convencional com redução da quantidade de combustível injetada (3) e sistema de partida a frio com injetor e redução da quantidade de combustível injetada (4) (Fig. 6). O ajuste otimizado (SPFI) consistia da injeção de menores quantidades de gasolina e etanol, visando obter uma mistura combustível/ar menos rica durante a partida a frio e no período de aquecimento do motor e, conseqüentemente, diminuir as emissões de poluentes na exaustão. O tempo de partida para cada configuração foi definido pelo período necessário para o motor atingir a rotação de 600 rev/min. A pulverização mais eficiente da gasolina no coletor de admissão do através do sistema evoluído (4) contribuiu para tempos de partida a frio uniformes e aproximadamente 31% mais curtos em relação ao sistema convencional (1). A aplicação de um eletroinjetor no sistema de partida a frio (Patente INPI N° PI 9905212-1) é encontrada em veículos de produção em série a partir de 2008.



Figura 4: Sistema de partida a frio com introdução de gasolina por furo calibrado.
Fonte: Sales, 2001.



Figura 5: Sistema de partida a frio com introdução de gasolina por um eletro injetor.
Fonte: Sales, 2001.

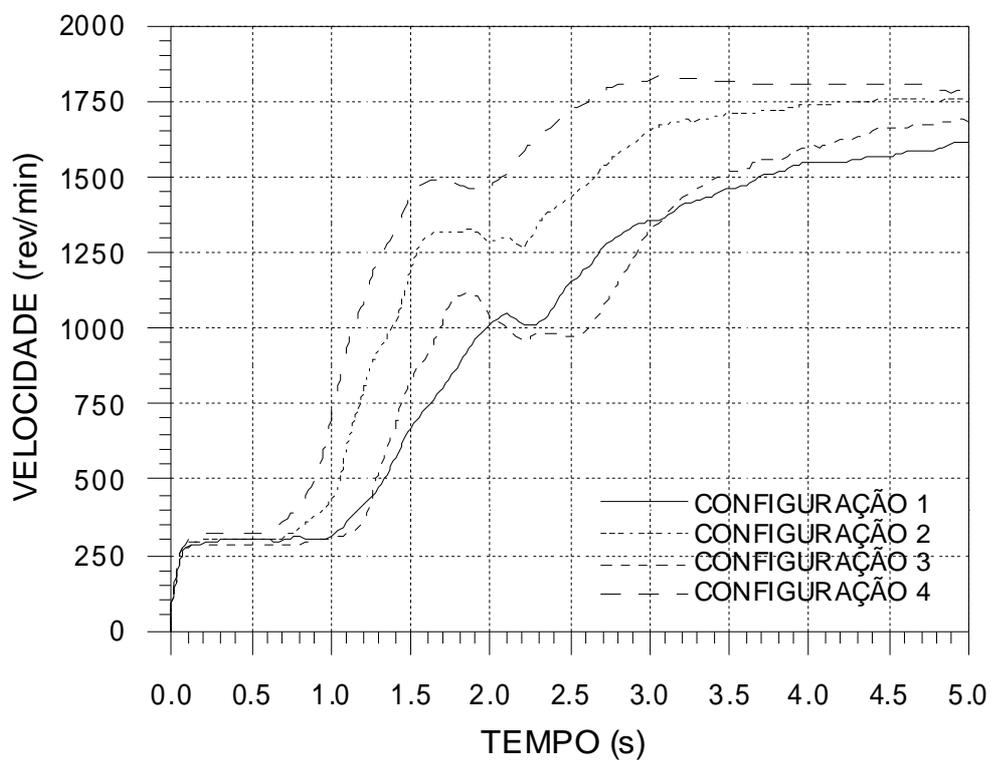


Figura 6: Comparativo dos tempos de partida a frio.
Fonte: Sales, 2001.

Uma combinação dos furos calibrados com a precisão de um eletro-injetor foi desenvolvida por Sales et al. (2007), com o objetivo de pulverizar gasolina simultaneamente nos quatro ramos do coletor de admissão durante a partida e acelerações a frio. A Fig. 7 mostra o desenho do dispositivo inicialmente avaliado numericamente e validado experimentalmente em um banco de testes. Os autores obtiveram uma diferença de vazão entre os furos de, no máximo, 2,4% entre os resultados numéricos e os resultados experimentais.

O sistema desenvolvido por Sales et al. (2007) foi aplicado por Sales et al. (2009) em um veículo *flex fuel* para realização de testes de partida a frio. As Figs. 8 e 9 mostram o posicionamento do distribuidor de combustível no coletor de admissão. A posição dos furos calibrados permite que toda gasolina pulverizada nos ramos do coletor de admissão seja completamente aproveitada, minimizando o volume injetado e reduzindo o consumo de combustível e a emissão de poluentes. Testes foram realizados sob as temperaturas de -2 °C, -5 °C e -13 °C. Os resultados mostram que o sistema permite partidas a frio dentro dos padrões de aceitação normalmente utilizados nos centros de engenharia automotiva, ou seja, períodos em torno de 2,0 s para início de funcionamento do motor.

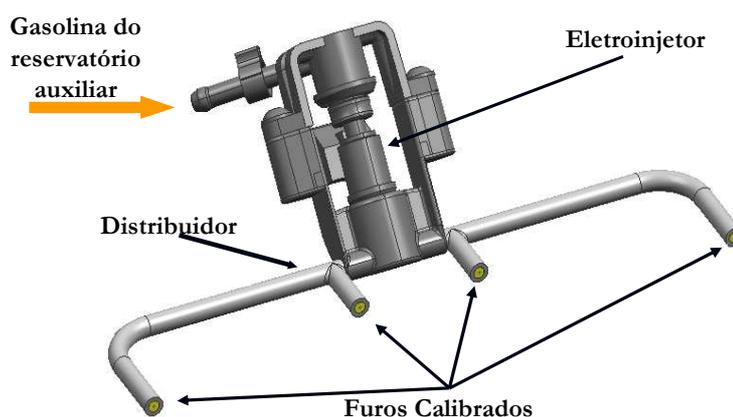


Figura 7: Distribuidor de combustível com eletro injetor.

Fonte: Sales et al., 2007.

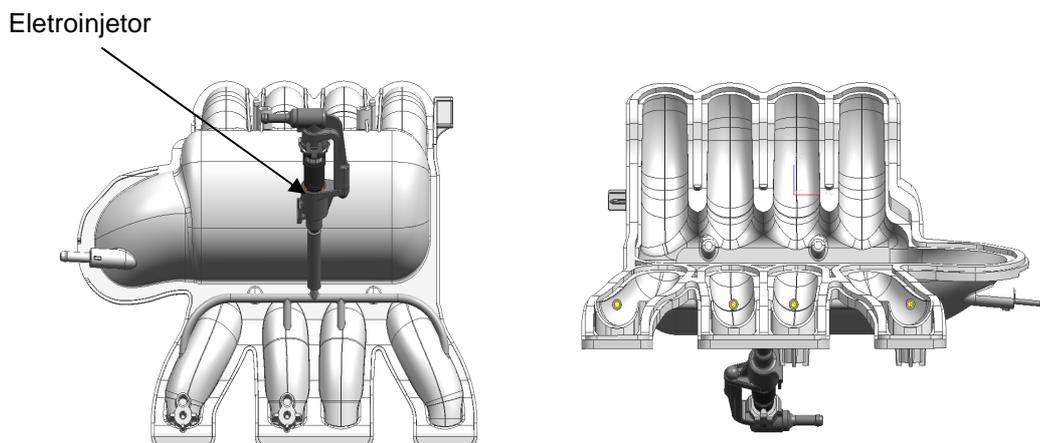


Figura 8: Vista posterior do coletor de admissão com o distribuidor de combustível com o eletroinjetor (esquerda) e furos calibrados nos ramos do coletor (direita).

Fonte: Sales et al., 2009.

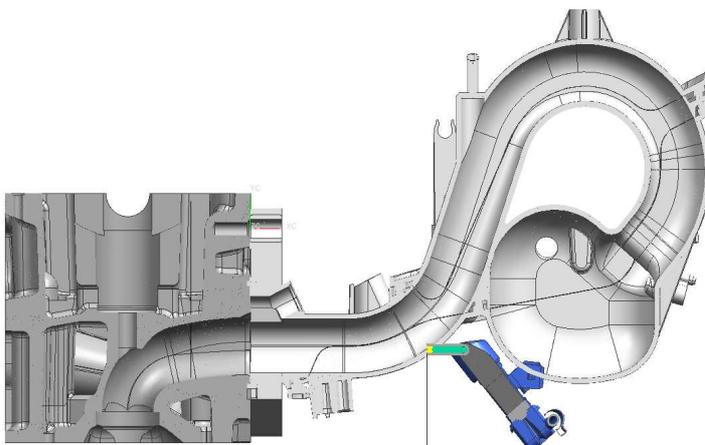


Figura 9: Vista Lateral do coletor com o distribuidor.

Fonte: Sales et al., 2009.

Além da influência da pulverização do combustível pelos injetores, as velas de ignição e o controle da centelha também se constituem objetos de pesquisas relacionadas à partida e funcionamento a frio dos motores e às emissões de poluentes. Bisetto et al. (2006) apresentaram um trabalho mostrando a influência das velas de ignição no desempenho de motores multi-combustíveis (gasolina, etanol e GNV). As características que melhoram o desempenho das velas, como o aumento da elasticidade térmica e confiabilidade da ignição, promovem consideráveis

vantagens para estabilidade da marcha lenta, performance superior para partida a frio e aquecimento, além da redução das emissões de CO e HC. Os benefícios do eletrodo central da vela, composto de níquel-iridium, foram relacionados à melhoria da partida a frio e à redução das emissões de HC e CO. Davis et al. (1999) realizaram experimentos com descargas múltiplas ou centelhas múltiplas durante a partida e funcionamento a frio de motores abastecidos com E85. Os resultados mostraram que velas com centelhas múltiplas promovem uma partida a frio mais rápida e um melhor funcionamento do motor em marcha lenta.

A partida e funcionamento a frio também podem ser melhorados com a variação da abertura das válvulas. Roberts e Stanglmaier (1999) estudaram a atuação de um variador de abertura das válvulas de admissão durante a partida a frio e 1 minuto após a partida a frio, e exploraram os benefícios relacionados à redução das emissões de HC. Os autores verificaram que o vácuo criado na porta das válvulas de admissão com a variação da abertura contribui para a revaporização do combustível condensado nas paredes dos dutos e na superfície das válvulas.

2.4 Sistemas de partida a frio sem adição de substâncias voláteis ao etanol

O aquecimento da galeria de combustível foi uma alternativa apresentada por Boyle ET al. (2000) para a partida a frio com o combustível E85. O sistema utilizava resistências elétricas de 950 W para o aquecimento do combustível em cada uma das duas galerias de combustível do motor. O objetivo do trabalho dos autores era a conversão de um veículo com motor a gasolina para operação com E85. O aquecimento do E85 permitiu partidas e funcionamento a frio com o desempenho próximo ao da gasolina.

Brunocilla e Lepsch (2006) realizaram uma análise numérica e experimental de um sistema de aquecimento de etanol para cada um dos injetores da galeria de combustível. Com o sistema foi possível aquecer o etanol a 70 °C com um pré-aquecimento de 10 s a uma pressão de 4,2 bar. Os pesquisadores realizaram partidas abaixo de 5 °C e os tempos de partida ficaram entre 2,0 e 4,0 s. Outro aspecto interessante da pesquisa foi a apresentação da diferença do jato do injetor com aquecimento e sem aquecimento do etanol (Fig. 10). Com o etanol aquecido o

jato é mais favorável à vaporização e minimiza as perdas nas paredes do coletor de admissão e do cabeçote. O detalhamento da estratégia para aplicação deste sistema em um veículo *flex fuel* para o mercado brasileiro foi apresentado por Sbragia et al. (2010).

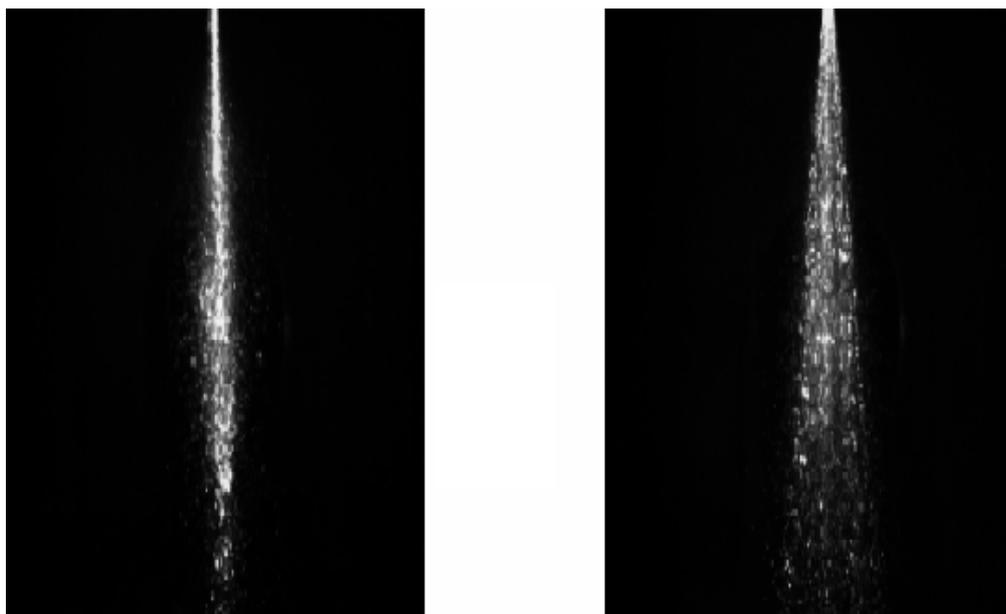


Figura 10: Características do jato de etanol sem aquecimento (esquerda) e aquecido (direita).
Fonte: Brunocilla e Lepsch, 2006.

A utilização de um injetor secundário para introdução de etanol aquecido no coletor de admissão funcionalmente reproduz a estratégia da introdução de gasolina (PONTOPPIDAN et al., 2009). Neste caso não é necessário um reservatório auxiliar, pois o etanol aquecido é proveniente da mesma galeria de combustível que aloja os outros injetores principais. Kabasin et al. (2009) apresentaram um sistema de aquecimento do etanol dentro do próprio injetor, melhorando, desta forma, o aproveitamento do calor transferido ao etanol. Os pesquisadores utilizaram injetores de combustível dotados internamente de uma pequena área térmica eletricamente aquecido para transferir calor ao etanol. Utilizando o mesmo sistema de Kabasin et al. (2009), Short et al. (2010) realizaram uma pesquisa com a finalidade de viabilizar a eliminação do sistema de partida a frio que utiliza gasolina. O trabalho consistiu da elaboração de uma modelagem através de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) e experimentos para validação. O sistema permitiu tempos de partida a frio em torno de 3,0 s a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Buchdid et al. (2006) apresentaram um sistema para aquecimento do ar de admissão de motores *flex fuel* operando com concentrações acima de 80% de etanol e abaixo de 20 °C, dispensando a utilização da gasolina na partida e funcionamento a frio. Os pesquisadores verificaram que o aumento da temperatura e a redução da pressão do ar de admissão causam um aumento na taxa de vaporização do etanol. O dispositivo proposto consiste de uma resistência elétrica dentro de um cilindro de material termicamente isolante. O sistema é montado externamente ao coletor de admissão e, durante a partida e funcionamento a frio, funciona como um *by-pass* para o ar, pois neste período o corpo de borboleta está com a válvula fechada. Assim, o ar passa pelo dispositivo e é aquecido por uma potência elétrica de 600 W. A abertura da válvula do dispositivo foi ajustada para que a vazão do ar fosse suficiente para manter o motor em marcha-lenta, provocando uma leve queda de pressão no instante da partida. A Tab. 6 mostra os resultados de tempo de partida a frio e os principais parâmetros controlados nos testes.

TABELA 4
Resultados dos testes de partida a frio com aquecimento somente do ar.

PARÂMETRO	CONDIÇÃO			
	Não	Sim	Sim	Sim
Pré-aquecimento	Não	Sim	Sim	Sim
Temperatura ambiente	10 °C	10 °C	5 °C	0 °C
Temperatura da água do sistema de arrefecimento	10 °C	10 °C	5 °C	-1 °C
Temperatura do óleo no cárter	10 °C	8 °C	5 °C	0 °C
Temperatura inicial do ar no coletor de admissão	10 °C	48 °C	50 °C	69 °C
Tempo de partida	Não partiu	10 s	27 s	Não partiu
Abertura aproximada da válvula na seção de escoamento	10%	10%	10%	10%

Fonte: Buchdid et al., 2006.

2.5 Efeitos da partida e funcionamento a frio nas emissões de poluentes

Estudos realizados por Boam et al. (1994) mostraram que, na partida a frio, durante o período de aquecimento do motor e nos períodos de marcha lenta, as

principais fontes de HC não queimados na câmara de combustão são as seguintes: regiões frias formadas pelas fendas, onde a chama se extingue ou não consegue penetrar; camada fria de óleo lubrificante, que faz a absorção/liberação do vapor de combustível; paredes frias da câmara de combustão, onde ocorre extinção da chama; combustão incompleta devido à mistura rica e baixa temperatura de combustão. Os efeitos destas fontes foram analisados durante a partida a frio e no período de aquecimento do motor, quando o catalisador ainda não é completamente eficiente. A pesquisa mostrou que as emissões de hidrocarbonetos se reduzem em aproximadamente 40% após o aquecimento do motor.

Um modelo para estimar a massa de HC não queimado foi elaborado por Huang et al. (1996), considerando os efeitos da fenda entre o topo do pistão e a parede do cilindro, da camada de óleo lubrificante e dos depósitos presentes no cabeçote e na superfície do pistão. Este modelo e o modelo de Kaplan e Heywood (1991) foram utilizados em outro trabalho de Huang et al. (1998), no qual um estudo foi realizado com o objetivo de verificar a formação e origem de HC em função da fenda entre o topo do pistão e a parede do cilindro e também da camada de óleo lubrificante na parede do cilindro. Os pesquisadores realizaram medições de temperatura no topo do pistão e na parede do cilindro durante o período compreendido pela partida a frio a 20 °C seguida do aquecimento do motor em marcha lenta. Desta forma a parcela de HC formada na fenda entre o topo do pistão e a parede do cilindro e a parcela proveniente da camada de óleo lubrificante foram estimadas. A Fig. 11 mostra a concentração de HC oriundo da fenda entre o topo do pistão e a parede do cilindro e da camada de óleo lubrificante no período compreendido pela partida a frio e aquecimento do motor. Pode-se verificar que a massa de HC diminui em 40% do valor inicial com o aumento da temperatura do óleo e a diminuição do volume da fenda através da expansão térmica.

No caso específico dos veículos operando com etanol, a quantidade de HC não queimado na câmara de combustão durante o período de aquecimento do motor é agravada devido à baixa volatilidade do combustível (OWEN; COLEY, 1995). Como o etanol possui um alto calor latente de vaporização, uma parte do combustível admitido não consegue vaporizar-se antes da frente de chama, pois a temperatura da câmara de combustão ainda é baixa. A vaporização do etanol ocorre somente após o processo de combustão, com o aumento da temperatura e pressão. Assim, a parcela do combustível que não se vaporiza não participa do processo

normal de combustão, se alojando nas regiões da câmara de combustão onde a chama não consegue penetrar, podendo também ser absorvida pela camada de óleo lubrificante. Como existe a necessidade de uma mistura mais rica para promover a partida a frio e melhorar a dirigibilidade durante o período de aquecimento do motor, as emissões de hidrocarbonetos neste período são intensificadas.

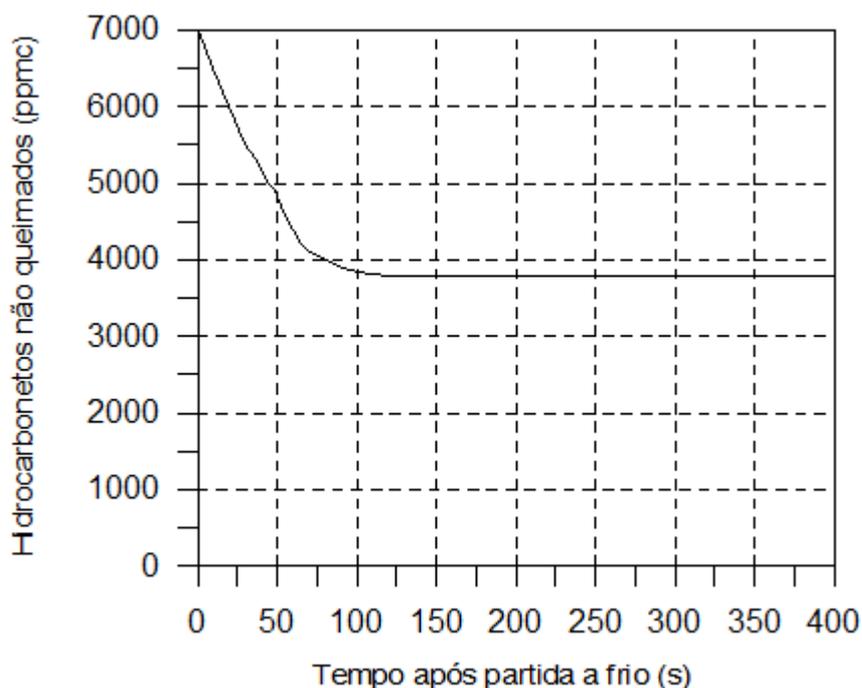


Figura 11: Hidrocarbonetos provenientes da fenda no topo do cilindro e da camada de óleo.
Fonte: Huang et al., 1998.

Hattori et al. (1997) analisaram as emissões de hidrocarbonetos ciclo a ciclo no início de funcionamento a frio a 25 °C, medindo a pressão no interior do cilindro de um motor operando com gasolina. As medições de hidrocarbonetos foram desde a partida a frio, com a temperatura do motor igual à do ambiente. A Fig. 12 mostra que as emissões de HC atingem um pico no terceiro e quarto ciclos. Este resultado pode ser atribuído à influência do combustível acumulado nas paredes durante os dois primeiros ciclos, que enriquece a mistura nos ciclos subseqüentes.

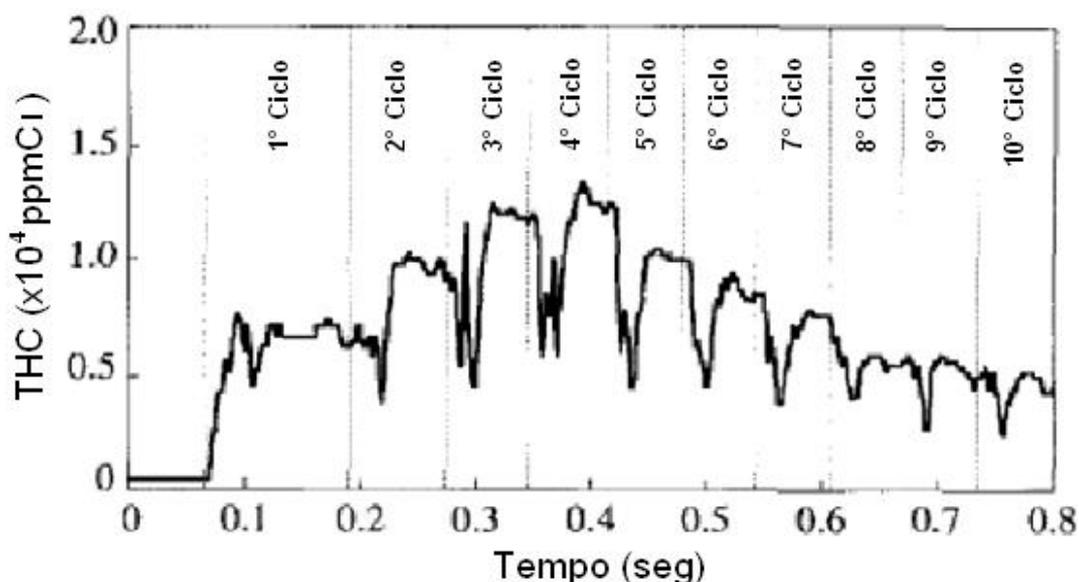


Figura 12: Comportamento das emissões de HC nos 10 primeiros ciclos após a partida a frio.
Fonte: HATTORI et al., 1997.

Henein e Tagomori (1999) também avaliaram as emissões de HC durante a partida a frio de um motor operando com gasolina. As elevadas concentrações de HC foram atribuídas à combustão incompleta e à mistura rica. Após o primeiro ciclo, o aumento de HC na exaustão continuou com menor intensidade durante o segundo e o terceiro ciclos, fato que foi atribuído ao aumento da temperatura das paredes, promovendo a liberação de combustível que estava contido na camada de óleo lubrificante (Fig. 13). A concentração de HC na exaustão atingiu um valor máximo no quinto ciclo, em torno de 21.000 ppm. Os pesquisadores concluíram que a combustão instável nos primeiros ciclos se constitui na maior fonte de emissões de hidrocarbonetos. A fração molar de HC ficou em torno de 2500 ppm no final da exaustão, indicando uma forte contribuição das fendas no topo do pistão.

A formação de CO em motores de ciclo Otto depende primariamente da razão de equivalência da mistura combustível/ar. A necessidade de enriquecimento da mistura quando o motor está frio faz com que as emissões de CO durante o aquecimento do motor sejam muito maiores em relação ao motor completamente aquecido (HEYWOOD, 1988). Comparações entre as emissões de monóxido de carbono de veículos a gasolina e a álcool (etanol e metanol) em função da razão de equivalência da mistura demonstram menores níveis de emissões de monóxido de carbono quando se utiliza álcool como combustível. A vantagem dos álcoois sobre a

gasolina é que os motores podem operar com misturas mais pobres (SCHAEFER; BASSHUYSER, 1995). Heywood (1988) mostra qualitativamente como CO, HC e óxido nítrico (NO) variam com a razão de equivalência da mistura combustível/ar (Fig. 14). O nível de CO é baixo para mistura pobre e aumenta drasticamente com o enriquecimento da mistura. O nível de HC também é elevado para misturas ricas e atinge o menor valor para mistura pobre, mas, com o empobrecimento extremo da mistura, volta a subir. NO, que forma a maior parte de NO_x em motores com ignição por centelha, apresenta baixos níveis para misturas pobres ou ricas e um valor máximo para mistura ligeiramente pobre, próxima à estequiométrica.

Durante a partida e funcionamento a frio dos motores operando com etanol as emissões de NO_x são relativamente reduzidas, pois as temperaturas de combustão são relativamente baixas e a razão da mistura combustível/ar é rica. Entretanto, após o período de aquecimento, em função do aumento das temperaturas no final da compressão e na combustão, as emissões de NO_x são incrementadas. O aumento da temperatura na câmara de combustão ocorre principalmente em função da elevada razão de compressão, possibilitada devido aos álcoois serem altamente resistentes à detonação (SCHAEFER; BASSHUYSER, 1995).

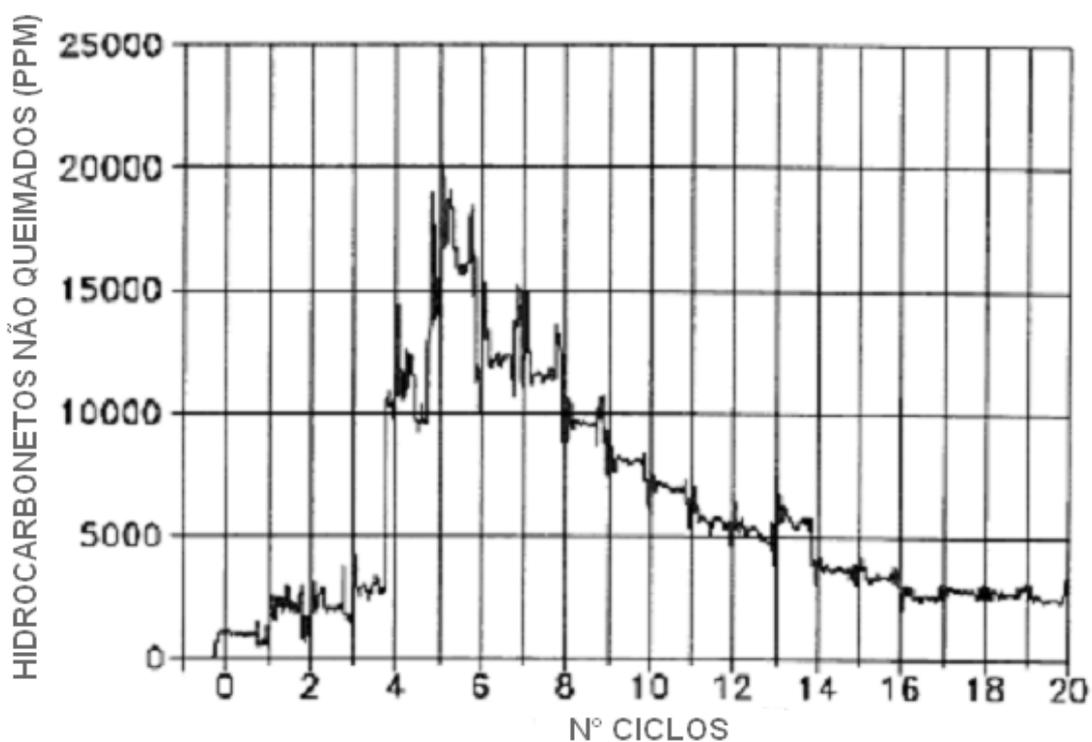


Figura 13: Comportamento das emissões de hidrocarbonetos nos 20 ciclos iniciais.

Fonte: Henein e Tagomori, 1999.

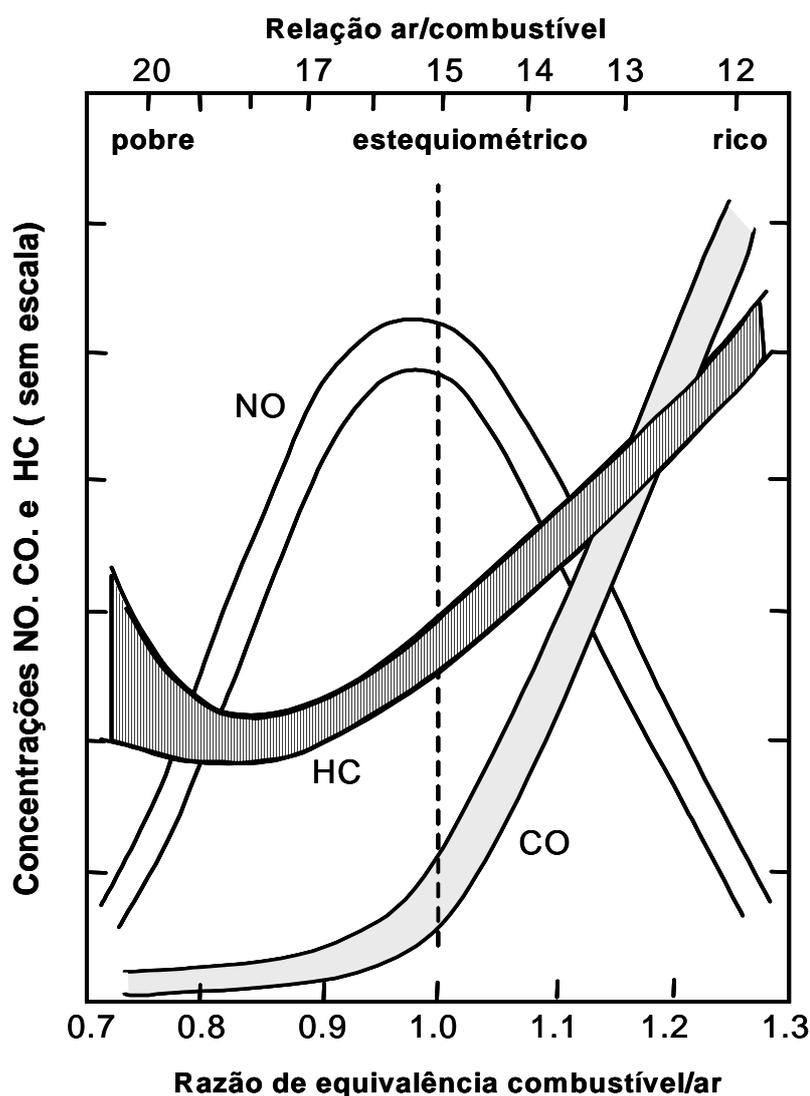


Figura 14: Variação da concentração de HC, CO, e NO na exaustão de um motor convencional com o ciclo Otto com a razão de equivalência combustível/ar.

Fonte: Heywood, 1988.

Costa e Sodré (2009) avaliaram as emissões de NO_x utilizando um motor *flex fuel* de 1.0 l e compararam os resultados da opera o com etanol hidratado em rela o a uma mistura de 22% de etanol anidro e 78% gasolina (E22). A Fig. 15 apresenta os resultados obtidos pelos pesquisadores com o motor operando aquecido entre as rota es de 2500 a 6000 rev/min em plena carga. A forma o de NO_x foi maior na opera o com etanol hidratado em rela o a E22 devido   utiliza o de maiores avanços de igni o, que ocasionou maiores temperaturas dentro da câmara de combustão (HEYWOOD, 1998; Chen et al., 1999).

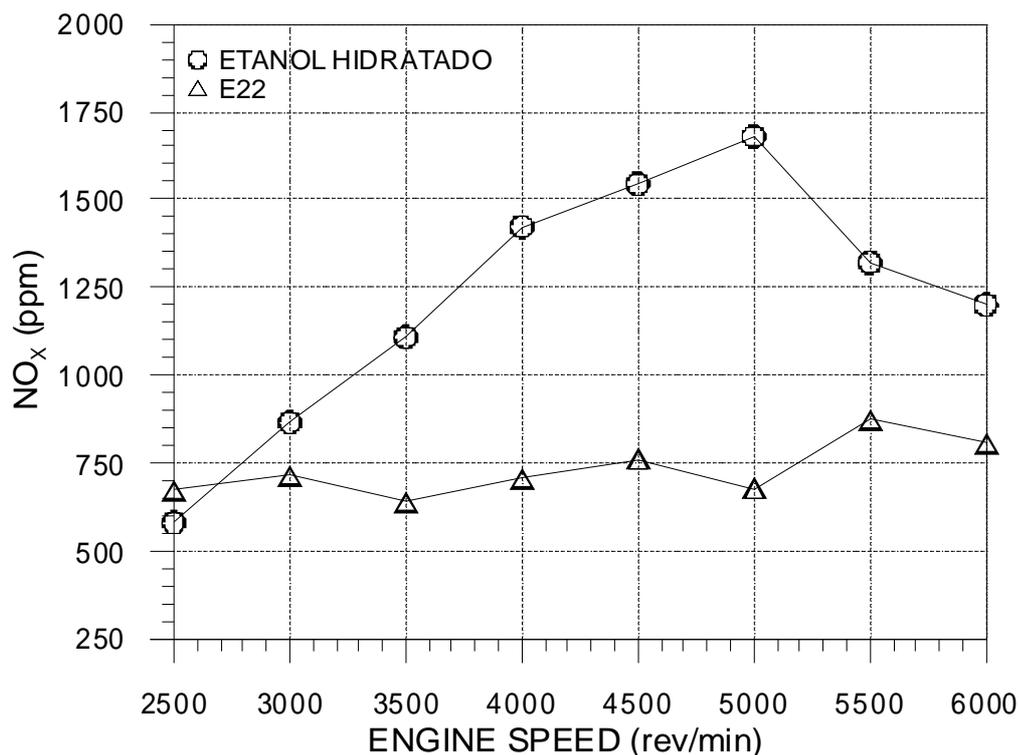


Figura 15: Influência do combustível (etanol hidratado e gasolina E22) nas emissões de NO_x com motor aquecido em dinamômetro.

Fonte: Costa e Sodré, 2009.

Koç et al. (2009) avaliaram os efeitos das misturas de 0% (E0), 50% (E50 e 85% (E85) de etanol em gasolina nas emissões de HC, CO e NO_x , utilizando um motor mono-cilindro operando em plena carga de 1500 a 5000 rev/min. Os resultados mostraram que a adição de etanol na gasolina reduziu as emissões de CO, HC e NO_x . A redução nas emissões de HC foi explicada pela presença de oxigênio na molécula de etanol e a redução das emissões de NO_x foi atribuída ao efeito do elevado calor latente de vaporização do etanol em relação à gasolina.

Singer et al. (1999) estimaram as emissões de poluentes durante o aquecimento do motor em um estacionamento subterrâneo. A entrada e a saída dos veículos no estacionamento foram controladas, sendo as emissões relativas medidas pela manhã referentes à condição estabilizada dos veículos, com os motores totalmente aquecidos. Após a partida do motor no período da tarde, os veículos permaneciam em média 60 s dentro do estacionamento. As concentrações de CO_2 , CO e NO_x foram muito maiores no período da tarde, refletindo a influência do aquecimento do motor. Em contraste, as concentrações de NMHC foram similares nos períodos da manhã e da tarde, mas durante a chegada pela manhã

houve uma importante contribuição das emissões evaporativas. Os pesquisadores compararam estes resultados aos 505 s iniciais que compreendem a partida a frio do ciclo FTP-75 (1975 U.S. Federal Test Procedure), utilizado para testes de emissões em laboratório. Os resultados destes testes mostraram que somente após 200 s de início de funcionamento do veículo os níveis de emissões de HC, CO e NO_x foram reduzidos, em função do completo aquecimento do motor e da eficiência dos catalisadores.

Brunocilla e Lepsch (2006), além da preocupação com o desafio da eliminação da gasolina no auxílio ao motor operando com etanol em baixas temperaturas, também avaliaram as emissões de poluentes com o etanol aquecido. Os autores utilizaram um sistema composto por uma resistência elétrica para cada injetor, que possibilitou o aquecimento do etanol a 70 °C com um pré-aquecimento de 10 s a uma pressão de 4,2 bar. Os resultados de emissões no ciclo FTP-75 apresentaram redução de 21,5% de HC e 28% de CO.

Kabasin et al. (2009, 2010) pesquisaram as emissões de um veículo com um sistema de aquecimento do etanol em cada um dos injetores, submetido a testes no ciclo FPT-75 operando com etanol. A utilização dos injetores dotados internamente de resistências elétricas possibilitou o empobrecimento da mistura ar/combustível durante os testes de emissões sob temperatura ambiente de 20 °C. Com o aquecimento do etanol as emissões de hidrocarbonetos totais (THC), NMHC e CO medidas após o catalisador na primeira fase do ciclo FPT 75 foram 66%, 69% e 61% menores, respectivamente, enquanto as emissões de NO_x aumentaram 18% em relação à configuração sem aquecimento do etanol. A redução das emissões de THC, NMHC e CO foram atribuídas ao empobrecimento da mistura e ao aumento da quantidade de oxigênio e da temperatura do gás da exaustão, melhorando a eficiência do catalisador. As Figs. 16 e 17 mostram o comportamento das emissões acumuladas de hidrocarbonetos totais (THC) e monóxido de carbono (CO) antes e depois do catalisador, com e sem aquecimento do etanol. Os pesquisadores também concluíram que, nos 90 s iniciais, os efeitos do aquecimento do etanol e do empobrecimento da mistura possibilitaram uma considerável eficiência do catalisador, evidenciada pela redução dos níveis de emissões de THC e CO após o catalisador.

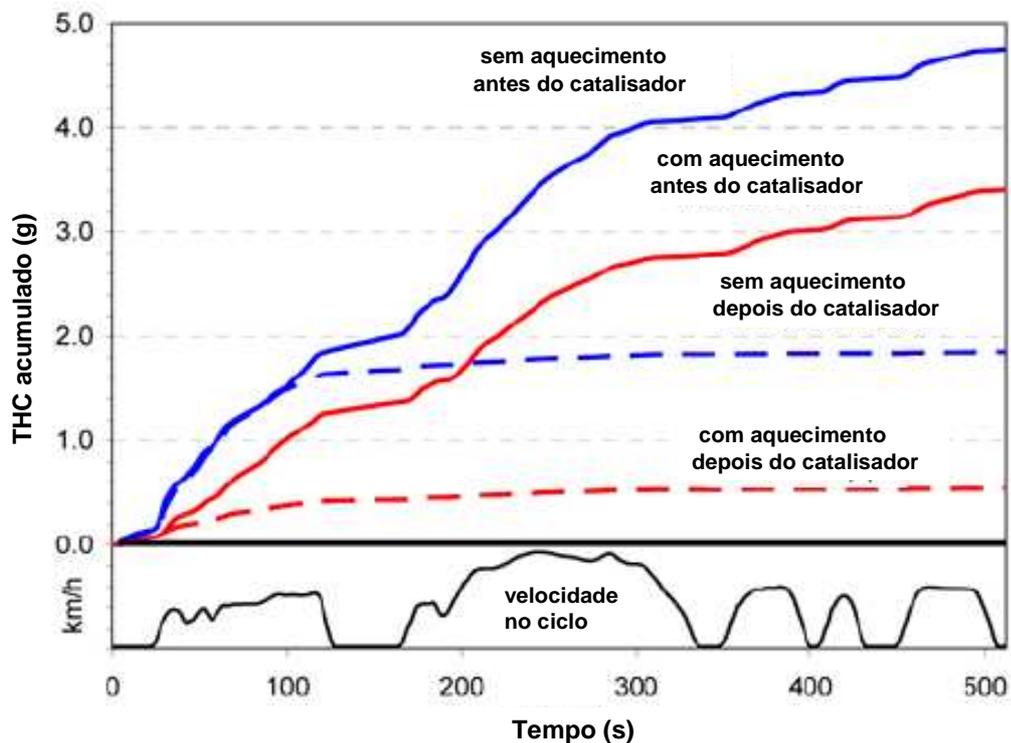


Figura 16: Comportamento das emissões acumuladas de THC antes e depois do catalisador das configurações com e sem aquecimento do Etanol.
 Fonte: Kabasin et al., 2010.

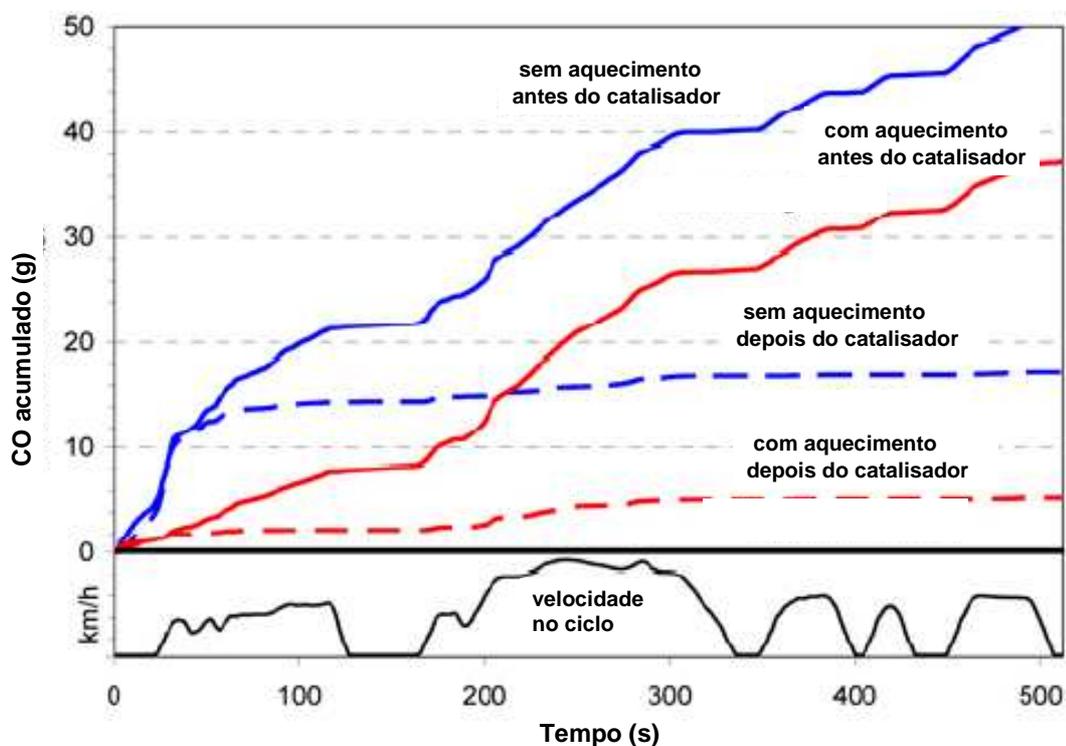


Figura 17: Comportamento das emissões acumuladas de CO antes e depois do catalisador das configurações com e sem aquecimento do Etanol.
 Fonte: Kabasin et al., 2010.

Sales (2001) utilizou um veículo operando com etanol para avaliar as emissões de HC, CO e NO_x antes do catalisador e aldeídos após o catalisador na primeira fase do ciclo FTP-75, que compreende a partida a frio e o período de aquecimento do motor (Figs. 18 a 23). Nos 55 s iniciais, as concentrações de HC, CO e aldeídos representaram, respectivamente, cerca de 40%, 30% e 70% do total emitido, (Figs. 18, 19 e 21). Os maiores níveis destes poluentes são evidenciados principalmente nas acelerações a frio, onde ocorre uma combinação do efeito de carga do motor, mistura muito rica em função da otimização da dirigibilidade e motor frio. Este período também é caracterizado pela baixa eficiência de conversão do catalisador. A eficiência de um catalisador é definida pelo percentual de diminuição do poluente, verificado através da medição da concentração antes e depois do catalisador. As Figs. 22 e 23 mostram a baixa eficiência do catalisador do veículo com motor a etanol (E100) utilizado por Sales (2001) para HC e CO, respectivamente. Nos 50 s iniciais a eficiência do catalisador para HC e CO é quase inexistente em função de sua baixa temperatura.

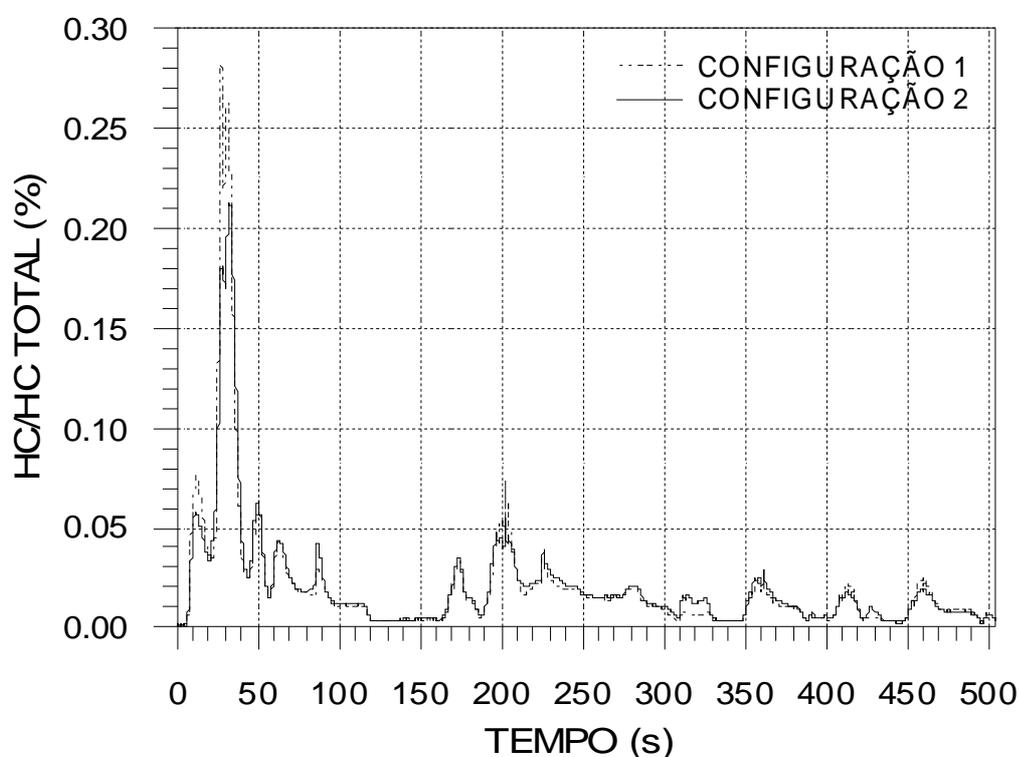


Figura 18: Emissões de HC antes do catalisador relativas à concentração total emitida na primeira fase do ciclo FTP-75, para duas configurações de sistema de partida a frio.

Fonte: Sales, 2001.

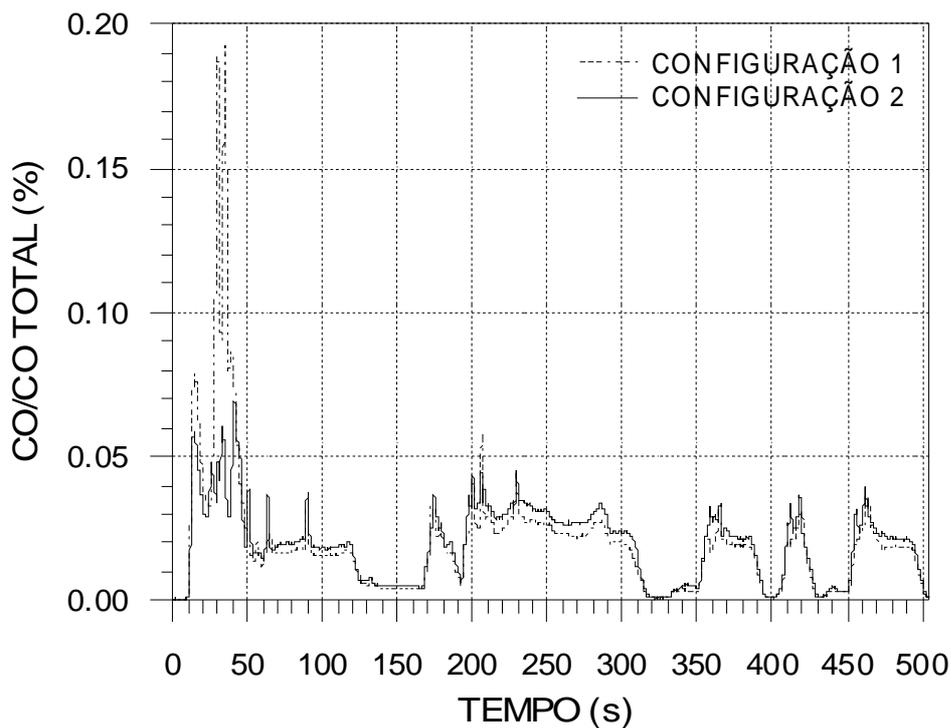


Figura 19: Emissões de CO antes do catalisador relativas à concentração total emitida na primeira fase do ciclo FTP-75, para duas configurações de sistema de partida a frio.

Fonte: Sales, 2001.

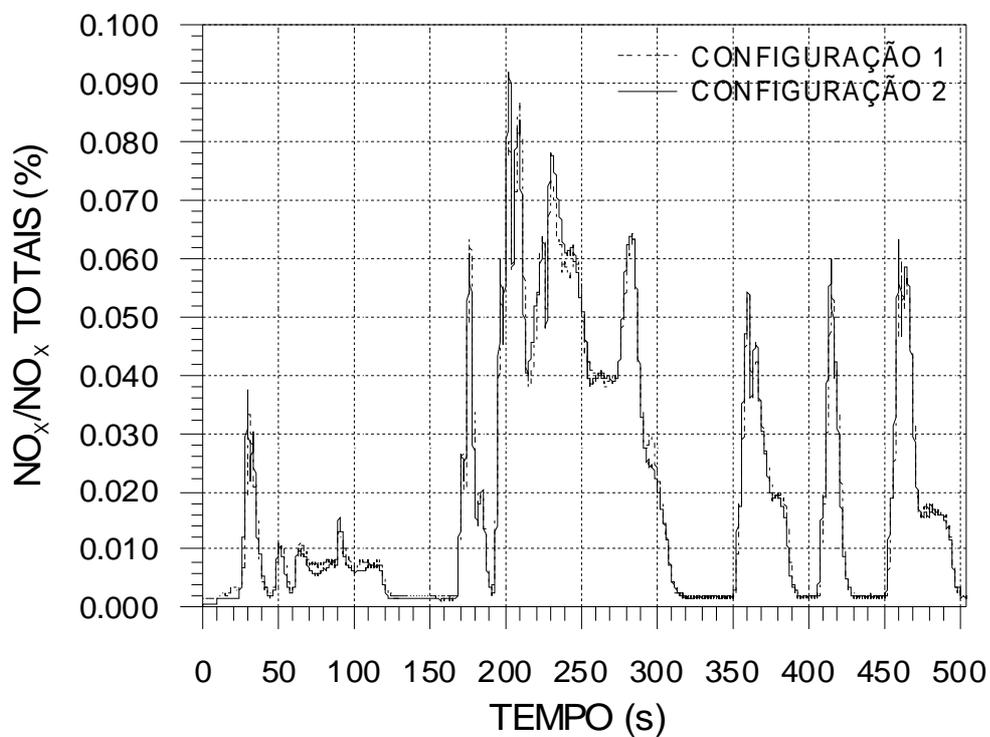


Figura 20: Emissões de NO_x antes do catalisador relativas à concentração total emitida na primeira fase do ciclo FTP-75, para duas configurações de sistema de partida a frio.

Fonte: Sales, 2001.

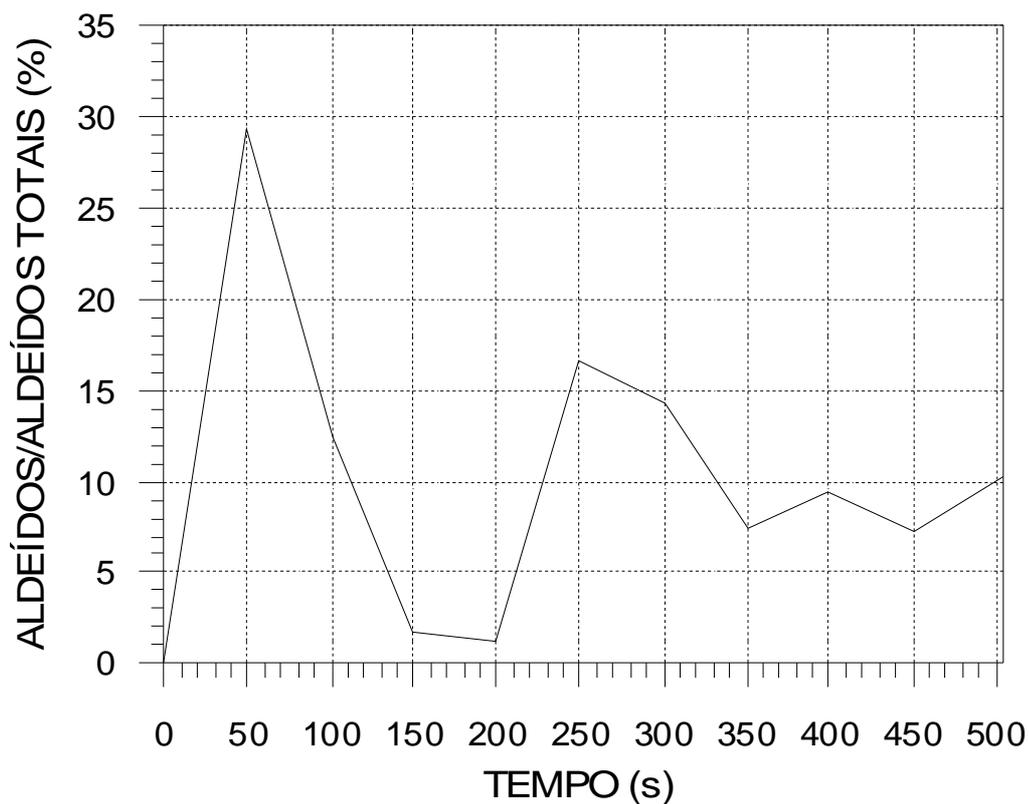


Figura 21: Emissões de aldeídos após o catalisador relativas à concentração total emitida na primeira fase do ciclo FTP-75

Fonte: Sales, 2001.

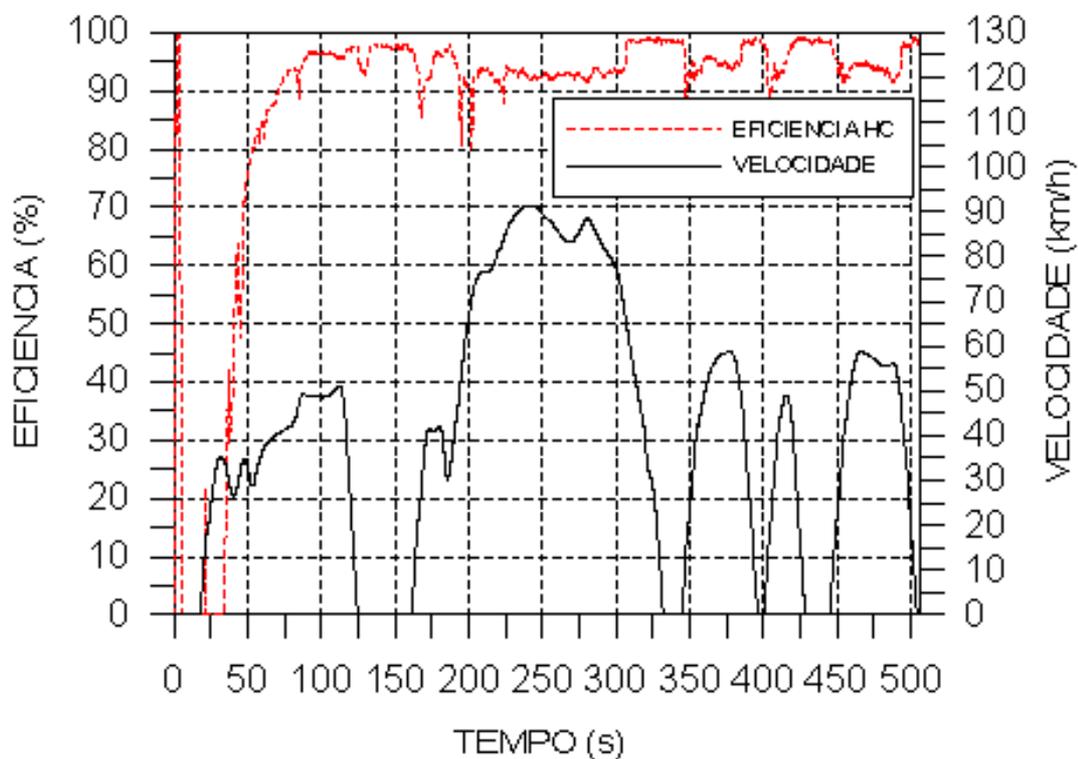


Figura 22: Eficiência de conversão de HC na primeira fase do ciclo do ciclo FTP-75.

Fonte: Sales, 2001.

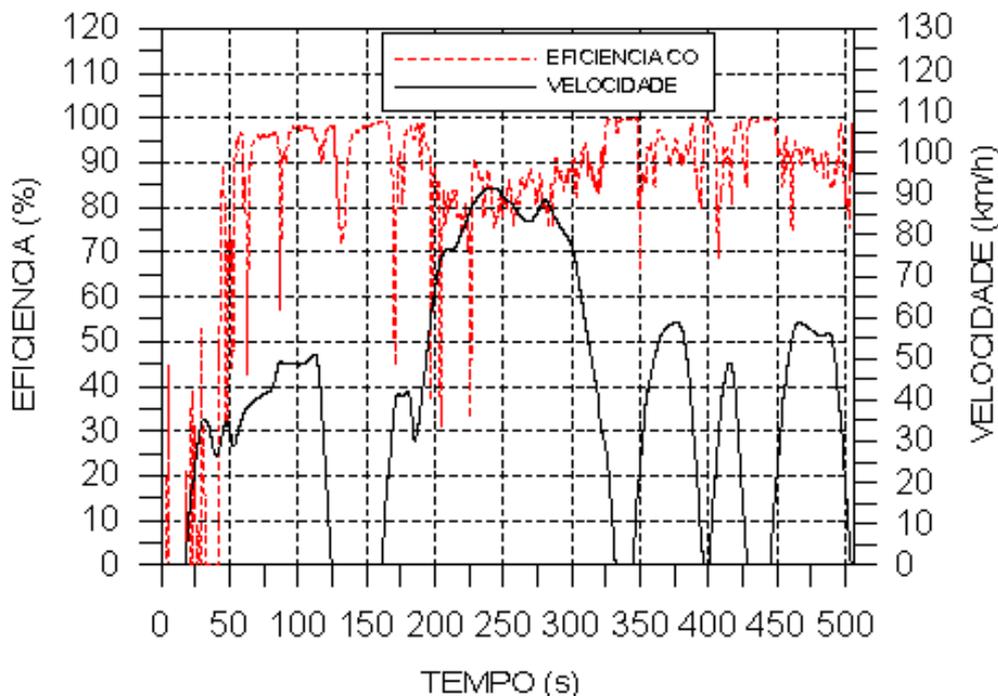


Figura 23: Eficiência de conversão de CO na primeira fase do ciclo do ciclo FTP-75.
Fonte: Sales, 2001.

Na fase de aquecimento, nos primeiros 150 s, as emissões de NO_x são muito inferiores aos níveis que ocorrem após 200 s, quando o motor opera com temperaturas mais elevadas e razão combustível/ar mais pobre (Fig. 20). Sales (2001) também comparou as emissões produzidas por duas configurações de sistemas de partida a frio. A configuração 2 possibilitava melhor pulverização e menor quantidade de gasolina e etanol injetados durante a partida a frio e aquecimento do motor. Com o empobrecimento da mistura através da configuração 2 foi possível reduzir as emissões de HC e CO, principalmente nos 50 s iniciais do ciclo, uma vez que estes componentes são fortemente influenciados pela razão de equivalência da mistura combustível/ar (Figs. 18 e 19). Não foram observadas diferenças significativas para as emissões de NO_x e aldeídos (Figs. 20 e 21).

Dentre os diversos compostos químicos que formam os aldeídos, são considerados como poluentes o acetaldeído ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$ ou CH_3CHO) e o formaldeído (CH_2O ou HCHO). Gabele (1990) comparou as emissões de formaldeído de um veículo seguindo o ciclo FTP-75, variando o percentual de metanol (0%, 25%, 50%, 85% e 100%) na mistura com a gasolina. Nos testes com a mistura contendo 85% de metanol e com metanol puro, mais da metade do valor total das emissões de formaldeído ocorreram durante os 125 s iniciais, que compreende o período de

aquecimento do motor após a partida a frio. Neste período existe uma combinação de excesso de combustível não queimado e carga aplicada ao motor, que são formadores de aldeídos, de acordo com Ayyasamy et al. (1981). Os autores compararam as emissões de aldeídos em função da razão de equivalência da mistura combustível/ar utilizando gasolina e metanol. A variação na razão de equivalência da mistura essencialmente faz variar a temperatura da exaustão e a concentração de oxigênio, parâmetros importantes para a formação de aldeídos. A Fig. 24 mostra níveis mínimos de aldeídos na região próxima à estequiométrica, aumentando quando a mistura torna-se rica ou pobre. Em geral, os aldeídos são cerca de quatro vezes maiores com o metanol em relação à gasolina.

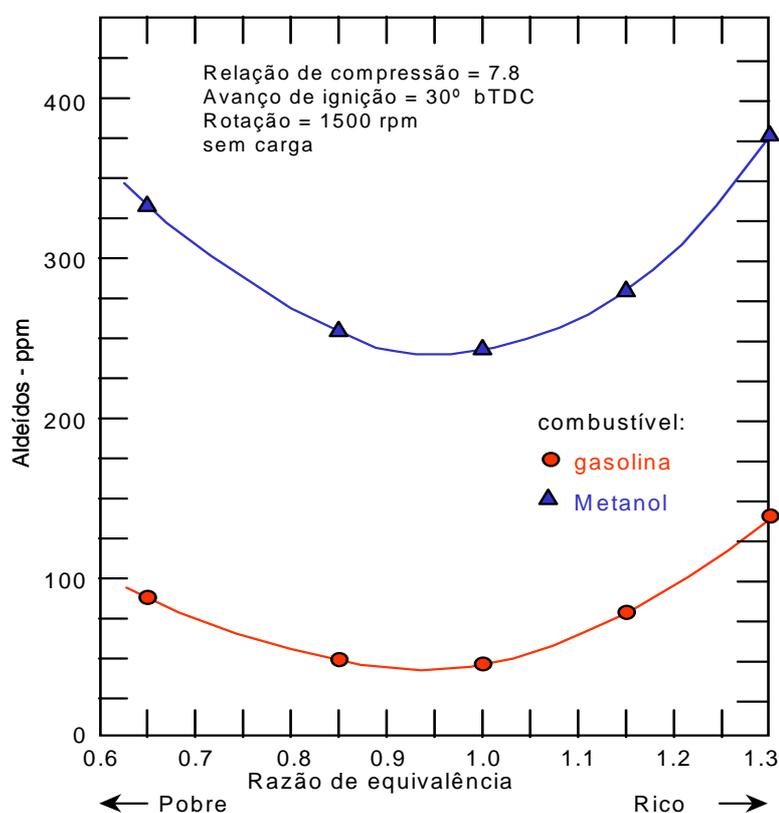


Figura 24: Efeito da razão de equivalência da mistura nas emissões de aldeídos.
Fonte: Ayyasamy et al., 1981.

Magnusson et al. (2002) investigaram as emissões de aldeídos e cetonas utilizando um motor de dois tempos alimentado com etanol, gasolina e misturas de gasolina com 15%, 50% e 85% de etanol. A emissão de acetaldeído foi dominante na utilização de misturas de gasolina com etanol. A concentração de acetaldeído variou dependendo do teor de etanol na mistura e da razão ar/combustível. Por outro

lado, com a utilização de gasolina a predominância foi de formaldeído. Zárante et al. (2008) utilizaram a cromatografia gasosa (GC) com um detector por ionização da chama (FID) como um método alternativo para a análise de formaldeído e acetaldeído na exaustão de motores de combustão interna. Em testes realizados com um motor 1.4 l 8V operando com etanol, os autores analisaram a formação de aldeídos variando a rotação do motor de 2000 a 4000 rev/min em um dinamômetro. Os resultados mostraram que a concentração de C_2H_4O foi maior que a concentração de CH_2O , independentemente da velocidade de rotação do motor.

Os trabalhos avaliados neste capítulo mostraram que as propriedades físico-químicas do etanol, como a volatilidade e a pressão de vapor, podem prejudicar a partida e funcionamento a frio de motores. Considera-se também que as emissões de poluentes, principalmente HC e CO proveniente do período de aquecimento do motor, constituem-se em uma grande preocupação quando é utilizado o etanol como combustível.

Normalmente, são utilizados sistemas de partida a frio que contemplam a utilização de compostos voláteis como a gasolina para auxiliar na operação do motor em baixas temperaturas. Por outro lado, propostas e estudos relacionados à eliminação da utilização da gasolina se utilizam do aquecimento do etanol ou do ar de admissão isoladamente, podendo não resultar em uma mistura combustível/ar com uma taxa de evaporação do etanol consistente para a combustão em baixas temperaturas.

Desta forma, as pesquisas relacionadas neste trabalho apresentaram metodologias ou recursos para avaliar e minimizar os efeitos da utilização do etanol em baixas temperaturas. Neste sentido, a proposta do novo sistema de partida a frio aqui apresentada se posiciona de forma inédita e avançada em relação ao estado da arte, pois possibilita o aquecimento do etanol e do ar de admissão de forma combinada ou isolada dependendo da temperatura ambiente. Assim, pode-se proporcionar uma mistura com ar e etanol suficientemente aquecidos, minimizando as perdas de calor relacionadas ao aquecimento do etanol isoladamente. Este artifício colabora de forma eficiente na partida e operação do motor em baixas temperaturas, além de reduzir consideravelmente as emissões de poluentes.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para melhor elucidar o entendimento dos aspectos relacionados à termodinâmica, transferência de calor e de massa na análise experimental do comportamento do novo sistema de partida a frio, neste capítulo são apresentados os conceitos fundamentais aplicados aos volumes de controle do ar e do etanol. Para os volumes de controle são identificadas as equações para análise da conservação de massa e de energia dos fluidos durante a partida a frio. As equações e os volumes de controle também foram utilizados para as análises numéricas e experimentais do sistema nos artigos internacionais apresentados nos Anexos I e II. Como a análise experimental também inclui resultados de emissões de poluentes pela exaustão do motor, neste capítulo são mostradas as equações químicas da combustão do etanol e a teoria de formação de poluentes durante a partida a frio.

3.1 Volumes de controle do ar de admissão e do etanol

O volume de controle considerado para o processo de aquecimento do ar de admissão é formado pela geometria do coletor admissão e pelo corpo da válvula borboleta, como mostra a Fig. 25. A representação do coletor de admissão com o corpo de borboleta, o aquecedor de ar e os condutos do cabeçote é mostrada nas Figs. 26 e 27. O volume de controle do ar de admissão é compreendido pelo corpo de borboleta, aquecedor de ar e coletor de admissão. A Fig. 28 mostra o corpo de borboleta e o volume de controle do ar formado com a borboleta totalmente aberta. Na Fig. 29 é mostrado o volume de controle do aquecedor de ar que foi montado abaixo do corpo de borboleta. O volume total é de $3233734,64 \text{ mm}^3$, sendo $3042777,48 \text{ mm}^3$ do coletor de admissão, $142345,39 \text{ mm}^3$ do corpo de borboleta e $48611,77 \text{ mm}^3$ do aquecedor de ar, mostrados nas Figs. 27 a 29.

Para o processo de aquecimento do etanol o volume de controle considerado é formado pela geometria tubular da galeria do eletro-injetor onde está inserida uma resistência elétrica, conforme mostrado na Fig. 30. A Fig. 31 mostra o volume

ocupado pelo etanol dentro de um dos quatro porta-eletoinjetores, onde está posicionada a resistência elétrica. O volume que compreende a análise é de 4219 mm^3 .

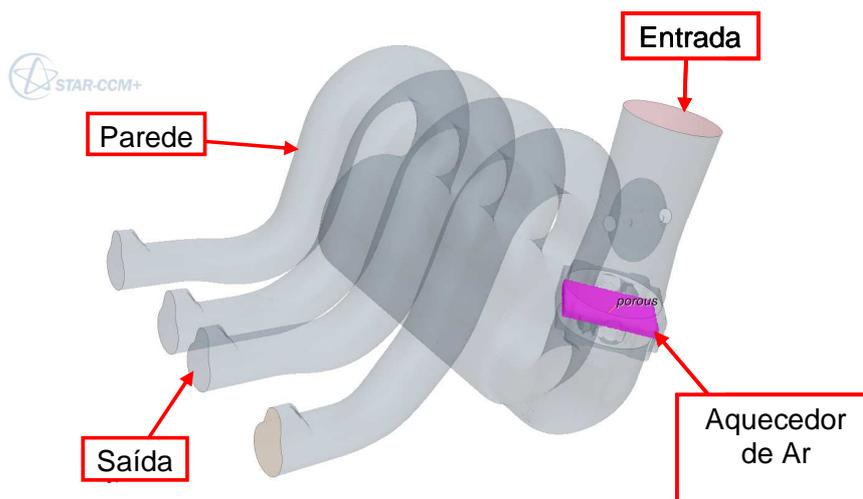


Figura 25: Volume de controle do ar no coletor de admissão.
Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

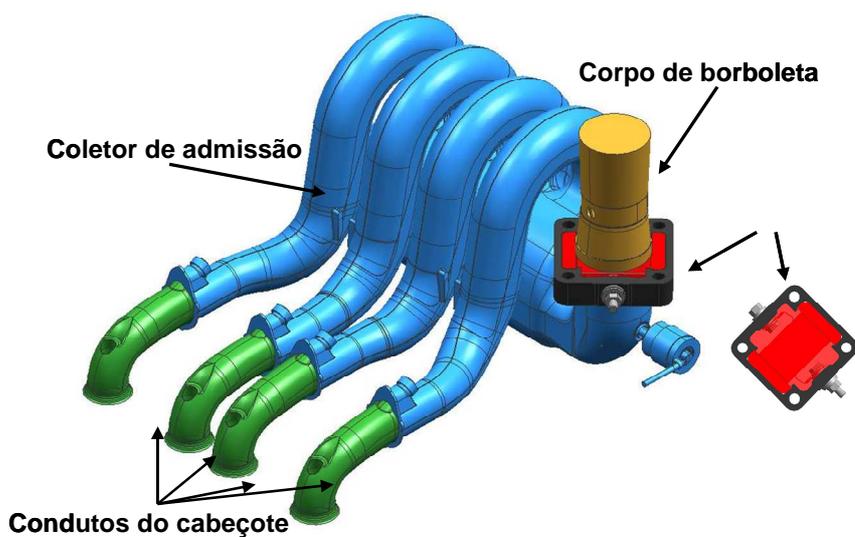


Figura 26: Coletor de admissão com o corpo de borboleta, a resistência elétrica para o aquecimento do ar e os condutos do cabeçote.
Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

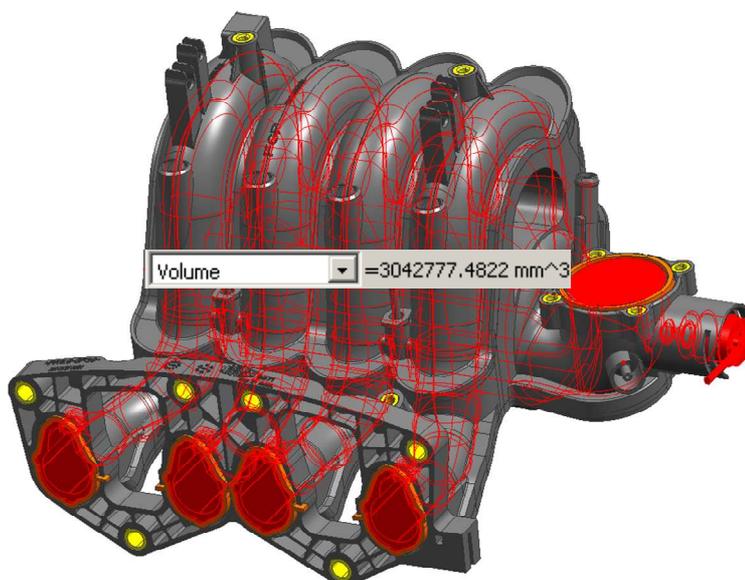


Figura 27: Volume do ar dentro do coletor de admissão.
Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

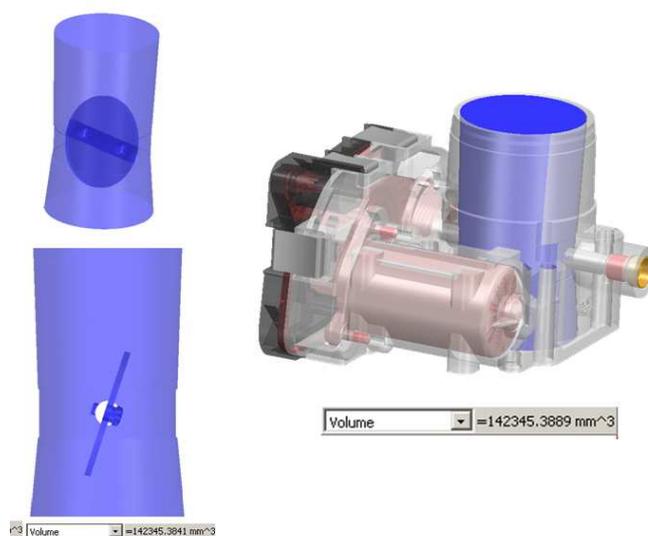


Figura 28: Corpo de borboleta e o detalhe do volume de controle.
Fonte: Dados da pesquisa (2010).

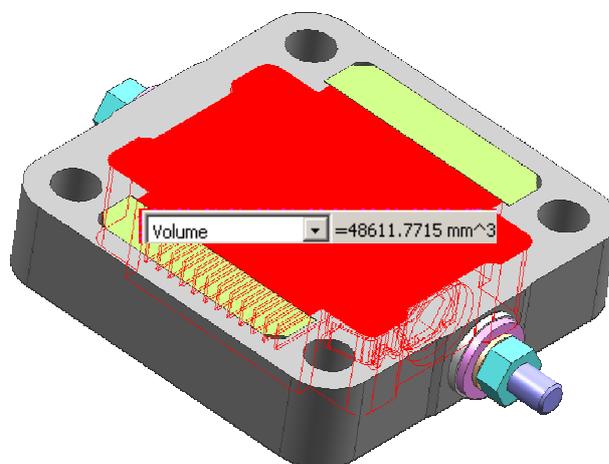


Figura 29: Detalhe do volume do aquecedor de ar.
Fonte: Dados da pesquisa (2010).

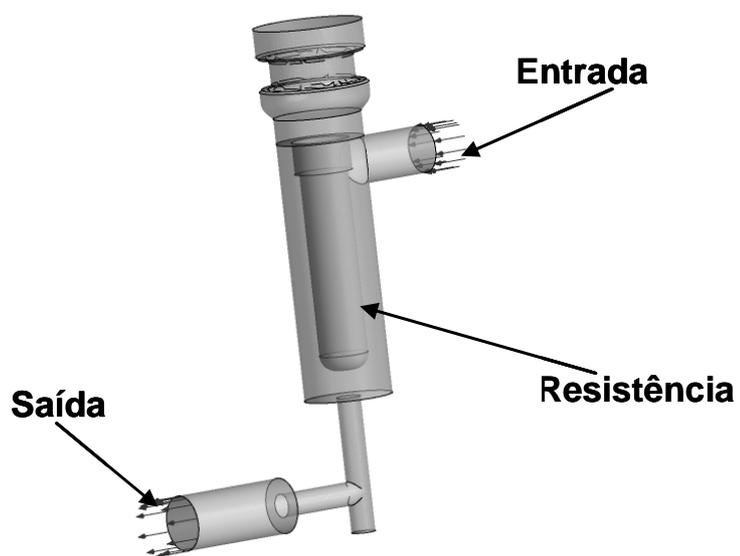


Figura 30: Volume de controle do etanol.
Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

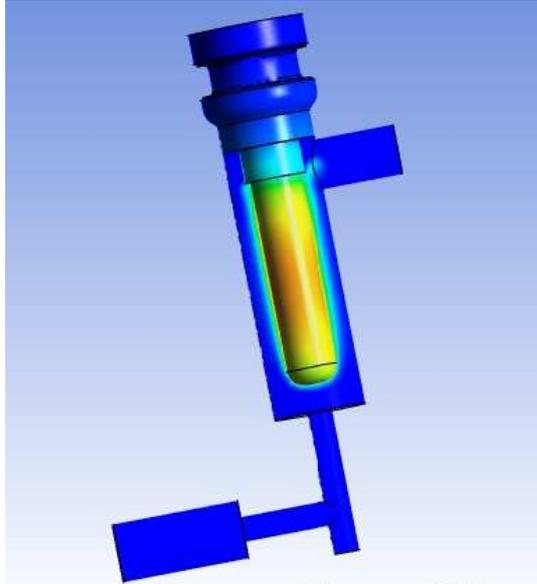


Figura 31: Representação do volume de etanol dentro do porta-eletoinjeter.
 Fonte: Dados da pesquisa , 2010.

3.3 Equações de conservação de massa e energia para os volumes de controle

Para o volume de controle do ar de admissão (Figs. 25 a 27), a aplicação da equação de conservação de energia é assim escrita (INCROPERA et al., 2008, MORAN; SHAPIRO, 2002):

$$\dot{m}_{entra} \left(u_t + pv + \frac{1}{2} V^2 + gz \right)_{entra} - \dot{m}_{sai} \left(u_t + pv + \frac{1}{2} V^2 + gz \right)_{entra} + \dot{q} - \dot{W} = \left(\frac{dE}{dt} \right)_{acumulada} \quad (1)$$

Onde:

\dot{m} - vazão mássica do fluido (kg/s);

u_t - energia interna específica total (kJ/kg);

p - pressão (Pa);

v - volume específico (m³/kg);

V - velocidade (m/s);

g - aceleração da gravidade (m/s^2);

z - coordenada de posição (m);

\dot{q} - taxa de calor absorvido e perdido (W/m^2);

\dot{W} - trabalho transferido na fronteira do volume de controle (kJ/kg);

$(dE/dt)_{acumulada}$ - energia térmica acumulada no volume de controle (kJ/s).

Os subscritos *entra* e *sai* (sistema aberto) referem-se à entrada e saída dos volumes de controle, respectivamente.

Considerando $\dot{W} = 0$ e a variação da energia potencial desprezível, e ainda utilizando a entalpia específica ($h = u + pv$), a Eq. 1 é reescrita da seguinte forma:

$$\dot{m}_{entra} \left(h + \frac{1}{2} V^2 \right)_{entra} - \dot{m}_{sai} \left(h + \frac{1}{2} V^2 \right)_{entra} + \dot{q} = \left(\frac{dE}{dt} \right)_{acumulada} \quad (2)$$

Outra consideração importante para os volumes de controle é que as vazões mássicas de ar e de etanol podem ser consideradas constantes (não existe acúmulo de massa no interior do volume de controle) no período compreendido pela análise. Sendo assim, aplica-se o princípio da conservação da massa:

$$\sum_{entra} \dot{m}_{entra} = \sum_{sai} \dot{m}_{sai} = m \quad (3)$$

O termo \dot{q} pode ser representado pela diferença entre o calor fornecido pela resistência e o calor perdido para as paredes por convecção, da seguinte forma;

$$\dot{q} = \dot{q}_{aquecimento} - \dot{q}_{convecção} \quad (4)$$

O calor cedido pelas resistências elétricas $\dot{q}_{aquecimento}$ é representado por:

$$\dot{q}_{aquecimento} = RI^2 \quad (5)$$

Onde R é a resistência elétrica (Ω) e I é a corrente elétrica (A).

O calor perdido para as paredes por convecção é representado pela Lei de Newton para o Resfriamento:

$$\dot{q}_{convecção} = h A(\Delta T) \quad (6)$$

Onde h é o coeficiente convectivo, A é a área superficial e ΔT é a diferença de temperatura entre o fluido e a parede.

A energia térmica acumulada pode ser representada por:

$$\left(\frac{dE}{dt} \right)_{acumulada} = \frac{d}{dt}(\rho V c_v T) \quad (7)$$

Onde ρ é a massa específica, V é o volume, c_v é o calor específico a volume constante e T é a temperatura.

Finalmente, utilizando as Eqs. 3 a 7, a Eq. 2 pode ser reescrita como:

$$\dot{m} \left[(h_{entra} - h_{sai}) + \left(\frac{V_{entra}^2 - V_{sai}^2}{2} \right) \right] + (RI^2 - hA\Delta T) = \frac{d}{dt}(\rho V c_v T) \quad (8)$$

O balanço de energia representado pela Eq. 8 demonstra que a energia acumulada no volume de controle depende fortemente do calor cedido ao fluido através das resistências elétricas e de propriedades dependentes da temperatura.

A equação de continuidade (Eq. 3) pode também ser aplicada para calcular o tempo necessário para que a massa de ar aquecido no sistema de admissão preencha o volume do cilindro após a abertura da válvula de admissão. A válvula é aberta com a ativação do motor através do giro da chave de ignição. Fazendo a conservação de massa entre o volume de controle no sistema de admissão onde ocorre o aquecimento do ar e o cilindro do motor, considerando a massa total admitida por ciclo (para as duas revoluções do eixo virabrequim no ciclo térmico do motor de quatro tempos ocorre a admissão do volume total de ar) e a massa de ar aquecido:

$$\frac{\rho_a \nabla_a}{t_{WOT}} = \frac{\rho_{cil} \nabla_{cil} \omega}{120} \quad (9)$$

$$t_{WOT} = \left(\frac{120}{\omega} \right) \frac{\rho_a \nabla_a}{\rho_{cil} \nabla_{cil}} \quad (10)$$

Onde:

t_{WOT} – período mínimo em que a borboleta deve permanecer totalmente aberta (s);

∇_a - volume total aquecido, do corpo de borboleta à entrada dos cilindros (m³);

∇_{cil} – volume total deslocado em um ciclo do motor (m³);

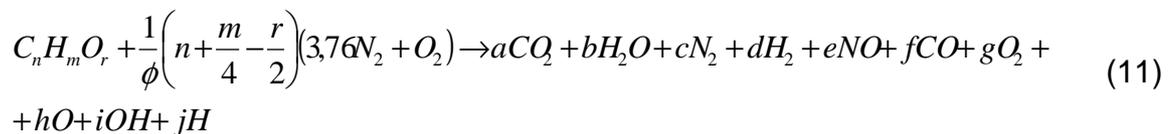
ρ_a – massa específica do ar aquecido na admissão (kg/m³);

ρ_{cil} – massa específica do ar no cilindro (kg/m³);

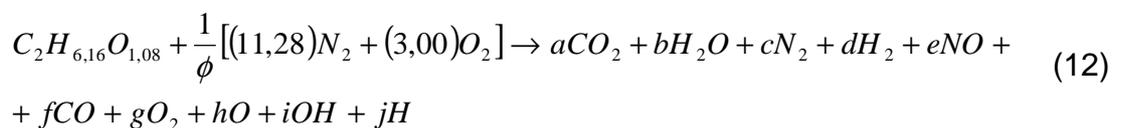
ω – frequência ou rotação do motor (rev/min).

3.4 Formação de HC, CO, NO_x e CHO

Os principais produtos da combustão de um combustível oxigenado para uma mistura rica ou pobre podem ser identificados na seguinte reação:



Para o etanol (C₂H_{6,16}O_{1,08}), a Eq. 11 pode ser reescrita como:



A formação de CO é cineticamente controlada. Assim, o valor de equilíbrio calculado pela Eq. 12 não coincide com a concentração medida na exaustão. As principais reações de formação de monóxido de carbono são descritas por Heywood (1988):

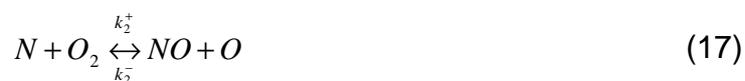


Onde k_i^+ são as constantes das taxas de avanço e k_i^- são as constantes das taxas de retorno, funções exponenciais da temperatura. A taxa de formação de CO é dada por:

$$\frac{d[CO]}{dt} = k_1^- [CO_2][H] - k_1^+ [CO][OH] + k_2^+ [CO_2][O] - k_2^- [CO][O_2] \quad (15)$$

As constantes das taxas de reação e o cálculo da formação cinética de CO são detalhados por Raggi e Sodré (2003).

Tal como monóxido de carbono, a cinética química de forma o dos óxidos de nitrogênio (NO_x) difere da velocidade da rea o de combustão Eq. 12. As principais rea o es de forma o de NO, que corresponde   quase totalidade de NO_x em motores com igni o por centelha,   apresentada por Heywood (1988) para misturas próximas   estequiometria:



Onde k_i^+ são as constantes da reação direta e k_i^- as constantes de reação inversa. A taxa de formação de NO é dada por:

$$\frac{d[NO]}{dt} = \frac{2R_1\{1 - ([NO]/[NO]_e)^2\}}{1 + ([NO]/[NO]_e)R_1/(R_2 + R_3)} \quad (19)$$

Onde $R_1 = k_1^+[O]_e[N_2]_e$, $R_2 = k_2^-[NO]_e[O]_e$ e $R_3 = k_3^-[NO]_e[H]_e$. Informações complementares sobre as constantes de reação e o cálculo da Eq. (28) podem ser encontradas em Raggi e Sodré (2004).

Os hidrocarbonetos não queimados e os aldeídos não são produtos da combustão e, portanto, não foram representados nas Eqs. 11 e 12. Os hidrocarbonetos não queimados e aldeídos são formados por outros processos. A forma o de HC está relacionada ao combustível não queimado. As principais fontes de combustível não queimado são descritas por Sodré e Yates (1997):

- a) Aberturas existentes na câmara de combustão – a como as encontradas na extremidade da junta entre o cabeçote e o bloco do motor, sede das válvulas e rosca da vela de igni o – onde a mistura combustível/ar se aloja e a chama não consegue penetrar, sendo a principal delas a formada entre o conjunto pistão–cilindro–anéis de segmento;
- b) Absor o de moléculas do combustível pela camada de óleo lubrificante do cilindro em contato com a mistura combustível/ar antes da passagem da chama, com subsequente desprendimento do combustível para os gases queimados após a passagem da chama;
- c) Região fria próxima às paredes da câmara, onde ocorre a extin o da chama devido   baixa temperatura e a mistura combustível/ar não   queimada;
- d) Depósitos, cuja porosidade a mistura combustível/ar fresca pode se alojar e onde a chama não consegue penetrar;
- e) Extin o da chama no núcleo da câmara antes da combustão ter se completado, não queimando toda a mistura combustível/ar existente na câmara, devido a fatores tais como excesso de turbulência, turbulência insuficiente e mistura excessivamente pobre ou rica;

Uma parte do combustível não queimado na câmara de combustão sofre um intenso processo de oxida o p s-chama que se inicia na câmara e pode se

propagar pelo duto de exaustão, devido ao contato com os gases queimados sob altas temperaturas e em presença de oxigênio. Para baixas temperaturas a taxa de oxidação do HC não queimado é lenta, convertendo menor quantidade de combustível não queimado (SODRÉ, 1998). Quando o motor opera com etanol puro (E100), a quantidade de HC não queimado na câmara de combustão durante o período de aquecimento do motor é agravada devido à baixa volatilidade do combustível (OWEN; COLEY, 1995). Sob condições de baixas temperaturas e devido ao elevado calor latente de vaporização, o etanol permanece em grande parte na forma líquida. O etanol líquido não é queimado na combustão, mas participa de um processo de oxidação pós-chama, gerando HC.

Os aldeídos formados na fase intermediária da reação de combustão da mistura combustível/ar são consumidos imediatamente pela frente de chama devido à alta temperatura nessa região dentro da câmara de combustão (BROWNING; PEFLEV, 1977a; 1977b; 1979). Os aldeídos encontrados na exaustão são compostos provenientes da oxidação pós-chama do combustível não queimado na câmara. O número de átomos de carbono e hidrogênio existentes nos hidrocarbonetos e nos álcoois é fundamental para a formação dos aldeídos. As cadeias que possuem mais átomos de carbono formam aldeídos com cadeias também maiores. Os aldeídos de interesse para controle de emissões veiculares são o formaldeído e o acetaldeído. A formação de formaldeído (CH_2O) e acetaldeído ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$) se inicia na câmara de combustão e se propaga no duto de exaustão. O processo de oxidação pós-chama de metano (CH_4) ou de metanol (CH_3OH) é o principal formador de formaldeído (CH_2O), enquanto a oxidação pós-chama de etano (C_2H_6) ou de etanol não queimado ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) produz acetaldeído ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$). Metano, metanol e etanol podem ser formados como produtos intermediários da combustão ou da oxidação pós-chama do combustível não queimado (COSTA, 2007).

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A metodologia experimental para a obtenção dos dados para análise em uma bancada de testes e em um veículo é apresentada neste capítulo. Também são apresentados os métodos para a análise das emissões de poluentes, além dos detalhes do novo sistema de partida a frio aplicado em um motor 1.4 l *flex fuel*.

4.1 Testes em bancada

O coletor de admissão e o sistema de alimentação de combustível de um motor 1.4 l *flex fuel* foram alterados pela instalação de um aquecedor de ar abaixo do corpo de borboleta, além da substituição da galeria de injetores por quatro porta-eletores injetores dotados cada um com uma resistência elétrica. Originalmente a galeria de combustível com os quatro injetores, o corpo de borboleta e entradas de gasolina do sistema de partida a frio convencional são instalados no coletor de admissão.

4.1.1 Aparato experimental para testes em bancada

O coletor de admissão equipado com o sistema de partida a frio para aquecimento do ar de admissão e do etanol foi montado em um cabeçote sobre uma bancada de testes. A Fig. 32 apresenta o coletor de admissão e galeria de combustível com os injetores originais. A Fig. 33 mostra o cabeçote com os respectivos condutos para cada cilindro do motor. Um compressor de ar foi utilizado para ajustar a velocidade do ar, tornando possível a variação da velocidade em função da variação da tensão elétrica de alimentação do compressor (0 a 24 V). A Fig. 34 mostra o conjunto de todos os componentes que formam o aparato experimental para os testes em bancada. A Fig. 35 mostra detalhadamente o sistema de aquecimento do etanol no coletor de admissão com os porta-eletores

injetores, com os eletro injetores e as resistências elétricas. Foi utilizada uma linha pressurizada para o etanol com um modulador de frequência (Fig. 36) para controle de abertura e fechamento dos eletroinjetores. A faixa de atuação do modulador de frequência é de 70 Hz a 840 mHz, ou seja, o tempo de abertura e fechamento dos injetores pode ser ajustado de 14,3 ms a 1,2 s.

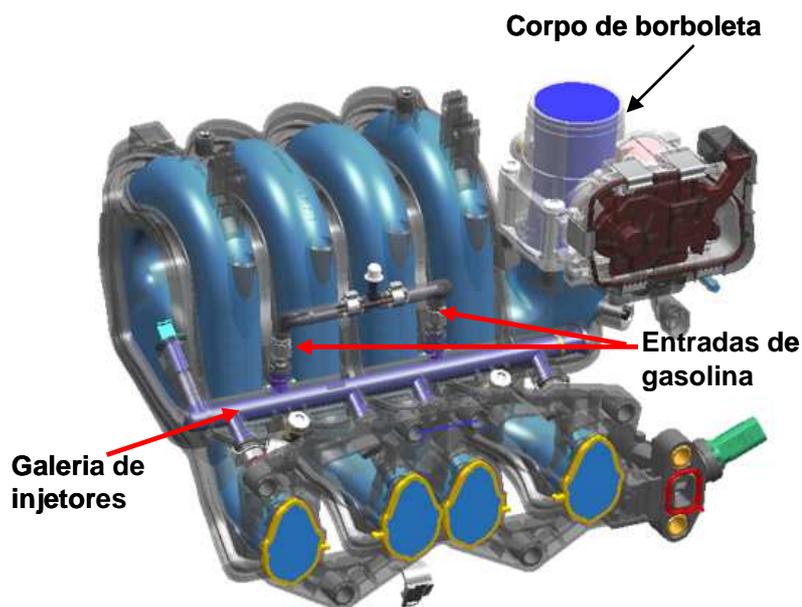


Figura 32: Coletor de admissão com a galeria de combustível com os injetores, corpo de borboleta e entradas de gasolina do sistema de partida a frio convencional.

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

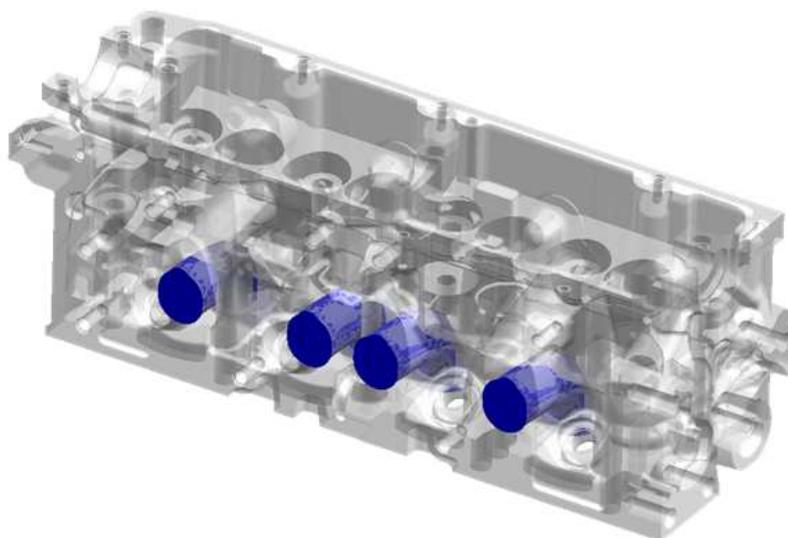


Figura 33: Cabeçote com os respectivos condutos para cada cilindro do motor.

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

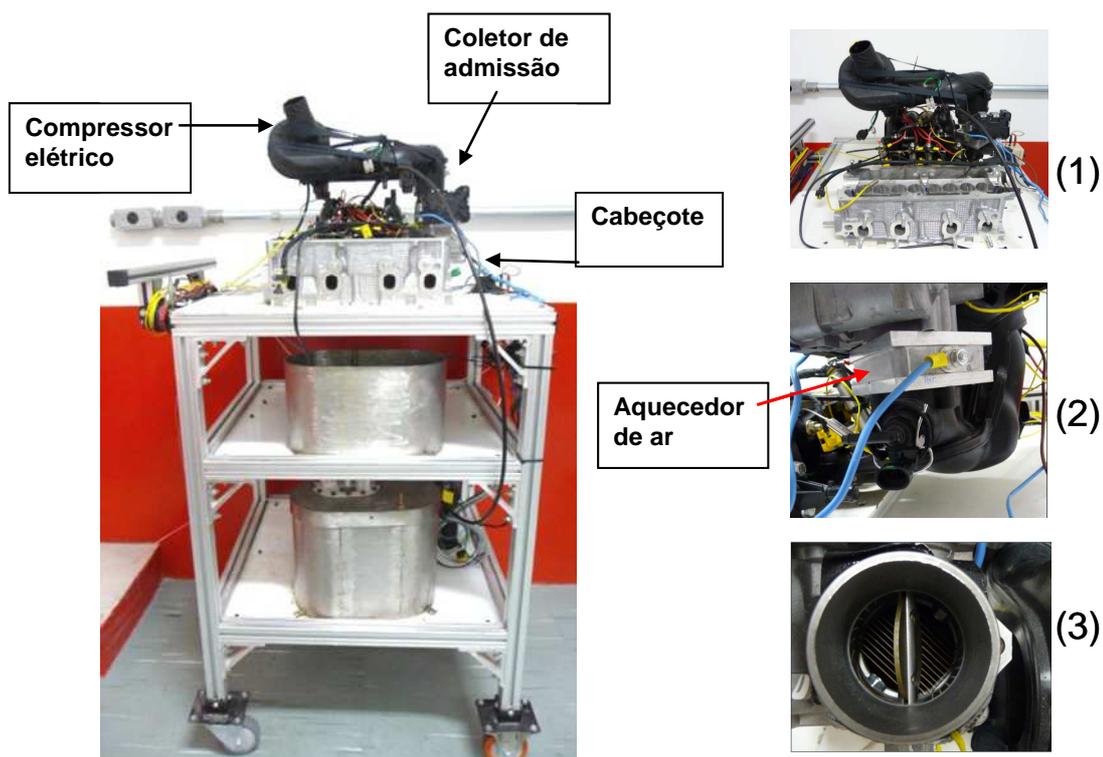


Figura 34: Bancada de testes com o todos componentes. (1) detalhe do cabeçote, coletor de admissão e compressor de ar, (2) detalhe do aquecedor de ar abaixo do corpo de borboleta e (3) vista superior do corpo de borboleta com borboleta aberta e resistências do aquecedor de ar.
 Fonte: Fotos do autor , 2010.

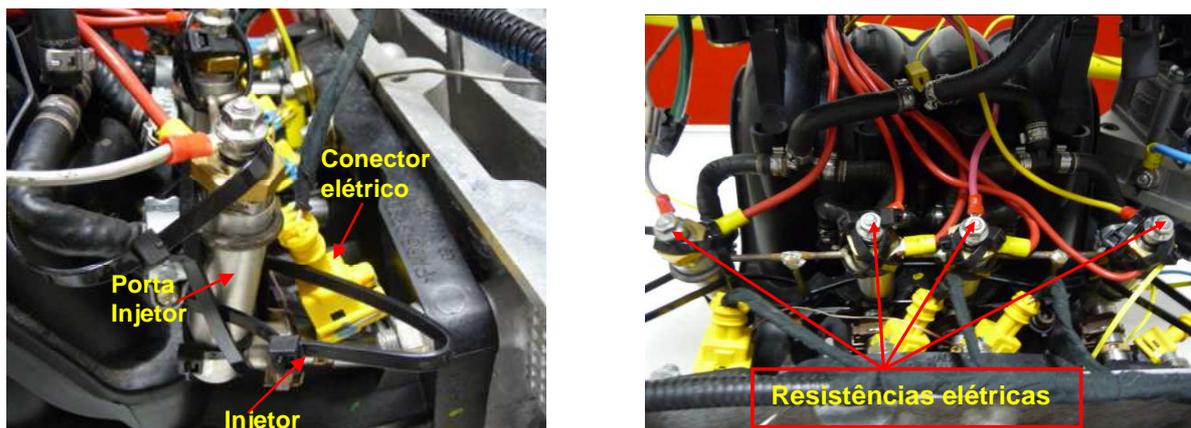


Figura 35: Detalhes do sistema de aquecimento do etanol no coletor de admissão.
 Fonte: Fotos do autor, 2010.

O sistema que compõe a bancada de testes foi equipado com uma bomba de combustível que proporciona uma pressão constante de 2,0 bar para o etanol. Para o controle e ajuste da pressão foram utilizados um manômetro e um regulador de pressão. O manômetro apresentava uma faixa de medição até 4,0 bar, com resolução de 0,1 bar. A mobilidade da bancada permitiu que a mesma fosse transportada para dentro da cela climática, cuja temperatura foi mantida a 0 °C. Em função das perdas de carga elétrica da instalação e a necessidade da realização de testes sucessivos foram utilizadas duas baterias cada uma com tensão nominal de 12V. A potência elétrica possível para o aquecedor de ar e resistências elétricas para aquecimento do etanol era de 200 W e 85 W/injetor, respectivamente. A Fig. 37 mostra o esquema elétrico do sistema de aquecimento do ar e do etanol, instalado na bancada de testes.

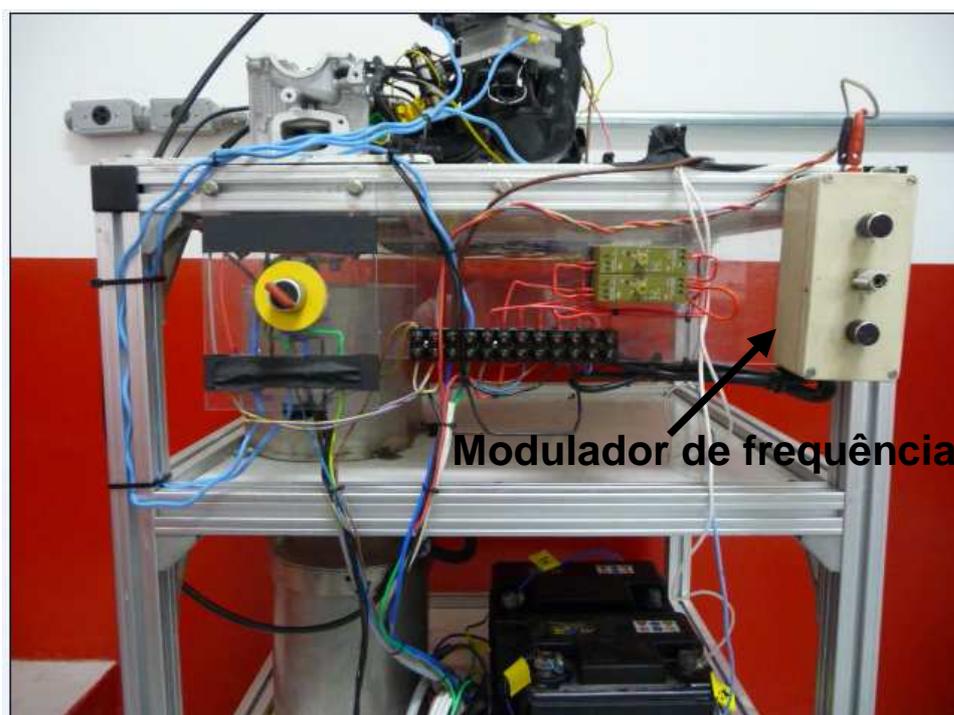


Figura 36: Modulador da frequência abertura e fechamento dos eletroinjetores.

Fonte: Foto do autor, 2010.

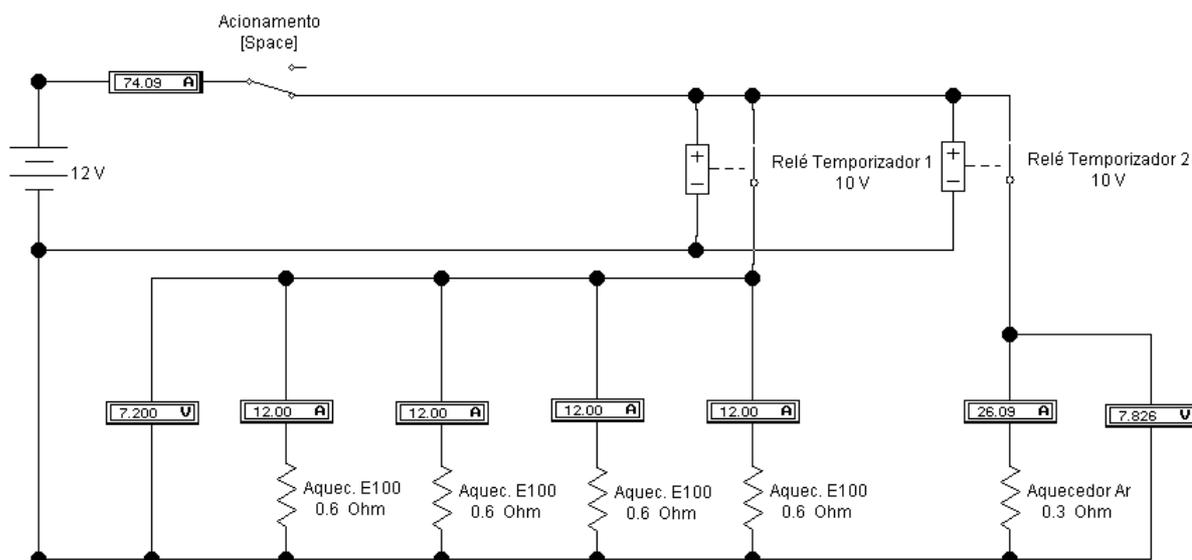


Figura 37: Esquema elétrico do sistema de aquecimento do ar e do etanol da bancada de testes.
Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

Nas medições de temperaturas do etanol e do ar foram utilizados termopares tipo K, com faixa de operação de $-50,0$ a $1300,0$ °C, exatidão de leitura de $\pm 0,4\% + 0,8$ °C, resolução de $0,1$ °C e tempo de resposta de $\sim 1,0$ s. Para as medições de temperatura do ar os termopares foram instalados nos dutos do coletor de admissão antes e depois do aquecedor de ar e nas saídas dos dutos, próximo às válvulas de admissão ($T_{\text{ar, saída}}$). As temperaturas do etanol foram obtidas através de termopares instalados na entrada do porta-eletoinjeter ($T_{\text{etanol, entrada}}$), na região interna do porta-eletoinjeter e no acoplamento com o eletroinjeter ($T_{\text{etanol, acoplamento}}$). Também foi instalado um termopar no interior do coletor de admissão, na região imediatamente à frente do injeter, para a medição da temperatura do jato de etanol misturado com o ar ($T_{\text{etanol, mistura}}$). A Fig. 38 mostra esquematicamente a instalação dos termopares e a Fig. 39 mostra uma seção de um duto do cabeçote na região de incidência do jato de etanol na entrada do cilindro, onde é medida a temperatura da mistura ar/etanol.

Para a medição da velocidade do ar no coletor de admissão, na entrada do volume de controle, acima da borboleta, foi utilizado um anemômetro de cabo aquecido. A faixa de medição deste anemômetro é de $0,2$ a $20,0$ m/s ($\pm 3\% + 1$ dígito). Um osciloscópio digital com uma frequência máxima de 500 Hz foi utilizado para registrar os dados de temperatura, com uma frequência de 10 Hz.

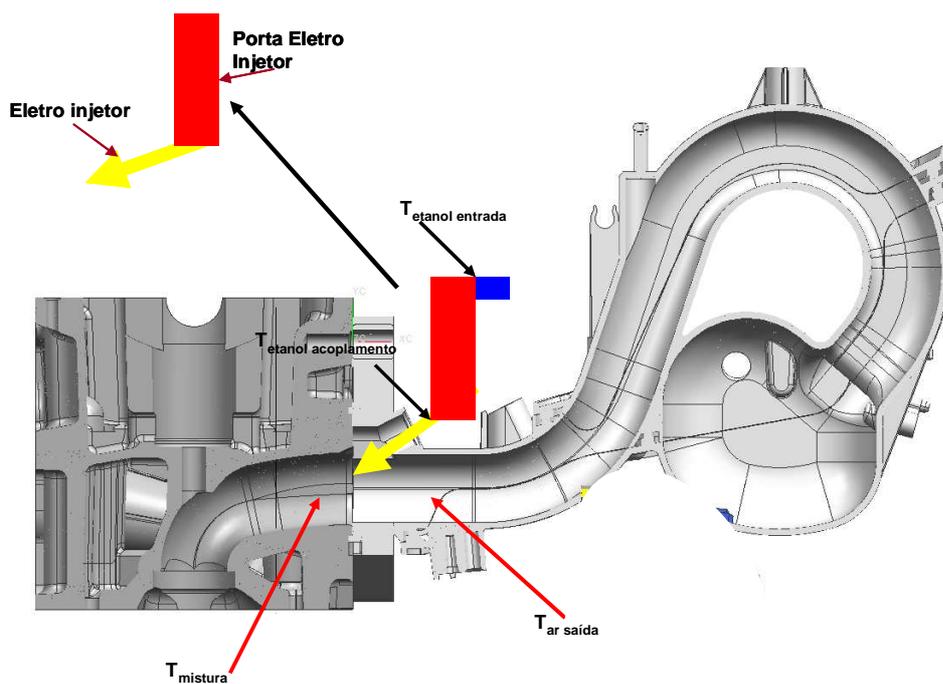


Figura 38: Esquema da instalação dos termopares para medição das temperaturas do ar e do etanol.

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

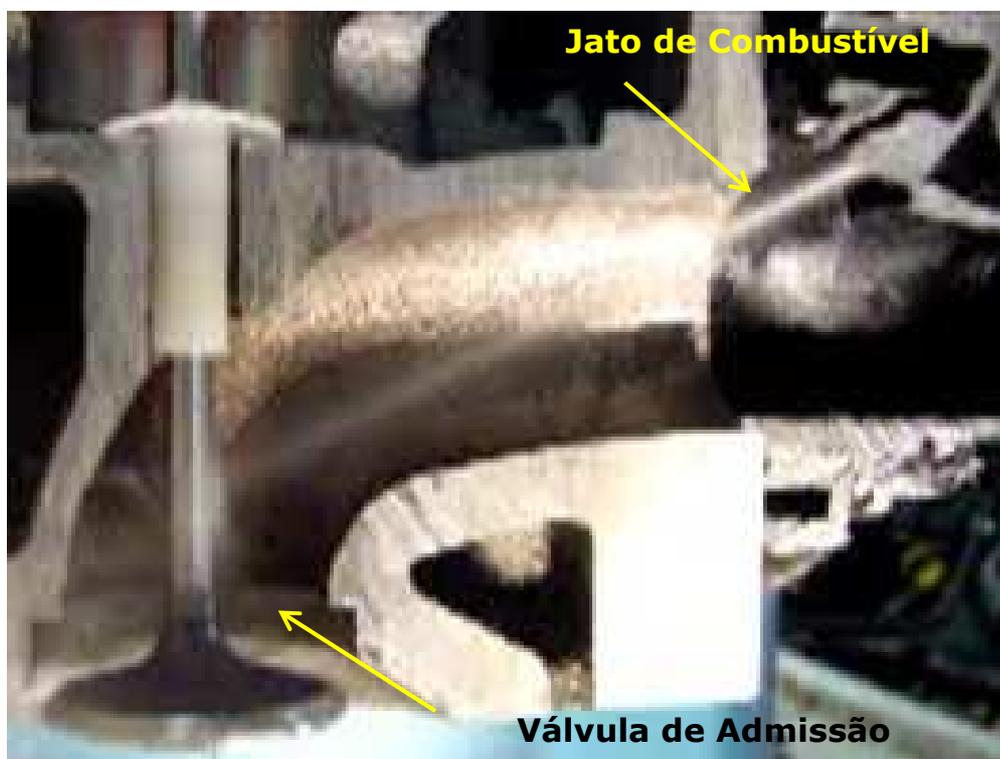


Figura 39: Seção de um duto do cabeçote na região de incidência do jato de etanol na entrada do cilindro.

Fonte: Foto do autor, 2010.

4.1.2 Procedimento experimental para os testes em bancada

Os testes para obtenção das temperaturas do ar e do etanol foram realizados em uma cela climática que permite o ajuste da temperatura ambiente a 0 °C. A bancada foi inserida nesta cela e os testes somente eram realizados após o equilíbrio da temperatura do conjunto com a temperatura ambiente ter sido atingido. As resistências elétricas para aquecimento do etanol e do ar eram ativadas por 8,0 s antes do início do escoamento destes dois fluidos. O período de 8,0 s foi adotado como uma aproximação do tempo de duração dos eventos que podem ocorrer antes do início de operação do motor a frio, como abertura da porta do veículo, posicionamento do condutor no assento e acionamento da chave de ignição. Neste período a linha do etanol era pressurizada a 2,0 bar.

Após os 8,0 s iniciais, o escoamento do etanol foi promovido pela ação do modulador de frequência de abertura/fechamento do eletro injetor. A vazão do etanol através do eletroinjetor era de 2,6 g/s. O escoamento do ar foi promovido pelo compressor, que proporcionava 2,3 m/s de velocidade do ar. A velocidade de escoamento do ar foi induzida para este valor para simular as condições impostas pelo motor de partida.

A válvula do corpo de borboleta foi mantida totalmente aberta durante as medições. A condição de válvula aberta faz parte da estratégia de proporcionar a expulsão do ar frio e chegada do ar aquecido na entrada do cilindro. Após os primeiros ciclos do motor a borboleta era fechada, estabelecendo a condição normal de partida do motor. O período no qual a borboleta deve ficar aberta de acordo com o número de voltas do eixo virabrequim foi determinado pela Eq. (10). Para os sistemas que utilizam corpo da borboleta com controle eletrônico, como no presente trabalho, a abertura da válvula borboleta pode ser realizada via central eletrônica do sistema de controle do motor.

4.2 Análise experimental em veículo

Testes de partida a frio e emissões de poluentes foram realizados em um veículo. Durante os testes de partida a frio também foram coletados os parâmetros de entrada e para validação de trabalhos preliminares de simulação numérica (ver Anexos I e II). As emissões de poluentes foram medidas antes e depois do catalisador.

4.2.1 Sistema de aquecimento do ar de admissão e do etanol

Na avaliação experimental do sistema de partida a frio com aquecimento do ar de admissão e do etanol foi utilizado um veículo com motor 1.4 l *flex fuel* abastecido com etanol hidratado (E100). O coletor de admissão com o aquecedor de ar e as resistências para aquecimento do etanol foi instalado no motor. Assim, o sistema de partida a frio convencional com introdução de gasolina (E22) no coletor de admissão foi desativado. A Fig. 40 mostra esquematicamente o arranjo do sistema de partida a frio convencional e do sistema de alimentação de combustível do veículo testado. O sistema convencional é constituído de um reservatório de gasolina (E22), eletrobomba, filtro, eletroválvula e dois tubos (um para cada dois cilindros) ligados aos pontos de introdução de gasolina nos ramos do coletor de admissão. O sistema de partida a frio convencional funciona à pressão de 2,0 bar e é acionado pela central eletrônica quando o reservatório principal está abastecido predominantemente com etanol, dependendo da temperatura ambiente e da temperatura do motor. O sistema de alimentação do combustível principal opera à pressão de 3,5 bar.

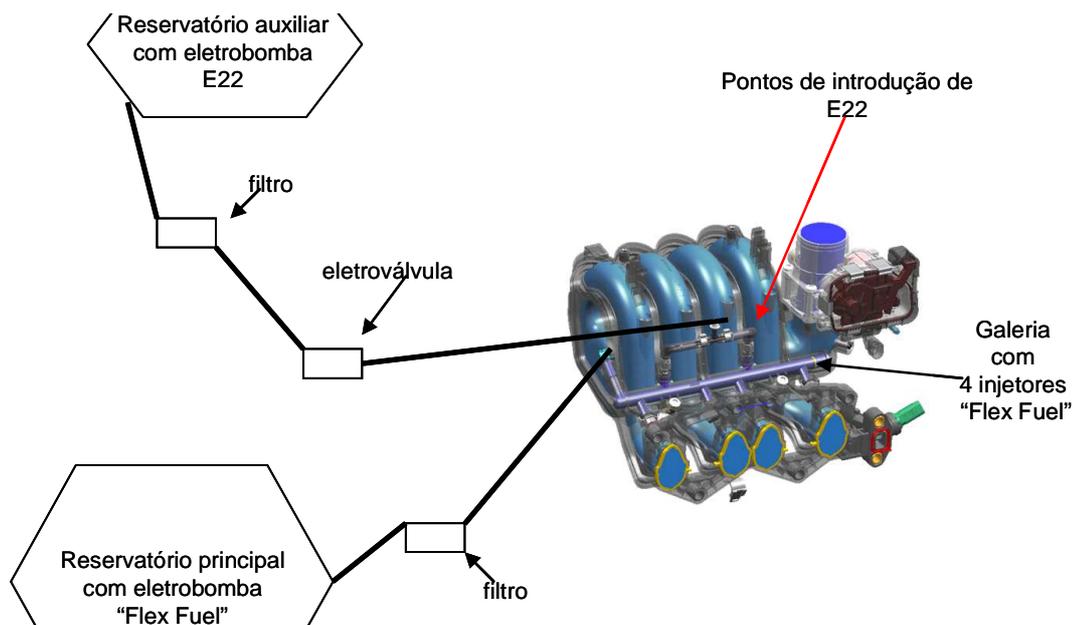


Figura 40: Esquema dos sistemas de partida a frio convencional e de alimentação de combustível.
Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

Os porta-eletoinjetores foram envolvidos por um isolamento de cortiça para minimizar a perda de calor transferido pelas resistências elétricas posicionadas dentro dos mesmos (Fig. 41). Duas baterias de 12 V e 65 A/h foram utilizadas, uma instalada normalmente no veículo e a outra como fonte de alimentação para o sistema de aquecimento do ar e do etanol. A utilização de uma bateria exclusiva para o sistema serviu para garantir o mesmo nível de potência elétrica nos diversos testes realizados sucessivamente. Desta forma, foi possível obter potências elétricas de 300 W e 150 W/injetor para o aquecedor de ar e para as resistências elétricas para aquecimento do etanol, respectivamente. Este aumento das potências elétricas em relação aos testes de bancada (200 W e 85 W/injetor) pode também ser atribuído à ausência do sistema de temporização para funcionamento do sistema, que representa um ponto de perda de potência elétrica. Na Fig. 42 está representado o esquema elétrico da ligação do sistema de partida a frio com aquecimento do ar de admissão e do etanol injetado no veículo. A Fig. 43 mostra a variação da tensão (V) e da corrente elétrica (A) para alimentação do aquecedor de ar em função do tempo. Estes parâmetros foram medidos durante a operação de partida do motor, até atingir a velocidade de 350 rpm.



Figura 41: Isolamento térmico com cortiça dos porta-eletrorinjetores para os testes em veículo.
Fonte: Foto do autor, 2010.

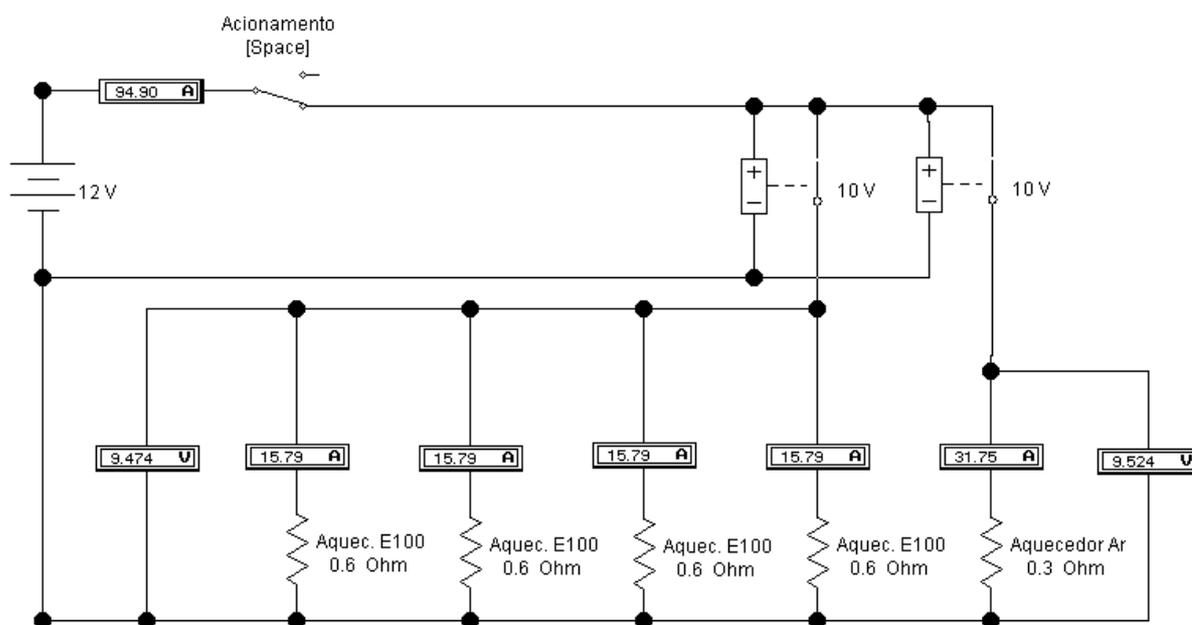


Figura 42: Esquema elétrico do sistema de aquecimento do ar e do etanol instalado no veículo.
Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

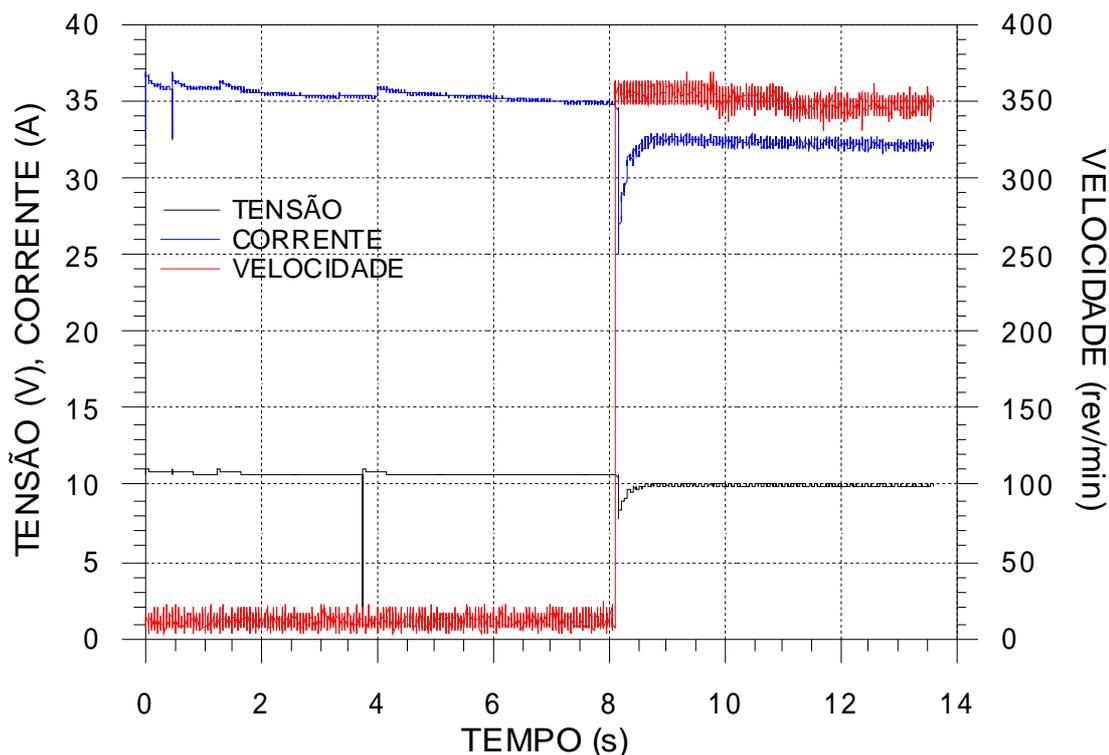


Figura 43: Comportamento da tensão e corrente elétrica de alimentação do aquecedor de ar e da resistência elétrica para aquecimento do etanol durante a partida (350 rpm).

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

Para as medições de temperatura do ar os termopares foram instalados nos dutos do coletor de admissão antes e depois do aquecedor de ar e nas saídas dos dutos, próximo às válvulas de admissão ($T_{ar, saída}$). A temperatura do ar nas proximidades do aquecedor de ar também foi medida ($T_{ar, borboleta}$). As temperaturas do etanol foram obtidas através de termopares instalados na entrada do porta-eletoinjeter ($T_{etanol, entrada}$), na região interna do porta-eletoinjeter e no acoplamento com o eletroinjeter ($T_{etanol, acoplamento}$). Também foi instalado um termopar no interior do coletor de admissão, na região imediatamente à frente do injeter, para a medição da temperatura do jato de etanol misturado com ar ($T_{mistura}$).

Os valores de tensão da bateria e dos eletro-injetores serviram para identificar a queda de tensão do sistema, devido ao funcionamento do motor de partida, e o início de funcionamento dos eletroinjetores no instante da partida do motor. Os valores de temperatura e tensão da bateria foram registrados com uma frequência de 10 Hz. A Fig. 44 mostra a instalação dos termopares e o ponto de medição da velocidade do ar.

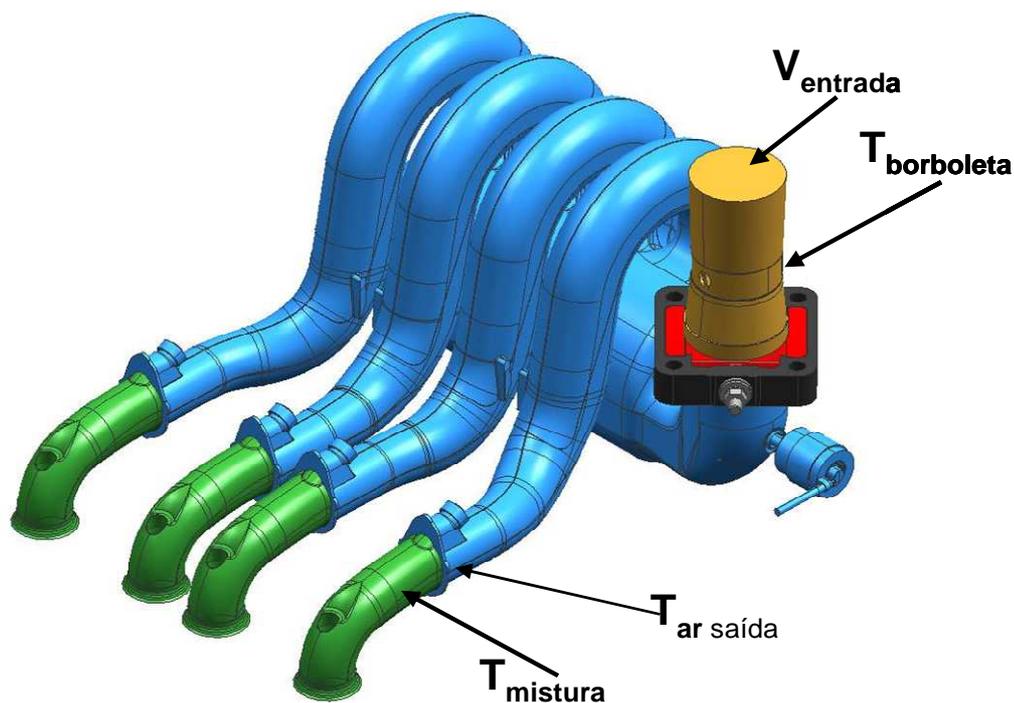


Figura 44: Pontos de medição das temperaturas do ar e do etanol e velocidade do ar.
Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

No veículo foi utilizado um anemômetro de cabo aquecido para a medição da velocidade do ar no coletor de admissão, na entrada do volume de controle, acima do corpo de borboleta. A faixa de medição deste anemômetro é de 0,2 a 20,0 m/s ($\pm 3\% + 1$ dígito). Um osciloscópio digital com uma frequência máxima de 500 Hz foi utilizado para registrar os dados de temperatura, tensão da bateria e tensão de alimentação dos eletro injetores. O sistema de medição da razão de equivalência ar/combustível era composto principalmente de uma unidade de controle e um sensor lambda linear. O sensor lambda era pré-aquecido a 800 °C, possuindo um tempo de resposta na faixa de 0,08 s a 0,15 s, podendo realizar medições na faixa de temperatura dos gases do sistema de exaustão do motor de -7 °C a 900 °C. A faixa de medição da razão de equivalência da mistura era de 0,50 a 2,50, com resolução de 0,01.

4.2.2 Registro dos parâmetros do sistema de controle do motor

O veículo também foi equipado com uma unidade eletrônica (Sistema Helios) que fez a interface com a central eletrônica do sistema de injeção e ignição, possibilitando a aquisição dos parâmetros de funcionamento do motor que determinam o controle do ângulo de ignição, quantidade de combustível injetada e abertura da válvula borboleta em cada condição de funcionamento do motor. Os parâmetros monitorados neste trabalho foram: temperatura da água de arrefecimento, velocidade angular do motor, tempo de injeção, temperatura do ar, pressão no coletor de admissão e posição da válvula borboleta. A modificação de parâmetros de funcionamento, como o tempo de injeção, também era possível através desta interface. Entretanto, para uma análise comparativa da influência do aquecimento do ar e do etanol nas emissões de poluentes, os ajustes do sistema de controle do motor não foram alterados. Desta forma, os testes com o sistema de aquecimento ativado ou desativado foram realizados com os mesmos ajustes (ex. tempo de injeção, razão de equivalência ar/combustível, avanço de ignição, etc.) Estes dados foram utilizados para caracterizar a partida a frio e o regime de funcionamento do veículo e foram registrados em um microcomputador a uma frequência de 10 Hz.

4.2.3 Procedimento dos testes de partida a frio

Os testes de partida a frio foram realizados com o veículo posicionado dentro de uma cela climatizada a uma temperatura de 0 °C. Para a realização dos testes de partida a frio a temperatura do motor do veículo devia estar em equilíbrio com o ambiente, sendo estabelecido para isso, um período mínimo de 12 horas. O controle da temperatura do motor era feito através da temperatura da água do sistema de arrefecimento e da temperatura do etanol. O sistema de aquecimento do ar de admissão e do etanol era ativado durante 8,0 s antes da partida do motor. A borboleta do corpo de borboleta era mantida totalmente aberta desde a ativação do sistema de aquecimento, ou seja, a partir do instante 0,0 s.

A manutenção da borboleta aberta era realizada acionando-a eletricamente. Este período de borboleta aberta contribuía para que a massa de ar frio dentro do coletor fosse substituída pela massa de ar escoando através do aquecedor, favorecendo o aquecimento da mistura ar-etanol. Após a preparação dos 8,0 s iniciais era realizada a partida do motor, com o sistema de aquecimento continuamente ativado até o início de funcionamento do motor. A borboleta era fechada 1,5 s após a partida do motor. A Eq. 9 foi utilizada para a determinação do tempo mínimo para preenchimento do volume formado desde o corpo de borboleta até a entrada dos cilindros com ar aquecido.

Considerando a velocidade rotacional do virabrequim de 350 rev/min, para o volume total do sistema de aproximadamente 3,45 l e para o volume deslocado pelo motor de 1,4 l, o período mínimo em que a borboleta deveria permanecer totalmente aberta para o preenchimento de todo sistema com ar é de 0,86 s. Com uma margem de segurança, o tempo adotado nos testes foi de 1,5 s. Após este período a borboleta era completamente fechada nos testes de partida a frio a 0°C. A caracterização do tempo de partida a frio considerou o período necessário para o motor atingir a rotação de 600 rpm após o acionamento da chave de ignição. Nos testes de partida a frio a 0 °C também eram coletados os valores de temperatura do ar, do etanol e da mistura ar/etanol.

4.2.4 Aparato para os testes de emissões

Os testes de emissões comparativos entre o veículo na configuração normal de produção e com o sistema de aquecimento do ar de admissão e do etanol foram realizados no Laboratório de Emissões da FIAT Powertrain Technologies – FPT (Fig. 45). O Laboratório de Emissões é equipado com um dinamômetro de chassi, utilizado para simular em laboratório a resistência ao deslocamento do veículo. A determinação da resistência ao deslocamento é feita submetendo o veículo a uma desaceleração livre em pista de rolamento, conforme a norma NBR 10312. O dinamômetro possui uma unidade elétrica de absorção de potência para simular as condições de carga do veículo (potência resistiva). A potência resistiva no rolo do dinamômetro é determinada em função de fatores relacionados com a

desaceleração do veículo, como inércia equivalente, coeficiente de arrasto aerodinâmico e a resistência ao rolamento. A inércia equivalente do veículo é simulada no dinamômetro através de um conjunto de massas de inércia que são acopladas ao eixo do rolo, que reproduzem um efeito dinâmico equivalente à massa de inércia do veículo em movimento linear. O equipamento utilizado possui um rolo de 1220 mm de diâmetro e pode medir velocidades na faixa de 0 a 160 km/h, com resolução de 0,01% do fundo de escala, e potência de até 150 hp (111,9 kW).



Figura 45: Laboratório para ensaios de emissões de poluentes
Fonte: HORIBA, 2009.

O sistema de amostragem do gás de exaustão é do tipo amostrador de volume constante (AVC). O sistema permite a medição das massas reais das substâncias emitidas pelo motor através do tubo de exaustão do veículo. O volume total da mistura gás de exaustão/ar de diluição é medido, sendo uma parte deste volume continuamente coletada para análise. O sistema é provido de balões de coleta de amostras para o ar de diluição e para o gás de exaustão diluído. Estes balões são construídos com material especial para impedir alterações nas análises dos gases armazenados. Os analisadores de HC, CO e NO_x podem realizar análise em tempo real antes e depois do catalisador, além da análise das amostras que são coletadas e armazenadas nos balões durante o teste (Fig. 46). A análise do gás de exaustão foi realizada segundo a Norma NBR 6601 (ABNT, 2005).

A medição dos hidrocarbonetos totais (HC) é realizada passando o gás coletado através de uma chama de hidrogênio. Os hidrocarbonetos na amostra produzem uma corrente de íons proporcional ao total de átomos de carbono presentes. Um eletrodo que envolve a chama mede a corrente de íons. A quantidade de hidrocarbonetos de uma amostra é expressa em ppmC. Usando-se o propano (C_3H_8) como gás de referência, por exemplo, a resposta é três vezes maior do que a obtida com o metano (CH_4), que apresenta um único carbono por molécula. Para análise em tempo real a linha de coleta é aquecida, e sua faixa de medição é de até 3000 ppmC, com incerteza de $\pm 0,5\%$. Para os gases coletados nos balões, a faixa de medição é de até 300 ppmC, com incerteza de $\pm 0,5\%$.

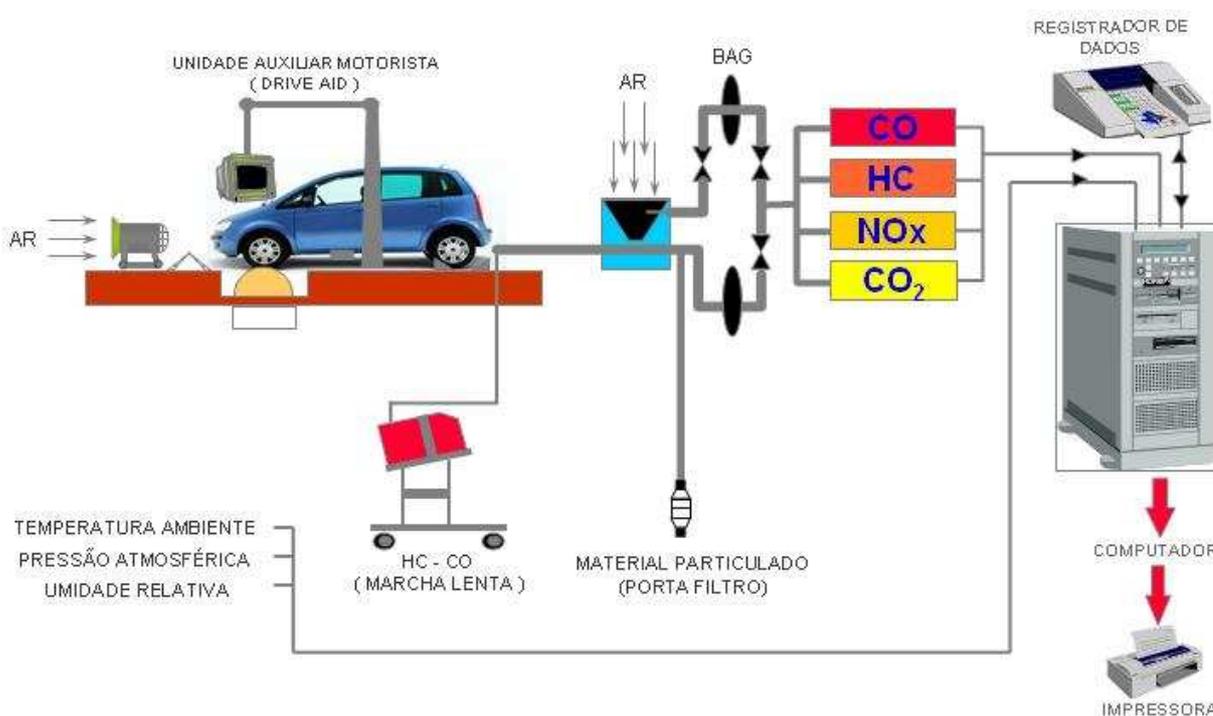


Figura 46: Laboratório para ensaios de emissões de poluentes

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

Os analisadores de CO utilizam detectores por absorção de raios infravermelhos não dispersivos (NDIR). A amostra de gás é bombeada para dentro de uma câmara, por onde atravessa uma luz infravermelha. O comprimento de onda da luz é especialmente selecionado, dependendo da composição do gás detectado. A composição presente na amostra absorve a luz e diminui sua intensidade na saída da câmara. A intensidade é comparada com uma fonte de luz de referência, e o resultado da diferença é expresso em concentração da composição da amostra. Para análise em tempo real, a linha de coleta é aquecida e sua faixa de medição é de até 20000 ppm, com incerteza de $\pm 0,5\%$. Para os gases coletados nos balões a faixa de medição é de até 1000 ppm, com incerteza de $\pm 0,5\%$.

Os analisadores de NO_x utilizam o método de luminescência química (CLD), para detectar a reação entre o óxido nítrico (NO) e o ozônio (O_3). A reação emite um fóton de luz. O número de fótons emitidos é proporcional à concentração de NO. Para a detecção de NO_x a amostra é guiada através de um conversor, onde o NO_x é dissociado em NO. Para análise modal a linha de coleta é aquecida e sua faixa de medição é de até 5000 ppm, com incerteza de $\pm 0,5\%$. Para os gases coletados nos balões a faixa de medição é de até 300 ppm, com incerteza de $\pm 0,5\%$.

O sistema de amostragem de aldeídos é composto por frascos lavadores de gás montados em série dois a dois, mantidos a uma temperatura entre 2 °C e 6 °C. Para um ciclo completo de condução compreendido de três fases são utilizados quatro pares, um para cada fase e outro para amostragem do ar de diluição. Para amostragem em intervalos de tempos menores utilizam-se quantos pares forem necessários. São utilizadas soluções de DNPH (dinitrofenilhidrazina) e ACN (acetoneitrila) para a absorção dos aldeídos e cetonas contidos no gás de descarga, resultando em derivados carbonílicos.

As amostras correspondentes a cada uma das fases do ciclo de condução e o ar de diluição são preparadas, ou seja, avolumadas com ACN em balões de 100 ml. Estas amostras, após a preparação, são armazenadas em solução de DNPH/ACN, injetadas e analisadas por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC). A Fig. 47 mostra o esquema da análise de aldeídos pelo sistema DNPH/HPLC. A determinação de aldeídos totais é feita segundo a norma NBR 12026 (ABNT, 1997).

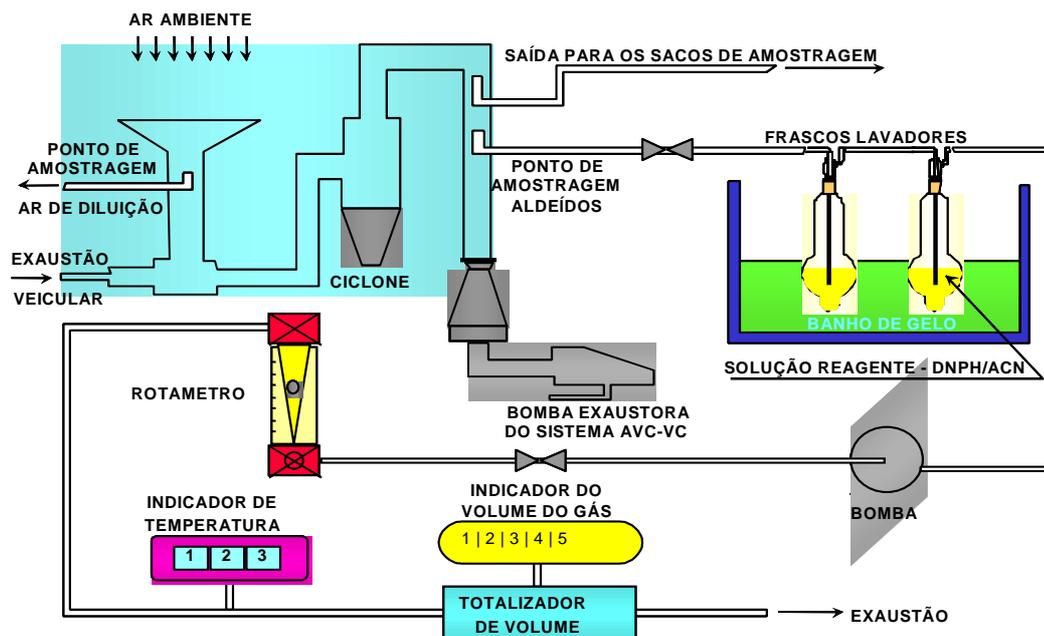


Figura 47: Esquema do sistema de amostragem de aldeídos.

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

4.2.5 Procedimento dos testes de emissões

Os testes de emissões gasosas na exaustão são realizados com o veículo sobre rolos em dinamômetros de chassi. O método é definido para simular uma determinada condição de operação, próxima à condição real de utilização do veículo. Foram avaliadas duas configurações do veículo nos testes de emissões. O veículo com o sistema de partida a frio convencional e o mesmo veículo com o sistema de partida a frio com aquecimento do ar de admissão e do etanol. Os testes comparativos serviram para avaliar os efeitos do aquecimento simultâneo do ar de admissão e do etanol nas emissões de poluentes. Nos testes de emissões com as duas configurações foram utilizadas a mesma calibração do sistema de controle do motor, ou seja, parâmetros como tempo de injeção, avanço de ignição e ajuste da relação ar/combustível (A/F igual a 9,0) não foram alterados.

A determinação das emissões de HC, CO e NO_x é realizada de acordo com a norma NBR 6601, e a determinação de aldeídos é feita de acordo com a norma NBR 12026. Foram realizados testes utilizando o ciclo urbano de emissões completo, incluindo a partida a frio (*cold 505*). O veículo era submetido a um pré-

condicionamento de 12 a 36 h antes do teste de emissões. Neste período o veículo permanecia estacionado em uma sala de ambientação com temperatura entre 20 °C e 30 °C, que é a mesma faixa de temperatura exigida para o ambiente do teste de emissões com partida a frio. Desta forma, podem ser avaliados os níveis de emissões após a partida a frio e no período de aquecimento do motor, além do tempo de partida a frio. As velocidades para troca de marchas utilizadas nos testes foram as seguintes: de 1ª para 2ª marcha, 25 km/h; de 2ª para 3ª marcha, 40 km/h; de 3ª para 4ª marcha, 65 km/h; e de 4ª para 5ª marcha, 72 km/h.

O teste de emissões é realizado com o veículo simulando uma viagem de percurso médio de aproximadamente 18 km em área urbana. Este percurso é definido como ciclo urbano, que se define por um gráfico contínuo de velocidade em função do tempo. O ciclo consiste de sequências não repetidas dos regimes de marcha lenta, acelerações, velocidade de cruzeiro e desacelerações em magnitudes e combinações variadas. Para garantir esta simulação, os limites de tolerância na velocidade, em qualquer instante no ciclo de condução, são definidos por dois limites, um inferior e outro superior. O teste consiste na partida do motor e na operação do veículo em um dinamômetro de chassi, através de um ciclo de condição específica. O teste completo é formado por dois ciclos, sendo um ciclo de 12,1 km com partida a frio e o outro ciclo com 5,8 km com partida a quente. O resultado da medição das emissões é a média ponderada entre os dois ciclos, representando assim uma viagem com percurso de 18 km. Entre as duas partes do teste (partida a frio e a quente) existe um intervalo, no qual o veículo permanece sobre o dinamômetro de chassi por 10 minutos, com o capô do veículo fechado.

O teste de partida a frio, com temperatura ambiente entre 20 e 30 °C tem a duração de 1371 s e é subdividido em duas partes. A primeira parte inicia-se no instante em que o motor é acionado a frio, denominada fase I, que é a fase transitória com partida a frio, na qual o veículo simula um percurso de aproximadamente 5,8 km. A fase I termina ao final da desaceleração que é programada para ocorrer 505 s após o início do ciclo. A segunda parte inicia-se imediatamente após a fase I, sem interrupção do funcionamento do motor, e é denominada de fase II. Esta é a fase estabilizada, concluindo a primeira parte do ciclo, incluindo o desligamento do motor. A fase III, que é a segunda parte do ciclo, é o teste de partida a quente. Esta fase consiste de um período que representa a fase quente e termina com o final da desaceleração aos 505 s. O teste completo para

determinação das emissões no ciclo urbano é composto pelas fases I, II e III. A Fig. 48 mostra o diagrama de velocidade em função do tempo do ciclo urbano para determinação das emissões pelo escapamento de um veículo, conforme a norma NBR 6601.

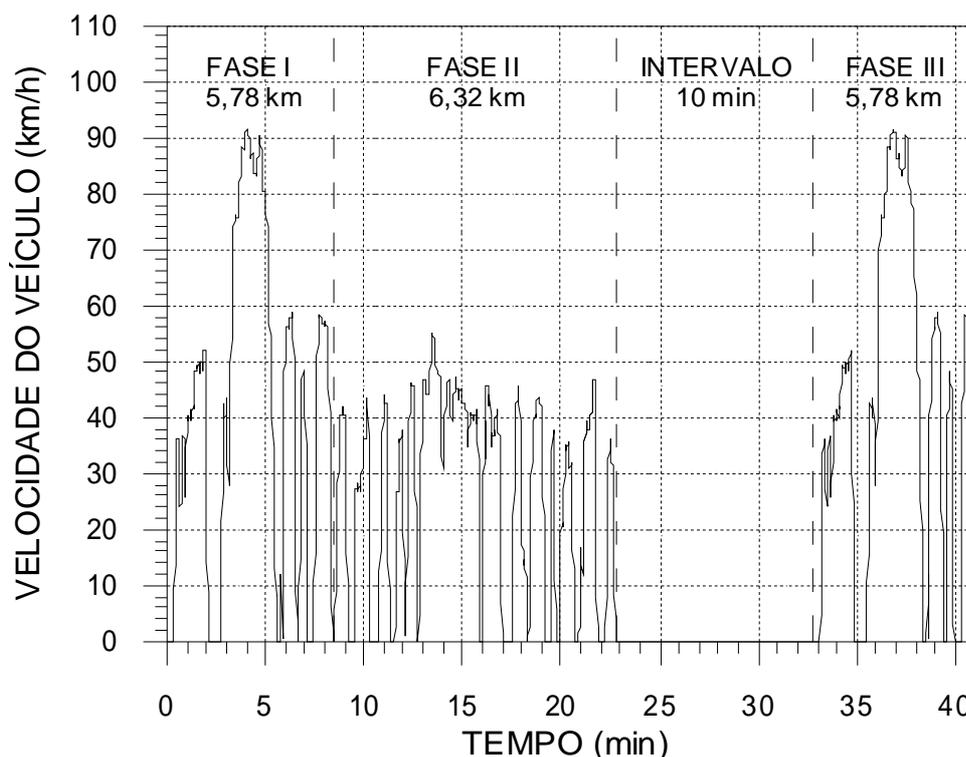


Figura 48: Representação do ciclo urbano para determinação das emissões pelo escapamento de um veículo conforme a NBR 6601.

Fonte: Adaptação da NBR 6601, 2005.

Quando o veículo estava equipado com o sistema de partida a frio com aquecimento do ar de admissão e do etanol, o sistema de aquecimento foi ativado durante a fase I do ciclo de emissões (505 s iniciais após a partida a frio). As temperaturas do ar de admissão foram monitoradas com a mesma instrumentação utilizada nos testes de partida a frio na cela climatizada (0 °C). A estratégia de início de operação do veículo foi similar àquela empregada para os testes de partida a frio, ou seja, ativação do aquecedor de ar e das resistências elétricas para aquecer o etanol 8,0 s antes da partida. Após a partida as resistências eram desativadas quando a temperatura do etanol na região do acoplamento do eletroinjetor com o porta-eletroinjetor se situasse entre 90 e 100 °C. As resistências eram novamente

reativadas quando a temperatura do etanol na mesma região se encontrava entre 65°C e 70 °C. Este procedimento era repetido até os 150 s iniciais do total de 505 s da fase I. Após este período as resistências permaneciam desativadas. O período compreendido por este procedimento de ativação e desativação do sistema de aquecimento coincide com o elevado nível de emissões de poluentes, principalmente HC, CO e aldeídos, conforme Sales (2001).

4.6 Análise de incerteza

As incertezas das medições para obtenção dos resultados experimentais de partida a frio e emissões de poluentes foram calculadas pelo método apresentado por Kline e McClintonck (1953), citado por Holman (1994). O método é baseado em uma especificação de várias incertezas medidas experimentalmente. O método considera a natural incerteza experimental que inclui as incertezas relacionadas às precisões dos equipamentos, além dos resultados das médias e desvios padrões. Para adicionar uma especificação de incerteza de uma medição, Kline e McClintonck (1953) definiram a incerteza de um determinado resultado experimental (R) em função de variáveis independentes ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$), conforme:

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (20)$$

Os autores definiram também w_R como a incerteza do resultado e w_1, w_2, \dots, w_n como as incertezas das variáveis independentes. Se as incertezas nas variáveis independentes são todas dadas com algumas disparidades, então a incerteza de um resultado possui estas disparidades e são apresentadas por Kline e McClintonck (1953) da forma:

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

Para a determinação das incertezas dos parâmetros mensurados foram utilizados três testes na câmara fria a 0 °C e três testes no laboratório de emissões a 25 °C. Os resultados dos testes com as respectivas médias e desvios padrões são apresentados no apêndice A. Os resultados da análise de incerteza são apresentados no apêndice B.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados das análises experimentais do protótipo do sistema de partida a frio em bancada de testes e veículo. Os resultados das temperaturas do ar de admissão e do etanol em função do processo de aquecimento são mostrados, além da partida a frio sob temperatura ambiente de 0 °C e da avaliação das emissões de poluentes, com ou sem aquecimento do etanol.

5.1 Testes preliminares do sistema de partida a frio em bancada

O protótipo do novo sistema de partida a frio foi instalado no cabeçote posicionado na bancada de testes para realização dos procedimentos de medição das temperaturas do ar de admissão e do etanol. A bancada de testes foi posicionada em uma câmara fria estabilizada a 0 °C. O sistema foi submetido a um período inicial de 8,0 s sem escoamento e com os sistemas de aquecimento ativado. Após o período de preparação de 8,0 s os sistemas de aquecimento continuaram ativados, o compressor elétrico de ar e o sistema de alimentação de combustível foram ativados e os dados foram registrados para a análise experimental do período com escoamento dos dois fluidos.

A Fig. 49 mostra as temperaturas do ar no duto de saída (antes do eletroinjetor), do etanol no acoplamento do eletroinjetor com o porta-eletroinjetor (entrada do eletroinjetor) e da mistura ar/etanol na entrada do cilindro. Estas temperaturas foram obtidas após os 8,0 s iniciais de preparação e foram medidas no duto do coletor de admissão e no conduto do cabeçote referente ao cilindro 4 do motor. É possível observar no diagrama que as temperaturas nos respectivos pontos de medição somente começam a aumentar após o início do escoamento dos dois fluidos. Os valores de temperatura ficam mais estáveis em torno dos 10,0 s, ou seja, após os 8,0 s de preparação e 2,0 s iniciais de escoamento.

A temperatura do etanol dentro do porta-eletroinjetor ($T_{\text{etanol, acoplamento}}$), na região de entrada do eletroinjetor, atingiu um valor médio de 47,0°C. A temperatura do ar antes do eletroinjetor ($T_{\text{ar, saída}}$) foi de 10°C. A temperatura da mistura ar/etanol

próximo da entrada do cilindro ($T_{mistura}$) atingiu um valor médio 13,0°C. Este resultado da temperatura da mistura ar/etanol mostra que o etanol aquecido a 47 °C se resfria antes de ser injetado. O resfriamento ocorre em função da expansão do escoamento para fora do eletroinjeter de forma a equiparar-se com a pressão mais baixa a jusante (MORAN; SHAPIRO, 2002). A variação de pressão que ocorreu após a passagem através dos reduzidos diâmetros do eletroinjeter foi de 2,0 bar, na parte interna do eletroinjeter, para 0,913 bar no duto do coletor de admissão. Entretanto, o etanol contribuiu para uma satisfatória temperatura da mistura ar/etanol, de 13°C, pois o ar isoladamente atingiu uma temperatura máxima de 10°C.

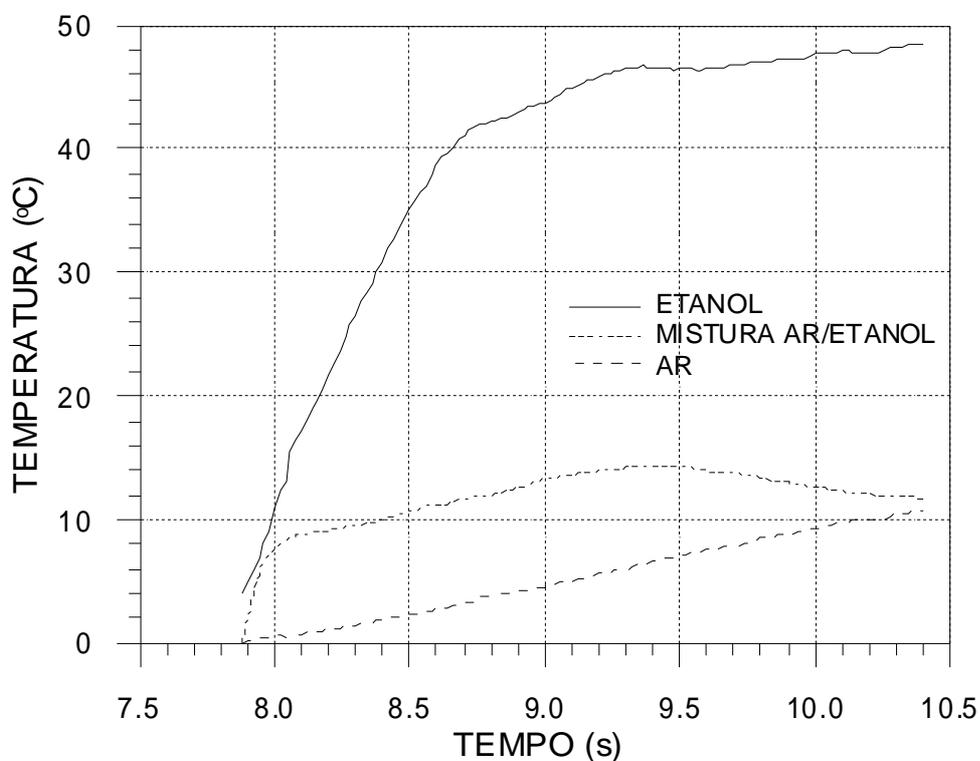


Figura 49: Temperaturas do ar no duto de saída, do etanol no acoplamento do eletroinjeter com o porta-eletroinjeter e da mistura ar/etanol na entrada do cilindro.

Fonte: Dados da pesquisa , 2010.

A avaliação experimental do protótipo do novo sistema de partida a frio em bancada de testes mostrou que é possível obter uma mistura ar-etanol com uma temperatura satisfatória para a combustão do etanol à temperatura ambiente de 0 °C. Sob temperaturas ambiente abaixo de 13 °C a combustão do etanol não ocorre facilmente em função de propriedades como o calor latente de vaporização e o ponto de ebulição (TURNER et al., 2007, MUZIKOVÁ et al., 2009). Os resultados

dos testes em bancada foram promissores, tendo na sequência os testes do sistema em veículo à temperatura ambiente de 0 °C.

5.2 Testes do sistema de partida a frio em veículo

Após os testes em bancada, o protótipo do novo sistema de partida a frio foi instalado em um veículo com motor 1.4 flex fuel para realização de testes de avaliação das temperaturas do ar de admissão e do etanol, testes de partida a frio e emissões de poluentes. Os testes para avaliação das temperaturas do ar da admissão e do etanol foram realizados com a temperatura da câmara climática ajustada para 0 °C e as bobinas do motor desativadas para permitir operação sem a ocorrência de combustão, com a velocidade rotacional entre 300 de 350 rpm. Estes testes foram realizados para comparar as condições obtidas no veículo com as condições observadas nos testes de bancada. As temperaturas do etanol na região interna do acoplamento do eletroinjetor com o porta-eletroinjetor ($T_{\text{etanol, acoplamento}}$), do ar de admissão na saída do duto do coletor de admissão antes do eletroinjetor ($T_{\text{ar, saída}}$), da mistura ar/etanol próximo à entrada do cilindro (T_{mistura}) e do ar ambiente ou de entrada ($T_{\text{ar, borboleta}}$) são mostradas na Fig. 50. O etanol na região de acoplamento do eletro-injetor atingiu a temperatura máxima de 57 °C.

A temperatura do ar na saída do duto do coletor de admissão foi de 8,5 °C no tempo de 3,0 s após a partida do motor (Fig. 50). A temperatura da mistura ar-etanol próxima à válvula de admissão atingiu o valor máximo de 13,6 °C durante este período. Ocorreu uma redução da temperatura do etanol de 57 °C para 30 °C após 3,2 s da partida, em função dos efeitos da entrada da massa de etanol a 0 °C no interior do porta-eletroinjetor durante o escoamento transiente. Apesar da redução da temperatura do etanol para próximo de 30 °C, sua combinação com o ar aquecido próximo de 8,5 °C contribuiu para a obtenção da temperatura da mistura ar/etanol próxima dos 13 °C, à temperatura ambiente de 0 °C.

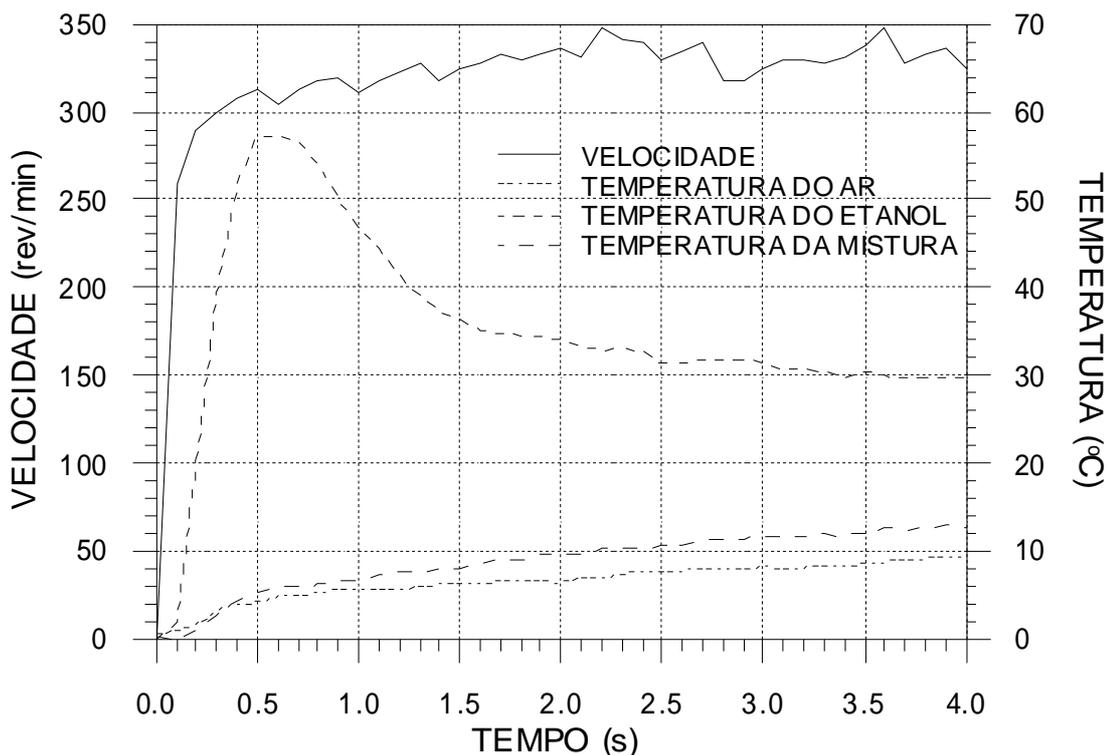


Figura 50: Temperaturas do ar no duto de saída, do etanol no acoplamento do eletroinjetor com o porta-eletroinjetor e da mistura ar/etanol na entrada do cilindro com o motor sem combustão.

Fonte: Dados da pesquisa , 2010.

Os testes de partida a frio foram realizados com o veículo condicionado por 12 horas em uma câmara climática a 0 °C. O tempo de partida foi considerado como o período compreendido entre o acionamento da chave de ignição ou acionamento do motor de partida até o instante em que o motor atinge a velocidade rotacional de 800 rpm. A Fig. 51 mostra a variação da velocidade rotacional (rpm), da temperatura do etanol dentro do porta-eletroinjetor ou entrada do injetor ($T_{\text{etanol, acoplamento}}$), da temperatura do ar na saída do duto do coletor, antes do injetor ($T_{\text{ar, saída}}$), e da mistura ar/etanol próxima à entrada do cilindro (T_{mistura}). O tempo médio de partida a frio obtido a partir de três testes realizados com o sistema protótipo montado no veículo foi de 1,7 s.

Após o período de pré-aquecimento nos 8,0 s iniciais foi realizada a partida do motor, com o sistema de aquecimento continuamente ativado. Nos primeiros 1,5 s contados a partir do acionamento da chave de ignição a válvula do corpo de borboleta ficou completamente aberta para permitir que a massa de ar frio dentro do coletor fosse substituída pela massa de ar escoando através do aquecedor,

favorecendo o aquecimento da mistura ar-etanol. Na Fig. 51 verifica-se que, 1,5 s após o acionamento da chave de ignição, a velocidade rotacional do motor aumentou sem variações significativas de 350 rpm para 800 rpm em 0,2 s.

Assim como nos testes do motor sem combustão (Fig. 50), a temperatura do etanol dentro do porta-eletoinjeter se reduziu após o início do escoamento do etanol. Também neste caso a redução de temperatura de 65 °C para 35 °C pode ser atribuída à massa de etanol fria escoando através do injeter aquecido. No instante em que ocorreu o início de funcionamento do motor, aos 1,7 s, as temperaturas do ar antes do injeter ($T_{ar, saída}$) e da mistura ar/etanol próximo à entrada do cilindro ($T_{mistura}$) eram, respectivamente, 6,5 °C e 9,0 °C. As menores temperaturas do ar na saída do duto e da mistura podem ser atribuídas às maiores velocidades do escoamento do ar no sistema de admissão, em função da elevação da velocidade rotacional do motor de 350 rpm para 1875 rpm. A rotação do motor iniciou a estabilização em torno de 1600 rpm. Entre 1,5 e 1,7 s a temperatura da mistura de 9,0 °C foi suficiente para permitir o início de funcionamento do motor à temperatura ambiente de 0 °C.

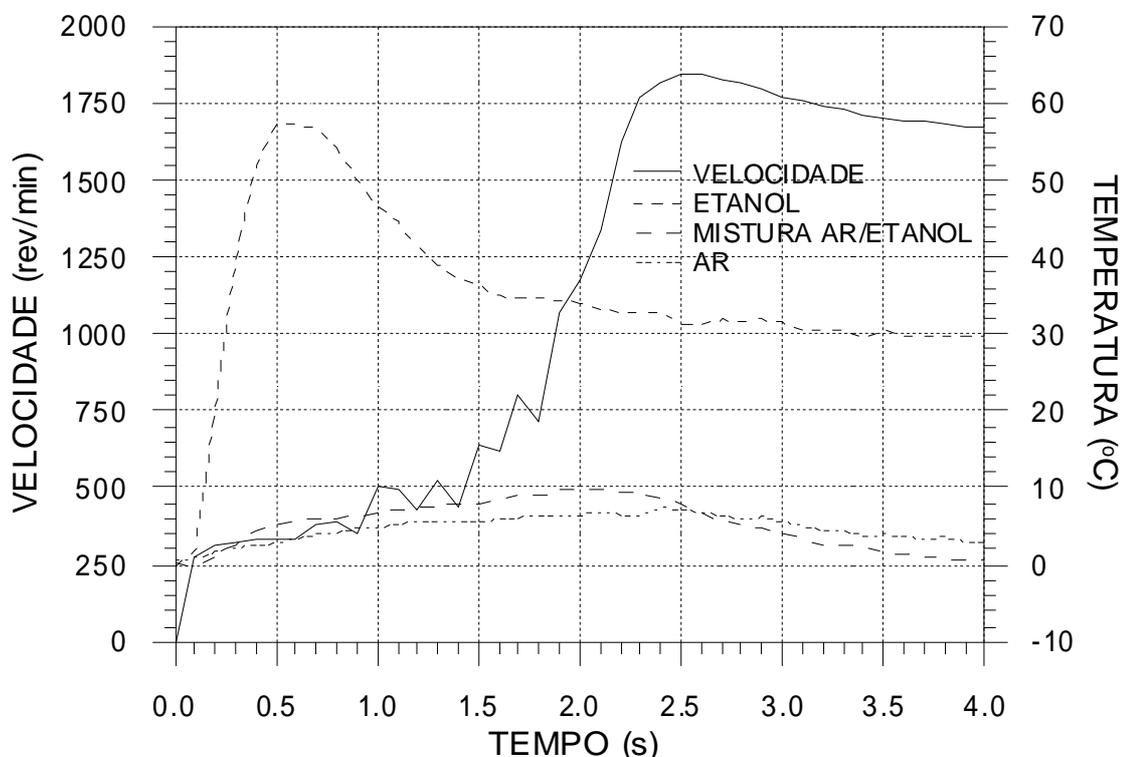


Figura 51: Tempo de partida a 0 °C (800 rpm) e temperaturas do ar no duto de saída, do etanol no acoplamento do eletroinjeter com o porta-eletoinjeter e da mistura ar/etanol na entrada do cilindro.

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

O etanol aquecido e a elevação da temperatura da mistura contribuem para melhorar a qualidade do jato de combustível (BRUNOCILLA E LEPSCH, 2006), aumentar a geração de vapor de etanol (KABASIN et al., 2010) e elevar o calor específico à pressão constante do etanol (NAN et al., 2004). Os tempos de partida obtidos nos três testes são mostrados na Tab. A.1, no Apêndice A.

5.3 Testes emissões de poluentes

Nos testes realizados no laboratório de emissões com a temperatura ambiente a 25 °C foram medidas as temperaturas do etanol na entrada do eletro injetor ($T_{\text{etanol, acoplamento}}$), do ar de admissão na saída do duto do coletor de admissão antes do eletroinjetor ($T_{\text{ar, saída}}$) e da mistura ar/etanol próximo à entrada do cilindro (T_{mistura}). A Fig. 52 apresenta os resultados das temperaturas do etanol na entrada do injetor e na saída do duto do coletor de admissão, antes do eletroinjetor. Na Fig. 52, também está representada a velocidade (km/h) do veículo nos 150 s iniciais do ciclo de emissões FTP 75.

A partida do motor foi realizada após os 8,0 s iniciais de ativação do sistema de aquecimento. Após a partida as resistências eram desativadas, quando a temperatura do etanol ($T_{\text{etanol, acoplamento}}$) na região do acoplamento do eletroinjetor com o porta-eletroinjetor se situava entre 90 °C e 100 °C. As resistências eram reativadas quando a temperatura do etanol na mesma região se situava entre 65 °C e 70 °C. Este procedimento foi repetido até os 150 s iniciais do total da fase I do ciclo de emissões (ver Fig. 48).

Após a partida na fase I do ciclo de emissões, o motor permanece em marcha lenta até a primeira aceleração, que ocorre em torno de 23 s (Fig. 52). Neste período não ocorre variação da temperatura do ar na saída do duto do coletor de admissão, pois a válvula borboleta permanece fechada. Como o aquecedor de ar é ativado simultaneamente às resistências elétricas para aquecimento do etanol, a variação da temperatura do ar na saída do duto do coletor de admissão, entre 20 °C e 40 °C acompanha a variação da temperatura do etanol, entre 70 °C e 100 °C.

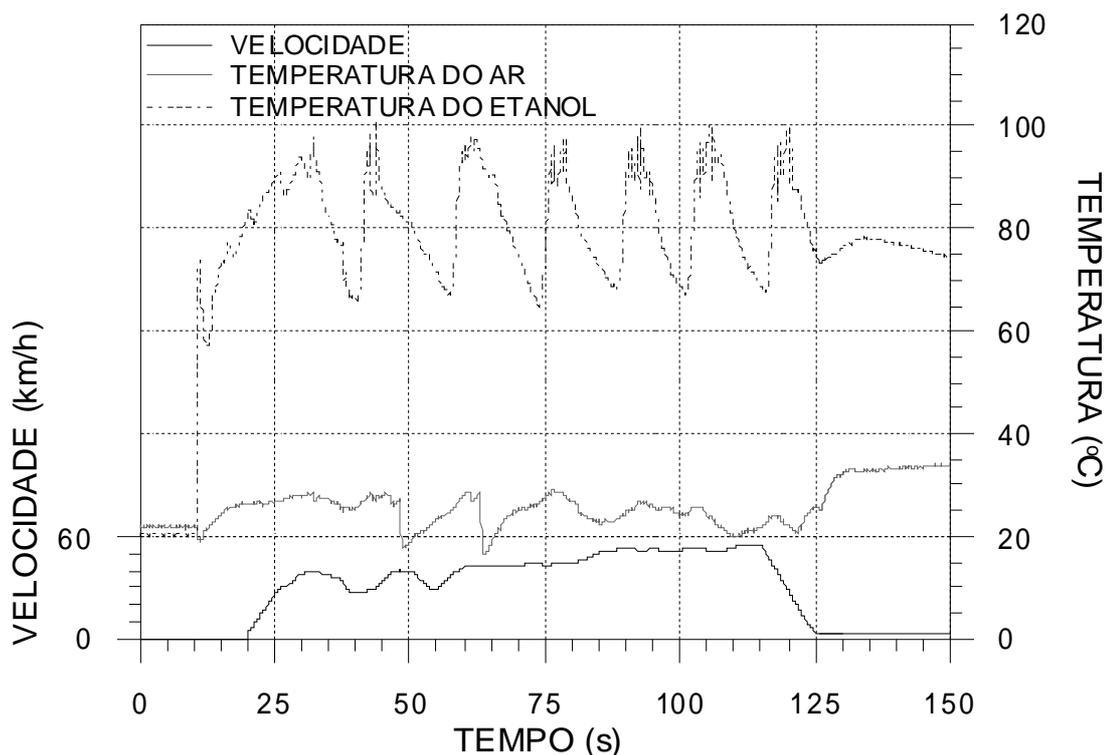


Figura 52: Temperaturas do etanol e do ar em função da ativação e desativação do sistema de aquecimento durante os 150 s iniciais do “COLD” 505.

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

O comparativo entre as temperaturas do ar na saída do duto do coletor de admissão com o sistema de aquecimento ativado ou desativado nos 150 s iniciais do ciclo de emissões, juntamente com a variação da velocidade rotacional (rev/min) do motor, é mostrado na Fig. 53. As temperaturas nas duas condições são próximas, em torno de 26 °C, até os 15 s iniciais. Após este período, quando o sistema de aquecimento é ativado, observa-se uma diferença significativa entre as duas temperaturas. O ar com aquecimento atinge a temperatura máxima em torno de 29 °C, enquanto, para o ar sem aquecimento, o máximo valor medido foi de 24 °C. A região onde foram realizadas as medições caracteriza-se por velocidades de escoamento mais elevadas em função dos diâmetros reduzidos, em relação à entrada do coletor de admissão. Sendo assim, justificam-se as menores temperaturas em relação à entrada do coletor de admissão (26°C). Após 120 s as temperaturas se aproximam em função do período de marcha lenta (850 rev/min),

quando a válvula borboleta permanece quase que totalmente fechada, reduzindo a influência da vazão de ar que passa pelo aquecedor.

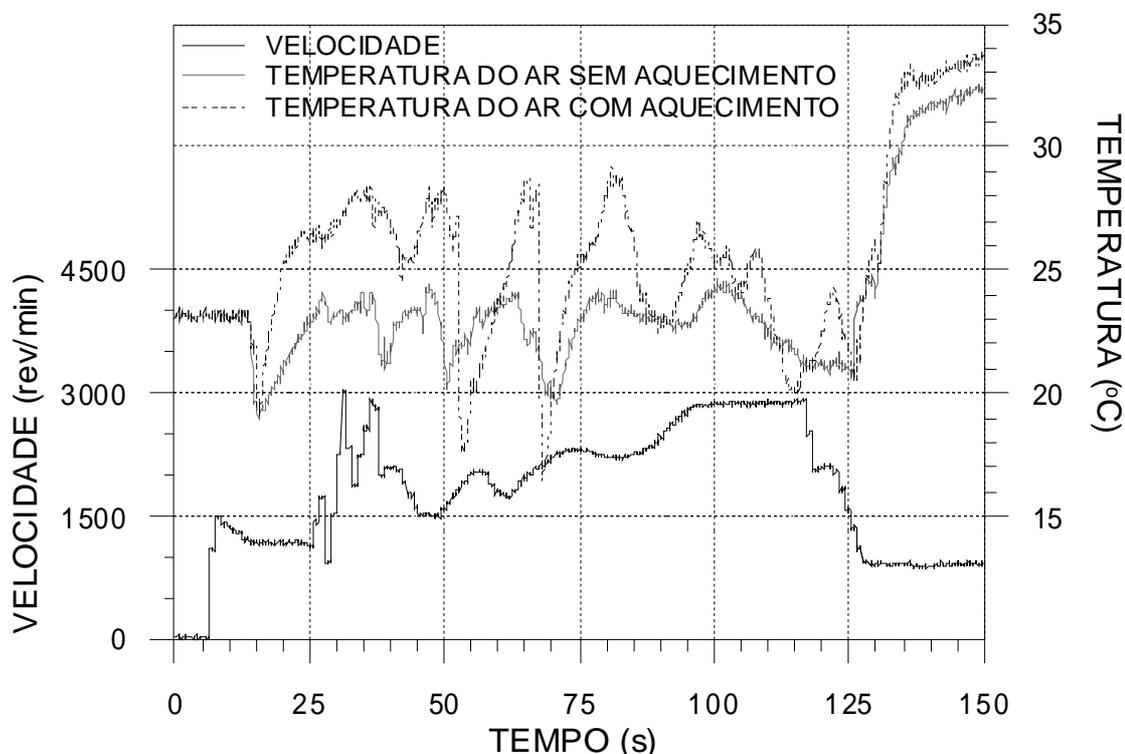


Figura 53: Temperaturas do ar aquecido e sem aquecimento na saída do duto durante os 150 s iniciais do “COLD” 505.

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

O comparativo das temperaturas da mistura ar/etanol na entrada do cilindro 4 é apresentado na Fig. 54. Com aquecimento, a mistura atingiu a temperatura máxima próxima de 18 °C, enquanto, que sem aquecimento, o máximo valor ficou próximo a 15 °C. Assim como no comparativo das temperaturas do ar na saída do duto, as maiores diferenças entre as temperaturas foram verificadas nas acelerações do motor. Nestas condições o aquecimento determinou diferenças de até 6 °C. Nas condições de desaceleração e em marcha lenta as temperaturas com ou sem aquecimento foram próximas.

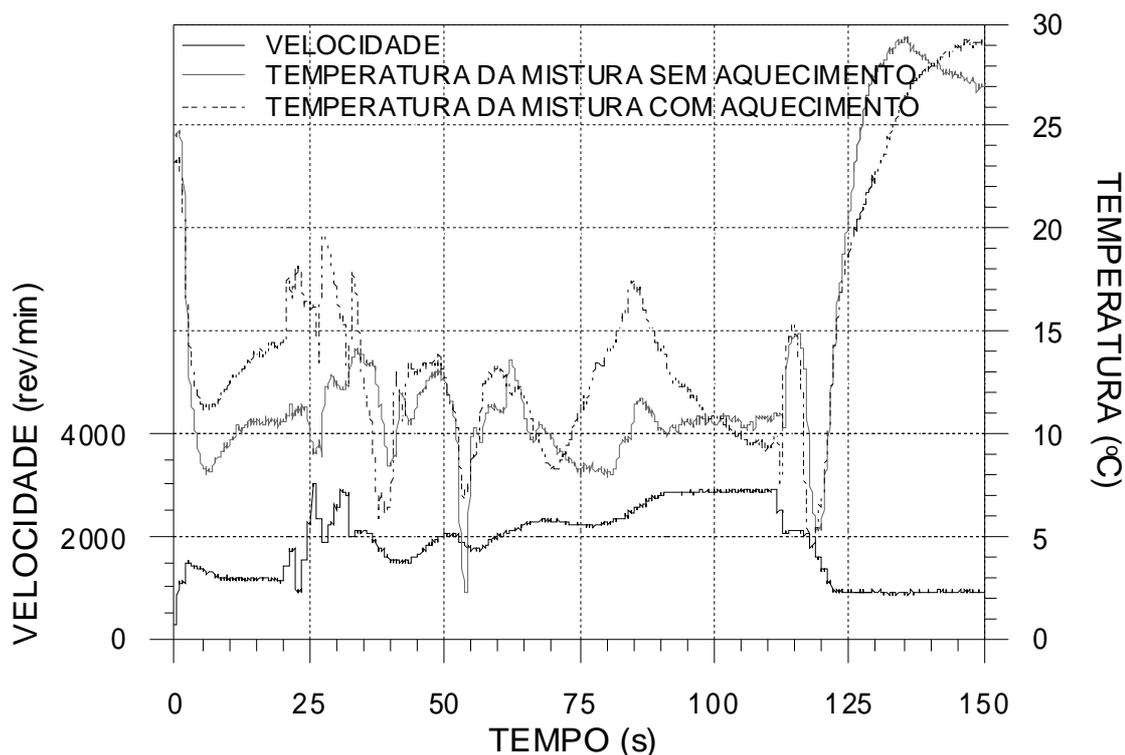


Figura 54: Temperaturas da mistura ar/etanol com e sem aquecimento durante os 150 s iniciais do “COLD” 505.

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

Para complementar a análise do comportamento da temperatura da mistura também foram realizadas medições na entrada do cilindro 1 e comparadas com os resultados de temperatura de mistura na mesma posição no cilindro 4. A Fig. 55 mostra que não ocorreram diferenças significativas entre os dois cilindros. As pequenas diferenças de temperatura podem ser relacionadas às diferenças de distribuição da vazão mássica entre os cilindros. Este resultado concorda com Siqueira et al. (2006) que, utilizando simulação CFD (Computational Fluid Dynamics) realizada para um coletor de admissão com a geometria e volume próximos do coletor de admissão objeto desta pesquisa, verificaram que a diferença na distribuição da vazão mássica entre os quatro cilindros de um motor não superava 1,64%.

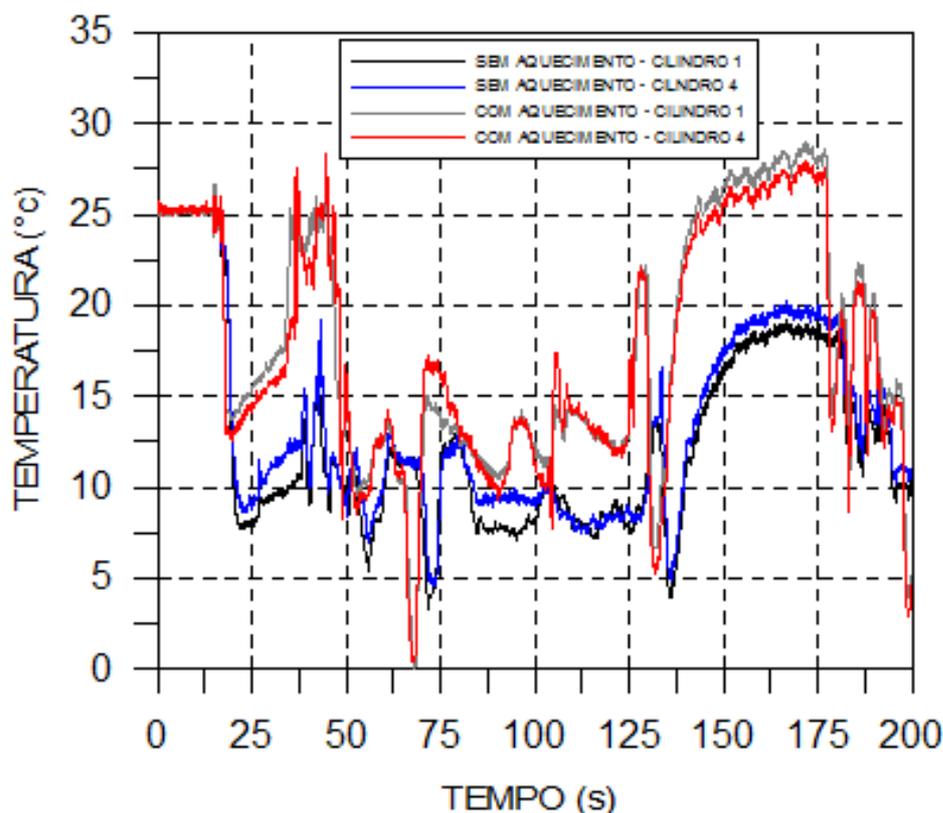


Figura 55: Temperaturas da mistura ar/etanol na entrada dos cilindros 1 e 4 com e sem aquecimento durante os 200 s iniciais do “COLD” 505.

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

Os testes para a determinação das emissões de poluentes foram realizados para avaliar a influência do aquecimento combinado do etanol e do ar de admissão nos níveis de hidrocarbonetos totais (THC), hidrocarbonetos não metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e aldeídos (CHO). O veículo foi avaliado nas configurações com e sem aquecimento do etanol e do ar de admissão. Foram realizadas análises modais comparativas dos comportamentos dos níveis de emissões de THC, CO e NO_x medidas antes do catalisador ao longo da fase I do ciclo de emissões descrito na norma NBR 6601. Os resultados das análises modais são apresentados em termos percentuais da concentração total emitida para cada componente.

Na Fig. 56 é possível verificar que os níveis de THC são elevados para as duas configurações após a partida a frio, principalmente durante as primeiras acelerações a frio entre 20 s e 50 s. Em motores que operam com etanol, a quantidade de combustível não queimado na câmara de combustão durante o

período de aquecimento do motor é agravada devido à baixa volatilidade do combustível (OWEN e COLEY, 1995). O alto calor latente de vaporização do etanol faz com que uma parte do combustível admitido não consiga se vaporizar antes da frente de chama, pois a temperatura da câmara de combustão ainda é baixa. A vaporização desta parcela do etanol ocorre somente após o processo de combustão, com o aumento da temperatura e da pressão. Assim, a parcela do combustível que não se vaporiza não participa do processo normal de combustão, se alojando nas regiões da câmara de combustão onde a chama não consegue penetrar, podendo também ser absorvida pela camada de óleo lubrificante. Como existe a necessidade de uma mistura mais rica para promover a partida a frio e melhorar a dirigibilidade durante o período de aquecimento do motor, as emissões de THC neste período são intensificadas. Os hidrocarbonetos surgem do processo de oxidação pós-chama do etanol não queimado.

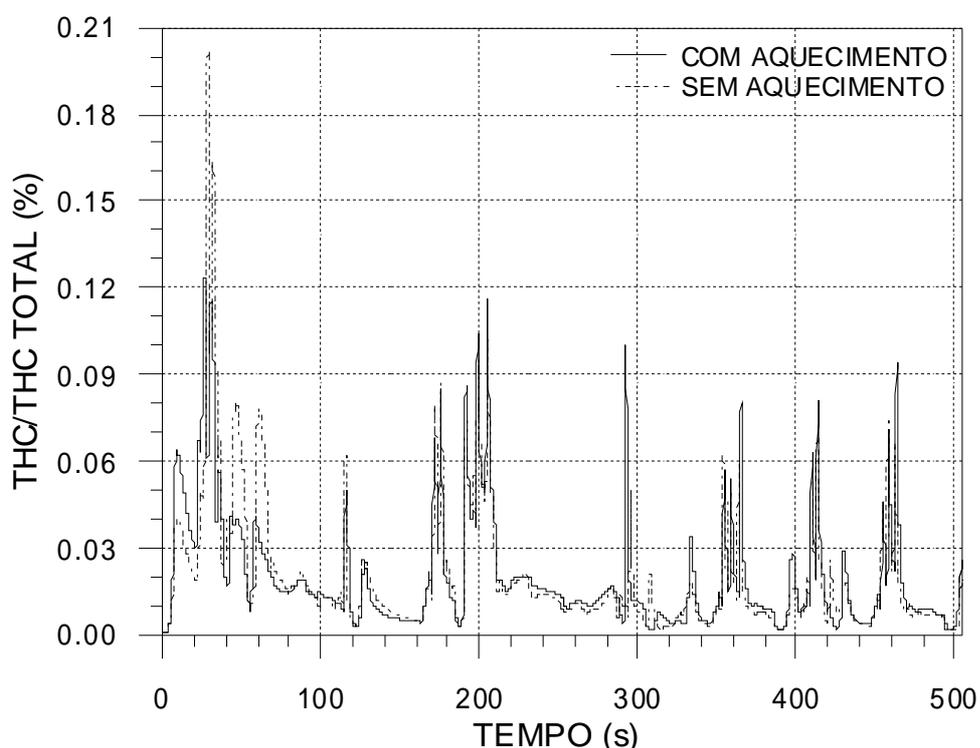


Figura 56: Emissões relativas de hidrocarbonetos totais medidas antes do catalisador durante a fase I do ciclo de emissões.

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

Os menores níveis de emissões de THC foram verificados com a configuração com o sistema de aquecimento ativado. As maiores diferenças de concentração proporcionadas pelas duas configurações são observadas nos 200 s iniciais. A redução dos níveis de THC com o sistema de partida a frio proposto pode ser atribuída exclusivamente ao aquecimento do etanol e do ar de admissão realizado até os 150 s iniciais do ciclo (ver Fig. 52). No restante do ciclo os comportamentos das emissões das duas configurações ficaram próximos, pois as temperaturas da mistura ar/etanol não foram significativamente diferentes e não existiram diferenças de ajuste da vazão de etanol. Contabilizando apenas os 200 s iniciais verificou-se que, para ambas as configurações, o nível de emissões de THC medidas antes do catalisador é de aproximadamente 50% do total emitido na fase I do ciclo de emissões. Como o catalisador apresenta uma baixa eficiência de conversão neste período (SALES, 2001), a atuação no pré-tratamento da mistura ar-etanol e na própria combustão é fundamental para a redução das emissões.

As concentrações mais baixas de THC verificadas para configuração com aquecimento podem também ser atribuídas a fatores relacionados ao jato e à taxa de evaporação do etanol injetado. O aquecimento do etanol e o funcionamento dos eletroinjetores promovem uma melhor pulverização, aumentando a taxa de evaporação do etanol e minimizando o filme de líquido nas paredes do coletor de admissão, nos condutos do cabeçote e no filme de óleo lubrificante das paredes do cilindro. Desta forma, ocorre uma redução de combustível não queimado nos primeiros ciclos do motor (HATTORI et al. 1997; HENEIN e TAGOMORI, 1999), possibilitando a redução dos níveis de hidrocarbonetos. Estas comprovações também foram realizadas por Kaplan e Heywood (1991) e Huang et al. (1998).

A Fig. 57 mostra a variação das emissões de monóxido de carbono (CO) medidas antes do catalisador para as configurações com e sem aquecimento do ar e do etanol durante a fase I do ciclo de emissões. Para as duas configurações os maiores níveis de CO estão concentrados na partida a frio e, principalmente, nas acelerações entre 20 e 50 s a partir do início do ciclo. Analisando os 200 s iniciais também verificou-se reduções significativas nos níveis das emissões de CO em função do aquecimento do ar de admissão e do etanol nos períodos de marcha lenta (0 a 20s e 120 a 140 s). O regime de marcha lenta é a condição de funcionamento do motor onde o melhor aproveitamento do combustível entre os cilindros determina o equilíbrio da combustão entre os cilindros. Em qualquer

condição de funcionamento do motor a formação de CO depende primariamente da razão de equivalência da mistura ar/combustível. A necessidade de enriquecimento da mistura quando o motor está frio faz com que as emissões de CO durante o aquecimento do motor sejam muito maiores em relação ao motor completamente aquecido, uma vez que o nível de CO é baixo para mistura pobre e aumenta drasticamente com o enriquecimento da mistura (HEYWOOD, 1998).

A Fig. 58 mostra a variação da razão de equivalência ar/combustível (λ) para as duas configurações durante a fase I do ciclo de emissões. Não se verificam diferenças significativas para a razão de equivalência da mistura ar/combustível para as duas configurações. Contudo, em ambos os casos pode ser observado o enriquecimento da mistura nos 30 s iniciais do ciclo.

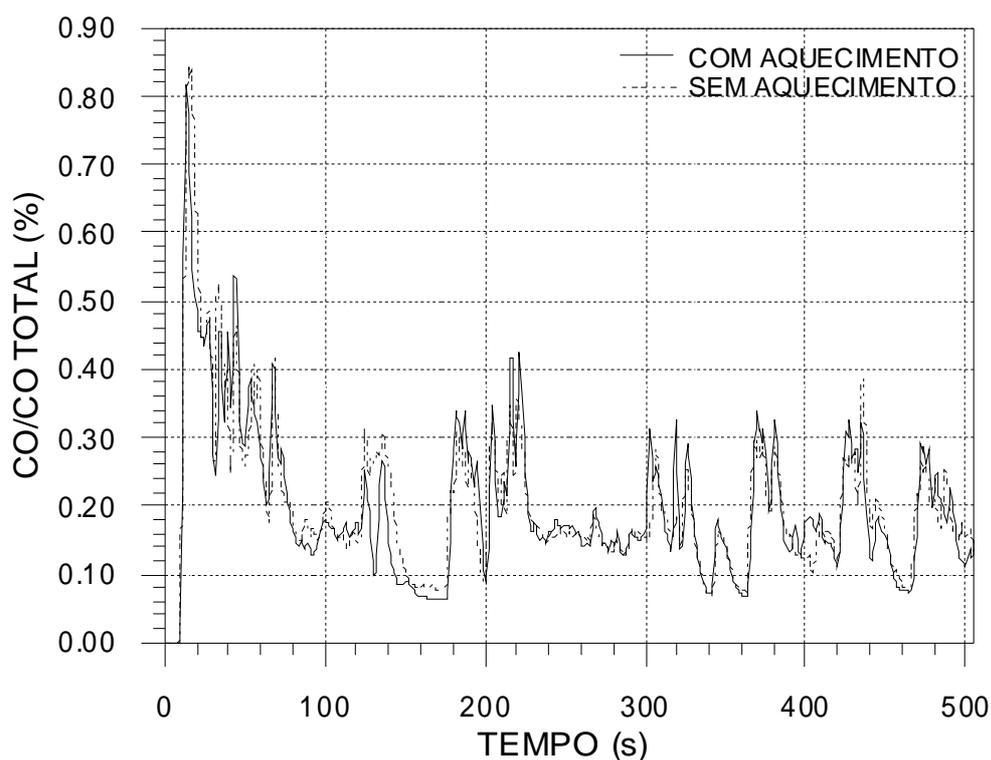


Figura 57: Emissões relativas de monóxido de carbono medidas antes do catalisador na fase I do ciclo de emissões.

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

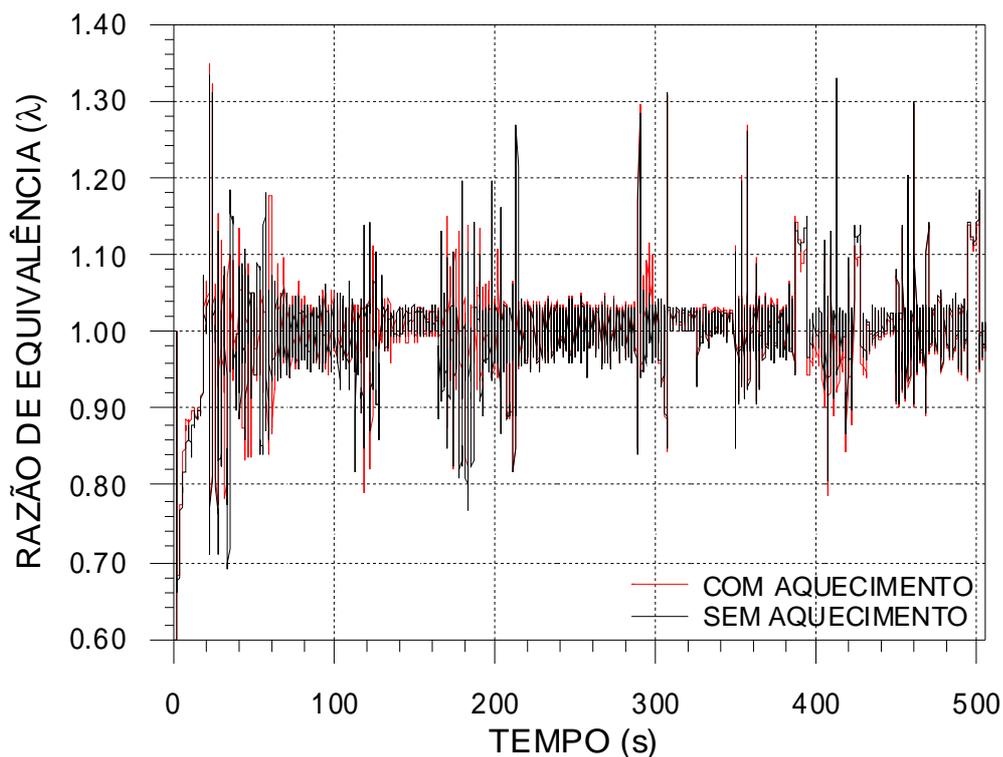


Figura 58: Razão de equivalência da mistura ar/combustível na fase I do ciclo de emissões.

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

As emissões de NO_x para as com e sem aquecimento do ar de admissão e do etanol foram próximas, conforme apresentado na Fig. 59. Os óxidos de nitrogênio são fortemente influenciados pelas temperaturas atingidas na câmara durante a combustão, apresentando baixos níveis para misturas pobres ou ricas e um valor máximo para mistura ligeiramente pobre. Como a razão de equivalência da mistura foi similar para as duas configurações, as emissões de NO_x não foram influenciadas por este parâmetro.

Outro parâmetro que também não foi alterado e pode influenciar na pressão e temperatura da câmara de combustão é o avanço de ignição (HEYWOOD, 1988). Todos demais parâmetros de operação do motor foram também mantidos com seu ajuste original. Sendo assim, estima-se que as temperaturas atingidas na câmara de combustão tenham sido similares para ambas as configurações de partida a frio, não afetando as emissões de NO_x .

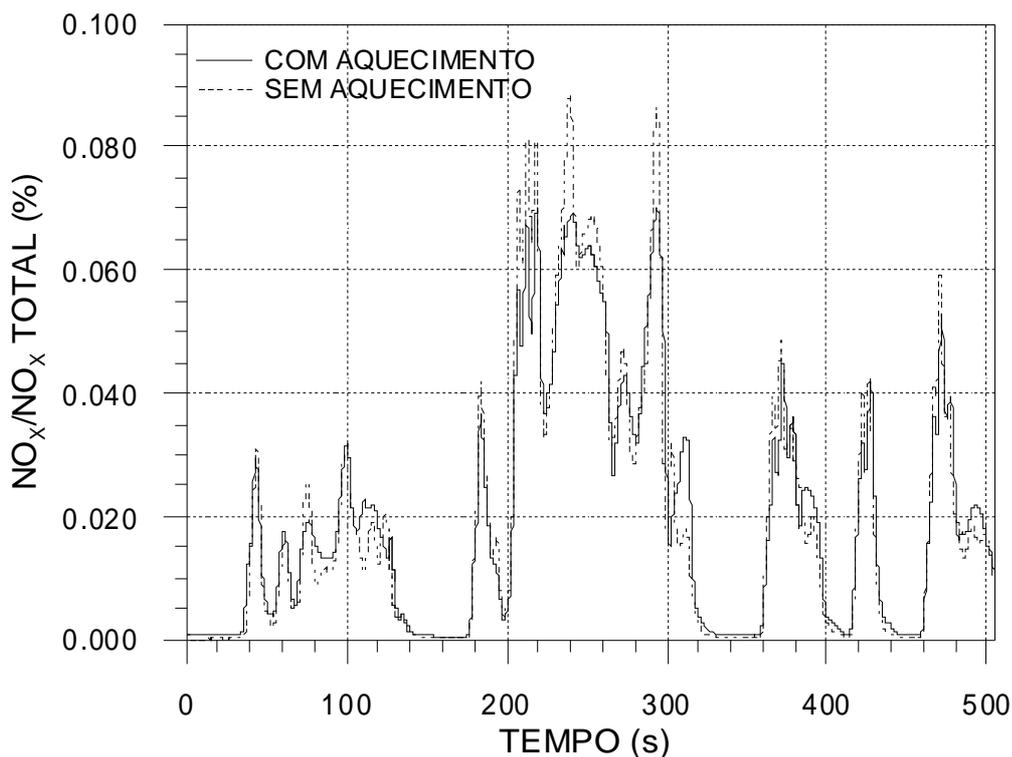


Figura 59: Emissões relativas de óxidos de nitrogênio medidas antes do catalisador na fase I do ciclo de emissões.

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

A integração das emissões de THC (Fig. 56) e CO (Fig. 57) da configuração com aquecimento resultam em valores 55% e 26% menores, respectivamente, em comparação com aqueles produzidos pela configuração sem aquecimento até os 200 s iniciais do ciclo de emissões. Não houve alteração significativa nas emissões de NO_x entre as duas configurações neste período (Fig. 59). Considerando toda a fase I do ciclo de emissões, os 505 s iniciais, reduções de 14% na concentração de THC, 7% na concentração de CO e 3,3% na concentração de NO_x foram obtidas com o uso da configuração com aquecimento, em comparação com a configuração sem aquecimento. Diferentemente das emissões de THC e CO, os benefícios trazidos pelo aquecimento do ar e do etanol nas emissões de NO_x foram sentidos após 200 s (ver Fig. 59).

Medições realizadas após o catalisador na fase I (fase fria) do ciclo de emissões demonstraram reduções na concentração total de THC de 70,2% e 67,3%, com o sistema de aquecimento do ar e do etanol ativado e sem o sistema de aquecimento, respectivamente, em relação às concentrações medidas antes do catalisador (Figs. 60 e 61). As emissões de CO na fase I do ciclo de emissões foram

reduzidas em 84,3% e 79,3% após o catalisador, com o sistema de aquecimento ativado e o sistema de aquecimento desativado, respectivamente, relativamente às emissões medidas antes do catalisador.

Para as emissões de NO_x as reduções verificadas após o catalisador em relação aos valores observados antes do catalisador na fase I do ciclo de emissões foram de 98,9% e 98,8%, para o sistema de aquecimento ativado e o sistema de aquecimento desativado, respectivamente. Estes resultados demonstram que o aquecimento do ar e do etanol injetado, além de reduzir as emissões brutas de THC, CO e NO_x (antes do catalisador), aumenta também a eficiência de conversão do catalisador, especialmente para THC e CO.

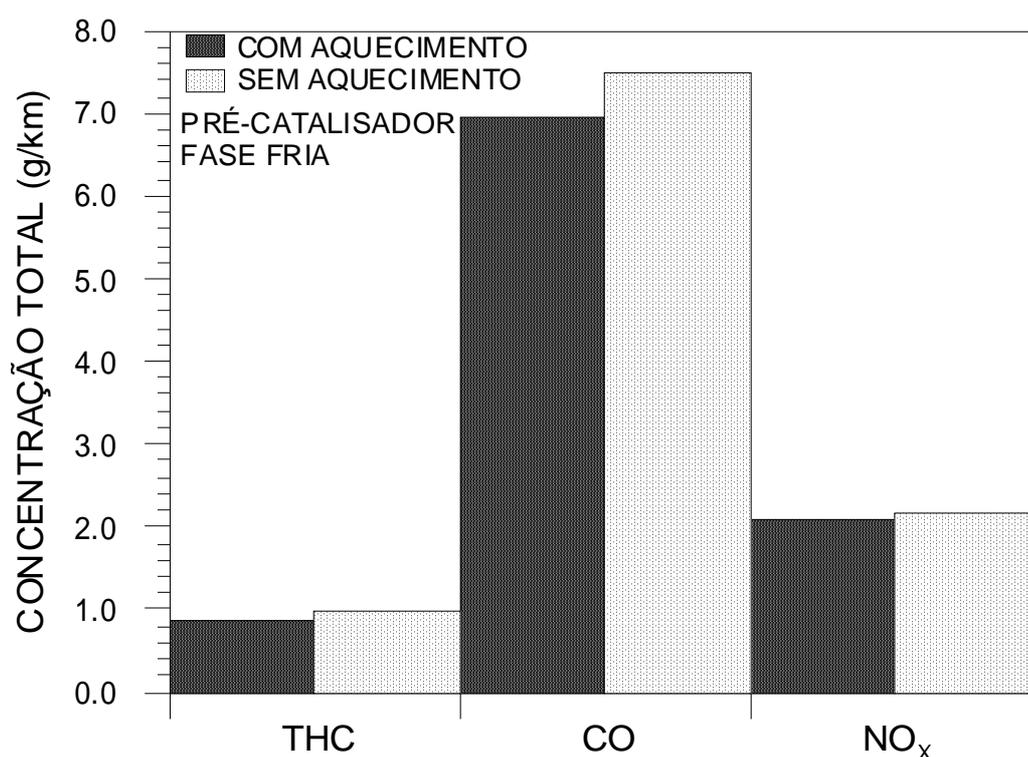


Figura 60: Emissões totais de hidrocarbonetos, monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio medidas antes do catalisador na fase I (505 s) do ciclo de emissões.

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

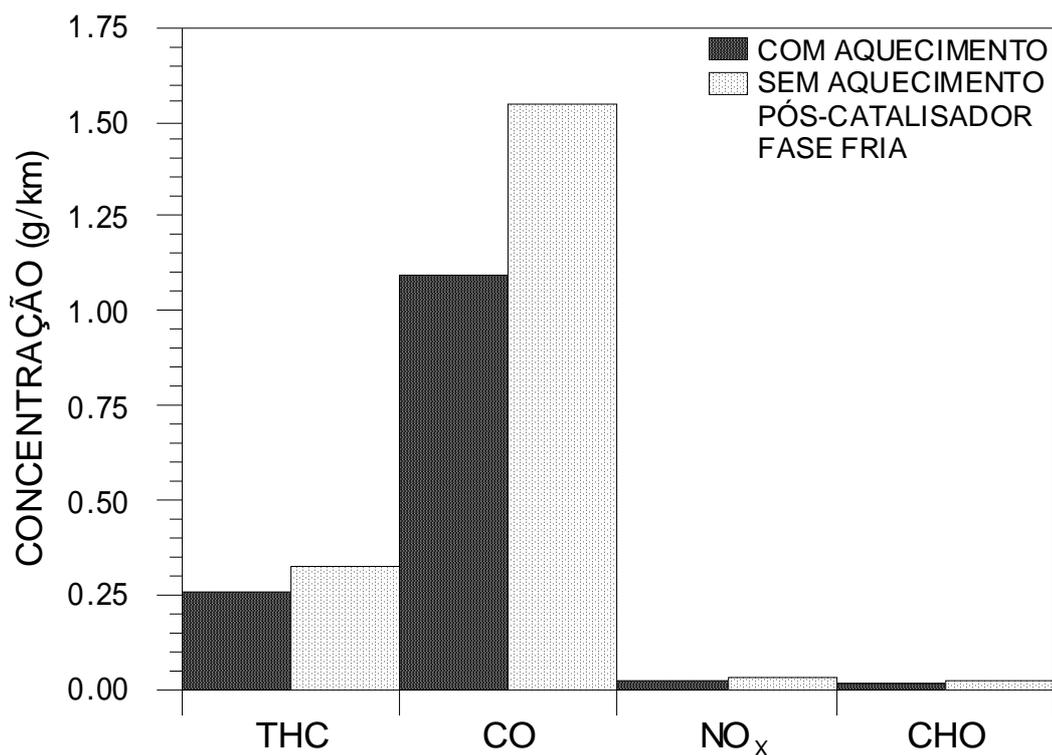


Figura 61: Emissões totais de hidrocarbonetos, monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio medidas após o catalisador na fase I (505 s) do ciclo de emissões.

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

As concentrações totais de THC, CO, NO_x e aldeídos (CHO) ao longo de todo o ciclo de emissões FTP-75, descrito pela norma NBR 6601, medidas após o catalisador, são mostradas na Fig. 62. A utilização do aquecimento do ar e do etanol injetado proporcionou reduções de 19,7%, 17,3% e 18,9% nas concentrações de THC, CO e NO_x, respectivamente. O uso do sistema de aquecimento não provocou alteração significativa na concentração de aldeídos. Segundo Ayyasamy et al. (1981) as emissões de aldeídos variam em função da razão de equivalência da mistura combustível/ar. A variação na razão de equivalência da mistura essencialmente faz variar a temperatura da exaustão e a concentração de oxigênio, parâmetros importantes para a formação de aldeídos. Os níveis mínimos de aldeídos estão na região próxima à estequiométrica, aumentando quando a mistura torna-se rica ou pobre (Fig. 24). Assim, pode-se atribuir a insignificante diferença nos resultados de aldeídos à manutenção da mesma relação de equivalência combustível/ar para as duas configurações (ver Fig. 58).

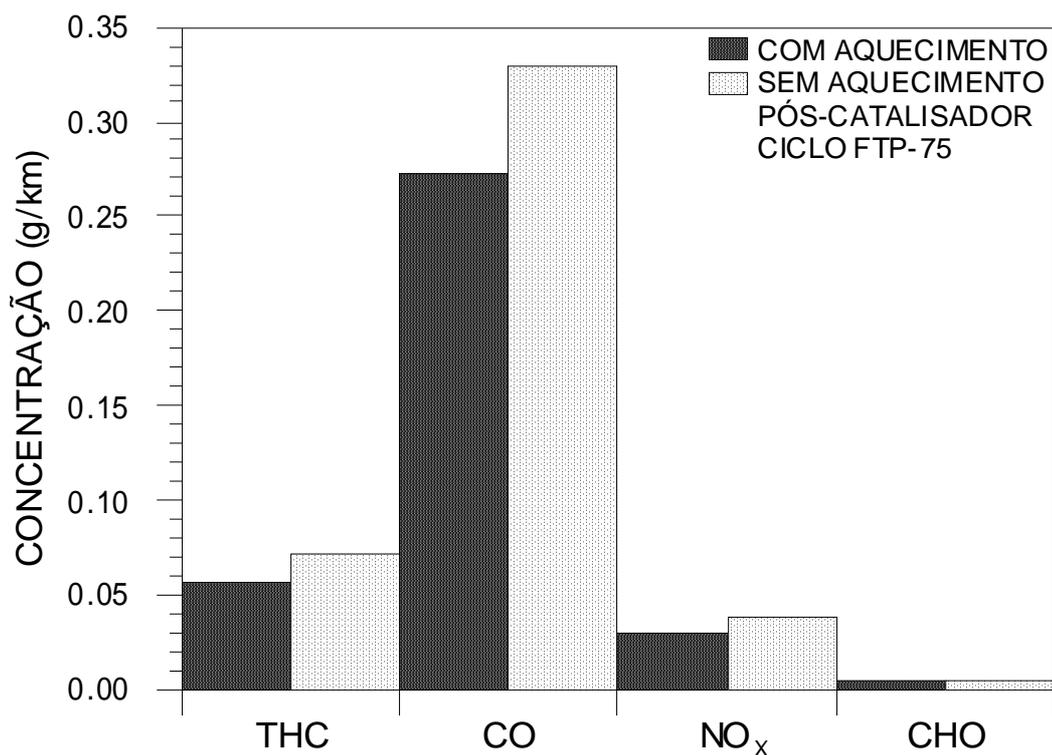


Figura 62: Emissões totais de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e aldeídos, medidas após o catalisador no ciclo de emissões FTP-75 completo.

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

Conforme análise realizada por Sales (2001), a eficiência de conversão do catalisador para redução de THC e CO inicia-se somente próximo aos 50 s na fase I do ciclo de emissões. Na mesma análise foi mostrado que a eficiência de conversão próxima de 100% ocorre a partir dos 120 s (ver Figs. 22 e 23). Assim, do ponto de vista de redução das emissões destes poluentes, a ativação do sistema de aquecimento do ar de admissão e do etanol é recomendável neste período. Os dados medidos em laboratório, que geraram os resultados de emissões apresentados neste capítulo, estão relacionados nas Tabs.7 a 9 do Apêndice A.

6 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas dos resultados experimentais e sugestões para trabalhos futuros.

6.1 Testes em bancada dentro da câmara fria

- a) Na análise em bancada foi possível verificar que o comportamento das temperaturas do ar na saída do duto, do etanol na parte interna do porta-eletroinjetor e da mistura ar/combustível próximo à válvula de admissão, variaram fortemente em função das taxas de escoamento de massa de ar e etanol.
- b) Sob a temperatura ambiente de 0 °C e com o aquecimento do ar de admissão e do etanol, até 10,40 e 46°C, respectivamente, obteve-se a temperatura da mistura ar/combustível de 14 °C. Esta temperatura permite o início da combustão do etanol, superando sua temperatura mínima de ignição de 13 °C.

6.2 Testes de partida a frio em veículo

- a) Uma redução da temperatura do etanol de 65 °C para 35 °C nos primeiros 1,5 s da partida foi verificada, em função dos efeitos da entrada da massa de etanol a 0 °C no interior do porta-eletroinjetor durante o escoamento transiente. Esta redução da temperatura do etanol também pode ser minimizada posicionando o acoplamento do injetor no porta-eletroinjetor mais próximo da região mais aquecida.
- b) A combinação do aquecimento do etanol injetado, atingindo a temperatura de 35 °C, com o aquecimento do ar de admissão, atingindo a temperatura de 6,5 °C contribuiu para a obtenção da temperatura da mistura ar/etanol próxima de 9°C, permitindo a partida do motor sob a temperatura ambiente de 0 °C.

- c) O tempo médio de partida a frio, definido pelo período necessário para o motor atingir 800 rev/min após o giro da chave de ignição, foi 1,7 s, obtido a partir de três testes com o sistema de aquecimento de ar e de etanol ativado, sob a temperatura ambiente de 0 °C. Este resultado é considerado satisfatório, levando-se em consideração que o tempo de 2,0 s é utilizado como padrão para os testes de partida a frio de um motor de combustão interna instalado em um veículo de produção.
- d) Para o motor de 1,4 litros de volume deslocado por ciclo, a utilização de uma resistência elétrica com potência de 300 W para aquecer o ar de admissão e de quatro resistências elétricas de 150 W posicionadas nas entradas dos injetores para aquecer o etanol se mostrou adequada para proporcionar a temperatura necessária para a partida a frio em um período 15% inferior ao mínimo aceitável.

6.3 Testes de emissões de poluentes

- a) Com a utilização do sistema de partida a frio com aquecimento do ar de admissão e do etanol injetado, foi verificada uma redução significativa das emissões de hidrocarbonetos totais e monóxido de carbono, em especial nos primeiros 150 s do ciclo de emissões FTP 75.
- b) Na fase fria do ciclo de emissões, nos 505 s iniciais, verificaram-se reduções de 14% na emissão de THC, 7% na emissão de CO e 3,3% na emissão de NO_x antes do catalisador, proporcionadas pelo aquecimento do ar e do etanol.
- c) As reduções nas concentrações de THC, CO e NO_x realizadas pelo catalisador na fase fria do ciclo de emissões, com a utilização do sistema de aquecimento dos fluidos, foram de 70,2%, 84,3% e 98,9%, respectivamente. A eficiência de conversão do catalisador foi ligeiramente aumentada com o uso do sistema de aquecimento do ar e do etanol.
- d) No ciclo FTP-75 completo, as reduções promovidas pelo uso do sistema de aquecimento do ar e do etanol após o catalisador foram as seguintes: 19,7% para THC, 17,3% para CO e 18,9% para NO_x. O sistema de aquecimento do ar e do etanol não provocou alteração significativa na emissão de aldeídos.

6.4 Sugestões para trabalhos futuros

Como trabalhos de continuidade, os seguintes tópicos são sugeridos:

- a) Simulação numérica completa do processo de aquecimento do ar de admissão e do etanol, considerando os domínios de controle que compõe o novo sistema de partida a frio;
- b) Modelagem do processo de vaporização do jato de combustível ao penetrar no ar aquecido;
- c) Determinação da melhor posição de acoplamento do injetor no porta eletroinjetor de forma a maximizar o volume de etanol que receber calor durante o período de pré-aquecimento;
- d) Avaliação das condições necessárias para obtenção e controle da temperatura da mistura ar-etanol adequadas para a operação do motor sob temperaturas ambiente inferiores a 0 °C;
- e) Realização de testes de partida a frio com aquecimento do ar e do etanol sob temperaturas ambiente inferiores a 0 °C;
- f) Análise do efeito do aquecimento da mistura ar-etanol nas pressões e temperaturas atingidas no interior do cilindro do motor;
- g) Análise do consumo de combustível e das emissões de poluentes regulados e de dióxido de carbono (CO₂) com o motor operando com concentrações variáveis de etanol na gasolina, entre 20% e 100%, e o sistema de aquecimento de ar e do combustível;
- h) Análise detalhada da eficiência do catalisador no período de partida a frio e aquecimento do motor utilizando a estratégia de aquecimento do ar e do combustível.

REFERÊNCIAS

AL-BAGHDADI, M.A.S. Hydrogen: ethanol blending as an alternative fuel of spark ignition engines. **Renewable energy**, n. 28, p. 1471 – 1478, 2003.

AMARAL, R. A. **Influência de Parâmetros Geométricos e de Funcionamento do Motor nas Emissões de Aldeídos por um Veículo a Álcool**, Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

AMARAL, R. A.; SODRÉ, J. R. Aldehyde Emissions from Ethanol-Fuelled Vehicle as Influenced by Engine Geometric Parameters. **SAE Technical Paper Series**, n. 2001-01-1998, p. 1-6, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6601**: Veículos rodoviários automotores leves: Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12026**: Veículos Rodoviários Automotores Leves: Determinação da emissão de aldeídos e cetonas contidas no gás de escapamento, por cromatografia líquida: Método DNPH. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ANNAND, W. V. D.; GULDER, O. L. Exhaust Emissions and Cold Starting of a Four-Cylinder Engine Using Methanol as Fuel. **Proc. Instn. Mech. Engrs.**, v.194, p. 139-143, 1980.

AYYASAMY, R. B. et al. Formation and Control of Aldehydes in Alcohol Fueled Engines. **SAE Technical Paper Series**, n. 811220, 1981.

BALAT, M.; BALAT, H. Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. **Applied Energy**, n. 86, p. 2273-2282, 2009.

BENNETT A. et al. Vapour-liquid equilibria of hydrocarbons and fuel oxygenate, 2. **Journal of Chemical Engineering**, n. 38, p. 263-9, 1993.

BISETTO, F.; TONIOLO, J.; MENEZES, R. Spark plugs for multi-fuel vehicles. **SAE Technical Paper Series**, n. 2006-01-2630, 2006.

BOAM, D. J. et al. The Sources of Unburned Hydrocarbon Emissions from Spark Ignition Engines During Cold Starts and Warm-up. **Proc. Institute Mechanical Engineers**, v. 208, p. 1-11, 1994.

BOSCH, Robert. **Manual de Tecnologia Automotiva**. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

BOYLE, J. et al. E85 1999 Chevrolet Silverado: A Conversion by Minnesota State University, Mankato for the "1999 Ethanol Vehicle Challenge. **SAE Technical Paper Series**, n. 2000-01-0591, 2000.

BOWMAN, C. T. Kinetics of Pollutant Formation and Destruction in Combustion. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 1, p. 33-45, 1975.

BOWDITCH, F. W. A New Tool for Combustion Research: A Quartz Piston Engine. **Trans. SAE**, n. 69, p. 17, 1961.

BRUNOCILLA M.; Lepsch, F. Influence of hot fuel injection on air/fuel mixture preparation and effects on flex fuel engines. **SAE Technical Paper**, n. 2006-01-2619, 2006.

BUCHDID, D.; LES, A.; KAMINSKI, P. C. Proposta de Sistema Alternativo de Partida a Frio de Veículos Bi-Combustíveis. **SAE Technical Paper**, n. 2006-01-2574, 2006.

BROWNING, L. H.; PEFLEY, R. K. Predicted Methanol-Water Fueled S.I. Engine Performance and Emissions. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ALCOHOL FUEL TECHNOLOGY, 2, 1977, Wolfsburg. **Anais...** Wolfsburg: [s.n.], 1977.

BURK, L. H. et al. Cold-Start Hydrocarbon Emissions Control. **Automotive Engineering**, p. 47-52, out. 1995.

CHAN, S. H.; HOANG, D. L. Heat transfer and chemical reactions in exhaust system or a cold-start engine. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 42, p. 4165-4183, 1999.

CHEN, R. H. et al. Gasoline displacement and NOX reduction in an SI engine by aqueous alcohol injection. **Fuel**, v. 89, p. 604-610, 2010.

COSTA, R. C.; SODRÉ, J. R. Hydrous ethanol vs. Gasoline-ethanol blend: Engine

performance and emissions. **Fuel**, v. 89, p. 287- 293, 2010.

DAVIS, G. W.; BOUBOULIS, J.; HEIL, E. The Effect of Multiple Spark Discharge on the Cold-Startability of an E85 Fueled Vehicle. **SAE Technical Paper Series**, n. 1999-01-0609.

FAN, L.; REITZ, R. D.; TRIGUI, N. Intake Flow Simulation and Comparisson with PTV Measurements. **SAE Technical Paper Series**, n. 1999-01-0176.

GABELE, P. A. Characterization of Emissions from a Variable Gasoline/Metanol Fueled Car. **Journal of Air & Waste Management Association**, v. 40, n. 3, p. 296-304, 1990.

GAO, J.; JIANG, D.; HUANG, Z. Spray properties of alternative fuels: A comparative analysis of ethanol-gasoline blends and gasoline. **Fuel**, v. 86, p. 1645-1650, 2007.

GERALDO, G. Differences Between On Board Diagnostic Systems (EOBD, OBD-II, OBD-BR1 and OBD-BR2). **SAE Technical Paper Series**, n. 2006-01-2671, 2006.

GUMUS, M. Reducing Cold-Start Emission from Internal Combustion Engines by Means of Thermal Energy Storage System. **Applied Thermal Engineering**, n. 29, p. 652- 660, 2009.

HAATELA, O.; DECKER, G. Present and Future Fuels and Lubricants in Cold Climate Operation. SAE Paper 890032, Society of Automotive Engineers, 1989.

HATTORI, F. et al. Analysis of fuel and combustion behavior during cold starting of SI gasoline engine. **JSAE Review**, n. 18, p. 351-359, 1997.

HENEIN, N. A.; TAGOMORI, M. K. Cold-start hydrocarbon emissions in port-injected gasoline engines. **Progress in Energy and Combustion Science**, n. 25, p. 563-593, 1999.

HEYWOOD, John B. **Internal combustion engine fundamentals**. New York: McGraw-Hill, 1988.

HOLMAN, J. P. **Experimental Methods for Engineers**. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 1994.

HUANG, Z. et al. Investigation into Hydrocarbon Emissions from Crevice and Oil film During Cold start and Idling Periods in a Spark Ignition Engine. *Institute of Internal Combustion Engine*, School of Energy and Power Engineering, People's Republic of China. **Proc. Institute Mechanical Engineers**, v. 12, Part. D, p. 501-505, 1998.

HUANG, Z. et al. An Investigation on Simulation Models and Reduction Methods of Unburned Hydrocarbon Emissions in Spark Ignition Engines. College of Energy & Power Engineering, – People's Republic of China. **Combust. Sci. Tech.**, v. 115, p. 105-123, 1996.

INCROPERA F. P.; DEWITT D. P.; BERGMAN T. L., **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

ITO, K.; KURATA K. Photochemical Reactions of the Exhaust Gas from an Alcohol-Fueled Engine (Formation of Aldehydes). **Bolletín of the JSME**, v. 28, n. 243, p. 2028-2033, 1985.

ITO, K., YANO, T.; NAGAZAKA, R. Unburned Methanol and Formaldehyde in Exhaust Gases from a Methanol Fueled S.I. Engine. **Bolletín of the JSME**, v. 25, n. 210, p. 1938-1944, 1982.

IWAI, N. A Study on Cold Startability and Mixture Formation of High-Percentage Methanol Blends. **SAE paper 880044**. Warrendale: Society of Automotive Engineers 1981.

JEHLIK, F. et al. Development of a Low-Emission, Dedicated Ethanol-Fuel Vehicle with Cold-Start Distillation System. **SAE Technical Paper Series**, n. 1999-01-0611, 1999.

KABASIN, D. et al. Heated Injectors for Ethanol Cold Starts. **SAE International J. Fuels Lubr**, v. 2, n. 1, p. 172 – 179, 2009.

KABASIN, D. et al. Emission Reduction with Heated Injectors. **SAE Technical Paper**, n. 2010-01-1265, 2010.

KAPLAN, J. A.; HEYWOOD, J.B. Modeling the Spark Ignition Engine Warm-Up Process to Predict Component Temperatures and Hydrocarbon Emissions. **SAE Paper**, n. 910302, p. 361-376, 1991.

KEITH, Owen; COLEY, Trevor. **Automotive Fuels and Reference Book**. 2. ed. [S.l.]: SAE International, 1995.

KITO, B. T. et al. **Properties of an Ethanol-Diethyl Ether-Water Fuel Mixture for Cold-Start Assistance of an Ethanol-Fueled Vehicle**. Colorado: American Chemical Society, 1998.

KLINE, S. J.; MCCLINTOCK, F. A. Describing Uncertainties in Single Sample Experiments. **Mechanical Engineering**, v. 75, p. 3-8, 1953.

KOÇ, M. et al. The effects of ethanol-unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in a spark-ignition engine. **Renewable Energy**, p. 1-6, 2009.

KREITH, F.; BOHN, M. S. **Princípios de Transferência de Calor**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

LIAO, S. Y. et al. Investigation of the Cold-Start Combustion Characteristics of Ethanol-Gasoline Blends in a Constant-Volume Chamber. **Energy & Fuels**, v. 19, p. 813-819, 2005.

MAGNETI Marelli. **Helios System User Manual**. Roma: [s.n.], 2006.

MAGNUSSON, R.; NILSSON, C.; ANDERSON, B. Emissions of Aldehydes and Ketones from a Two-Stroke Engine Using Ethanol and Ethanol-Blended Gasoline as Fuel. **Environmental Science & Technology**, v. 36, n. 8, 2002.

MORAN M. J.; SHAPIRO H. N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

MUZIKOVÁ, Z.; POSPISILI, M.; SEBOR, G. Volatility and phase stability of petrol blends with ethanol. **Fuel**, v. 88, p. 1351-1356, 2009.

NAN, Z.; TAN, Z. C.; SUM, L. Investigation on Thermodynamic Properties of Ethanol + Gasoline Blended Fuel. **Energy & Fuels**, n. 18, p. 84-89, 2004.

NAN, Z.; TAN, Z. C. Thermodynamic Investigation on Properties of Gasohol. **Energy & Fuels**, n. 18, p. 1032-1037, 2004.

OWEN, K.; COLEY, T. **Automotive Fuels Reference Book**. 2. ed. [S.l.]: SAE, Inc., 1995.

PATENTE INPI, Sales L. C. M., Fiat Automóviles S.A., “Sistema de Partida a Frio para Motores a Álcool”, N°PI 9905212-1, data do deferimento 18/12/2007

PATENTE PCT Europa, Sales L. C. M., FPT Technologies Brasil, “Cold Start Up Auxiliary System for Alcohol and Flex Engines with Air-Inlet and Alcohol Warm Up”, N°EP-1934467-B1, data do deferimento 18/08/2010.

PATENTE solicitada no INPI, Sales L. C. M., FPT Technologies Brasil, “Sistema Auxiliar de Partida a Frio para Motores a álcool e Flex com Aquecimento do Ar de Admissão e do Álcool”, N° Pedido PI 0504047-7, data da solicitação 12/09/2005.

PATENTE solicitada no INPI, Campos E. A., Magneti Marelli Sistemas, “Sistema de Partida a Frio sem Gasolina para Motores Funcionantes a álcool, Provido de Dispositivo de Aquecimento Individualizado para Cada Cilindro”, N° PI 0405181-5, data do depósito 11/11/2004.

PATENTE solicitada no INPI, Spiler H. R., Masotti C. R., Lepsch F., Santos C. D., Bauer H. P., Robert Bosch Limitada, “Sistema e Método de Controle de Partida de Motor de Combustão”, N°PI 0700422-2, data da solicitação 16/02/2007.

Patente solicitada no INPI, Magneti Marelli Sistemas, “Sistema de Preparação de Mistura Ar/Combustível para Partida a Frio em Veículos Flex”, N° MU 7502050-5 data da solicitação 25/07/2008.

PISCHINGER F.F.; KRAMER, K. The Influence of Engine Parameters on the Aldehyde Emissions of a Methanol Operated Four-Stroke Otto Cycle Engine. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ALCOHOL FUEL TECHNOLOGY, 3, 1979, Asilomar. **Anais**... Asilomar: [s.n.], 1979.

PONTOPPIDAN, M.; MONTANARI, G.; DAMASCENO, F. Analysis of the Physical Boundary Conditions for the Layout of an Optimized Ethanol Low – Temperature Mixture Preparation Device. **SAE Technical Paper**, n. 2009 - 01 – 0618, 2009.

PUMPHREY, J. A.; BRAND, J. I.; SCHELLER, W. A. Vapour pressure measurements and predictions for alcohol-gasoline blends. **Fuel**, n. 79, p. 1405-1411, 2000.

RAGGI M. V. K.; SODRÉ J. R. Model for Kinetic Formation of CO Emissions in

Internal Combustion Engines. **SAE Technical Paper**, n. 2003-01-3138, 2003.

RAGGI M. V. K.; SODRÉ J. R. Improvement of a Model for Calculation of Oxides of Nitrogen Emissions from Spark Ignition Engines. **SAE Technical Paper**, n. 2004-01-3001, 2004.

RANDAZZO, Mário Luciano. **Emissões e Performance de um Veículo Operando com Misturas de Óleo Diesel, Biodiesel e Etanol**. 2009. 175f. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte.

RASSKAZCHIKOWA, T. V.; KAPUSTIN, V. M.; KARPOV, S. A. Ethanol as High-Octane Additive to Automotive Gasolines. Production and Use in Russia and Abroad. **Springer Science + Business Media**, Chemistry and Technology of Fuels and Oils, v. 40, n. 4, 2004.

RIZZO, G., IVAN, A.; PIANESE, C. Models for the Prediction of Performance and Emissions in a Spark Ignition Engine – A Sequentially Structured Approach. **SAE Technical Paper**, n. 980779, 1998.

ROBERTS, C. E.; STANGLMAIER, R. H. Investigation of Intake Timing Effects on the Cold Start Behavior of a Spark Ignition Engine. **SAE Technical Paper**, n. 1999-01-3622, 1999.

RODRIGUEZ, A. J. D.; VALLE, R. M.; HANRIOT, S. M. Metodologia de Análise das Ondas de Pressão no Coletor de Admissão de um Motor de Combustão Interna para a Previsão do Rendimento Volumétrico. **SAE Technical Paper**, n. 2006-01-2769, 2006.

RODRIGUEZ, A. J. D.; VALLE, R. M.; HANRIOT, S. M. Análise da Propagação das Ondas de Pressão no Coletor de Admissão de um Motor de Combustão Interna com a Presença de um Ressonador de Helmholtz. **SAE Technical Paper**, n. 2006-01-2772, 2006.

SALES, Luís Carlos Monteiro. **Otimização do sistema de partida a frio de veículos a álcool para redução das emissões na exaustão**. 2001. 98f. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte.

SALES, L. C. M.; SODRÉ, J. R. Optimized Cold Start Auxiliary System for Emissions Reduction in Ethanol-Fuelled Engines. **SAE – Alternative Fuels**, v. 1725, p. 1-6, 2002.

SALES, L. C. M.; SODRÉ, J. R. Reducing Exhaust Emissions in Ethanol-Engines During Cold Start. **Combustion Science and Technology**, n. 8, p. 1535-1550, 2003.

SALES, L. C. M. et al. Distribution of the Fuel Flow in a Cold Start System Using an Electronic Fuel Injector. **SAE Technical Paper**, n. 2007-01-2706, 2007.

SALES, L. C. M. et al. Numerical Analysis of the Fuel Flow in a Cold Start System Equipped with an Electronic Fuel Injector. In: International CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 19, 2007, Brasília. **Anais...** Brasília: [s.n.], 2007.

SALES, L. C. M. et al. Cold Start System with Fuel Distributor Equipped with an Electronic Injector Applied to in Flex Fuel Vehicle. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 20, 2009, Gramado. **Anais...** Gramado: [s.n.], 2009.

SALES, L. C. M. et al. Numerical and Experimental Analysis of a Cold Start System Used in Flex Fuel Engines with Heating of Intake Air and Ethanol. **SAE Technical Paper**, n. 2009-36-0300, 2009.

SALES, L. C. M. et al. Heating System for Ethanol and Intake Air – Numerical Model and Experimental Validation at Cold Start in a Flex Fuel Vehicle with Emissions Analysis. **SAE Technical Paper**, n. 2010 -36-0412, 2010.

SALES, L. C. M. et al. Heating System for Ethanol and Intake Air – Numerical Model and Experimental Validation at Cold Start in a Flex Fuel Vehicle with Emissions Analysis. **SAE Technical Paper**, n. 2010 -36-0412, 2010.

SALES, L. C. M. et al. Improving Cold Start Emissions from an Ethanol – Fuelled Engine Through an Electronic Gasoline Injector. In: POWERTRAIN, FUELS & LUBRICANTES CONFERENCE, 2010, San Diego. **Anais...** San Diego: SAE Technical Paper, 2010.

SBRAGIA E. L. et al. Application of an Auxiliary Cold-Start System without Gasoline for a Flexible Fuel Vehicle Assigned to the Brazilian Market. **SAE Technical Paper**, n. 2010-36-0092, 2010.

SCHAFFER, F.; BASSHUYSER, R. **Reduced Emissions and Fuel Consumption in Automobile Engines**. [S.l.]: SAE, Inc., 1995.

SENDA, J. et al. Measurement and Modeling on Wall Wetted Fuel Film Profile and Mixture Preparation in Intake Port of SI Engine. **SAE Technical Paper Series**, n. 1999-01-0798, 1999.

SHORT, J.; KAZOUR J.; CAVOTTA M. Thermal Modeling for Heated Tip Injectors. **SAE Technical Paper Series**, n. 2010-01-1264, 2010.

SILVA, N.R.; SODRÉ J. R. Using Additive to Improve Cold Start in Ethanol-Fuelled Vehicles. **SAE Technical Paper Series**, n. 2000-01-1227, p. 203-207, 2000.

SIQUEIRA, C. R. et al. Three-dimensional Transient Simulation of an Intake Manifold using CFD Techniques. **SAE Technical Paper Series**, n. 2006-01-2633, 2006.

SINGER, B. C. et al. A Fuel-Based Approach to Estimating Motor Vehicle Cold-Start Emissions. **Journal of Air & Waste Management Association**, v. 49, p. 125-133, 1999.

SODRÉ, J. R. **Formulation and Experimental Validation of a Computer Model for Spark Ignition Engine Exhaust Hydrocarbons**. 1995. Tese (Pós doutorado) - UMIST, Manchester.

SODRÉ, J. R.; YATES, D. A. An Improved Model for Spark Ignition Engine Exhaust Hydrocarbons. **SAE 971011**: Issues in Emissions Control Technology (SP-1248), p. 135-152, 1997.

SODRÉ, J. R. Further Improvement on a HC Emissions Model: Partial Burn Effects. **SAE 990222**: SI Engine Modeling (SP-1451), p. 155 –161, 1999.

SODRÉ, J. R. Modeling NO_x Emissions from Spark-Ignition Engines: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. **Journal of Automobile Engineering**, Part D, v. 214, p. 929-934, 2000.

TAN, P.; LU, J. **GAS-PM Modelling for Particulate Matter Emission of Diesel Engines**: Private Communication. Shanghai: Institute of Internal Combustion Engine, Shanghai Jiaotong University, 2003.

TANI, Y.; MORI, Y.; MORI, Y. Multiple-hole Nozzle Atomization for SI Engines. **SAE Technical Paper Series**, n. 1999-01-0564, 1999.

TURNER, J. W. G. Alcohol-Based Fuels in High Performance Engines. **SAE Technical Paper Series**, n. 2007-01-0056, 2007.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method**. Malaysia: Longman Scientific & Technical, 1995.

WHITE F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 4. ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 2002.

WITHROW, L.; RASSWULLER, G. M. Formaldehyde Formation. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 26, n. 12, 1934.

WITZE, P. O.; GREE R. M. **LIF Visualization of Liquid Fuel in the Cylinder of a Spark Ignition Engine**: Proceedings of the Eighth International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. Lisboa: [s.n.], 1996.

WITZE, P. O.; GREE, R. M. LIF and Flame-Emission Imaging of Liquid Fuel Films and Pool Fires in an SI Engine During a Simulated Cold Start. **SAE Paper**, n. 970866, 1997.

WITZE, P. O. Diagnostics for the Study of Cold Start Mixture Preparation in a Port Fuel-injected Engine. **SAE Technical Paper Series**, n. 1999-01-1108, 1999.

WYLEN, Gordon Van; SONNTAG, Richard; BORGNAKKE, Claus. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1995.

ZÁRANTE, P. H. B. et al. Exhaust Aldehyde Measurement Using Gas Chromatography. **SAE Technical Paper Series**, n. 2008-36-0036, 2008.

APÊNDICE A – TABELAS DE RESULTADOS

Neste Apêndice são apresentados os resultados das médias dos tempos de partida a frio a 0°C, das temperaturas da mistura ar/etanol obtidos em bancada a 0°C e dos testes para determinação das emissões de poluentes. Os resultados dos testes de medição das temperaturas da mistura ar/etanol em bancada e os resultados dos testes de emissões dos poluentes THC, CO, NO_x e aldeídos serão utilizados para avaliar as incertezas das respectivas medições. A análise das incertezas das medições são apresentadas no Apêndice B.

TABELA 5
Resultados dos tempos de partida a frio a 0°C.

Teste	t(s)
1	1,500
2	1,700
3	1,900
MÉDIA	1,700
DESVIO PADRÃO	0,200

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

TABELA 6

Resultados das temperaturas da mistura medidas nos testes em bancada a 0°C após 2,0 s do início do escoamento de ar e etanol aquecidos.

Teste	Temperatura Ar $T_{ar\ saída}$ (°C)	Temperatura da Mistura $T_{mistura}$ (°C)	Temperatura da Etanol $T_{etanol\ acoplamento}$ (°C)
1	10,00	13,00	47,20
2	10,20	13,10	46,80
3	9,80	12,90	47,00
MÉDIA	10,00	13,00	47,00
DESVIO PADRÃO	0,200	0,100	0,200

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

TABELA 7

Resultados das emissões de THC, CO, e NO_x medidas antes do catalisador no ciclo "COLD" 505.

EMISSÕES COLD 505 ANTES DO CATALISADOR (g/km)			CONFIGURAÇÃO
THC	CO	NO _x	
0,784	6,736	2,094	COM AQUECIMENTO DO AR E DO ETANOL
0,899	7,396	2,087	
0,888	6,715	2,099	
0,857	6,949	2,093	MÉDIA
0,063	0,387	0,006	DESVIO PADRÃO
0,959	8,090	2,201	SEM AQUECIMENTO DO AR E DO ETANOL
0,981	7,054	2,176	
1,048	7,270	2,115	
0,996	7,471	2,164	MÉDIA
0,046	0,547	0,044	DESVIO PADRÃO
13,956	6,991	3,266	% DIFERENÇA ENTRE AS MÉDIAS

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

TABELA 8
 Resultados das emissões THC, CO, NO_x e aldeídos medidas depois do catalisador no ciclo "COLD 505.

EMISSIONES COLD 505 DEPOIS DO CATALISADOR (g/km)				CONFIGURAÇÃO
THC	CO	NOx	Aldeídos	
0,245	1,101	0,022	0,016	COM AQUECIMENTO DO AR E DO ETANOL
0,251	1,071	0,028	0,017	
0,27	1,110	0,022	0,0189	
0,255	1,094	0,024	0,017	MÉDIA
0,013	0,020	0,003	0,001	DESVIO PADRÃO
0,34	1,325	0,026	0,0164	SEM AQUECIMENTO DO AR E DO ETANOL
0,328	1,646	0,028	0,0169	
0,31	1,671	0,027	0,0193	
0,326	1,547	0,027	0,018	MÉDIA
0,015	0,193	0,001	0,002	DESVIO PADRÃO
21,677	29,298	11,111	1,331	% DIFERENÇA ENTRE AS MÉDIAS

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

TABELA 9
 Resultados das emissões THC, CO e NO_x, aldeídos e NMHC medidas depois do catalisador no ciclo FTP 75.

EMISSÕES FTP 75 DEPOIS DO CATALISADOR (g/km)					CONFIGURAÇÃO
THC	CO	NO _x	Aldeídos	NMHC	
0,057	0,279	0,026	0,0048	0,045	COM AQUECIMENTO DO AR E DO ETANOL
0,055	0,260	0,032	0,0046	0,044	
0,059	0,276	0,032	0,0044	0,049	
0,057	0,272	0,030	0,005	0,046	MÉDIA
0,002	0,010	0,003	0,000	0,003	DESVIO PADRÃO
0,075	0,321	0,038	0,0048	0,064	SEM AQUECIMENTO DO AR E DO ETANOL
0,070	0,350	0,035	0,0047	0,058	
0,067	0,316	0,039	0,0044	0,056	
0,071	0,329	0,037	0,005	0,059	MÉDIA
0,004	0,018	0,002	0,000	0,004	DESVIO PADRÃO
19,340	17,427	19,643	0,719	22,472	% DIFERENÇA ENTRE AS MÉDIAS

Fonte: Dados da pesquisa, 2010.

APÊNDICE B – ANÁLISE DE INCERTEZAS

Neste Apêndice são determinadas as incertezas máximas das medições das temperaturas e das das emissões de poluentes. Utilizando a metodologia de Kline e McClintock (1953).

• Testes de Emissões de Poluentes

A incerteza nas leituras dos poluentes HC, CO e NO_x é especificada pelo fabricante dos analisadores como sendo 0,5%. Para o cálculo da incerteza máxima das medições foram utilizados os resultados de emissões da configuração 1, em g/fase.

$$IHCF = \pm HCF \cdot 0,5\% \quad (22)$$

$$HCF = HC_{\text{médio}} \times d \quad (23)$$

$$HCF = 0,857 \times 5,75$$

$$HCF = 4,93$$

$$IHCF = \pm 4,93 \times 0,005$$

$$IHCF = \pm 0,0247 \text{ g / fase}$$

$$ICOF = \pm COF \cdot 0,5\% \quad (24)$$

$$COF = CO_{\text{médio}} \times d \quad (25)$$

$$COF = 6,949 \times 5,75$$

$$COF = 40,026$$

$$ICOF = \pm 40,03 \times 0,005$$

$$ICOF = \pm 0,200 \text{ g / fase}$$

$$ICOF = \pm COF \cdot 0,5\% \quad (26)$$

$$NO_x F = NO_{x\text{médio}} \times d \quad (27)$$

$$NO_x F = 2,093 \times 5,75$$

$$NO_x F = 12,035$$

$$INO_x F = \pm 12,035 \times 0,005$$

$$INO_x F = \pm 0,060 \text{ g / fase}$$

Onde:

COF - concentração total de CO na fase COLD 505 (g/fase)

HCF - concentração de total HC na fase COLD 505 (g/fase)

NO_xF - concentração total de NO_x na fase COLD 505 (g/fase)

ICOF - incerteza de leitura de CO (g/fase)

IHCF - incerteza de leitura de HC (g/fase)

INO_xF - incerteza de leitura de NO_x (g/fase)

A incerteza máxima da distância registrada pelo equipamento é de $\pm 0,1\%$.

Logo, a incerteza da distância, *Id(km)* é dada por:

$$Id = d \cdot 0,1\% \quad (28)$$

$$Id = 5,75 \cdot 0,001$$

$$Id = 0,006 \text{ km}$$

- **Incerteza Máxima das Emissões de HC**

A incerteza máxima da concentração de hidrocarbonetos medidos, em g/km, deve considerar as incertezas acumuladas de leitura do poluente e da distância. Utilizando a metodologia de Kline e McClintock (1953):

$$HC = \frac{HCF}{d} \quad (29)$$

$$IHC = \pm \sqrt{\left[\left(\frac{\partial HC}{\partial HCF} \right) \cdot IHC F \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial HC}{\partial d} \right) \cdot Id \right]^2} \quad (30)$$

$$IHC = \pm \sqrt{\left[\left(\frac{1}{d} \right) \cdot IHC F \right]^2 + \left[\left(-\frac{HCF}{d^2} \right) \cdot Id \right]^2} \quad (31)$$

Onde:

HC – concentração de HC emitido (g/km)

IHC – incerteza de medição das emissões de HC (g/km)

Calculando a incerteza máxima:

$$IHC = \pm \sqrt{\left[\left(\frac{1}{5,75} \right) \times 0,0247 \right]^2 + \left[\left(\frac{4,93}{(5,75)^2} \right) \cdot 0,006 \right]^2}$$

$$IHC = \pm 0,0044 \text{ g / km}$$

O desvio padrão das medições efetuadas é de 0,063 g/km. Logo, a incerteza total das emissões de HC para a configuração com aquecimento pode ser calculada como:

$$IT = \sqrt{0,0044^2 + 0,0063^2}$$

$$IT = 0,0077 \text{ g / km}$$

- **Incerteza Máxima das Emissões de CO**

Em procedimento similar ao cálculo efetuado para HC, a incerteza máxima das emissões de CO é dada pela seguinte sequência:

$$CO = \frac{COF}{d} \quad (32)$$

$$ICO = \pm \sqrt{\left[\left(\frac{\partial CO}{\partial COF} \right) \cdot ICOF \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial CO}{\partial d} \right) \cdot Id \right]^2} \quad (33)$$

$$ICO = \pm \sqrt{\left[\left(\frac{1}{d} \right) \cdot ICOF \right]^2 + \left[\left(-\frac{COF}{d^2} \right) \cdot Id \right]^2} \quad (34)$$

Onde:

CO – concentração de CO emitido (g/km)

ICO – incerteza de medição das emissões de CO (g/km)

Calculando a incerteza máxima:

$$ICO = \pm \sqrt{\left[\left(\frac{1}{5,75} \right) \cdot 0,200 \right]^2 + \left[\left(\frac{40,026}{(5,75)^2} \right) \cdot 0,006 \right]^2}$$

$$ICO = \pm 0,092 \text{ g / km}$$

O desvio médio das medições efetuadas é de 0,387 g/km. Logo, a incerteza total das emissões de CO para a configuração com aquecimento pode ser calculada como:

$$IT = \sqrt{0,092^2 + 0,387^2}$$

$$IT = 0,398 \text{ g / km}$$

- **Incerteza Máxima das Emissões de NO_x**

O procedimento de cálculo da incerteza máxima dos resultados para NO_x é similar ao adotado para HC e CO.

$$NO_x = \frac{NO_x F}{d} \quad (35)$$

$$INO_x = \pm \sqrt{\left[\left(\frac{\partial NO_x}{\partial NO_x F} \right) \cdot INO_x F \right]^2 + \left[\left(\frac{\partial NO_x}{\partial d} \right) \cdot Id \right]^2} \quad (36)$$

$$INO_x = \pm \sqrt{\left[\left(\frac{1}{d} \right) \cdot INO_x F \right]^2 + \left[\left(\frac{NO_x F}{d^2} \right) \cdot Id \right]^2} \quad (37)$$

Onde:

NO_x – concentração de NO_x emitido (g/km)

INO_x – incerteza das emissões de NO_x (g/km)

Calculando a incerteza máxima:

$$INO_x = \pm \sqrt{\left[\left(\frac{1}{5,75} \right) \cdot 0,060 \right]^2 + \left[\left(\frac{12,035}{(5,75)^2} \right) \cdot 0,006 \right]^2}$$

$$INO_x = \pm 0,011 \text{ g / km}$$

O desvio médio das medições efetuadas é de 0,006 g/km. Logo a incerteza total das emissões de NO_x para a configuração com aquecimento pode ser calculada como:

$$IT = \sqrt{0,011^2 + 0,006^2}$$

$$IT = 0,013 \text{ g / km}$$

- **Incerteza Máxima das Emissões de Aldeídos**

Os testes de emissões de aldeídos são sensíveis ao modo de condução do veículo e os valores medidos são muito pequenos. Assim, no Laboratório de Emissões onde os testes foram executados são realizadas verificações periódicas por órgãos de homologação, ou sempre que a dispersão das medições for maior que a especificada para o sistema analisador. A incerteza máxima da medição de aldeídos, de acordo com estas verificações, é definida como 8,0% do valor medido. Assim, para o valor médio registrado para a configuração com aquecimento depois do catalisador no ciclo “COLD 505” de 0,017g/km, a incerteza máxima calculada é de ±0,0014 g/km.

• **Temperaturas da Mistura Ar / Etanol a 0°C**

Em todos os testes as temperaturas (°C) do ar da admissão, do etanol e da mistura ar / etanol foram medidas como termopares tipo K com as seguintes características:

- escala: -50,0 a 1300,0°C;
- precisão: $\pm (0,4\% + 0,8^\circ\text{C})$;
- resolução: $0,1^\circ\text{C} / 0,1^\circ$
- Tempo de resposta: Aprox. 0,5 s.

A incerteza máxima das medições de temperaturas em graus Celsius (°C) deve considerar as incertezas acumuladas de leitura dos termopares tipo K e no osciloscópio utilizados nas medições. Para o osciloscópio será utilizado a precisão de $\pm 0,5\%$ da leitura. Nesta análise serão utilizados os dados da temperatura do etanol após 2,0 s do início do escoamento de ar e etanol aquecidos, conforme Tab. 8 do Apêndice A. Para o cálculo da incerteza máxima será utilizada a metodologia de Kline e McClintock (1953):

$$IT_{total} = \pm \sqrt{[(IT_{termopar})^2 + (IT_{oscil})^2 + (IT_{temperatura})^2]} \quad (38)$$

$$IT_{total} = \pm \sqrt{[(0,004 \times T + 0,8)^2 + (0,005 \times IT_{oscil})^2 + (IT_{temperatura})^2]} \quad (39)$$

Onde:

IT_{total} – Incerteza total das medições de temperatura (°C) ;

IT_{oscil} - Incerteza da medição do termopar (°C);

T - Média das temperaturas (°C);

IT_{oscil} - Incerteza da medição do osciloscópio (°C);

$IT_{temperatura}$ - Desvio padrão das medições de temperatura (°C).

$$IT_{total} = \pm \sqrt{[(0,004 \times 47 + 0,8)^2 + (0,005 \times 47)^2 + (0,2)^2]}$$

$$IT_{total} = \pm 1,036^\circ C$$

- **Tempo de Partida a Frio**

Para a determinação da incerteza do tempo de partida a frio será utilizada a mesma metodologia dos demais parâmetros. Considerando o erro máxima na leitura da velocidade rotacional de 800 rev/min (1% da leitura) e o desvio padrão das médias dos tempos de partida a frio.

$$It_{total} = \pm \sqrt{[(0,01 \times It_{rotacional})^2 + (It_{tempo})^2]} \quad (40)$$

Onde:

It_{total} – Incerteza total das medições de tempo (s);

$It_{rotacional}$ - Incerteza da medição da velocidade rotacional pela ECU (s);

It_{tempo} - Desvio padrão das medições dos tempos de partida a frio (s).

$$It_{total} = \pm \sqrt{\left[\left(0,01 \times \frac{60}{800} \right)^2 + (0,2)^2 \right]}$$

$$It_{total} = \pm 0,2s$$

ANEXO I – ARTIGO SAE 2009

2009-36-0300

Numerical and Experimental Analysis of a Cold Start System Used in Flex Fuel Engines with Heating of Intake Air and Ethanol

Luís Carlos Monteiro Sales
Robinson Ferrari Barbosa
Luciano de Andrade Martins

FPT- Fiat Powertrain Technologies, Engineering Center, Betim, Brasil

Rudolf Huebner

Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, Brasil

Rogério Gonçalves dos Santos

Magneti Marelli Sistemas Automotivos Powertrain, Campinas, Brasil

José Ricardo Sodré

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais Departamento de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, Brasil

Copyright © 2009 SAE International

ABSTRACT

The use of pure ethanol or the prevailing of it in the mixture with gasoline in flex fuel engines, led to a necessity of an auxiliary system to the cold start and engine functioning. Ethanol chemical properties can be used to explain this necessity. Ethanol is been used in Brazil for more than 30 years and many researches give support to the cold start technologic evolution. The cold start system enables the gasoline introduction into the intake manifold of flex fuel engines, when vehicles are using pure ethanol or a mixture with more ethanol than gasoline. The researches challenge is to find a way to start an engine using ethanol without the use of the cold start system using gasoline. This works presents a

numerical analysis of the flow and heat transfer in a cold start system, using computational fluid dynamics. An experimental test bench developed to study a start cold system heating air and ethanol. The objective is to use this system to assure the engine operation at low ambient temperatures. The simulations were validated using the experimental data and results shows the possibility to get a temperature high enough to assure fuel combustion.

Keywords: cold start, ethanol, fuel injection, internal combustion engine, numerical method

The Engineering Meetings Board has approved this paper for publication. It has successfully completed SAE's peer review process under the supervision of the session organizer. This process requires a minimum of three (3) reviews by industry experts.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of SAE.

ISSN 0148-7191

Positions and opinions advanced in this paper are those of the author(s) and not necessarily those of SAE. The author is solely responsible for the content of the paper.

SAE Customer Service: Tel: 877-606-7323 (inside USA and Canada)
 Tel: 724-776-4970 (outside USA)
 Fax: 724-776-0790
 Email: CustomerService@sae.org

SAE Web Address: <http://www.sae.org>

Printed in USA

SAEInternational™

INTRODUCTION

The predominance use of ethanol in flex fuel vehicles was important and determined the progress on related researches in Cold Start Systems evolution. These systems are used to aid the cold start and cold condition of a flex fuel engine working with ethanol. The conventional developed systems and consecrated in Brazil for more than 30 years are characterized by the introduction of gasoline in the intake elbow during the cold Start and accelerations in the motor heating period. Switching the manual electrical gasoline reservoir bomb on in the engine's starting moment, an eletro-injector sprays gasoline into the intake elbow ([1], [2]) the researches have developed until the elimination of the gasoline in the cold starting. The ethanol heating before and during the cold start [3] determined the elimination of the use of the gasoline. However temperature less than -5°C , the ethanol heating cannot be enough to guarantee the engine start operating with ethanol (E100). On this case can be a condition if the ethanol be also used in others countries that have less temperatures than in Brazil. On this way, the use of the gasoline can still be a good alternative, or will be necessary more researches for extreme conditions of temperatures, to guarantee the possibility to beginning the operation with ethanol (E100) without the aid of gasoline. The objective of this work is present a complete analysis numeric (CFD and heat transfer) and experimental of cold Start system with ethanol heating and air admission. This artifice can be a good alternative to guarantee the engine starts in low atmosphere temperatures. The simulation results were validated by experiments in test bench and they prove that is possible obtain temperatures when you make mix among air and ethanol compatible with the necessary requirements for the combustion. Specifically the work focus is obtaining a mix of air and ethanol in a favorable temperature for combustion in low temperatures. To prove this proposal is that the most of the mixture air/ethanol is formed by air (around 9 parts of air for one of fuel). When heating up the air it will be possible to minimize the losses of heat of the ethanol when it's heated up separately. The Cold Start system analyzed is composed by an electric resistance for the heating of the air positioned below the throttle housing. The ethanol's heating is done by electrical resistances positioned in the entrance of each one of the four injectors. The performance and command of all electric resistances can be accomplished by the ECU (electronic control unit). The air and alcohol can be simultaneously or separately warm, depending on the engine and atmosphere temperature, by the engine's ECU parameters.

LITERATURE REVIEW

The ethanol's vapor pressure (2,3 psi) and the high latent heat of vaporization are properties [4] that determine the need of artifices to minimize the problems related to the start and cold operation of the engines when they are operating with this fuel under low atmosphere temperatures. Usually, the used artifice is

the introduction of gasoline into the admission system during the start and period of heating of the engine. Then, it is possible to obtain a mixture with a more volatile composition for the combustion in low temperatures. The atomization of the fuel also contributes to the combustion in low temperatures. Researches demonstrate the efficiency of this artifice for the ethanol's combustion. Recently, presentations ([1], [2]) showed that a cold start system uses an electronic injector to spray gasoline into the admission system (when the engine is working with ethanol) and it improves the time of a cold start, minimizes the emissions of pollutant and allows a good drivability during the period of engine heating. An evolution of this system was the use of a fuel's distributor characterized by four branches with gauged holes, being one for each cylinder. This system [6] possesses an electronic injector to control the gas flow in each one of the gauged holes. This way, it is possible to minimize the gasoline losses in the walls of the admission system, because the atomization is addressed directly for the entrance of each cylinder. However, the great try for the elimination of the gasoline need in the aid of the cold start determined works that contemplate the ethanol's heating [3] and of the air admission [7]. These last researches are coherent to this work that applies the ethanol's heating and the air admission to eliminate the use of the gasoline in the aid to the combustion of the ethanol in low temperatures.

METHODOLOGY

EXPERIMENTAL APARATUS - In this work, the tests were accomplished on a table where the admission system was set up in the complete headstock. These components are of a four-cylinder engine and eight valves. The air flow was provided by an electric compressor and the adjustment of the air speed was obtained through the variation of the electric tension of the compressor. Fig. 1 shows the group of all components of the experimental apparatus. To supply entrance data for the numeric simulations of temperature's profiles of the ethanol and of the air, were installed temperature sensors type K. About the air temperatures, the temperature sensors were installed in the admission system ducts, before and after the air heater and close to the admission valve. The ethanol's temperatures were obtained by temperatures sensors in the entrance of the door injector, in the intern part where it is positioned the resistance that heats up the ethanol. Besides, other temperature sensor was positioned in the area of the jet of the injector. Then, it was possible to obtain the result of the temperature of the mixture air and ethanol, both heated up. The Fig. 1 shows the test bench with cylinder head, intake manifold and electrical compressor. The Figs. 2, 3 and 4 shows details of the admission system with the air compressor, fuel distributor and the tube for injectors, respectively. This device is equipped to a fuel pump in order to provide pressure in ethanol line (2,0 bar). The mobility of the table allowed the group to be positioned inside of a room for the measurements to an ambient temperature of

0°C. The resistance power to heat the air and the ethanol were 200 W and 85W/injector respectively.

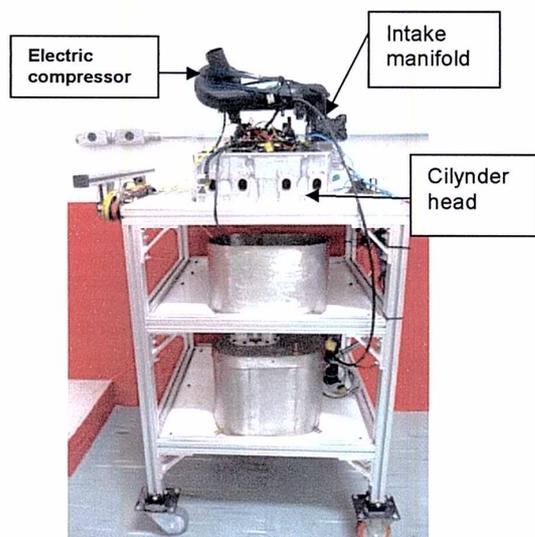


Figure 1 - Overview of test bench with cylinder head, intake manifold and electrical compressor.

To measure the air velocity at the intake manifold (above the throttle valve) a hot wire anemometer was used (0.2 to 20.0 m/s \pm 3% + 1 digit). A digital oscilloscope with 500Hz maximum frequency was used to measure all the temperatures needed.

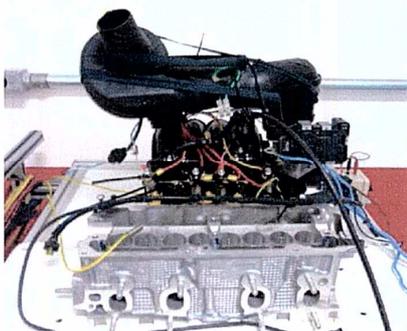


Figure 2 - Detail of cylinder head, intake manifold and electric compressor.



Figure 3 - Detail of fuel distributor with electrical injectors.

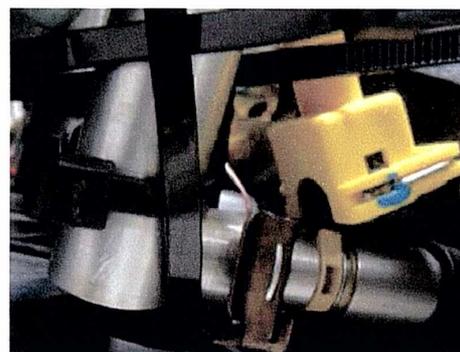


Figure 4 - Detail of tube for injector.fuel distributor with electrical injector

EXPERIMENTAL PROCEDURE – The tests to get the air and ethanol's temperature was conducted in a chamber that permits temperature adjustments to the target; 0 °C. The electrical resistance to heat the ethanol and air was plugged for 8,0 s, and then the electrical compressor and the injectors was active. The flow velocity at the throttle valve was 2,3m/s and the injector pressure 2,0 bar. The air and ethanol temperature to validate the numerical simulation were obtained when the air and ethanol heated flow begin.

NUMERICAL METHODOLOGY - In this work the heating process of air and ethanol was simulated. A numerical model was used to evaluate the air heating during 2,4 s after the flow begging in order to simulate intake air manifold under 2,3 m/s velocity. This velocity condition is based on intake air manifold during engine start. The domain includes the air path along the admission ducts until the inlet valves at the combustion chamber. The ethanol heating process begging 8,0 s after the electrical resistances and fuel injector are turned on. This

condition is necessary to simulate the transient ethanol flow under 2,0 bar by fuel injector.

Numerical Model for Ethanol Heating System - In this work a mathematical model for the flow inside the injection system based on a turbulent stationary flow of a viscous incompressible fluid was used. The flow regime of interest is modeled by the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations [8].

Continuity equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (1)$$

Momentum equation

$$\frac{\partial \rho \bar{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \otimes \bar{u}) - \nabla \bar{u} = -\nabla p + \nabla \cdot [(\mu + \mu_T)(\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T)] + S_M \quad (2)$$

where ρ represents the density, t the time, p the pressure, u the velocity vector, μ the fluid viscosity, μ_T the turbulent viscosity and S_M the sum of body forces.

Due to its robustness, economy and acceptable results obtained for a considerable amount of flows, the $k-\varepsilon$ model has been the most used model for numerical predictions of industrial flows. In this model the turbulent viscosity is computed as

$$\mu_T = \bar{\rho} c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

The system is closed by including the transport equations for k and ε ,

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \rho \bar{u} \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \mu_T P(\bar{u}) - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \rho \bar{u} \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_T P(\bar{u}) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

where the production of turbulence is defined as

$$P(\bar{u}) = \nabla \bar{u} \cdot (\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T) \quad (6)$$

Constants $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.00$, and $\sigma_\varepsilon = 1.30$ assume the standard values proposed by [9]. Energy equation was used to evaluate the temperature distribution along the domain.

The rail is fully of ethanol ($\rho=810 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0.0012 \text{ Pa.s}$ and $c_p= 2430 \text{ J/kg.K}$) and the heater (steel, $\rho=7854 \text{ kg/m}^3$ and $c_p= 434 \text{ J/kg.K}$) supplies 85W from $t=0$ until

8s. After that the energy supplied is suspended and a mass flow rate of 2,6g/s is imposed at the inlet.

Adiabatic no slip boundary condition was adopted for the rail walls, and the wall functions proposed [10] their variations are implemented in the software and used to perform the simulations. For the outlet, the boundary conditions were defined by subsonic flow regime and ambient pressure (101300 Pa). The Fig. 5 shows the domain where the flow was simulated.

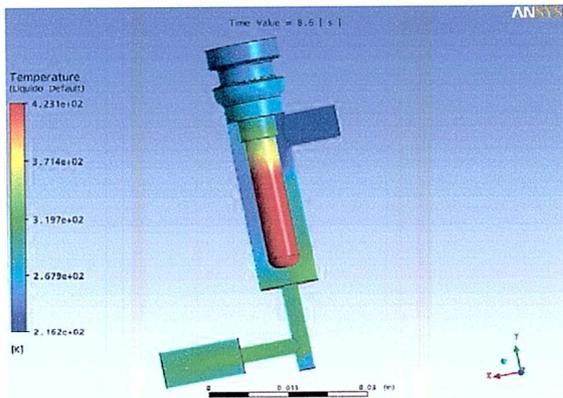


Figure 5 – View of the fuel heater system device

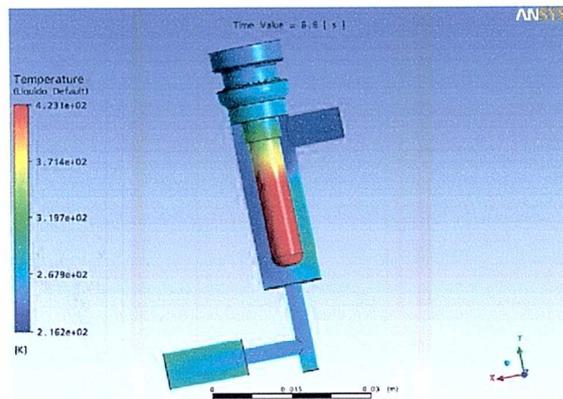
The software Ansys CFX 11SP1 was used to simulate the system. Some parameters had to be defined for each simulation. A reference pressure equal to 101300 Pa and a fluid temperature equal to 273 K at $t=0$ s were used in the domain definition. For the simulation a convergence criteria of target residual of 10 was considered.

In this simulation a mesh with a maximum size of 0.6 mm was used in the fluid region and inflation was used near the heater wall in order to get a best solution for the flow field. ICEM was used as mesh generator. The final mesh used 247826 nodes, 758997 elements (tetrahedra and pyramids) with a maximum end length ratio of 8.811.

Numerical Model for Air Heating System - The air heating process was simulated along the admission ducts until the inlet valves at the combustion chamber. Equations are the same as used to simulate the fuel heater device. The air is heated by an electrical device placed near the butterfly valve. The software STAR-CCM+ was used to simulate the system. The Fig. 6 shows the model. The power provide is 85 W/injector.



(d) time = 8.6s



(e) time = 8.8s

Figure 8 – Ethanol heating from 8.0 to 8.8 s

Numerical Results – Air Heating System – The Figs. 9 to 12 shows the air heating along the admission ducts until the inlet valve at the combustion chamber. It can be noticed the temperature rise near the heating device placed near the throttle valve. The air temperature varies from 0°C to 14°C in 2.5s.

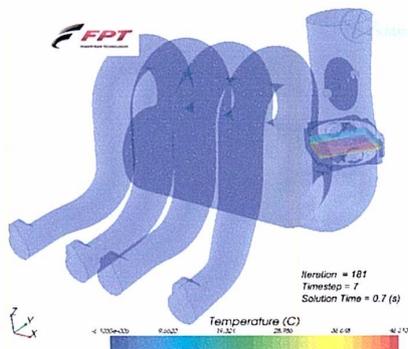


Figure 9 - Air heating in 0.7 s

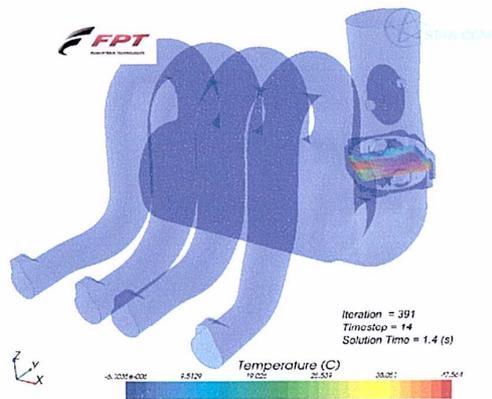


Figure 10 - Air heating in 1.4 s

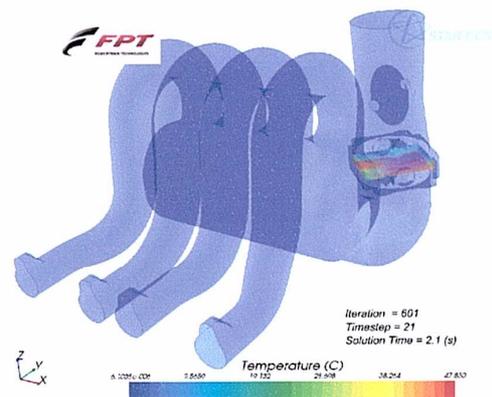


Figure 11 - Air heating in 2.1 s

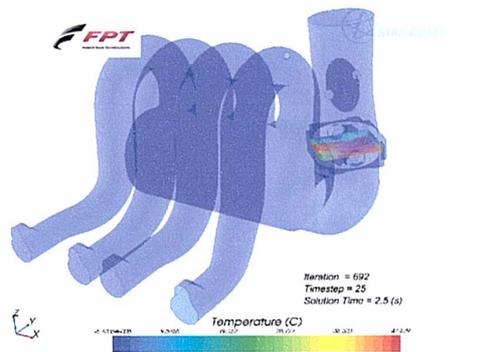


Figure 12 – Air heating in 2.5 s

The figure 13 below reflects the temperature over the time. At t = 2,5 s the temperature calculated is 14,5 °C.

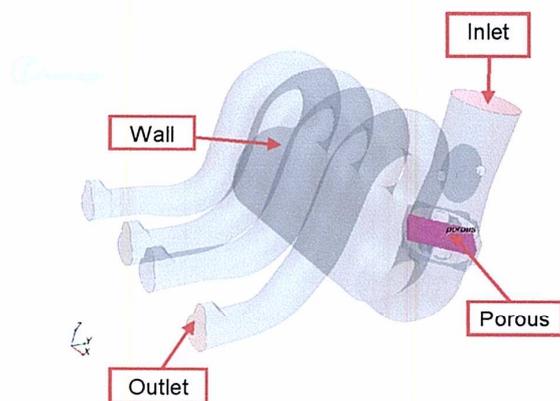


Figure 6 – View of the air heater system domain

At the manifold inlet, the temperature is 0°C and the velocity is 2,3 m/s. At the manifold outlet the pressure is 101300Pa, where the temperature was measured. The other manifold areas were kept at 0°C. To simulate the heater, the geometry simplification technique was used, that a porous atmosphere considering the Porous Inertial Resistance and Porous Viscous Resistance was experimental obtained. The Porous Inertial Resistance main tensor ($xx = 200 \text{ kg/m}^3\text{-s}$; $yy = 200 \text{ kg/m}^3\text{-s}$; $zz = 5 \text{ kg/m}^3\text{-s}$) and the Porous Viscous Resistance ($xx = 400 \text{ kg/m}^3\text{-s}$; $yy = 400 \text{ kg/m}^3\text{-s}$ e $zz = 10 \text{ kg/m}^3\text{-s}$) values was calculated linearizing the load loss curve VS flow velocity at the whole heater (porous media) as showed at the figure below (Fig. 7). The power provide is 200 W.

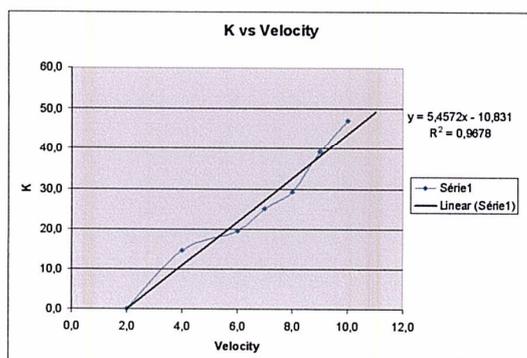


Figure 7 – Porous media coefficients determination.

Equations for Porous Media:

$$K = - (dp/l)/u$$

$$K = (\alpha) * u + \text{Beta}$$

Where:

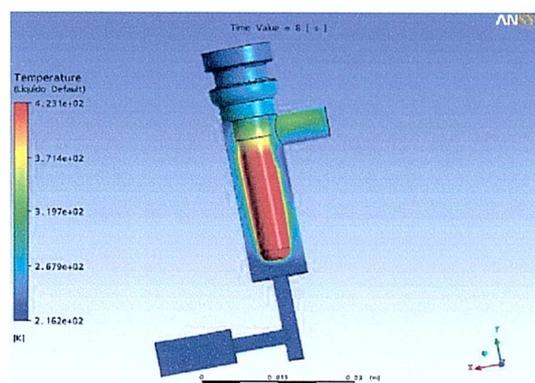
u = Velocity

dP = Pressure Drop

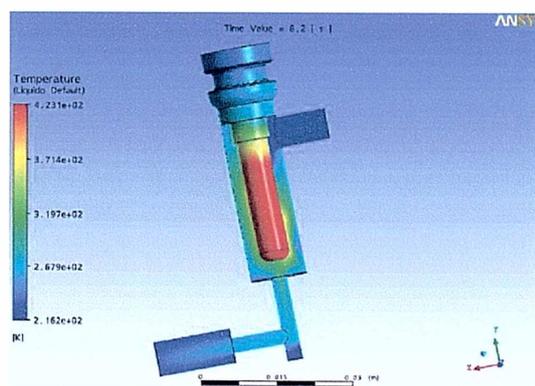
l = length

RESULTS

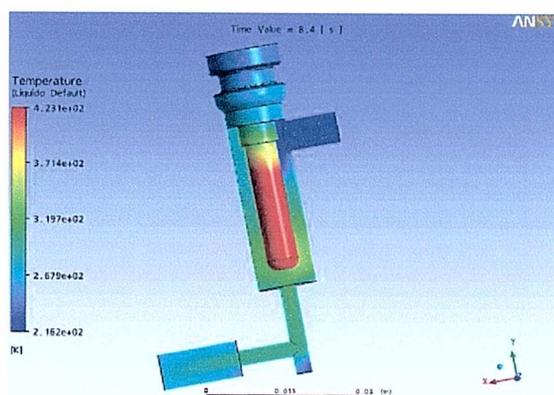
Numerical Results – Ethanol Heating System - The Fig. 8 (a to e) shows the ethanol heating from 8 to 8.8s. In a cycle ethanol is heated from 273K to 319K (0°C to 46°C).



(a) Time = 8s



(b) time = 8.2s



(c) Time = 8.4s

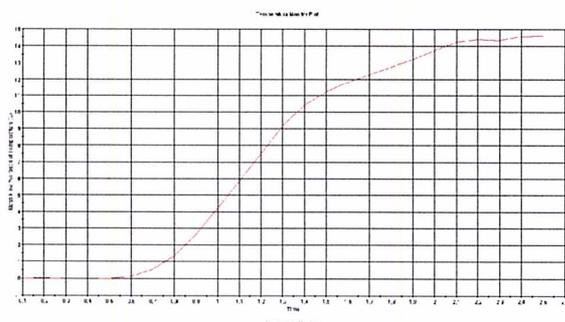


Figure 13 – Temperature VS time

EXPERIMENTAL RESULTS – The temperatures results measured of the ethanol into the tube for injector (in the inlet injector), of the air at the inlet cylinder head (before the injector position) and the mixture air/ethanol (close the intake valve), were showed in the Fig. 14. The ethanol temperature into the tube for injector achieves 46°C as same the numerical results. The air temperature was 10,40°C while the temperature obtained in numerical analysis was 14,5°C. This difference could be attribute to the boundary conditions like wall ducts temperatures and thermocouple response time. The mixture temperature close to intake valve (region and condition didn't consider in numerical analysis) achieve 14°C as the maximum value during the period. This mean that the heated ethanol at 46°C before the injection became colder because the volumetric expansion right after the injection (pass through tiny hole), but contributed to increase air temperature (from 10,40°C to 14,0°C).

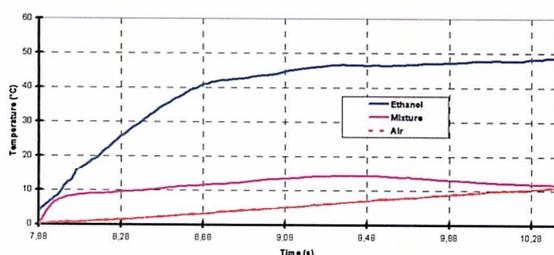


Figure 14 – Experimental temperatures results.

CONCLUSION

The experimental results is according to the numerical model, but could be improve with the others boundary conditions. The ethanol heating above 46°C into tube for injector could even rise the mixture temperature. This possibility could be possible if the power is increase to 85 W/injector. This system presented potential to be evaluated in vehicle featured with flex fuel engine in order to provide the ethanol combustion below 0°C ambient temperature.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the FPT - Fiat Powertrain Technologies for resources availability and financial support for this work.

REFERENCES

1. Sales, L.C.M. and Sodré J.R., 2002, "Optimized Cold Start Auxiliary System for Emissions Reduction in Ethanol-Fuelled Engines", In: SAE, Inc. (Org.). SAE – Alternative Fuels. 2002, v. 1725, p. 1-6.
2. Sales, L.C.M. and Sodré J.R., 2003, "Reducing Exhaust Emissions in Ethanol-Engines During Cold Start. Combustion Science and Technology, USA, v. v, n. 8, p. 1535-1550.
3. Brunocilla M. and Lepsch F., 2006, "Influence of hot fuel injection on air/fuel mixture preparation and effects on flex fuel engines", SAE 2006-01-2619 Tech. Paper.
4. Owen, K., e Coley, T., 1995, "Automotive Fuels Reference Book", Second Edition, SAE, Inc.
5. Annand W.V.D. and Gulder O.L. 1980, "Exhaust Emissions and Cold Starting of a Four-Cylinder Engine Using Methanol as Fuel", Proc. Instn. Mehc. Engrs., Vol. 194, pág. 139-143.
5. Kito B.T., Pacas A.D., Selim S. and Cowley S.W., 1998, "Properties of an Ethanol-Diethyl Ether-Water Fuel Mixture for Cold-Start Assistance of an Ethanol-Fuelled Vehicle", American Chemical Society, Colorado, USA.
6. Sales et al, 2007, "Distribution of the Fuel Flow in a Cold Start System Using an Electronic Fuel Injector", SAE 2007-01-2706, SAE Technical Paper
7. Buchdid D. et al, 2006, "Proposta de Sistema Alternativo de Partida a Frio de Veículos Bi-Combustíveis", SAE 2006-01-2574, Technical Paper.
8. Ilinca, F., Pelletier, D. and Garon, A., 1997. An adaptive finite element method for a two-equation turbulence model in wall-bounded flows. International Journal Numerical Methods in Fluids, vol.24,pp101–120.
9. Launder, B. E. and Sharma, B. I. (1974) "Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc", Letters in Heat and Mass Transfer, v.1, p.131-138.
10. Launder, B.E. and Spalding, D.B., 1974, "The numerical computation of turbulent flows", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v.3, p.269-289.

CONTACT

luis.monteiro@br.fptpowertrain.com–0055 312123 5321.

ANEXO II – ARTIGO SAE 2010

**SAE TECHNICAL
PAPER SERIES**

**2010-36-0412/
E**

Automotive Transmissions

LUIS CARLOS MONTEIRO SALES
JOSÉ RICARDO SODRÉ
ROBINSON BARBOSA FERRARI
FREDERICO MESQUITA VILELA OLIVEIRA
WESLEY FERREIRA LEAL
ZOZIMO VALDIVINO DA SILVA

SAE BRASIL
Sociedade de Engenheiros da Mobilidade

FILIADA À
SAE International

Congresso 2010
SAE BRASIL

XIX Congresso e Exposição Internacionais
de Tecnologia da Mobilidade
São Paulo, Brasil
05 a 07 de outubro de 2010

Este trabalho técnico/científico recebeu apoio financeiro do Conselho
Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq – Brasil


Conselho Nacional de Desenvolvimento
Científico e Tecnológico

2010-36-04121

Heating System for Ethanol and Intake Air - Numerical Model and Experimental Validation at Cold Start in a Flex Fuel Vehicle with Emissions Analysis

Luís Carlos Monteiro Sales
Robinson Ferrari Barbosa
Frederico Mesquita Vilela Oliveira
Wesley Ferreira Leal
Zozimo Valdivino da Silva

FPT- Fiat Powertrain Technologies, Engineering Center, Betim, Brasil

José Ricardo Sodré

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Mechanical Engineering Department, Brasil

Copyright © 2010 SAE International

ABSTRACT

The increasing number of flex fuel vehicles using pure or mainly ethanol when mixed with gasoline led to a necessity of an auxiliary cold start system. These systems are based on introducing gasoline during the engine's cold phase. The researches lead to find an alternative to avoid using gasoline at cold start systems. This work presents a numerical analysis of the flow and heat transfer in a cold start system, using computational fluid dynamics. A prototypal vehicle was used to validate the simulations. The tests were done at controlled ambient temperatures: 0°C for cold start measurements and 25°C at chassis dynamometer to run the FTP75 emission cycle. The numerical data were validated and the results shown the possibility to get a temperature high enough to assure fuel combustion with emissions benefits.

Key-words: Ethanol; Cold Start; Emissions; Fuel Injection, Internal Combustion Engine; Experimental Method; Numerical Method; Flex Fuel Engine; Emissions.

INTRODUCTION

Brazil is a world's example in ethanol use due to the large fleet of vehicles with engines using pure ethanol or ethanol-gasoline blends (flex fuel). This combustible produced from sugar cane is made in large scale in a sustainable way. The great hope of Brazilian ethanol worldwide acceptance resides in bad experiences left by crises of petroleum products (price and supply) in the past 30 years. The United States are also an example of using ethanol in vehicles with ethanol produced from corn mixed with pure gasoline, known as E85 (85% ethanol and 15% gasoline). The American fleet of vehicles using ethanol is still small, being this fuel produced from corn, unlike sugar cane, is held at a higher cost and a lower productivity [1]. In addition to economic factors related to crises involving oil which reinforce the benefits of ethanol use as an alternative fuel, another positive factor is the need of reducing emissions of pollutants from motor vehicles. Beyond pollution through

carbon monoxide (CO), hydrocarbons (HC), nitrogen oxides (NO_x) and aldehydes, another major global concern is with carbon dioxide emissions (CO₂), one of the main greenhouse effect causes. Also the use of ethanol from sugar cane is a big advantage over fossil fuels because the generated CO₂ from their combustion can be reclaimed by own sugar cane during photosynthesis. In this scenario, Flex Fuel vehicles are currently one of the main alternatives to reduce problems caused by fossil fuels. However, the cold start and cold operation on engines operating with ethanol remains focused of searches relating to ways used to improve ethanol combustion at low temperatures.

Flex Fuel engines have an auxiliary cold start system that is used under conditions of low-temperature environment when the engine operates with ethanol (E100) or with ethanol predominance mixed with gasoline (E22). These systems are used to aid the flex fuel engine's cold start and cold operation working with ethanol. The conventional developed systems are characterized by gasoline introduction in the intake manifold during the cold start and accelerations while engine warms up. Usually, the gasoline is introduced into the intake manifold by a calibrate hole, but the new systems are equipped with an electronic injector to produce a gasoline controlled flow and spray into the intake manifold ([2], [3]).

The researches have developed until the elimination of gasoline in the cold starting. The ethanol heating before and during the cold start ([4], [5], [6]) or intake air heating determined the gasoline elimination. The works presented results and effects with the ethanol or intake air heating isolated.

This work's objective is to present the performance of a cold starting system that comprises intake air and ethanol heating on a Flex Fuel engine vehicle. A complete numerical analysis was made (CFD and heat transfer) and experimental of cold Start system with a combination between ethanol and intake air heating. This artifice can be a good alternative to guarantee the engine starts in low atmosphere temperatures and minimize the heating loss after heating process. Cold start tests were done at an ambient temperature set to 0°C, and emissions tests. Specifically the work focus is obtaining a mix of air and ethanol in a favorable temperature for combustion in low temperatures. To prove this proposal is that the most of the mixture air/ethanol is formed by air (around 9 parts of air for one of fuel). When heating up the air it will be possible to minimize the ethanol heating losses when it's heated up separately. The Cold Start system analyzed is composed by an electric resistance for air heating positioned below the throttle body. The ethanol's heating is done by an electrical resistances positioned in each one of the four injectors entrance. The air and ethanol can be simultaneously or separately warm, depending on engine and atmosphere temperature. In this work the ethanol and intake air were heated simultaneously during the cold start and emissions tests. Previously, this system was evaluated numerically and experimentally validated using a test bench [7].

The simulation results were validated by experiments using a vehicle with a Flex Fuel engine operated with ethanol (E100) and showed that is possible to obtain temperatures when mix among air and ethanol compatible with the necessary requirements for the combustion. Tests showed reduction in cold phase cycle (FTP 75) for HC (31,2%) and CO (34,5%).

LITERATURE REVIEW

Related to cold start and engine operation [8] described that the use of ethanol and methanol is a big disadvantage compared to gasoline. The properties directly related to this problem are the volatility and the steam pressure ([9], [10]). This is one of the reasons for adding gasoline to ethanol through cold starting system or with the mixture known as E85 (85% ethanol with 15% gasoline) used in the United States and Sweden. Usually, the technique is the introduction of gasoline into the intake manifold during the cold start and warm up engine. Then, it is possible to obtain a mixture with a more volatile composition for the combustion at low temperatures. The fuel atomization also contributes to the combustion at low temperatures. The best spray and

fuel atomization in the intake manifold, through injectors with multiple orifices improves conditions of engine operation at low temperatures. The improvement of the spray allows reducing emissions of hydrocarbons and improving the performance of the engine start at low temperatures [11]. The spray improvement could also be obtained by ethanol heating [4].

The use of an auxiliary electronic injector (5° electronic injector), showed that a cold start system uses an electronic injector to spray gasoline into the intake manifold (when the engine is working with ethanol) and it improves the time of a cold start, minimizes the emissions of pollutant and allows a good drivability during the warm up engine ([2], [3]). An evolution of this system was the use of a fuel's distributor characterized by four conduits with gauged holes, one for each cylinder. This system [12] has an electronic injector to control the gasoline flow in each one of the gauged holes. This way, it is possible to minimize the gasoline losses in the walls of the admission system, due to atomization (directly to the duct for each cylinder).

So, the big challenge is to eliminate the auxiliary start system with gasoline on flex-fuel engines using ethanol. This reason motivated some researches related to ethanol heating. ([4], [5], [6], [13]). The heating process is a good alternative to increase the ethanol heat capacities (C_p) [14]. Also, the intake air heating [15] with proven benefits related operation and emissions engine cold ethanol. These last researches are coherent to this work that applies combination of ethanol and intake air heating to eliminate gasoline addition to the ethanol combustion at low temperatures.

METHODOLOGY

EXPERIMENTAL APARATUS - In vehicle tests, the intake manifold (Fig. 1) with the air heater and resistance for ethanol heating was installed in a 1.4 8V engine "Flex Fuel vehicle". Each ethanol heater had a 150W electrical power and the air heater had 300W.

Ethanol and air temperatures were measured with thermocouples. For air temperature and air/ethanol mixture measurements, thermocouples were installed in the intake manifold ducts before and after the air heater and ducts exits near the inlet valves (outlet air temperature) and air/ethanol mixture (mixture temperature). Air temperature close to the air heater was also measured.

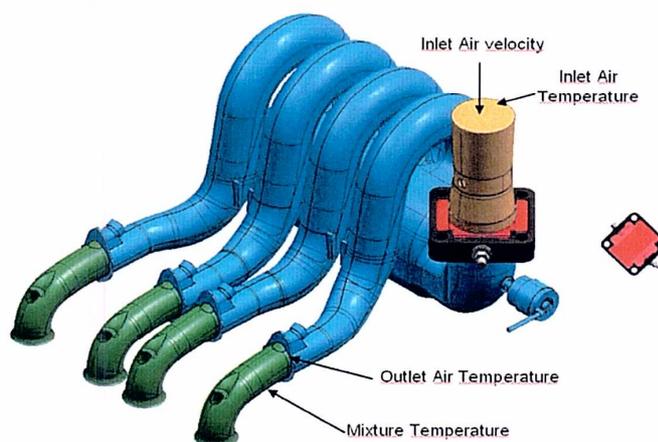


Figure 1: Temperature measurements points.

Ethanol temperatures were obtained by thermocouples installed at the injector housing ($T_{\text{injector housing}}$), inside the injector housing at the coupling region (Ethanol temperature). Also a thermocouple was installed inside the intake manifold right after the injector spray, to measure the mixture temperature. Fig. 2 shows the ethanol heating system details and Fig. 3 shows the temperatures measurements points.

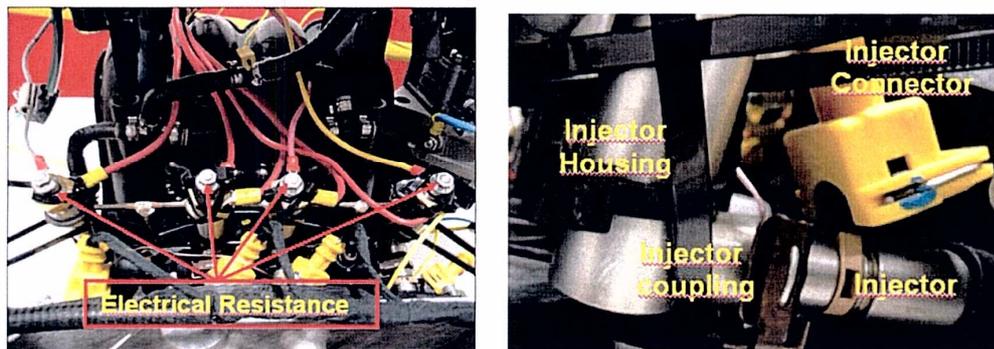


Figure 2 - Ethanol heating system details

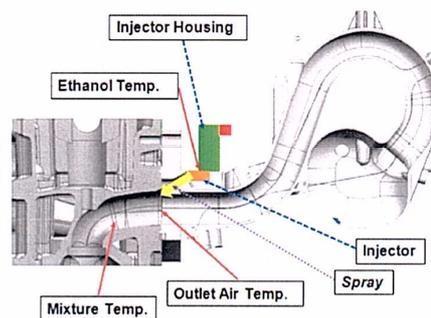


Figure 3: Temperatures measurements points and components.

The inlet air velocity at the intake manifold (inlet domain V_{inlet} above the throttle body) was measured using a hot wire anemometer. Its measure range is 0,2 to 20,0 m/s ($\pm 3\% + 1$ digit). A digital oscilloscope with 500 Hz maximum frequency was used to get the temperature, battery voltage and electro-injectors voltage data. The considered parameters were cooling temperature, engine speed, injection time, air temperature, intake manifold pressure and throttle body position. Those data (recorded at 10 Hz frequency) was used to characterize cold start conditions.

NUMERICAL METHODOLOGY - In this work the air and ethanol heating process was simulated. A numerical model was used to evaluate the air and ethanol heating during 3,0 s and 0,8 s, respectively. The transient state was after the flows beginning in order to simulate the conditions during cold start at 0°C . The mean air velocity intake is 3,0 m/s (V_{inlet}) and the ethanol mass flow rate is 2,6g/s at the inlet under 4.2 bar by

fuel injector. The air domain includes the air path along the admission ducts until the inlet valves at the combustion chamber. The powers provide are 150W/injector and 300 W for air heater.

Numerical Model for Ethanol Heating System - The numerical template used in this work was the same as evaluated at test bench [7]. The flow inside the injection system based on a turbulent stationary flow of a viscous incompressible fluid was used. The flow regime of interest is modeled by the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations [16].

Continuity equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (1)$$

Momentum equation

$$\frac{\partial \rho \bar{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \otimes \bar{u}) \cdot \nabla \bar{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \left[(\mu + \mu_T) (\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T) \right] + S_M \quad (2)$$

where ρ represents the density, t the time, p the pressure, u the velocity vector, μ the fluid viscosity, μ_T the turbulent viscosity and SM the sum of body forces.

Due to its robustness, economy and acceptable results obtained for a considerable amount of flows, the k - ε model has been the most used model for numerical predictions of industrial flows. In this model the turbulent viscosity is computed as

$$\mu_T = \bar{\rho} c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

The system is closed by including the transport equations for k and ε ,

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \rho \bar{u} \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + \mu_T P(\bar{u}) - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \rho \bar{u} \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mu_T P(\bar{u}) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

where the production of turbulence is defined as

$$P(\bar{u}) = \nabla \bar{u} \cdot (\nabla \bar{u} + \nabla \bar{u}^T) \quad (6)$$

Constants $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1.00$, and $\sigma_\epsilon = 1.30$ assume the standard values proposed by [17]. Energy equation was used to evaluate the temperature distribution along the domain.

The rail is full of ethanol ($\rho=810 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0.0012 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ and $c_p= 2430 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$) and the heater (steel, $\rho=7854 \text{ kg/m}^3$ and $c_p= 434 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$) supplies 150W from $t=0$ until 8s. Adiabatic boundary condition was adopted for the rail walls and the wall functions proposed [18] their variations are implemented in the software and used to perform the simulations. For the outlet, the boundary conditions were defined by subsonic flow state and ambient pressure (101300 Pa). The Fig. 4 shows the domain where the flow was simulated.

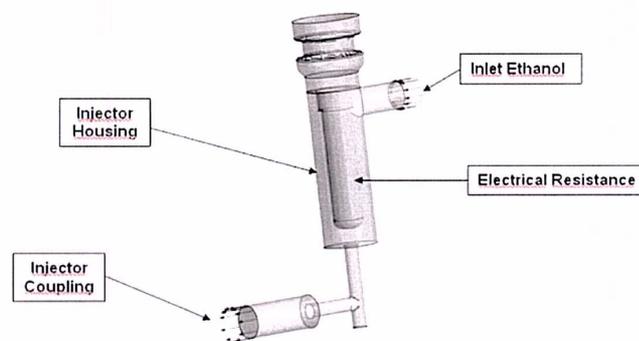


Figure 4 – View of the fuel heater system device

The software Ansys CFX 11SP1 was used to simulate the system. Some parameters had to be defined for each simulation. A reference pressure equal to 101300 Pa and a fluid temperature equal to 273 K at $t=0$ s were used in the domain definition. For the simulation a convergence criteria of target residual of 10 was considered.

In this simulation a mesh with a maximum size of 0.6 mm was used in the fluid region and inflation was used near the heater wall in order to get a best solution for the flow field. ICEM was used as mesh generator. The final mesh used 247826 nodes, 758997 elements (tetrahedral and pyramids) with a maximum end length ratio of 8.811.

Numerical Model for Air Heating System - The air heating process was simulated along the admission ducts through the inlet valves at the combustion chamber. Equations are the same as used to simulate the fuel heater device. The air is heated by an electrical device placed near the intake air throttle. The software STAR-CCM+ was used to simulate the system. The Fig. 5 shows the model.

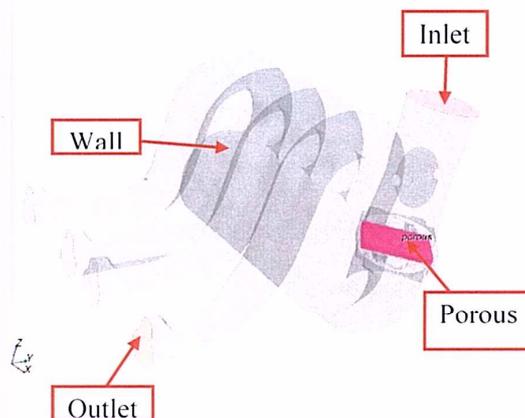


Figure 5 – View of the air heater system domain

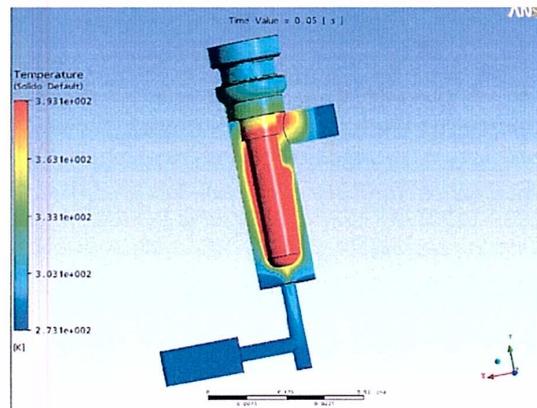
At the manifold outlet the pressure is 101300Pa, where the temperature was measured. The other manifold areas were kept at 0°C and the power provide is 300 W.

EXPERIMENTAL PROCEDURE – For experimental cold start system evaluation with intake air and ethanol heating was used a vehicle with a 1.4 l Flex fuel engine fueled with ethanol (E100). The cold start system with conventional gasoline (E22) introduction in the intake manifold was disabled. During the cold start testing were also collected the input parameters for the numerical simulation and model validation. The cold start tests were conducted in a climatic chamber at 0 °C. The engine was considered in operation after reaching a rotation of 800 rpm. To validate the numerical analysis, the measurements were made with a steady state engine speed at 350RPM (V inlet air = 3,0 m/s) without ignition, to obtain experimental temperatures values at 0°C.

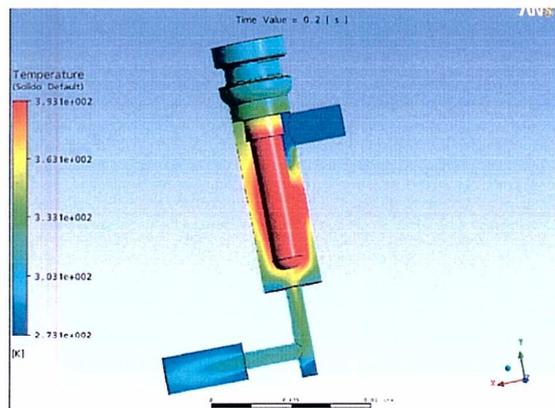
Emission tests were performed to compare the cold starting system with heating and air of ethanol with the conventional system (gasoline introduction in the intake manifold). These tests were performed under NBR 6601 standard (FTP 75 cycle). After starting the resistances were turned off when the temperature of ethanol in the region of engagement electro-injector with electroinjector housing evolved between 85 and 90 °C. The resistors were again reactivated when the temperature of ethanol in the same region lay between 60 and 70 °C. This procedure was repeated until the first 150 s from a total of 505 s of Phase I. After this period the resistances remained disabled. In this work the porous catalytic converter results were considered to the emissions analyses only for initial 200 s from Phase I in order to verify and compare the heating process effect. For both configurations all the engine control parameters were held the same.

RESULTS

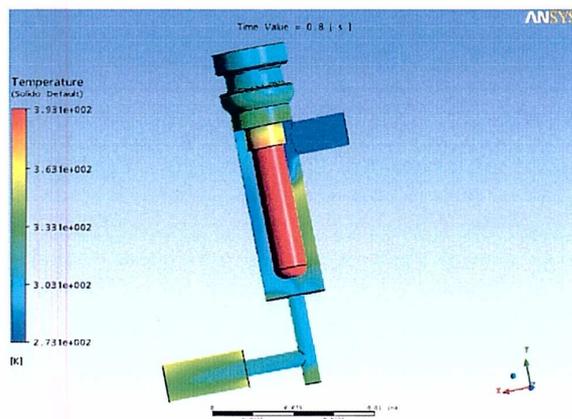
NUMERICAL RESULTS – Ethanol Heating System - The Fig. 6 (a to c) shows the ethanol heating from 0,0 to 0.8s at transient flow. In a cycle ethanol is heated from 273K to 333K (0°C to 60°C) at injector coupling region.



(a) Time = 0,05 s



(b) Time = 0,2 s



(c) time = 8.8s

Figure 6 – Ethanol heating from 8.0 to 8.8 s at transient flow (a to c).

NUMERICAL RESULTS – Air Heating System – The Figs. 7 and 8 show the air heating along the intake manifold. It can be noticed the temperature rise near the heating device placed near the throttle valve. The air temperature varies from 0°C to minimum 11,4°C and maximum 16,1°C during 3,0 s. The outlets temperatures depend on the position related the air heating device and the pressure variation because the open and close intake valves sequence. In this work, the numerical simulation was used the same sequence that occurs at the engine (1, 3, 4, 2).

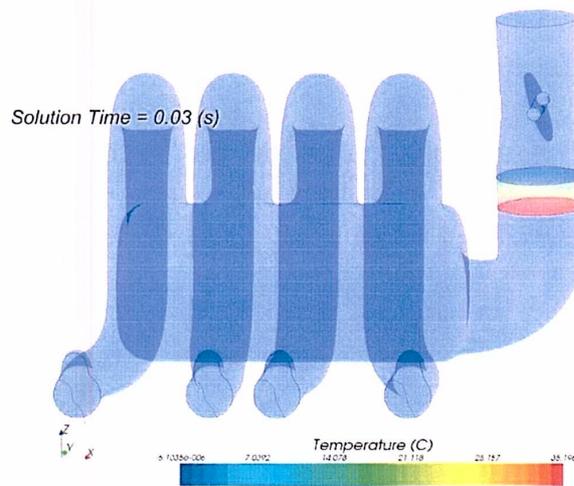


Figure 7 - Air heating in 0.03 s

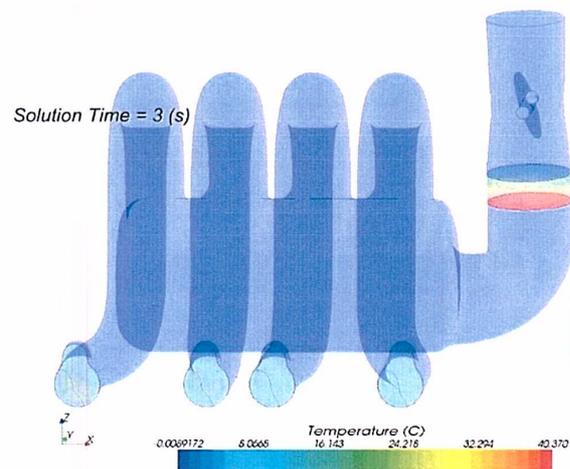


Figure 8 - Air heating in 3.0 s

The figure 9 below reflects the temperature over the time. At $t = 3.0$ s the maximum temperature calculated is $16,1^{\circ}\text{C}$.

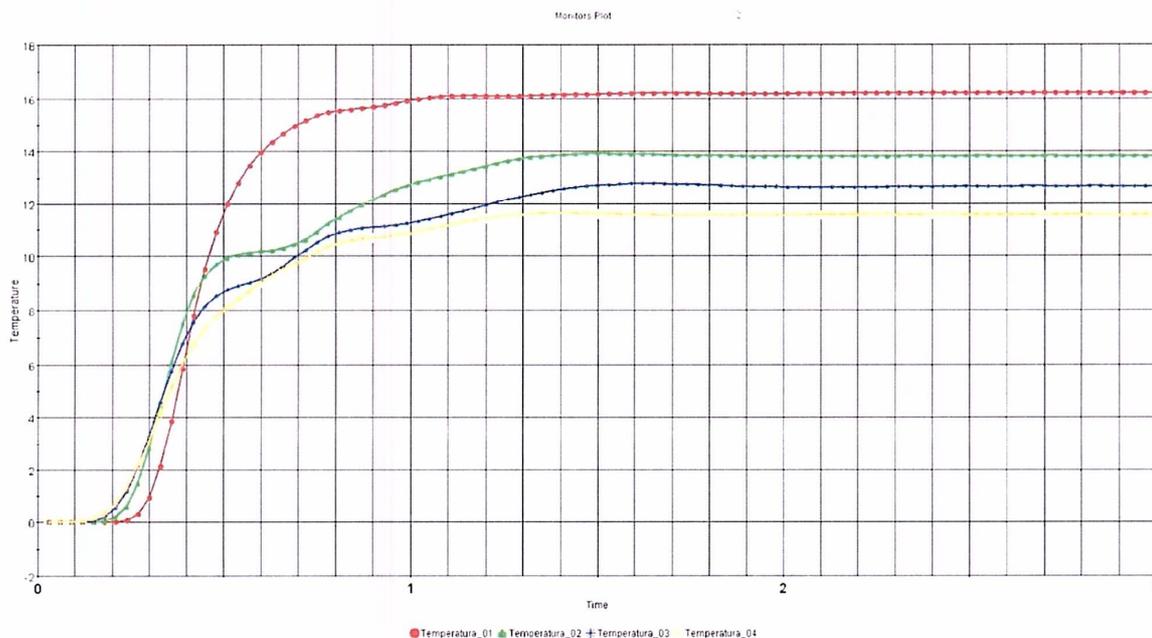


Figure 9 – Outlets temperatures calculated at transient flow.

EXPERIMENTAL RESULTS - Ethanol and Intake Air– The ethanol temperatures results measured at coupling region (Ethanol), the air at the inlet cylinder head (Outlet Air), the mixture air/ethanol close to the intake valve (Mixture) and ambient air (Inlet Air), are showed in the Fig. 10. The ethanol temperature injector at coupling region achieves 60°C , the same value from the numerical results. The obtained outlet air temperature was $8,5^{\circ}\text{C}$ after $3,0$ s while the obtained temperature in numerical analysis was $16,1^{\circ}\text{C}$. This difference could be attributed to the boundary conditions as wall ducts temperatures and thermocouple response time and the combustion sequence start position (i.e.: numerical 1-3-4-2, experimental 4-2-1-3). The mixture temperature close to intake valve (region and condition didn't consider in numerical analysis) achieve 14°C as the maximum value during the period. This mean that the heated ethanol decreased from 60°C to 30°C before the first $0,5$ s, due to transient flow effects. Even this temperature reduction after $0,5$ s, the heated ethanol (around 30°C) combined with heated air (around $8,5^{\circ}\text{C}$) contributed to obtain a mixture temperature around 13°C .

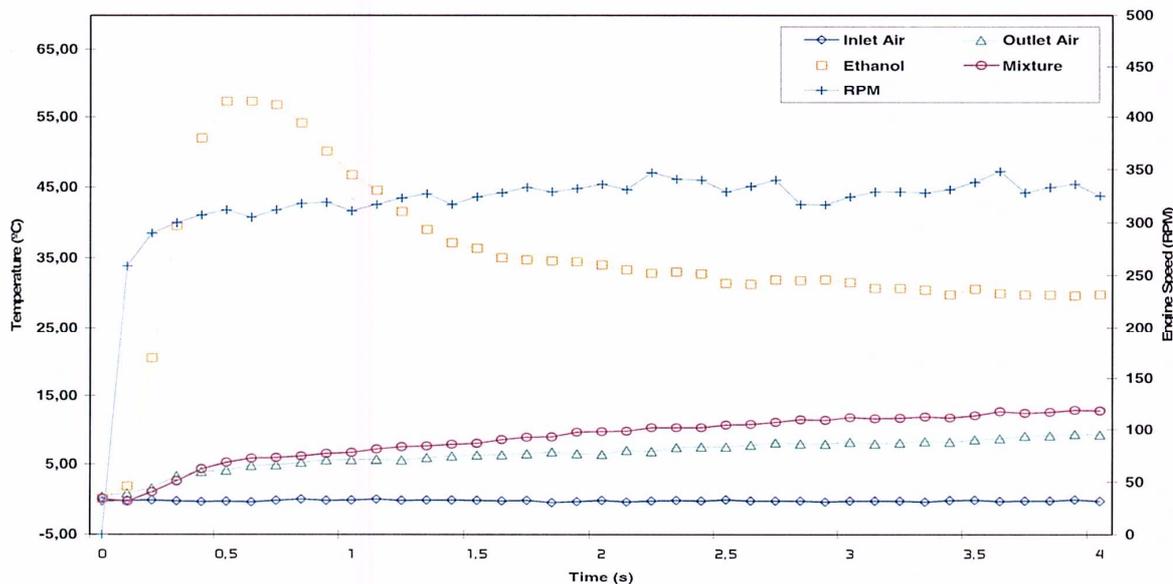


Figure 10 – Experimental temperatures results - Engine speed 350 RPM without combustion.

EXPERIMENTAL RESULTS – Cold Start Tests - The engine start occurs after 1,7 s when the engine achieves 800 RPM. The outlet air temperature (outlet air) was 6,5°C , ethanol was 35°C and mixture was 9°C. The smaller temperatures measured (outlet air and mixture) could be attributed to higher engine speed obtained in this test.

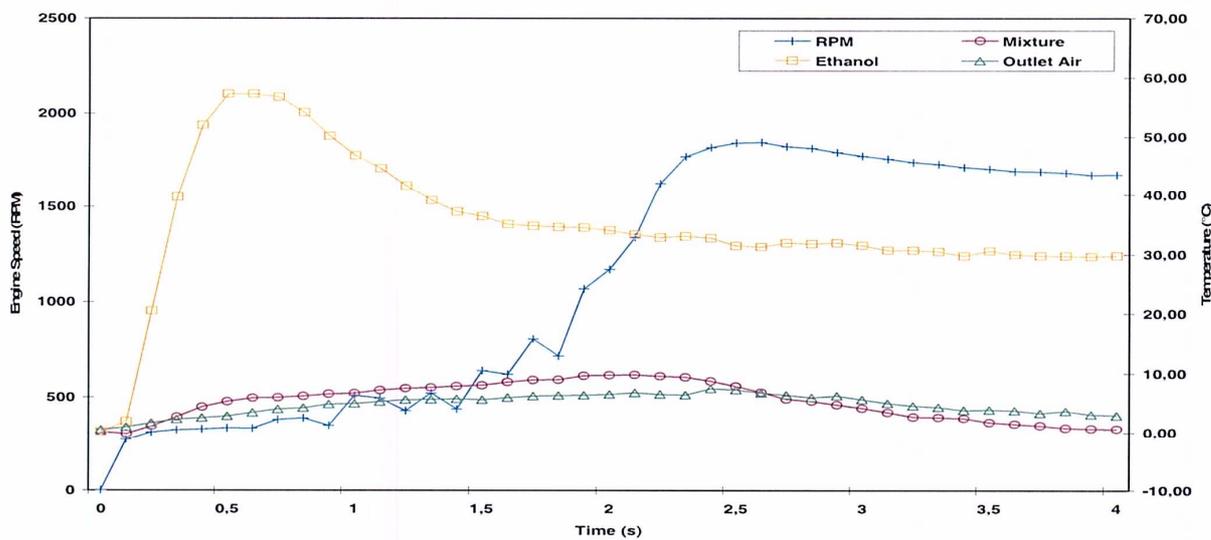


Figure 11 – Experimental temperatures results. Engine with combustion

EXPERIMENTAL RESULTS – Emissions Tests - The hydrocarbons (HC) and carbon monoxide (CO) results showed the reduction accumulated of 31,2 % and 34,5 %, for the first 200 s measured, respectively. The nitrogen oxides (NOx) results didn't change strongly. The Figs. 12, 13 and 14 show the pos catalytic converter comparative behavior between the engine with and without heating system for HC, CO and NOx. The HC and CO reductions are due to spray improvement that increases the ethanol vapor generation [6] and increase the ethanol heat capacities (Cp) [14].

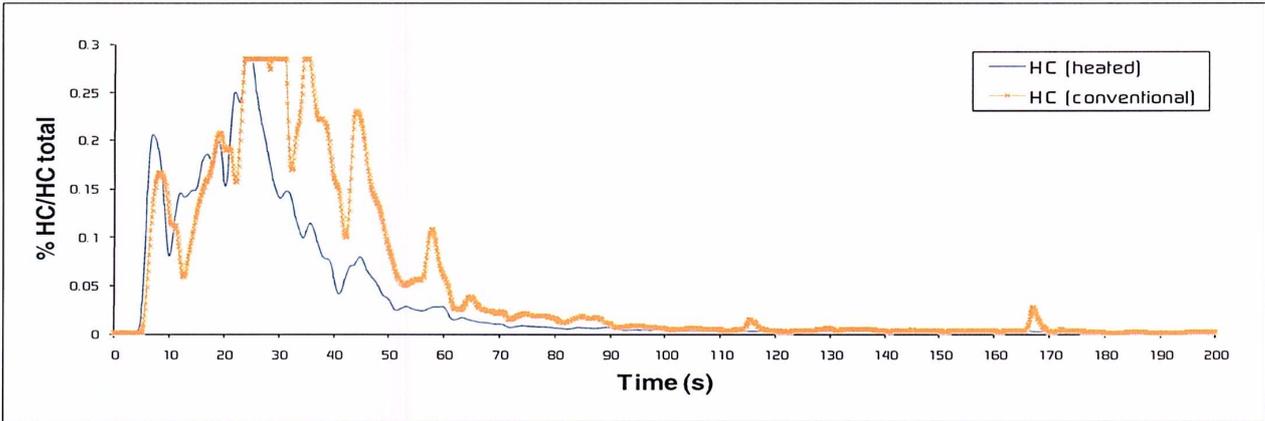


Figure 12 – Experimental emissions result pos catalytic converter comparative - HC.

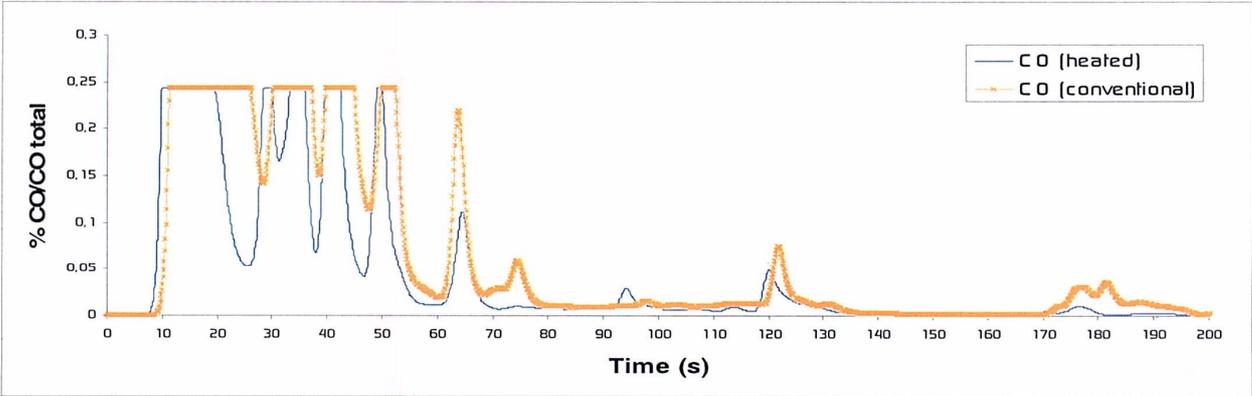


Figure 13 – Experimental emissions result pos catalytic converter comparative - CO.

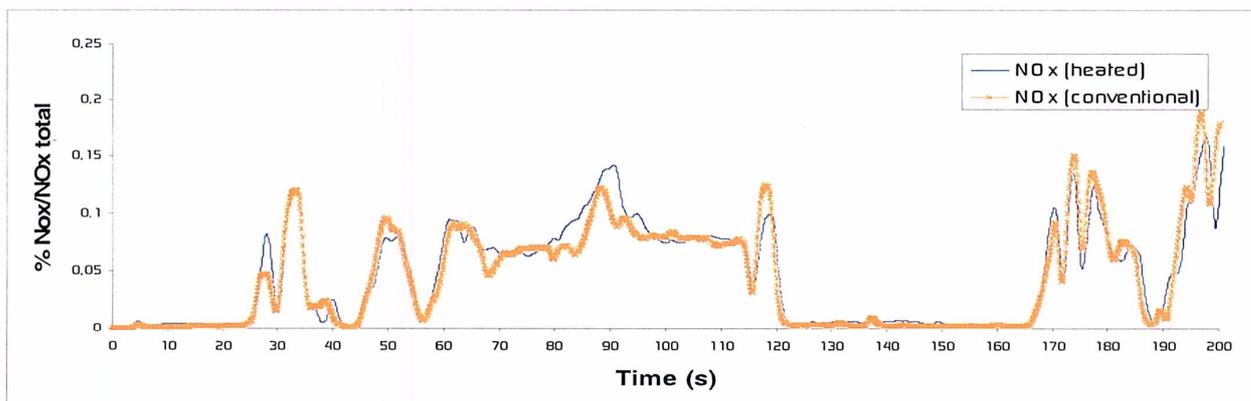


Figure 14 – Experimental emissions result pos catalytic converter comparative - NOx.

CONCLUSION

The ethanol and inlet air heated combined improve air/fuel mixture, obtained good results in engine start at low temperatures (0°C). The domain numerical analysis presented results coherent with experimental ones (inlet air and ethanol temperatures). Those results can be even closer if consider some boundary conditions. The emission results analysis (HC, CO, NOx) are compatible to the effects caused by ethanol and inlet air heating. All obtained results increases the possibilities to conduct more research related to the use of pure ethanol (E100) under cold ambient temperatures.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the FPT - Fiat Powertrain Technologies for resources availability and financial support for this work.

REFERENCES

1. Balat M. and Balat H., 2009, "Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel", Applied Energy 86, 2009, p. 2273-2282.
2. Sales, L.C.M. and Sodr  J.R., 2002, "Optimized Cold Start Auxiliary System for Emissions Reduction in Ethanol-Fuelled Engines", In: SAE, Inc. (Org.). SAE – Alternative Fuels. 2002, v. 1725, p. 1-6.
3. Sales, L.C.M. and Sodr  J.R., 2003, "Reducing Exhaust Emissions in Ethanol-Engines During Cold Start. Combustion Science and Technology, USA, v. v, n. 8, p. 1535-1550.
4. Brunocilla M. and Lepsch F., 2006, "Influence of hot fuel injection on air/fuel mixture preparation and effects on flex fuel engines", SAE 2006-01-2619, SAE Technical Paper
5. Short J. at al., 2010, "Thermal Modeling for Heated Tip Injectors", SAE 2010-01-1264, SAE Technical Paper

6. Kabasin D. et al., 2010, "Emission Reduction with Heated Injectors", SAE 2010-01-1265, SAE Technical Paper.
7. Sales, L.C.M et al, 2009, "Numerical and Experimental Analysis of a Cold Start System Used in Flex Fuel Engines with Heating of Intake Air and Ethanol", SAE 2009-36-03006, SAE Technical Paper
8. Turner, J.W.G. et al, 2007, "Alcohol-Based Fuels in High Performance Engines." SAE Technical Paper Series, nº 2007-01-0056
9. Mužíková Z. et al., 2009, "Volatility and phase stability of petrol blends with ethanol", J.Fuel 2009.02.003. p. 1351-1356
10. Owen, K., e Coley, T., 1995, "Automotive Fuels Reference Book", Second Edition, SAE, Inc.
11. Tani Y. et al., 1999, "Multiple-hole Nozzle Atomization for SI Engines" SAE 1999-01-0564, SAE Technical Paper.
12. Sales et al, 2007, "Distribution of the Fuel Flow in a Cold Start System Using an Electronic Fuel Injector". SAE 2007-01-2706, SAE Technical Paper
13. Jehlik F. et al., 1999, "Development of a Low-Emission, Dedicated Ethanol-Fuel Vehicle with Cold-Start Distillation System", SAE 1999-01-0611, SAE Technical Paper.
14. Nan Z., et al., 2004, "Investigation on Thermodynamic Properties of Ethanol + Gasoline Blended Fuel", American Chemical Society, Energy Fuel 2004, 18, 84-89
15. Buchdid D. et al, 2006, "Proposta de Sistema Alternativo de Partida a Frio de Veículos Bi-Combustíveis". SAE 2006-01-2574, Technical Paper.
16. Ilinca, F., Pelletier, D. and Garon, A., 1997. An adaptive finite element method for a two-equation turbulence model in wall-bounded flows. International Journal Numerical Methods in Fluids, vol. 24, pp101–120.
17. Launder, B. E. and Sharma, B. I. (1974) "Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc", Letters in Heat and Mass Transfer, v.1, p.131-138.
18. Launder, B.E. and Spalding, D.B., 1974, "The numerical computation of turbulent flows", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v.3, p.269-289.

CONTACT

luis.monteiro@br.fptpowertrain.com 0055 312123-5321.

The appearance of the ISSN code at the bottom of this page indicates SAE's consent that copies of the paper may be made for personal or internal use of specific clients. This consent is given on the condition however, that the copier pay a \$ 7.00 per article copy fee through the Copyright Clearance Center, Inc. Operations Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 for copying beyond that permitted by Sections 107 or 108 of U.S. Copyright Law. This consent does not extend to other kinds of copying such as copying for general distribution, for advertising or promotional purposes, for creating new collective works, or for resale.

SAE routinely stocks printed papers for a period of three years following date of publication. Direct your orders to SAE Customer Sales and Satisfaction Department.

Quantity reprint rates can be obtained from the Customer Sales and Satisfaction Department.

To request permission to reprint a technical paper or permission to use copyrighted SAE publications in other works, contact the SAE Publications Group.



GLOBAL MOBILITY DATABASE

All SAE papers, standards, and selected books are abstracted and indexed in the Global Mobility Database.

No part of this publication may be reproduced in any form, in an electronic retrieval system or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

ISSN 0148-7191

© Copyright 2010 Society of Automotive Engineers, Inc.

Positions and opinions advanced in this paper are those of the author(s) and not necessarily those of SAE. The author is solely responsible for the content of the paper. A process is available by which discussions will be printed with the paper if it is published in SAE Transactions. For permission to publish this paper in full or in part, contact the SAE Publications Group.

Persons wishing to submit papers to be considered for presentation or publication through SAE should send the manuscript or a 300 word abstract of a proposed manuscript to: Secretary, Engineering Meetings Board, SAE.

ANEXO III – CERTIFICADO DE PATENTE PARA OS PAÍSES DA EUROPA (PCT)



(11) **EP 1 934 467 B1**

(12) **EUROPEAN PATENT SPECIFICATION**

(45) Date of publication and mention
of the grant of the patent:
18.08.2010 *Bulletin 2010/33*

(51) Int Cl.:
F02M 69/02 (2006.01) *F02M 69/02 (2006.01)*
F02M 53/02 (2006.01) *F02M 53/06 (2006.01)*
F02M 53/02 (2006.01)

(21) Application number: **06790475.5**

(86) International application number:
PCT/BR2006/030189

(22) Date of filing: **12.09.2006**

(87) International publication number:
WO 2007/030106 (22.03.2007 Gazette 2007/12)

(54) **COLD START UP AUXILIARY SYSTEM FOR ALCOHOL AND FLEX ENGINES WITH AIR-INLET AND ALCOHOL WARM UP**

KALTSTARHILFSSYSTEM FÜR ALKOHOL- UND FLEX-MOTOREN MIT LUFTEINLASS UND ALKOHOLERWÄRMUNG

SYSTEME AUXILIAIRE DE DEPART A FROID POUR MOTEURS A ALCOOL ET PLURICARBURANT COMPRENANT UNE ENTREE D'AIR ET UN CHAUFFAGE D'ALCOOL

(84) Designated Contracting States:
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR
HU IE IS IT LI LT LU LV MC NL PL PT RO SE SI
SK TR**
Designated Extension States:
HR RS

(73) Proprietor: **FIAT AUTOMÓVEIS S.A. - Filial
Mecânica**
32530-000 Belim MG (BR)

(30) Priority: **12.09.2005 BR P10504047**
09.05.2006 BR C10504047

(72) Inventor: **SALES, Luis Carlos Monteiro**
Belo Horizonte - Mg (BR)

(43) Date of publication of application:
25.06.2008 *Bulletin 2008/26*

(74) Representative: **Gervasi, Gemma et al**
Notarbartolo & Gervasi S.p.A.
Corso di Porta Vittoria 9
20122 Milano (IT)

(56) References cited:
EP-A2- 1 408 232 **WO-A-2005/024224**
DE-A1-102064 007 797 **FR-A- 2 876 161**

EP 1 934 467 B1

Note: Within nine months of the publication of the mention of the grant of the European patent in the European Patent Bulletin, any person may give notice to the European Patent Office of opposition to that patent, in accordance with the Implementing Regulations. Notice of opposition shall not be deemed to have been filed until the opposition fee has been paid. (Art. 99(1) European Patent Convention).

ANEXO IV – PROCESSO DE PATENTE BRASIL (INPI)



República Federativa do Brasil
Ministério do Desenvolvimento, Indústria
e do Comércio Exterior
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) (21) **PI 0504047-7 A**

(22) Data de Depósito: 12/09/2005
(43) Data de Publicação: 22/05/2007
(RPI 1898)



(51) Int. Cl.:
F02M 57/00 (2007.01)
F02N 9/00 (2007.01)

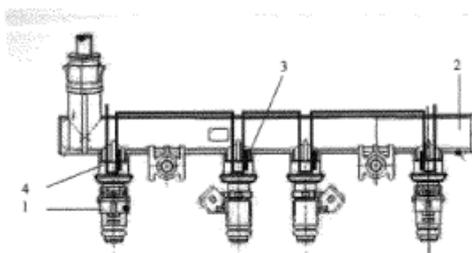
(54) Título: **SISTEMA AUXILIAR DE PARTIDA A FRIO PARA MOTORES A ÁLCOOL E FLEX COM AQUECIMENTO DO AR DE ADMISSÃO E DO ÁLCOOL**

(71) Depositante(s): Fiat Automóveis S.A (BR/MG)

(72) Inventor(es): Luís Carlos Monteiro Sales

(74) Procurador: Advocacia Pietro Ariboni S/C

(57) Resumo: Sistema auxiliar de partida a frio para motores a álcool e flex com aquecimento do ar de admissão e do álcool. A presente invenção se refere a um novo sistema auxiliar de partida a frio, do tipo a ser preferencialmente utilizado nos motores a combustão interna que empregam álcool como combustível. Estão incluídos na possibilidade de utilização deste invento os motores "Flex Fuel", (álcool / gasolina / GNV). O sistema de partida a frio compreende o uso de resistências (3) posicionadas na entrada dos injetores (4); resistência (6) dentro de cada injetor (1) ou uma resistência (5) para todo tubo porta bicos (2), sendo que estas três possibilidades podem ser utilizadas simultaneamente, combinadas duas a duas ou isoladamente, dependendo da necessidade de fluxo aquecido de álcool e do consumo energético e compreende ainda o uso de conjuntos de resistências (11, 12, 13) posicionadas na parte superior do coletor de aspiração (10a) ou admissão, na parte inferior do coletor (10c); no corpo da borboleta (10c); nos condutos de aspiração do cabeçote (não representado) e conjuntos de resistências (26) no tubo secundário (13) de entrada do ar próximo ao coletor de descarga; conjunto de resistências (27) dentro do filtro de ar (20) ou no tubo de envio de ar (25) para o corpo de borboleta (10c) e o tubo secundário (23); conjunto de resistências (28) no tubo de envio de ar (25) para o corpo de borboleta (10c), ditas resistências sendo utilizadas de forma conjunta ou isolada, comandadas por uma centralina e dito filtro de ar (20) dotado de válvula termostática para controle do defletor (24) de desvio do ar aquecido pelo tubo secundário (23). Adicionalmente pode-se prever um ou dois injetores auxiliares (suplementares) no coletor de admissão com o mesmo sistema de aquecimento do álcool, ou seja, na entrada dos injetores, dentro dos injetores ou dentro do tubo porta-bicos.



ANEXO V – CERTIFICADO DE PATENTE DO SISTEMA DE PARTIDA A FRIO COM 5°ELETRO-INJETOR – BRASIL



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
Instituto Nacional da Propriedade Industrial



CARTA PATENTE N.º PI 9905212-1 *Patente de Invenção*

O INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL concede a presente PATENTE, que outorga ao seu titular a propriedade da invenção caracterizada neste título, em todo o território nacional, garantindo os direitos dela decorrentes, previstos na legislação em vigor.

(21) Número do Depósito : PI 9905212-1

(22) Data do Depósito : 28/08/1999

(43) Data da Publicação do Pedido : 13/06/2001

(51) Classificação Internacional : F02N 9/00

(54) Título : SISTEMA DE PARTIDA A FRIO PARA MÓTORES A ALCOOL

(73) Titular : Fiat Automóveis S.A., C/CNPJ: 16701716000156, Endereço: Rodovia Fernão Dias, s/nº, BR 381, Km 403, galpão 3, Jardim Alvorada, Betim, Minas Gerais, Brasil (BR/MG), CEP: 32300.

(72) Inventor : Luis Carlos Monteiro Sales, Engenheiro(a) Mecânico(a), Endereço: Rua Professor Tahaiana Pedroni, 183, apto. 140, Poltrona, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, CEP: 31110-730, Cidade/Estado:

Prazo de Validade : 20 (vinte) anos contados a partir de 28/08/1999, observadas as condições legais.

Expedida em : 18 de Dezembro de 2001.

Carlos Pazos Rodriguez
Diretor de Patentes

