

GIOVANNI FRANCISCO BERNARDO

MÉTODO PARA INSTALAÇÃO ROBUSTA DO SENSOR MEDIDOR DE  
VAZÃO MÁSSICA DE AR (MAFS) EM SISTEMAS DE ADMISSÃO DE  
AR PARA MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA.

São Paulo

2010

GIOVANNI FRANCISCO BERNARDO

MÉTODO PARA INSTALAÇÃO ROBUSTA DO SENSOR MEDIDOR DE VAZÃO MÁSSICA DE AR (MAFS) EM SISTEMAS DE ADMISSÃO DE AR PARA MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre Profissional em Engenharia Automotiva.

Área de Concentração:  
Engenharia Automotiva

Orientador:  
Prof. Dr. Fábio Saltara

São Paulo  
2010

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Bernardo, Giovanni Francisco**

**Método para instalação robusta do sensor medidor de vazão mássica de ar (MAFS) em sistemas de admissão de ar para motores de combustão interna / G.F. Bernardo. -- São Paulo, 2010. 108 p.**

**Trabalho de conclusão de curso (Mestrado Profissional em Engenharia Automotiva) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.**

**1. Sensor 2. Medição mecânica 3. Motores de combustão interna 4. Sistemas veiculares I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica II.t.**

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho à Raquel Del Bianco, João Ricardo Bernardo, Angela Maria Francisco Bernardo e Giuliana Yone Francisco Bernardo, pessoas essenciais para conclusão deste trabalho.

## **Agradecimentos**

Ao professor Fábio Saltara, pela orientação e pelo constante estímulo transmitido durante todo o trabalho. A General Motors do Brasil pelo apoio e patrocínio. A minha namorada, família e amigos pelo apoio e compreensão dedicados a minha pessoa durante a conclusão de mais esta etapa em minha vida. As empresas Mahle e Mann&Hummel pelo consentimento ao uso de algumas das imagens apresentadas no trabalho. E a todos aqueles que colaboraram direta ou indiretamente, na execução deste trabalho.

## Resumo

A utilização do sensor medidor de vazão mássica de ar (MAFS) para controlar a vazão em massa de ar admitida pelo motor de combustão interna é relativamente nova no Brasil. Dentre os veículos comercializados no mercado brasileiro é possível encontrar uma série de exemplos que aplicam tal tecnologia. Acredita-se ainda, que este sensor em breve será adotado pela totalidade dos fabricantes de veículos nacionais.

Este trabalho aborda uma metodologia prática para instalação robusta deste sensor em sistemas de admissão de ar para motores de combustão interna veiculares. Esta metodologia foi baseada em recentes projetos de desenvolvimento de sistemas de admissão de ar realizados por uma das principais montadoras brasileiras que utiliza este tipo de sensor para auxiliar no gerenciamento do sistema eletrônico de controle do motor. Este trabalho inclui ainda informações sobre os principais testes de validação para a instalação do sensor nos sistemas de admissão veicular, bem como algumas das práticas adotadas na execução do processo de desenvolvimento. Além disso, serão abordados também os efeitos de modificações realizadas nos sistemas de admissão e como estas afetam os resultados obtidos.

**Palavras-chave:** Sistema de Admissão de Ar, Sistema de Admissão de Ar Veicular, MAFS, Sensor Medidor de Vazão Mássica de Ar.

## **Abstract**

The usage of Mass Air Flow Sensor (MAFS) to control the mass air flow intake by the internal combustion engine is relatively new in Brazil. Among the vehicles sold in the Brazilian market it is possible to find a number of examples that apply this technology. It is believed, however, that this sensor will soon be embraced by all domestic vehicle manufacturers.

This document presents a practical methodology for robust installation of this sensor in air intake systems for a vehicle internal combustion engine. This methodology was based on recent development projects of air intake systems developed by one of the main Brazilian companies that use this type of sensor to help the electronic control system to manage the engine. This work also includes information about the main validation tests for installing the sensor in the vehicle air intake systems, as well as some of the practices adopted in the implementation of the development process. There will also be addressed the effects of modifications in the intake systems and how these modifications affect the results.

**Keywords:** Air Induction Systems, Vehicle Air Induction Systems, MAFS, Mass Air Flow Sensor.

## Lista de figuras

Figura 1 - Sistema de Admissão Integrado ao Motor .....	20
Figura 2 - Sistema de admissão remoto .....	21
Figura 3 - Sensor de aleta .....	23
Figura 4 - Sensor de fio quente.....	24
Figura 5 – Sensor de fio frio.....	25
Figura 6 – Sensor de membrana .....	25
Figura 7– Sensor de membrana vs. Sensor de fio quente .....	30
Figura 8 – Sensor de membrana Bosch .....	32
Figura 9 – Típico sensor cilíndrico ou de „fio quente“ .....	33
Figura 10 – Típica curva de resposta de um sensor de fio „quente“ .....	37
Figura 11 – Fluxo de velocidades média (U) e instantânea (u') .....	39
Figura 12 - Venturi de Fluxo Crítico normalizado de acordo com as normas ASME / ISO.....	41
Figura 13 - Flange com bocais sônicos usinados .....	42
Figura 14 - Bocais sônicos de fácil adaptação/instalação.....	42
Figura 15 - Esquema bancada sônica .....	43
Figura 16 - Relação sinal-ruído.....	44
Figura 17 - Função de transferência (MTF) .....	44
Figura 18 - Relação Sinal-ruído (resultado típico esperado < 2.5%). .....	46
Figura 19 - Desvio dQ/Q .....	47
Figura 20 - Relação Desvio (resultado típico esperado) .....	47
Figura 21 - 6-way Blocked Filter Test: Áreas a serem bloqueadas de 1 à 6.....	48
Figura 22 - Exemplo de resultado de Sinal-Ruído para um teste de 'Blocked Filter'. .....	49
Figura 23 - Exemplo de resultado de 'Desvio' para um teste de 'Blocked Filter'. .....	49
Figura 24 – Sistema de admissão de ar remoto .....	52
Figura 25 - Fluxograma de projeto de instalação do MAFS.....	53
Figura 26 - Exemplo de Integração do MAFS à tampa da caixa do filtro de ar .	56
Figura 27 - Exemplo ilustrativo de montagem e requisitos desejáveis.....	57



Figura 28 - Exemplo ilustrativo de montagens indesejáveis 1 .....	58
Figura 29 - Exemplo ilustrativo de montagens indesejáveis 2 .....	58
Figura 30 - Simulação matemática: Determinação do volume de controle. ....	60
Figura 31 - Zoom na região de instalação do sensor.....	60
Figura 32 - Vista lateral direita da seção do tubo na região de instalação do sensor - proposta original. ....	61
Figura 33 - Vista em planta da seção do tubo na região de instalação do sensor - proposta original. ....	62
Figura 34 - Vista lateral direita da seção do tubo na região de instalação do sensor - proposta otimizada.....	62
Figura 35 - Vista em planta da seção do tubo na região de instalação do sensor - proposta otimizada. ....	63
Figura 36 - Exemplo de um sistema de admissão de ar. ....	65
Figura 37 - Exemplo de modificações realizadas para testes em bancada. ....	66
Figura 38 - Modificações para verificação de sensibilidade do sistema.....	66
Figura 39 – Detalhe do dispositivo para permitir movimentos de translação e rotação.....	67
Figura 40 - Detalhamento de uma evolução de design.....	68
Figura 41 - Design otimizado desde um sistema básico inicial. ....	68
Figura 42 - Posicionamento das câmeras para medição SPIV na direção do fluxo de ar .....	69
Figura 43 - Posicionamento das câmeras para medição SPIV ortogonalmente ao fluxo de ar .....	70
Figura 44 – Visualização dos volumes de controle para a análise final através do SPIV.....	71
Figura 45 – Padrão de escoamento dentro do volume de controle.....	72
Figura 46 – Visualização tridimensional do perfil de turbulência do ar atravessando o duto de saída de um filtro de ar .....	73
Figura 47 – Visualização tridimensional do perfil de turbulência do ar atravessando o duto de saída de um filtro de ar .....	73
Figura 48 – Visualização tridimensional do perfil de turbulência do ar atravessando o duto de saída de um filtro de ar .....	74

Figura 49 – Análise do fluxo para instalação do MAFS baseada na medição da velocidade no sentido do fluxo de ar.....	75
Figura 50 – Posicionamento do MAFS em função da medição da velocidade no sentido do fluxo de ar.....	75
Figura 51 – Visualização do sensor instalado na seção proposta .....	76
Figura 52 – Visualização do sensor instalado na seção proposta .....	77
Figura 53 – Posicionamento do MAFS em função da medição da velocidade no sentido ortogonal ao fluxo de ar.....	77
Figura 54 – Visualização do sensor instalado na seção proposta .....	78
Figura 55 – Visualização do sensor instalado na nova seção proposta.....	79
Figura 56 - Exemplo de resultado de um teste 5x5 sinal-ruído.....	80
Figura 57 - Exemplo de resultado de um teste 5x5 Desvio.....	81
Figura 58 – Recomendação para instalação no conduto de saída do filtro de ar .....	83
Figura 59 – Figura esquemática relativa ao posicionamento do sensor no conduto de saída do filtro de ar.....	84
Figura 60 – Posicionamento do duto de saída do filtro em relação à tampa ....	85
Figura 61 – Posicionamento do duto de saída do filtro em relação à tampa ....	85
Figura 62 – Posicionamento do duto de saída do filtro em relação à tampa ....	85
Figura 63 – Recomendação quanto ao aumento de volume no lado limpo do filtro de ar .....	86
Figura 64 – Recomendações de projeto para sistemas já desenvolvidos .....	87
Figura 65 – Recomendações de projeto para sistemas já desenvolvidos .....	87
Figura 66 – Chevrolet Agile.....	91
Figura 67 – Honda Civic .....	92
Figura 68 – Chevrolet HHR.....	92
Figura 69 – Volkswagen Amarok .....	93
Figura 70 – Chevrolet Captiva .....	93
Figura 71 – Honda City .....	94
Figura 72 – Ford Edge .....	94
Figura 73 – Ford Fusion.....	95
Figura 74 – Volkswagen Jetta.....	95

Figura 75 – Toyota Hilux .....	96
Figura 76 – Dodge Journey .....	96
Figura 77 – Nissan Livina .....	97
Figura 78 – Honda Accord .....	97
Figura 79 – Hyundai I30.....	98
Figura 80 – Hyundai Genesis.....	98
Figura 81 – Hyundai Elantra .....	99
Figura 82 – Honda Accord .....	99
Figura 83 – Honda Element.....	100
Figura 84 – Toyota Camry .....	100
Figura 85 – Esquema de configuração para medição PIV. NOTA: A sincronização entre o laser e a câmera é controlada pelo Sincronizador. ....	102
Figura 86 - Condição de Scheimpflug.....	104
Figura 87 - Exemplo de esquema para um experimento SPIV. ....	104
Figura 88 - Processo de fabricação de protótipos em estereolitografia .....	105
Figura 89 – Processo de fabricação de protótipos plásticos em SLS .....	106
Figura 90 – Processo de fabricação de protótipos metálicos em SLS .....	107
Figura 91 – Processo de fabricação de protótipos através da impressão em 3D .....	108

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

AIS – Air Induction System

MAFS – Mass Air Flow Sensor

MTF – Master Transfer Function

PIV – Particle Image Velocymetry

SLS – Selective Laser Sintering

SPIV – Stereo Particle Image Velocymetry

TF – Transfer Function

# SUMÁRIO

1	Introdução.....	14
1.1	Objetivos.....	15
1.1.1	Objetivo geral.....	15
1.1.2	Objetivos específicos.....	16
1.2	Sistemas de Admissão de Ar Veicular.....	19
1.3	Configurações do sistema de admissão.....	20
1.4	Sensor Medidor de Vazão Mássica de Ar (MAFS).....	22
2	Importância do projeto de pesquisa – Justificativa.....	27
3	Unidade ou objeto de pesquisa.....	29
4	Fundamentação teórica.....	31
4.1	Sensores cilíndricos.....	33
4.2	Calibração de Sensores cilíndricos.....	34
4.3	Resposta angular da sonda.....	36
4.4	Medições de Velocidade e ângulo do fluxo.....	38
4.5	Medições Turbulência.....	38
4.6	Medição da Camada limite.....	39
4.7	Bancada de Fluxo de Ar Sônica.....	40
4.8	Função de transferência (TF - Transfer Function).....	43
4.9	Sinal-ruído.....	45
4.10	Desvio $dQ/Q$ .....	46
4.11	Ensaio de robustez do sistema (6-way Blocked Filter Test).....	48
5	Projeto de instalação.....	50
5.1	Projeto de pesquisa.....	50
5.2	O processo de instalação do sensor MAF no sistema de admissão de ar.....	51
5.2.1	Fluxograma.....	53
5.2.2	Escolha do MAFS.....	54
5.2.3	Localização do sensor dentro do sistema seguindo o procedimento recomendado pelo fornecedor do sensor escolhido.....	55
5.2.4	Localização do sensor via simulação matemática.....	59

5.2.5	Processos de construção de protótipos para validação do desenho do sistema	63
5.2.6	Desenvolvimento do protótipo em bancada	64
5.2.6.1	Ajuste do sistema diretamente em bancada de fluxo de ar sônico (correção do modelo matemático)	64
5.2.6.2	Ajuste do sistema de admissão de ar através do SPIV (correção do modelo matemático)	69
5.2.7	Validação final do sistema	80
6	Conclusão	82
	Referências	88
	Apêndice A – Exemplos de aplicação do sensor medidor de vazão mássica de ar (MAFS)	91
	Apêndice B – PIV (Particle Image Velocymetry) e SPIV (Stereo Particle Image Velocymetry) – Como funciona o sistema de medição de velocidades através de partículas inseridas em um fluido	101
	Apêndice C – Processos de construção de protótipos rápidos para validação de conceitos	105

## 1 Introdução

O presente trabalho trata do projeto de instalação do sensor medidor de vazão mássica de ar em um sistema de admissão de ar para um motor de combustão interna automotivo.

O trabalho não se restringe apenas a um exemplo ou uma aplicação específica, mas sim a métodos e técnicas aplicados em diferentes projetos e que por sua vez apresentaram resultados satisfatórios em termos de desempenho.

Através deste trabalho pretende-se estabelecer um plano de trabalho e uma referência para futuros desenvolvimentos onde a instalação de sensores para medir a vazão mássica de ar se fizer necessária. Acredita-se que um estudo de tal natureza é de grande valia para todos aqueles que trabalham no desenvolvimento de sistemas de admissão de ar para aplicações automotivas.

A base para este entendimento se dá pela análise das tendências do mercado automotivo sob o ponto de vista do desenvolvimento de sistemas de admissão de ar.

Esta análise se baseia em um estudo comparativo realizado com veículos disponíveis no mercado Brasileiro e no mercado global, onde se verificou que sensores medidores de vazão em massa de ar estão presentes em quase todas as aplicações atuais. Para melhor ilustrar esta tendência encontra-se disponível no Apêndice A deste trabalho parte do mencionado estudo comparativo onde uma série de exemplos de aplicações deste sensor pode ser observada.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

A aplicação do sensor medidor de vazão mássica de ar introduz uma maior complexidade no processo de desenvolvimento de um sistema de admissão de ar. Em função do aumento da complexidade, o tempo de desenvolvimento de um sistema com esta tecnologia em relação ao tempo demandado para um sistema que não requer a aplicação do mencionado sensor é mais longo.

Por esta razão o objetivo geral deste trabalho é manter o tempo necessário para o desenvolvimento de um sistema de admissão veicular quando for necessária a aplicação de um sensor medidor da vazão mássica de ar, atuando diretamente no tempo gasto com a instalação deste sensor em um ponto desejado deste sistema. A meta é reduzir o número de interações físicas e testes realizados em bancada para calibração do sensor instalado no sistema de admissão de ar automotivo. Esta melhoria por si só deve proporcionar uma redução dos custos relacionados ao desenvolvimento de um novo sistema de admissão de ar e por consequência uma redução dos custos relativos ao desenvolvimento de um novo veículo.



### 1.1.2 Objetivos específicos

É de conhecimento da comunidade de engenheiros que trabalham na indústria automotiva, que o projeto de um novo veículo demanda uma série de interações de diversos departamentos dentro de uma montadora<sup>1</sup>. Estas interações começam com a definição básica das dimensões principais do novo veículo até a localização da planta produtiva ou a maneira como o novo veículo será manufaturado. Por esta razão os projetos de novos veículos são desenvolvidos através de um processo interativo, conhecido dentro da indústria automotiva como „programa de desenvolvimento veicular“. Através deste „programa“ todas as áreas envolvidas no „processo de desenvolvimento“ podem definir suas necessidades e seus requisitos de forma coordenada para que o projeto do novo veículo corresponda com as expectativas da „montadora“ e de seus clientes.

A partir desta breve apresentação sobre o que é um programa de desenvolvimento veicular, chama-se a atenção para o item que normalmente determina a duração deste „programa“. Na maioria dos casos novos veículos são equipados com motores previamente desenvolvidos e que requerem uma „adaptação“ para as novas condições de carga que o novo veículo ira impor a este motor (estas condições de carga variam em função da massa, formato ou tipo de veículo). Esta „adaptação“ é também conhecida no meio automotivo como „calibração“ do motor. A calibração do motor é por sua vez a atividade que demanda o maior número de horas para conclusão dentro de um programa de desenvolvimento veicular. Por esta razão a calibração do motor determina a duração total do programa de desenvolvimento de um novo veículo.

Sabe-se ainda que a definição da configuração do sistema de admissão é uma peça chave para o início do trabalho de calibração de um novo motor ou de um motor existente a ser aplicado em um novo veículo. Assim a definição da configuração do sistema de admissão irá determinar o tempo total gasto para execução da calibração do motor. Por sua vez isto irá

---

<sup>1</sup> Termo comumente usado na indústria automotiva para se referir as companhias fabricantes de veículos automotores – este termo será largamente utilizado neste trabalho.

determinar a duração do programa de desenvolvimento veicular na sua totalidade.

Como parâmetro inicial a configuração do sistema de admissão determina a restrição ao fluxo de ar imposta ao motor na secção à montante da válvula de aceleração do motor. Este parâmetro (restrição ao fluxo de ar) sempre foi um dos principais fatores relacionados ao desempenho do motor. Entretanto, nos programas de desenvolvimento veicular mais recentes, outro parâmetro ganhou fundamental importância para o bom desempenho do motor. Este parâmetro é a medição da vazão mássica do ar admitida pelo motor. Esta função: „medir a vazão mássica de ar admitida“ é executada pelo sensor medidor da vazão mássica de ar. Esta medição é fundamental para controlar a quantidade de combustível a ser utilizada para cada combustão dentro dos cilindros do motor.

Sabe-se ainda que a tecnologia atual permite ao engenheiro responsável pelo desenvolvimento do sistema de admissão de ar prever a restrição ao fluxo de ar gerado pelo sistema de admissão. Isto é feito através de modelos matemáticos e simulações computacionais com grande nível de precisão. Entretanto com a tecnologia disponível atualmente ainda é impossível prever qual será a frequência de oscilação do sinal elétrico enviado pelo sensor instalado no sistema de admissão de ar ao sistema de gerenciamento eletrônico do motor.

Isto é o que motiva este estudo. Acredita-se ser possível a criação de um método robusto para instalação do sensor através de simulações computacionais baseando-se na correlação com resultados de testes físicos para reduzir o número de interações realizadas em bancada de fluxo de ar. A redução do número de interações e testes resultará em uma redução dos custos de desenvolvimento bem como uma redução do tempo gasto no desenvolvimento de um sistema de admissão de ar.

Pretende-se atingir este objetivo através do cumprimento das seguintes etapas:

- Pesquisa em bancos de dados acadêmicos em busca de todo tipo de informação relacionada ao assunto;

- Busca por informações e modelos matemáticos de sistemas desenvolvidos anteriormente junto aos especialistas no assunto dentro da General Motors Company;
- Análise dos resultados de testes e simulações computacionais destes sistemas;
- Redação de uma metodologia baseada nestes resultados, capaz de prever o robusto funcionamento do sensor;
- Construção de um protótipo aplicando os novos conceitos desenvolvidos;
- Testes, e conclusão dos resultados.

## 1.2 Sistemas de Admissão de Ar Veicular

Apresentados os objetivos principais do trabalho acredita-se ser também de grande valia para o leitor uma breve apresentação sobre o sistema de admissão de ar, suas funções principais e seus requisitos técnicos. Isto deve auxiliar o leitor a entender quais são as trocas feitas pelos engenheiros responsáveis pelo desenvolvimento deste tipo de sistema.

A principal função do Sistema de Admissão de Ar (AIS) veicular é prover ar para alimentação do motor de combustão interna do veículo. Este ar deve estar isento de partículas maiores do que 20 microns e mais duras que 125 HRB, isto porque as mesmas podem danificar os componentes internos do motor. Além disso, é de suma importância que o ar seja entregue ao motor a uma temperatura o mais próximo quanto possível da temperatura ambiente. Quanto mais baixa a temperatura de admissão do ar menor será o consumo energético do sistema de arrefecimento do motor.

Outra função de grande importância para este tipo de sistema é a atenuação do ruído de admissão do motor (talvez se possa apontar esta função como função principal dos sistemas de admissão de ar nos veículos modernos). Este ruído característico dos motores de combustão interna é gerado por ondas de pressão que ocorrem quando a válvula de admissão é fechada. As ondas de pressão são transmitidas pelo ar de volta pelo coletor de admissão em direção a válvula de aceleração e propagadas pelo sistema de admissão até chegar ao ambiente e ao ouvido do motorista e passageiro (os) do veículo. Assim para atender aos requisitos da legislação quanto ao ruído de passagem ou mesmo para aumentar o conforto do motorista do veículo normalmente são incluídos nos sistemas de admissão elementos acústicos para atenuação de ruídos.

### 1.3 Configurações do sistema de admissão

Existem basicamente dois tipos de configurações principais de sistemas de admissão de ar automotivos. São eles: o sistema de admissão de ar tipo integrado e o sistema de admissão de ar tipo remoto. O primeiro tipo de configuração mostrado na figura 1 é de um sistema de admissão de ar tipo integrado ao motor. Este tipo de sistema é normalmente montado sobre o motor do veículo, conta com um número reduzido de componentes, e é geralmente mais compacto quando comparado ao próximo tipo de sistema admissão o sistema de admissão de ar tipo „remoto“.



Figura 1 - Sistema de Admissão Integrado ao Motor  
Fonte: Ref. [25]

A segunda configuração de sistema de admissão de ar é conforme mencionado a do tipo „remoto“. Este tipo de sistema é normalmente fixado sobre a carroceria ou sobre o chassi do veículo, conta com um numero maior de componentes, e é geralmente menos compacto do que o sistema do tipo integrado. A figura 2 ilustra a aparência deste sistema.

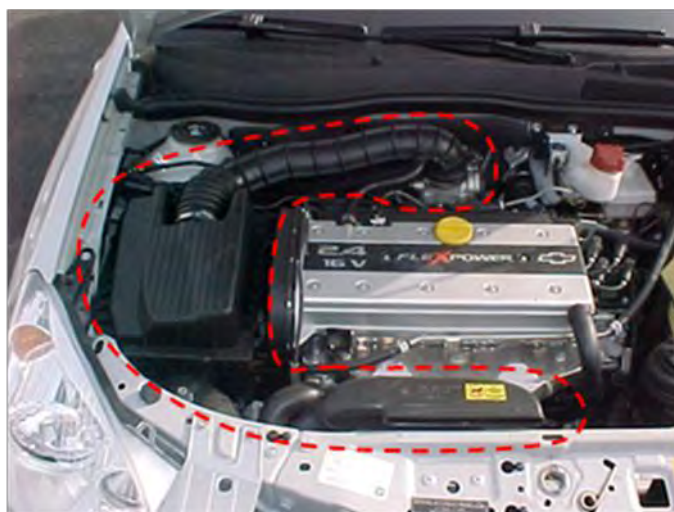


Figura 2 - Sistema de admissão remoto  
Fonte: Ref. [25]

Entre estes dois tipos de configuração obviamente existem vantagens e desvantagens. O critério para seleção de um em detrimento ao outro esta normalmente relacionada à estratégia da montadora de veículos. Isto porque cada um dos sistemas apresenta uma vantagem sob o ponto de vista estratégico. O sistema de admissão de ar do tipo remoto normalmente permite uma melhor comunização de componentes entre veículos que são construídos sobre uma mesma plataforma. Já o sistema de admissão de ar do tipo integrado normalmente permite uma melhor comunização de componentes entre motores que são usados em veículos diferentes.

Além dos mencionados fatores, podemos apresentar como vantagens do sistema de admissão integrado ao motor em relação ao sistema de admissão de ar remoto:

- Redução de massa;
- Melhor Aparência / Estilo (sistemas de admissão de ar integrados ao motor geralmente têm melhor aparência);
- Redução no numero de componentes;
- Melhor desempenho quanto à perda de carga;

Como desvantagens do sistema de admissão integrado ao motor em relação ao sistema de admissão de ar remoto podem-se destacar:

- Maior custo;

- Utilização de materiais mais nobres em função das temperaturas de trabalho normalmente mais altas devido à proximidade com o motor;
- Menor liberdade em relação ao seu desenho construtivo;

#### **1.4 Sensor Medidor de Vazão Mássica de Ar (MAFS)**

Conforme apresentado nos objetivos específicos o sistema de admissão de ar veicular deve ainda informar ao sistema de gerenciamento eletrônico do motor qual é a vazão em massa de ar que atravessa suas fronteiras. Com esta informação o sistema de gerenciamento eletrônico do motor calcula a correta quantidade de combustível a ser usada na combustão do próximo cilindro. A medição da vazão em massa de ar que atravessa as fronteiras do sistema de admissão de ar é desempenhada pelo Sensor Medidor de Vazão Mássica de Ar (Mass Air Flow Sensor ou MAFS).

O bom funcionamento deste sensor é fundamental para que os novos motores consigam atender as restrições impostas pelas mais recentes legislações referentes a emissões veiculares e melhorar seu desempenho quanto ao consumo de combustível.

Sensores capazes de medir a vazão mássica de ar que atravessa um determinado sistema ou um determinado volume de controle estão disponíveis no mercado em uma grande variedade de formas construtivas. Por esta razão, acredita-se que seja importante a apresentação dos tipos mais comuns de sensores através de um breve resumo de cada um deles.

Note-se que em nenhum dos tipos de sensor a seguir a tecnologia aplicada mede a massa de ar diretamente. Em todos eles esta tarefa é realizada com a ajuda de um sensor ou mais, para que a vazão mássica de ar admitida seja calculada corretamente.

A Figura 3 apresenta o sensor de aleta.

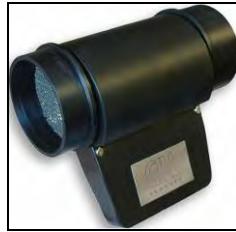


Figura 3 - Sensor de aleta  
Fonte: Ref. [14]

O Sensor de „Aleta” ou de „Pá”, projeta a quantidade atravessando suas fronteiras de acordo com a movimentação de um braço com mola conectado a um reostato. A aleta se move em função da vazão de ar, e uma voltagem é gerada em proporção à distância percorrida pela aleta como em um sensor de nível. A aleta mede somente a vazão de ar em volume, porém com o auxílio de um sensor de temperatura e outro de pressão é possível se determinar a correta vazão mássica de ar que atravessa este sensor.

Este tipo de sensor apresenta algumas desvantagens em relação ao sensor de fio quente que será apresentado a seguir. São elas:

- Maior restrição ao fluxo de ar;
- A medição do sinal é feita através de contatos elétricos móveis, isto aumenta o erro em condições instáveis;
- Contatos elétricos móveis sofrem desgaste;
- Sua instalação é mais complexa devido ao espaço requerido para seu alojamento;
- A gravidade influencia a medição, portanto o mesmo não pode ser instalado em qualquer posição;
- Sua massa é maior quando comparado ao sensor de fio quente;
- Maior custo



A Figura 4 ilustra o sensor de fio quente:

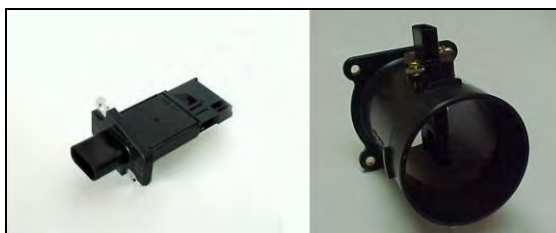


Figura 4 - Sensor de fio quente  
Fonte: Ref. [20]

O sensor de „Fio Quente” assim como o sensor apresentado anteriormente determina a massa de ar que atravessa o sistema de admissão de ar do motor. Isto é conseguido com o aquecimento de uma resistência elétrica (um „fio quente”) com corrente elétrica. Esta resistência elétrica aumenta ou diminui de acordo com a massa de ar que passa através dela. Esta resistência é projetada para trabalhar sempre a uma determinada temperatura, assim quando o ar retira calor do fio, e a resistência diminui em um intervalo de milissegundos o sistema eletrônico do sensor interpreta que é necessário aumentar a voltagem para manter o equilíbrio térmico. O inverso ocorre quando a vazão de ar diminui e a resistência aumenta o sistema interno do sensor compensa reduzindo a voltagem até a resistência voltar ao equilíbrio. Conforme descrito subentende-se que a quantidade de potência requerida para manter a temperatura do „fio” é diretamente proporcional a massa de ar passando por ele. E é exatamente esta variação de voltagem que é traduzida em um sinal de voltagem que é enviado ao sistema de controle eletrônico do motor.

Como o que importa para retirar calor do „fio quente” é a massa de ar que atravessa o mesmo, as condições de pressão e temperatura não afetam sua medição. E é justamente essa característica que faz com que este sensor se ajuste perfeitamente ao processo de combustão dos motores ciclo Otto onde o que importa fundamentalmente é a massa de ar admitida para combustão e não o volume de ar admitido.

A Figura 5 apresenta o sensor de fio frio.



Figura 5 – Sensor de fio frio  
Fonte: Ref. [15]

O Sensor de „Fio Frio“ é um sensor que funciona por indutância. A indutância muda de acordo com a vazão de ar. O sensor é parte de um circuito cuja frequência da oscilação muda de acordo com indutância do sensor. Esta frequência é relacionada à quantidade do ar que passa sobre a unidade. Este sinal elétrico oscilante, então alimenta o sistema de gerenciamento eletrônico do motor.

A Figura 6 apresenta o sensor de membrana.



Figura 6 – Sensor de membrana  
Fonte: Ref. [23]

O Sensor de „membrana“ é muito similar ao sensor de fio quente sob o ponto de vista de funcionamento, sendo que a diferença está principalmente no elemento sensor. Enquanto o sensor de fio quente utiliza efetivamente um fio quente como elemento de troca de calor com o ar, o sensor de membrana utiliza uma membrana eletrônica. Esta membrana possui um sensor de temperatura com espessura diminuta impresso à montante da seção de

passagem do fluxo de ar e outro sensor de temperatura impresso na seção à jusante. Aqui novamente um dispositivo que eleva a temperatura do sistema é integrado no centro da membrana e mantém uma temperatura constante similar à aplicação do sensor de fio quente. Sem nenhum fluxo de ar, o perfil de temperatura através da membrana é uniforme. Quando o fluxo de ar passa pela membrana, seus extremos se resfriam de forma diferente e é a diferença entre as temperaturas à montante e à jusante que indica ao sistema eletrônico o fluxo de ar mássico.

Sensores de fio quente e sensores de membrana são capazes de medir o fluxo em ambos os sentidos, o que ocorre às vezes porque o ar é admitido pelo motor de forma pulsante. Todavia o sistema de controle do próprio sensor é normalmente calibrado para que exista uma compensação de tal forma que não existam erros na medição feita pelo elemento sensível.

Os sensores de „fio quente“ e de „membrana“ são os mais populares e mais utilizados dentre os apresentados. Isto porque são os de menor custo dentre os apresentados, e os que requerem menos espaço físico para sua montagem, o que os tornam mais adequados para aplicação veicular.

Em termos práticos ambos os „sensores de fio quente“ e „sensores de membrana“ são iguais para o sistema de gerenciamento eletrônico do motor. Ambos enviam exatamente o mesmo sinal de saída, e são calibrados da mesma forma e devem atender aos mesmos requisitos técnicos. A principal diferença entre eles está fundamentalmente na eletrônica aplicada aos seus circuitos internos. Por esta razão a definição sobre o uso de um em detrimento ao outro está normalmente ligada a um motivo econômico e não técnico. Ou seja, o sensor de menor custo é o que será aplicado ao sistema de admissão de ar a ser desenvolvido para um novo veículo.

## 2 Importância do projeto de pesquisa – Justificativa.

Conforme apontado a aplicação do sensor medidor de vazão mássica de ar introduz maior complexidade no processo de desenvolvimento de um sistema de admissão de ar. Além disso, mesmo com toda tecnologia disponível, ainda é impossível prever o comportamento do sensor medidor de vazão mássica de ar quando instalado em um sistema de admissão de ar antes da realização de um teste físico em uma bancada de fluxo de ar.

Entretanto o que motiva o estudo é principalmente a quantidade de veículos em que este tipo de sensor vem sendo aplicado. Ocorre que mesmo com todas estas aplicações existe ainda uma grande carência de informações sobre o que é recomendável e o que não é recomendável sob o ponto de vista de instalação deste sensor nos sistemas de admissão de ar.

Outro ponto importante apresentado no objetivo geral é que um estudo deste tipo poderia reduzir o tempo de desenvolvimento do sistema de admissão de ar. Pode-se ainda afirmar que a importância do trabalho está relacionada à redução de custos e aumento da competitividade na indústria automobilística.

Este seria um resultado colateral esperado para o estudo o aumento do lucro expresso pela relação bastante simplificada abaixo:

$$\text{Lucro} = \Delta \text{ vendas} - \underbrace{(\Delta \text{ tempo de desenvolvimento} + \Delta \text{ investimentos})}_{\text{Custo}}$$

Interpreta-se o aumento das vendas como sendo um reflexo direto da qualidade e inovação dos produtos do portfólio de um dado fabricante de veículos, levando-se em consideração que para o público em geral inovação esta relacionada ao lançamento de novos veículos. Outro fator importante a se lembrar é que novos veículos vendem mais do que os veículos antigos.

O tempo de desenvolvimento de um novo veículo afeta diretamente os investimentos feitos para desenvolvê-lo e a renovação do portfólio de produtos de uma montadora.

O desenvolvimento do sistema de admissão de ar afeta diretamente o tempo de desenvolvimento da calibração de um novo motor. Quando a aplicação de um motor existente é requerida em um novo veículo algum tempo deve ser dedicado à calibração deste motor. A calibração de um novo motor por sua vez é conforme já mencionado um dos fatores que irá determinar a duração de um programa de desenvolvimento veicular.

Conclui-se então que atingindo o objetivo específico que é reduzir o tempo de desenvolvimento do sistema de admissão de ar é possível reduzir o tempo de desenvolvimento de um motor e atingir o objetivo geral que é a redução do tempo de desenvolvimento de um veículo.

### 3 Unidade ou objeto de pesquisa

Para realização da análise sobre a instalação do sensor em um sistema de admissão veicular precisou-se escolher um entre os dois tipos de configurações de sistemas de admissão veicular apresentadas anteriormente (remoto ou integrado).

Através de estudos de mercado constatou-se que o sistema do tipo remoto é o mais utilizado pelas montadoras atualmente, principalmente no mercado Brasileiro. Por esta razão como objeto de estudo foi selecionado o sistema de admissão de ar automotivo do tipo remoto. Todavia a conclusão dos resultados e conceitos desenvolvidos através deste estudo poderão ser aplicados de forma análoga à ambos os tipos de configuração de sistema de admissão de ar sejam do tipo remoto ou do tipo integrado.

Somente para ilustrar o sistema de admissão de ar veicular remoto é composto normalmente por três subconjuntos de componentes. O duto de entrada do filtro de ar, a caixa do filtro de ar e a mangueira de saída do filtro de ar.

O primeiro deles, o duto de entrada do filtro de ar, é considerado um subconjunto porque o mesmo é normalmente composto de diversos componentes tais como, por exemplo, os componentes de atenuação de ruídos como ressonadores, e ou, tubos de  $\frac{1}{4}$  de onda; além de contar também com elementos de fixação do próprio duto à entrada da caixa do filtro de ar e também à carroceria do veículo.

O segundo dos subconjuntos é a caixa do filtro de ar que é composta por uma carcaça; uma tampa; um elemento filtrante; o sensor medidor da vazão em massa de ar (montado geralmente do lado limpo do filtro de ar); e seus elementos de fixação. Os elementos de fixação da caixa do filtro de ar têm em geral duas funções distintas: a primeira função é montar os elementos do conjunto filtro de ar, e a segunda é montar o conjunto filtro de ar a carroceria do veículo. Além destes componentes a própria caixa do filtro de ar pode ainda abrigar elementos de atenuação de ruídos oriundos do motor assim como ocorre no duto de entrada do filtro de ar e no duto de saída do filtro de ar.

O terceiro e ultimo subconjunto deste tipo de sistema é o duto de saída do filtro de ar. Da mesma forma que o duto de entrada este é composto de componentes de atenuação de ruídos como ressonadores ou tubos de  $\frac{1}{4}$  de onda, e de forma análoga ao duto de entrada do filtro de ar que faz interface entre o ambiente onde a tomada do ar está instalada e entrada do filtro de ar, o duto de saída do filtro de ar faz interface entre a saída do filtro de ar e a entrada do motor.

O sensor MAFS é conforme mencionado acima normalmente montado na caixa do filtro de ar. Assim o estudo levará em consideração a instalação de sensores dos tipos „fio quente” e de „membrana” devido a sua grande popularidade em aplicações na indústria automotiva.

A figura 7 ajuda a ilustrar as diferenças entre o sensor de „fio quente” e de „membrana”.

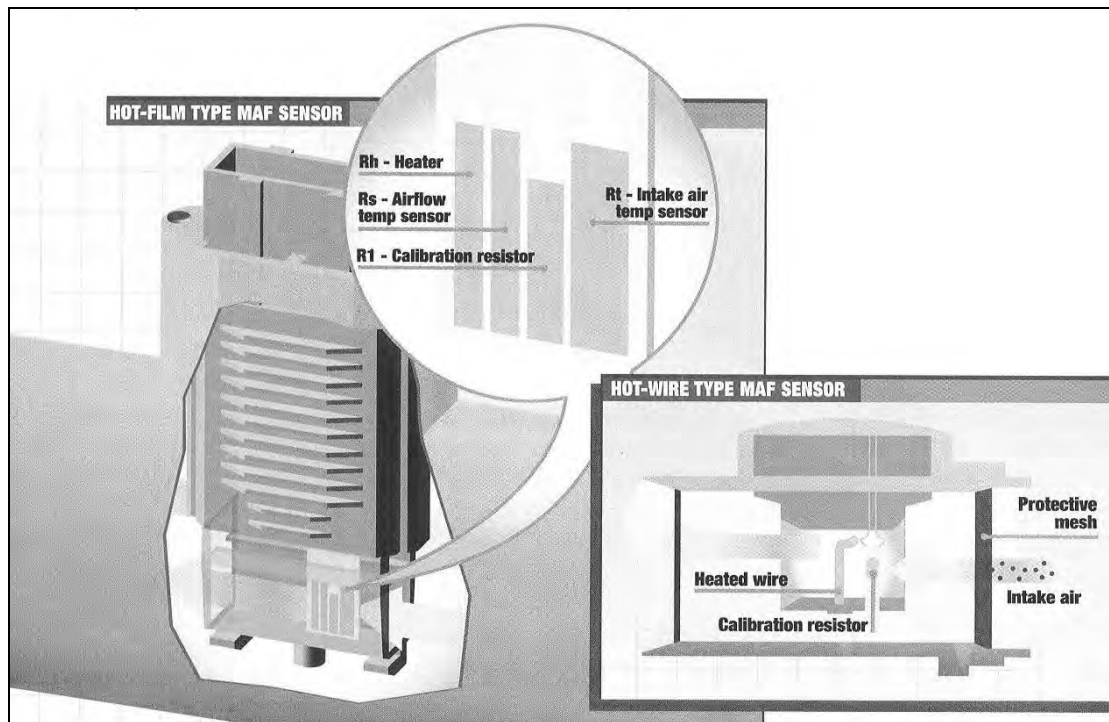


Figura 7– Sensor de membrana vs. Sensor de fio quente  
Fonte: Ref. [22]

#### 4 Fundamentação teórica

Abre-se aqui um parêntese em relação ao escopo do estudo. Não faz parte do trabalho o projeto ou a otimização dos sensores disponíveis no mercado através de nenhuma das relações apontadas a seguir. O foco do trabalho está relacionado com a aplicação de sensores disponíveis no mercado aos sistemas de admissão de ar veicular. A fundamentação teórica a seguir serve apenas como referência para o entendimento do leitor sobre o funcionamento destas sondas.

O funcionamento do sensor medidor da vazão mássica de ar está intimamente ligado a um conceito relativamente difundido no meio da dinâmica de fluidos, a anemometria térmica. A anemometria térmica é o método muito comum utilizado para medir a velocidade instantânea de um fluido. A técnica depende da troca de calor por convecção de um meio fluido em torno de um elemento sensor ou sonda eletrificada. Se interpretarmos apenas a velocidade do fluido como uma variável, então a perda de calor pode ser interpretada como uma medida dessa variável.

Sensores Cilíndricos ou sensores de „fio quente” são os mais comumente utilizados para medir a velocidade de fluidos, enquanto sensores de „filmes quentes” ou de „membrana” são empregados para medir a tensão de cisalhamento. Ambos são usados na indústria automotiva.

Sensores de „fio quente” são, como o nome implica, feitos a partir de curtos fios de resistência e têm secção circular. Já os sensores de „membrana” consistem de uma fina camada de material condutor depositado em um substrato não condutor. Sensores de „membrana” também podem ser cilíndricos como podem também ter outras formas, tais como a do sensor Bosch mostrado na figura 8.



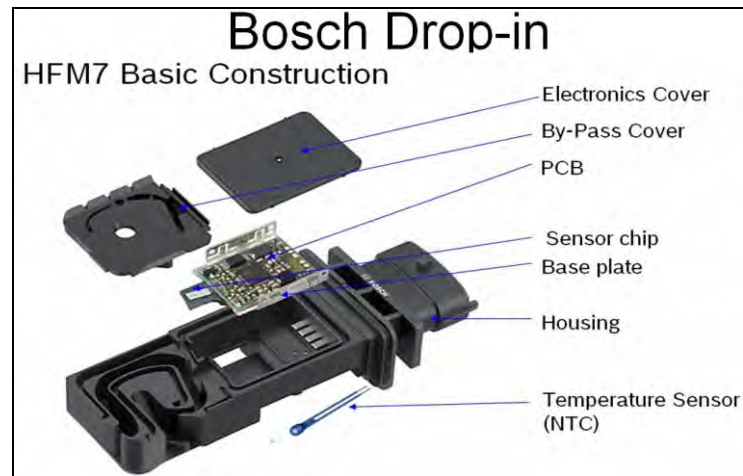


Figura 8 – Sensor de membrana Bosch  
Fonte: Ref. [23]

A anemometria térmica é popular, porque a técnica envolve o uso de sondas muito pequenas que oferecem resolução espacial muito alta e excelentes características de frequência de resposta. Os princípios básicos da técnica são relativamente simples e as sondas são difíceis de danificar se razoável cuidado é tomado. A maioria dos sensores são operados na modalidade „temperatura constante“.

Anemômetros de fio quente têm sido utilizados por muitos anos no estudo de camada limite em regimes laminares, de transição e turbulentos. Grande parte da nossa atual compreensão da física do efeito da camada limite de transição se deu exclusivamente a partir de medições com fio quente.

Anemômetros térmicos são também ideais para a medição dos fluxos instáveis, como os que surgem, por exemplo, nos sistemas de admissão de ar dos motores de combustão interna ou em turbinas.

#### 4.1 Sensores cilíndricos

Os sensores utilizados para a medição da velocidade em turbinas são invariavelmente do tipo cilíndrico. Destes, a maioria são do tipo fio quente, uma vez que estes oferecem maior flexibilidade de uso em ambientes muitas vezes restritos e instáveis como os observados dentro de turbinas.

Para melhorar a frequência de resposta de um anemômetro, a sonda deve ter uma pequena inércia térmica, e isto é simples de se obter no caso destes sensores já que seu tamanho é geralmente diminuto. Para trabalhar em gases são mais comumente utilizados elementos sensores de tungstênio revestidos em platina com 5  $\mu\text{m}$  de diâmetro, embora outros tamanhos e materiais são por vezes utilizados.

Um exemplo deste tipo de sensor está ilustrado na figura 9.



Figura 9 – Típico sensor cilíndrico ou de „fio quente”  
Fonte: Ref. [29]

## 4.2 Calibração de Sensores cilíndricos

A física do escoamento de fluidos, e da transferência de calor por convecção, estão intimamente ligadas à calibração de sensores cilíndricos de forma geral, pelas seguintes relações:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Kn}, \text{elementos geométricos ...})$$

os números de Nusselt, Reynolds, Prandtl e Knudsen são adimensionais. No contexto da anemometria térmica usando um elemento cilíndrico, a equação acima pode ser expandida resultando:

$$\frac{\dot{q}L}{D^2 (T - T_A)k} = f\left(\frac{\rho U d}{\mu}, \frac{\mu C_p}{k}, \frac{L}{d}, \dots \text{geometry}\right)$$

onde  $\rho$  é densidade do fluido, 'U' é a velocidade do fluido, ' $\mu$ ' sua viscosidade, 'd' é a dimensão típica (no exemplo, o diâmetro do fio quente - que representa a perda de calor), 'L' é o comprimento do fio, 'k' é a condutividade térmica, 'T' e 'T<sub>A</sub>' são as temperaturas do fio e fluido, respectivamente. Os elementos geométricos incluem não só a relação comprimento diâmetro do cilindro 'L/d', mas também outras dimensões tais como a dos conectores e a orientação do sensor em relação ao fluxo.

Em 1914, King derivou uma solução para a função de transferência de calor de um cilindro infinito, em um fluxo incompressível, com baixo número de Reynolds, que pode ser escrita como:

$$\text{Nu} = A' + B' \text{Re}^{0.5}$$

Onde A' e B' são constantes.

$$\frac{\dot{q}L}{D^2 (T - T_A)k} = A' + B' \left(\frac{\rho U d}{\mu}\right)^{0.5}$$

A taxa de perda de calor para o fluido é igual à energia elétrica entregue ao sensor „ $V^2/R$ “ onde „ $V$ “ é a queda de tensão em torno do sensor e „ $R$ “ é a sua resistência elétrica. Se as propriedades do fluido e da resistência fio permanecerem constantes reduz-se a expressão para:

$$V^2 = A + B U^{0.5}$$

onde A e B são constantes. Quando o substrato suporta a troca de calor por condução e as características do fluido não mudam em função da velocidade, a constante A pode ser substituída por „ $V_0^2$ “, onde „ $V_0$ “ é a tensão no sensor quando o escoamento é igual a zero.

Na prática, a tensão de saída registrada no anemômetro não é somente a tensão no sensor, mas em todo circuito. Quando „ $E$ “ é aplicada a parte superior da ponte de Wheatstone, a diferença de potencial nos dois ramos da ponte age como separador de modo a que a relação torna-se:

$$E^2 - A^2 = B U^{0.5}$$

Quando alta precisão não é mandatória a constante A pode ser substituída pela tensão no fluxo zero „ $E_0$ “. Na prática, o valor do expoente muda em função do sensor e da velocidade do fluxo ao seu redor, assim como os valores de „A“ e „B“, por esta razão, se faz necessário a calibração de cada sensor individualmente e uma verificação desta calibração deve ser feito com moderada freqüência. Um expoente de „0,45“ está mais próximo aos valores encontrados na prática.

Uma vez que não está disponível uma calibração universal, os sensores devem ser calibrados conforme mencionado acima. Para fazer isso, um fluxo com baixo nível de turbulência em velocidade conhecida deve ser utilizado. Idealmente, a sonda deve ser colocada na mesma atitude em que ela será utilizada.

Durante a utilização, erros na medição podem ocorrer devido a mudanças na temperatura ambiente e de outras propriedades do fluido, e devido à deposição de impurezas sobre o sensor. Procedimentos padrão estão

à disposição para corrigir os efeitos das mudanças de temperatura. O tempo para validar uma calibração irá variar caso a caso dependendo da situação.

Mas com manutenções básicas e com calibrações realizadas em intervalos regulares uma precisão de 1 por cento ou mais pode ser alcançada por um sensor de fio quente.

### 4.3 Resposta angular da sonda

Quando um sensor cilíndrico é colocado de forma que seu eixo não é perpendicular à direção do fluxo, haverá uma componente de velocidade que é paralela ao eixo do sensor. Se o sensor for de comprimento infinito o efeito do arrefecimento só é eficaz na componente da velocidade que é perpendicular ao sensor; a componente paralela da velocidade não tem qualquer efeito sobre o sensor. Assim, a velocidade efetiva de arrefecimento „ $u_{eff}$ “ pode ser obtida a partir da expressão:

$$u \cos \alpha = u_{eff}$$

onde ‘ $\alpha$ ’ é o ângulo entre o fluxo e o vetor normal ao eixo do sensor. No caso de um fio com um comprimento finito, a temperatura não é constante ao longo do seu comprimento, e perturbações aerodinâmicas são criadas pelas conexões elétricas na extremidade da sonda. Esses fatores são levados em conta, argumentando que a componente de velocidade que é paralelo ao eixo do arame agora contribui para o efeito de arrefecimento. Uma sonda finita responde às mudanças na direção de fluxo, conforme mostrado na figura 10. A interferência das conexões elétricas na extremidade da sonda pode ser reduzida através da utilização de conexões mais espaçadas e adicionando cobre ou ouro as extremidades do sensor, para garantir que há pouca resistência ao aquecimento no centro do fio.

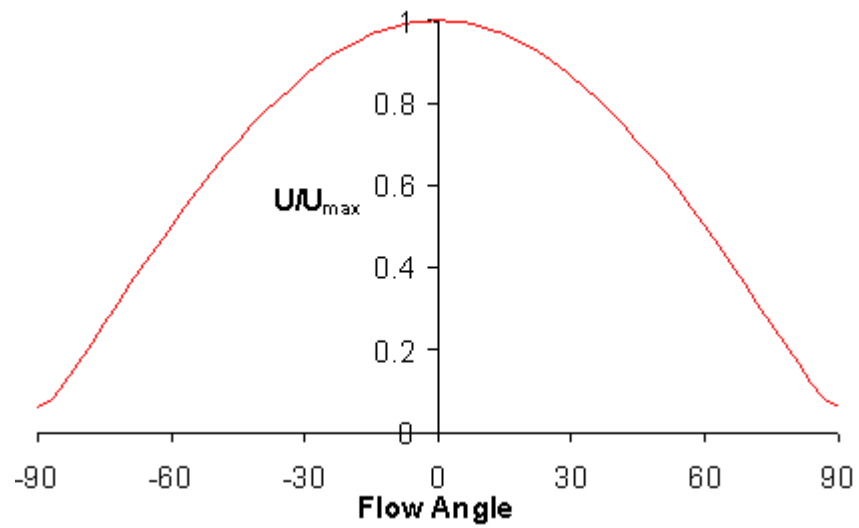


Figura 10 – Típica curva de resposta de um sensor de fio „quente“.  
Fonte: Ref. [29]

É importante reconhecer que os sensores de fio quente e de membrana são capazes apenas de determinar a magnitude da velocidade (ou o vetor componente), uma vez que a transferência de calor é a mesma seja qual for a sentido do vetor velocidade. Como resultado, sensores convencionais são inadequados para utilização quando o fluxo inverte como acontece no interior de bolhas de separação. Nestas circunstâncias, são obrigatórios sensores especializados com múltiplas sondas, capazes de determinar a magnitude e o sentido do fluxo.

#### 4.4 Medições de Velocidade e ângulo do fluxo

Dois sensores dispostos em X podem ser usadas para fazer medições bidimensionais. Quando informação tridimensional é necessária, o método de três sensores é empregado, os três elementos sensores são geralmente alinhados entre eixos retangulares de um sistema de coordenadas. Esta sonda permite a determinação simultânea de três componentes de velocidade e seis componentes de turbulência, mas a resolução espacial é relativamente fraca. A resolução espacial reduzida implica em uma frequência de resposta muito menos eficaz do que a resposta térmica de um sensor individual.

A calibração e reparação de três sensores é muito trabalhosa. Uma alternativa técnica é utilizar apenas um sensor, colocado em uma série de orientações em relação ao fluxo. Em rigor, apenas três orientações são necessárias para encontrar as componentes da velocidade média, mas o método pode ser melhorado pela utilização do método dos mínimos quadrados. Desta forma é possível se obter melhores resultados.

#### 4.5 Medições Turbulência

A figura 11 mostra uma medição típica onde „U” é a velocidade média fluido, que é normal ao sensor, e „u”, „v”, „w” são as flutuações da velocidade em três direções perpendiculares. Assumindo que o eixo do sensor está alinhado com a direção „w”, o sensor terá uma resposta muito ruim para a componente „w”. Isto irá ocorrer porque a razão entre comprimento e o diâmetro do sensor é grande ( $L/d > 200$ ) por esta razão a influência sobre o arrefecimento do sensor é mais eficaz na direção do vetor U. Como „v” não é muito grande a velocidade média será basicamente  $U + u'$ , de modo que a baixa intensidade da turbulência o fio estará medindo a amplitude da velocidade média na direção do fluxo. Assim, a intensidade do fluxo turbulento pode ser obtido calculando a raiz média quadrada da velocidade instantânea sobre a velocidade média  $\sqrt{u'^2/\bar{U}}$ . Em turbulência isotrópica, e esta medida e a velocidade média

resultaram em um erro de cerca de 2%, quando a intensidade da turbulência é de cerca de 20%.

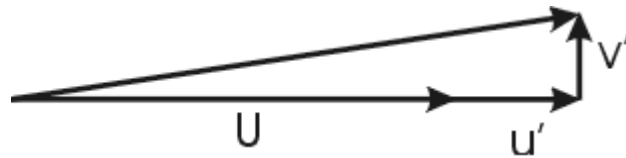


Figura 11 – Fluxo de velocidades média (U) e instantânea (u')  
Fonte: Ref. [29]

Para obter as componentes da turbulência que são normais a média vetorial do fluxo, uma variedade de técnicas utilizando dois ou três sensores pode ser empregada para determinar a magnitude e a direção do vetor fluxo instantâneo. A partir disto, o tempo médio de escoamentos turbulentos e outras propriedades podem ser encontradas.

#### 4.6 Medição da Camada limite

Uma das conseqüências negativas das leis de transferência de calor é que, quando um elemento aquecido é posicionado perto de uma superfície sólida, um aumento da transferência de calor ocorre. Assim uma correção na lei de King deve ser feita para tornar as medições mais precisas nas fronteiras da camada limite. No caso de um fio 5  $\mu\text{m}$  de diâmetro, o efeito da proximidade de parede se estende de 1 a 2 mm da superfície de modo que os efeitos de proximidade de parede estão presentes em várias medições.

A técnica mais comumente usada para corrigir este efeito é a chamada „técnica do ar parado“. Esta técnica envolve a medição da transferência de calor a partir do fio para uma superfície plana com o ar parado em várias posições encontradas experimentalmente. A transferência de calor é proporcional ao quadrado da tensão de saída da ponte de Wheatstone,  $E_0^2$  no ar parado. A forma geral da equação da lei de King é então modificada para fornecer:

$$E^2 - A^2 - [E_0^2(y) - E_0^2(0)] = B U^n$$



Onde as constantes A, k e n têm os mesmos valores determinados a partir de um fluxo livre, e os termos dentro dos colchetes representam o aumento na transferência de calor.

Os sensores medidores da vazão de massa de ar são na verdade dispositivos trocadores de calor. O calor é transferido pela „membrana“ ou pelo „fio quente“ ao fluxo de ar como resultado da própria vazão de ar passando por ele. Esta relação de troca de calor é descrita pela lei de King.

Estes sensores são instalados nos sistemas de admissão de ar do motor e devem ser ensaiados em uma bancada de fluxo que permita um fluxo de ar constante e estável para gerar a „função de transferência“. Esta „função de transferência“ relaciona a velocidade do ar com o sinal de voltagem do sensor e com a temperatura, umidade, e pressão barométrica.

#### **4.7 Bancada de Fluxo de Ar Sônica**

Conforme mencionado anteriormente o sistema de gerenciamento eletrônico do motor precisa receber um sinal eletrônico do sensor medidor de vazão mássica de ar para calcular a vazão de combustível a ser injetada para combustão do próximo cilindro.

Assim para determinar qual a correlação entre a vazão mássica de ar atravessando o sensor e seu sinal elétrico, faz-se necessário a caracterização do fluxo de ar em uma bancada de fluxo de ar. É de extrema importância que o fluxo de ar nesta bancada seja tão estável e preciso quanto possível. Para se atingir a precisão necessária para calibração do sensor instalado no sistema de admissão de ar, é necessário o uso de uma bancada de fluxo sônico.

A alma da bancada de fluxo sônico são os bocais sônicos utilizados em sua construção. O „bocal sônico“, também conhecido como „Venturi de fluxo crítico“ ou „Bocal de fluxo crítico“ é aceito internacionalmente como um padrão para calibração de medidores de vazão. Bocais sônicos recebem este nome porque seu projeto prevê que o mesmo deverá sempre trabalhar com escoamento sônico, ou seja, MACH igual a 1. Sabe-se ainda que um Venturi de

fluxo crítico operando em MACH 1 tem sua vazão máxima determinada pela sua seção crítica.

A construção deste tipo de bocal é normalizada de acordo com as normas ISO9300 e ASME MFC-7M-1987. A figura 12 ilustra melhor as dimensões recomendadas para seção transversal a ser seguida de acordo com a norma.

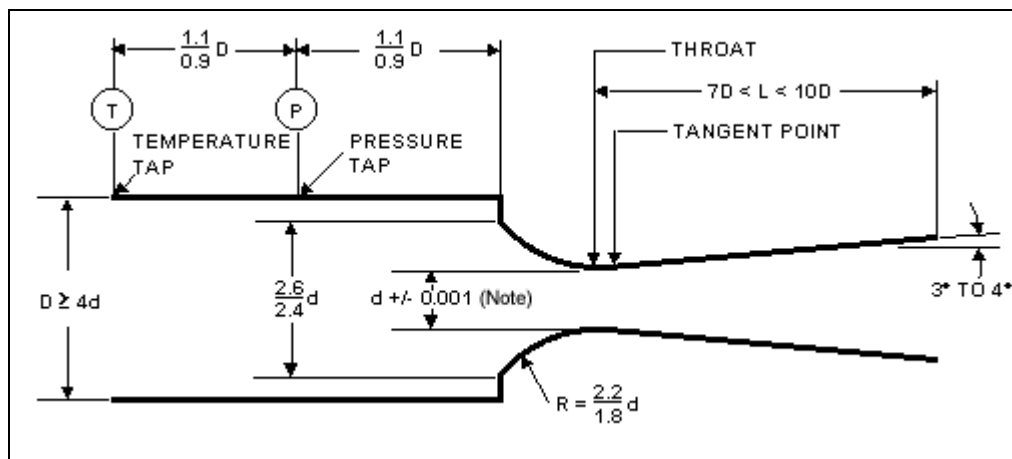


Figura 12 - Venturi de Fluxo Crítico normalizado de acordo com as normas ASME / ISO  
Fonte: Ref. [04]

A geometria é tal que o ar ou o gás é acelerado ao longo da seção convergente, e em seguida é expandido na seção divergente cônica, que é projetada para recuperação da pressão. Conforme mencionado anteriormente na garganta, ou seção mínima do bocal sônico, a velocidade do gás passa a ser igual à velocidade do som, ou seja, MACH 1. Neste ponto, a velocidade do gás e a densidade são maximizadas e a vazão mássica é uma função da pressão e temperatura de entrada do gás que atravessa suas fronteiras.

Considerando ambos o projeto da seção divergente e a vazão que atravessa o bocal, este tipo de desenho recomendado pelas normas mencionadas acima pode recuperar 90% da pressão montante a seção convergente. Isto significa menor custo energético na operação da bancada de fluxo de ar.

Uma bancada de fluxo de ar sônico é constituída por sua vez de uma série de bocais sônicos. As figuras 13 e 14 servem para dar uma idéia de como a seção de controle de fluxo é construída. Note que na figura 13 os bocais

foram usinados diretamente em um flange enquanto na figura 14 pode-se observar bocais com orifícios menores que podem ser comprados separadamente e que permitem uma adaptação ou simplesmente a instalação em uma bancada já existente.



Figura 13 - Flange com bocais sônicos usinados  
Fonte: Ref. [15]



Figura 14 - Bocais sônicos de fácil adaptação/instalação.  
Fonte: Ref. [15]

Bancadas de fluxo de ar sônicas são consideradas como o estado da arte em termos de medição de vazão de gases. Conforme pode-se observar na figura 13 normalmente bancadas de fluxo sônico são construídas com diversos bocais sônicos. São necessários diversos bocais sônicos para que se possa atingir as vazões estabelecidas nos projetos dos sistemas de admissão de ar ou mesmo nos projetos dos sensores propriamente ditos. A figura 15 foi

adicionada somente para facilitar a visualização sobre o local de instalação da seção de controle de vazão com os bocais sônicos.

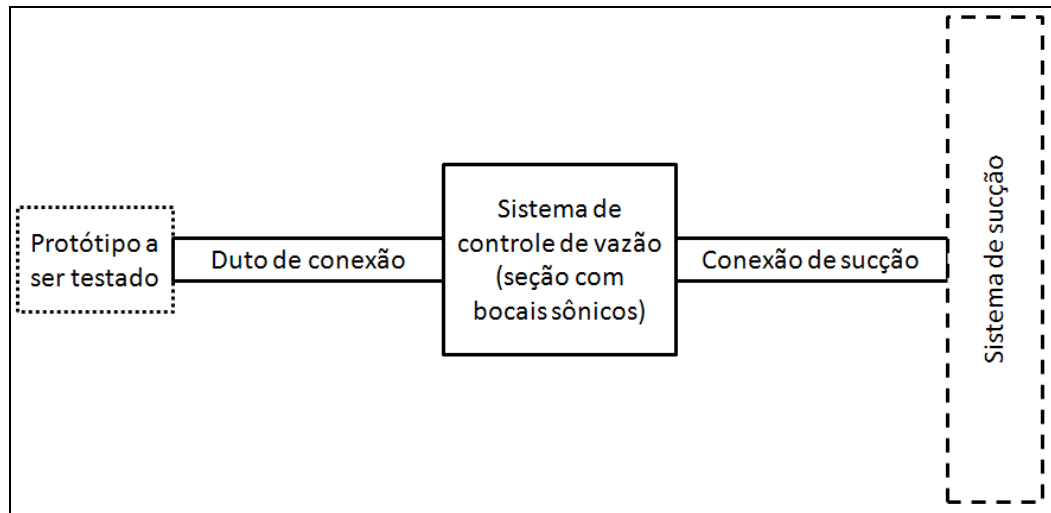


Figura 15 - Esquema bancada sônica

#### 4.8 Função de transferência (TF - Transfer Function)

Conforme apresentado anteriormente o sensor MAFS instalado em sistema de admissão de ar comunicasse com a central de gerenciamento eletrônico do motor através de um sinal elétrico. Este sinal é calibrado através de uma função que relaciona a frequência de variação da voltagem com a vazão mássica atravessando o sensor.

Para a geração da função de transferência é necessária a medição da variação frequência do sinal do MAFS em uma determinada vazão fixa durante um intervalo de tempo relativo a 6.000 pulsos consecutivos. Cada um dos pontos da curva de transferência é então o resultado da média da variação de frequência para uma determinada vazão. A figura 16 representa graficamente a determinação de cada um dos pontos da função de transferência.

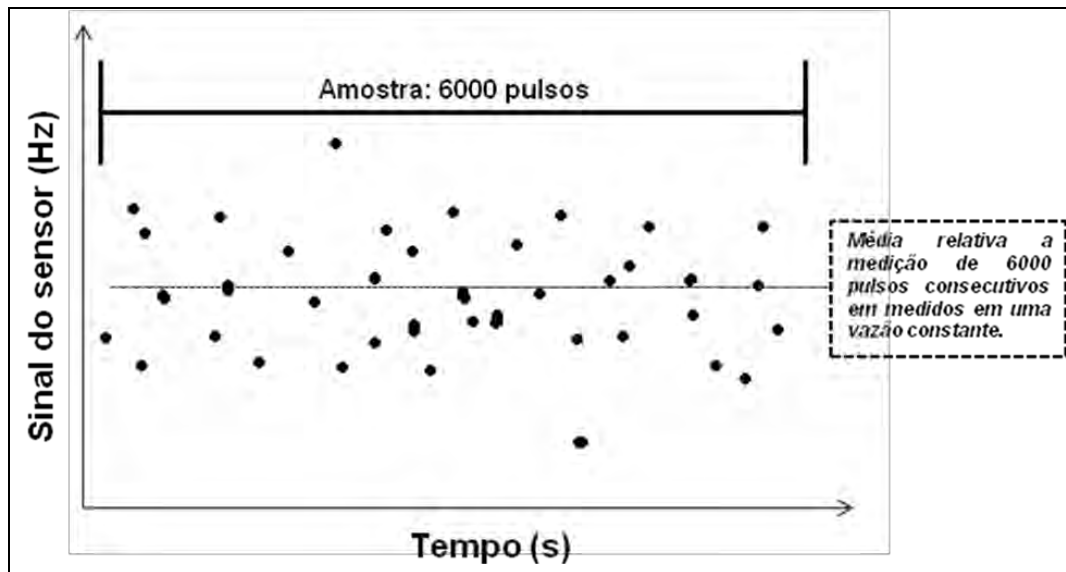


Figura 16 - Relação sinal-ruído

Para construção desta curva de transferência é necessário o levantamento do sinal de frequência relativo a uma serie de vazões previamente determinadas. Para cada vazão o sensor irá apresentar como sinal de saída uma frequência.

Somente para ilustrar a figura 17 apresenta uma curva de transferência típica. Normalmente a vazão mássica é projetada no eixo das abscissas enquanto o sinal de saída do sensor é projetado no eixo das ordenadas.

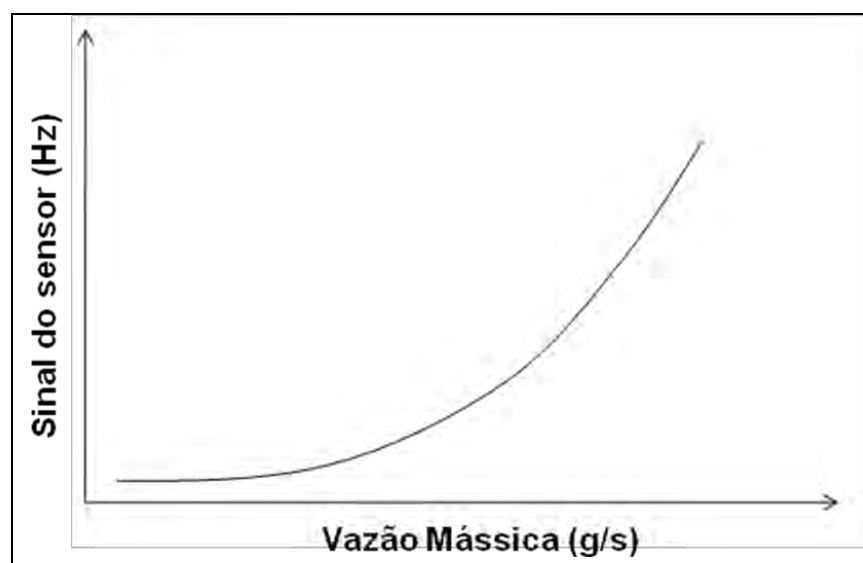


Figura 17 - Função de transferência (MTF)

Esta curva normalmente do 4º grau é justamente o que o sistema de gerenciamento eletrônico do motor precisa para funcionar adequadamente. Por esta razão a mesma tem que ser tão precisa quanto possível, uma vez que é esta informação que o sistema irá utilizar para calcular a vazão de combustível a ser utilizada na combustão do próximo cilindro.

#### 4.9 Sinal-ruído

Um dos parâmetros de robustez estabelecidos para instalação do sensor no sistema de admissão de ar está relacionado ao quanto o sinal de frequência varia dentro do intervalo de tempo relativo aos 6.000 pulsos consecutivos necessários para qualificação do ponto de funcionamento do sensor operando em uma determinada vazão constante.

Esta variação é chamada de relação Sinal-ruído. Este valor é expresso graficamente em termos de porcentagem. Todavia matematicamente é utilizada a função abaixo para definir a variação de cada ponto em relação à média:

$$\text{Ruído de sinal (\%)} = \frac{2 * \sigma}{1\% \text{ Erro}}$$

Padronizou-se para a instalação do sensor em um sistema de admissão de ar que o desvio em relação à média deve ser calculado dentro de um intervalo de 2 sigma.

Esta medição é expressa como uma relação de vazões em porcentagem onde o resultado desejado para o erro na medição é que o mesmo seja inferior a 2,5 % dentro do intervalo de funcionamento do sensor. Na figura 18 pode-se verificar o resultado típico esperado para este tipo de medição.

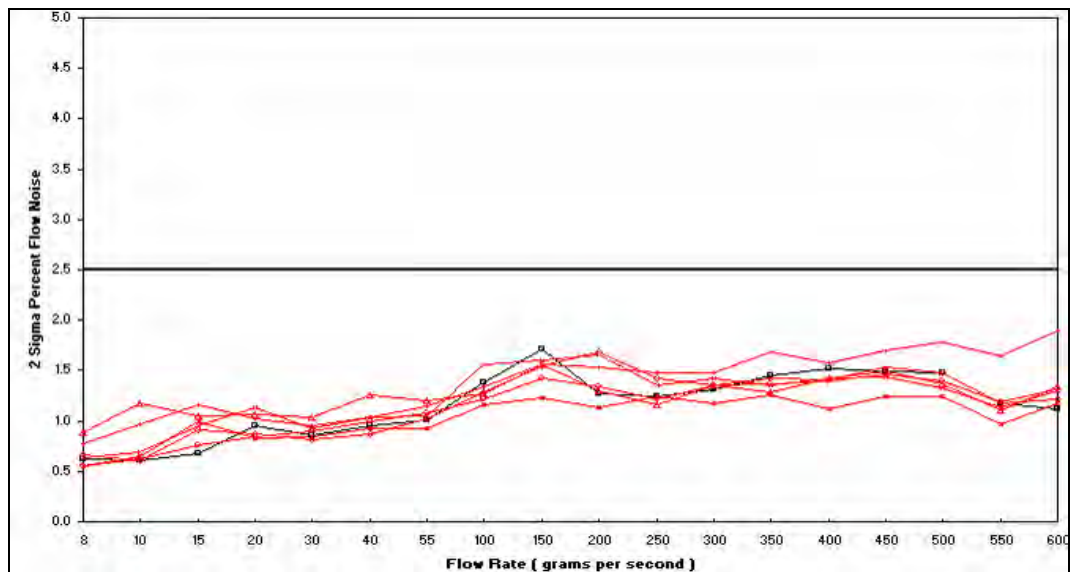


Figura 18 - Relação Sinal-ruído (resultado típico esperado < 2.5%).  
Fonte: Ref. [15]

#### 4.10 Desvio dQ/Q

O segundo parâmetro de robustez para o sistema é medição do desvio de cada um dos pontos de medição da vazão em relação à média. Pode-se entender como o desvio da função de transferência do sensor. Esta medida é usada para gerar uma função de transferência para um único sistema. A Média de vários sistemas é usada para gerar uma função de transferência mestre conhecida como MTF „Master Transfer Function“. Conforme apresentado anteriormente a MTF é exatamente a informação que o sistema de gerenciamento eletrônico do motor usa para identificar qual a quantidade de ar que está sendo admitida pelo motor num determinado instante.

A figura 19 representa a variação de dois sistemas em relação a média da medição entre ambos. Note que para uma mesma vazão mássica os sensores estariam informando um diferente sinal de frequência para o sistema de gerenciamento eletrônico do motor.

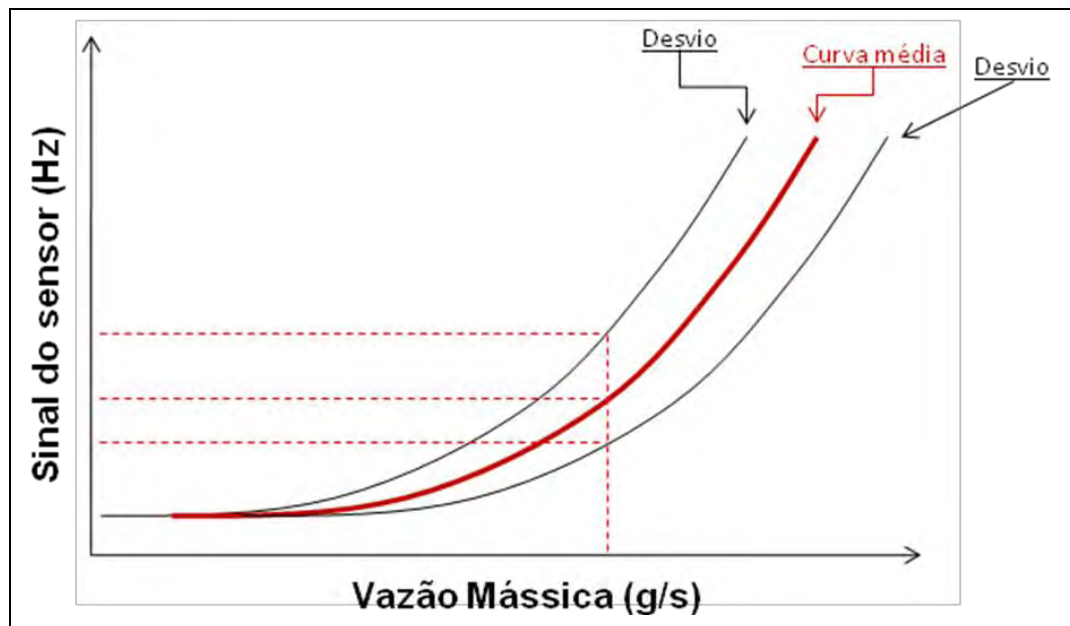


Figura 19 - Desvio dQ/Q

Por esta razão foi criado um parâmetro que classifica o quanto os sistemas podem variar entre si. A avaliação deste parâmetro baseia-se na análise da projeção da curva média na linha de zero e verificando-se a diferença em cada ponto de medição sendo que os valores devem ficar dentro de um intervalo de  $\pm 3\%$ . Na figura 20 pode-se verificar o resultado típico esperado para este tipo de medição.

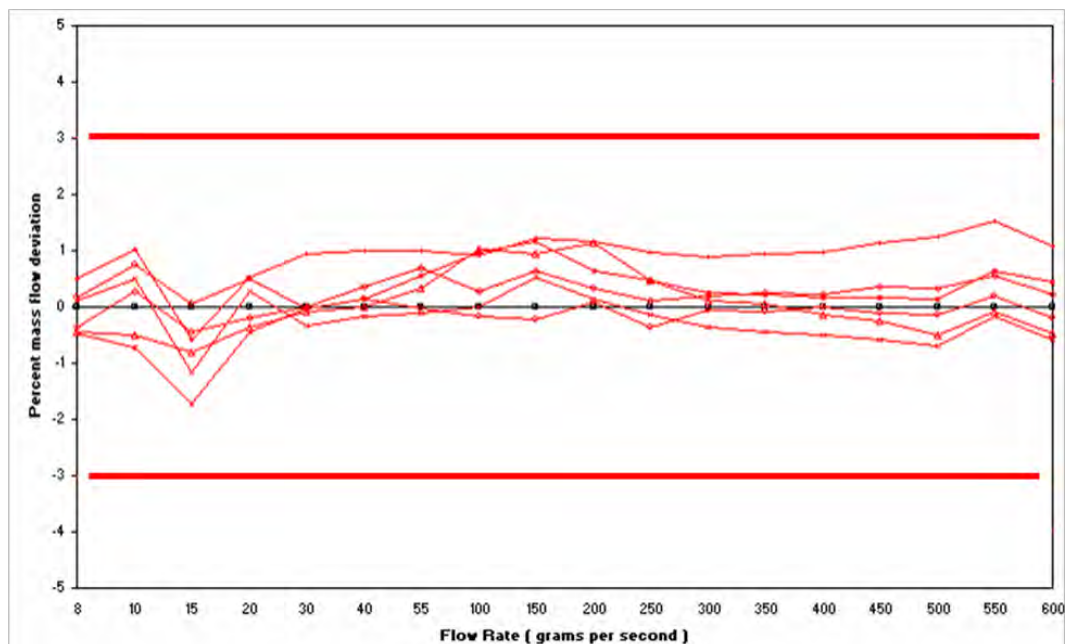


Figura 20 - Relação Desvio (resultado típico esperado)  
Fonte: Ref. [15]



#### 4.11 Ensaio de robustez do sistema (6-way Blocked Filter Test)

O ensaio chamado no idioma inglês de „6-way Blocked Filter Test' é o principal teste de robustez realizado no sistema de admissão. É este teste que determina se o sistema é robusto o suficiente para operar em qualquer condição de carregamento de pó sobre o elemento filtrante.

Apesar de ter a função de validar a robustez do sistema este teste não foi desenvolvido de modo a representar como o elemento filtrante é carregado pelo pó durante a sua vida útil. Este teste é realizado única e exclusivamente para atestar a robustez do sistema quanto ao carregamento desigual do elemento filtrante.

Na figura 21 pode-se verificar como é realizado o teste através do „bloqueio“ das seis regiões do elemento filtrante com fita.

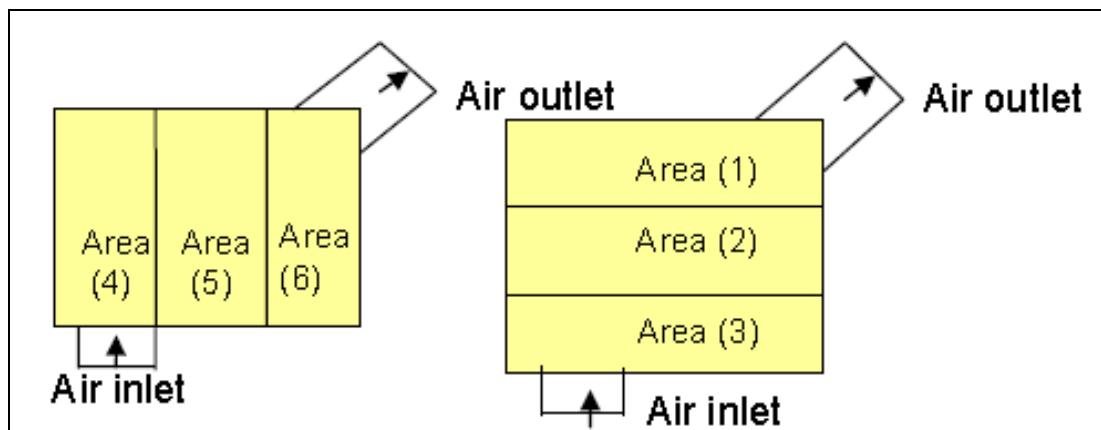


Figura 21 - 6-way Blocked Filter Test: Áreas a serem bloqueadas de 1 à 6.  
Fonte: Ref. [15]

Na figura 22 podemos observar o resultado de um teste realizado para um sistema de admissão de ar padrão. A variação na relação Sinal-ruído é notável entre as regiões bloqueadas do filtro.

Importante notar na figura 22 que apesar do gráfico mostrar que os pontos de medição estão dentro do limite especificado a dispersão dos pontos mostram que o sistema não está robusto suficiente.

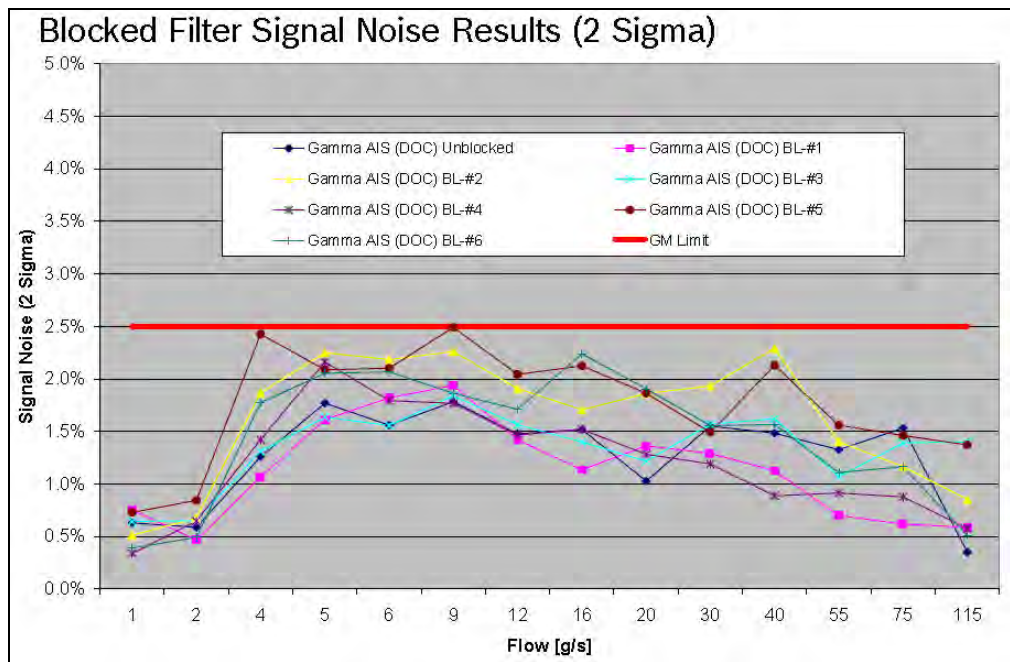


Figura 22 - Exemplo de resultado de Sinal-Ruído para um teste de 'Blocked Filter'. Imagem cedida gentilmente pela empresa Mahle do Brasil LTDA.

A afirmação acima pode ser confirmada pela segunda medição verificada na figura 23. Note que aqui que quando „bloqueia-se” a posição numero 2 o desvio ultrapassa os limites de especificação.

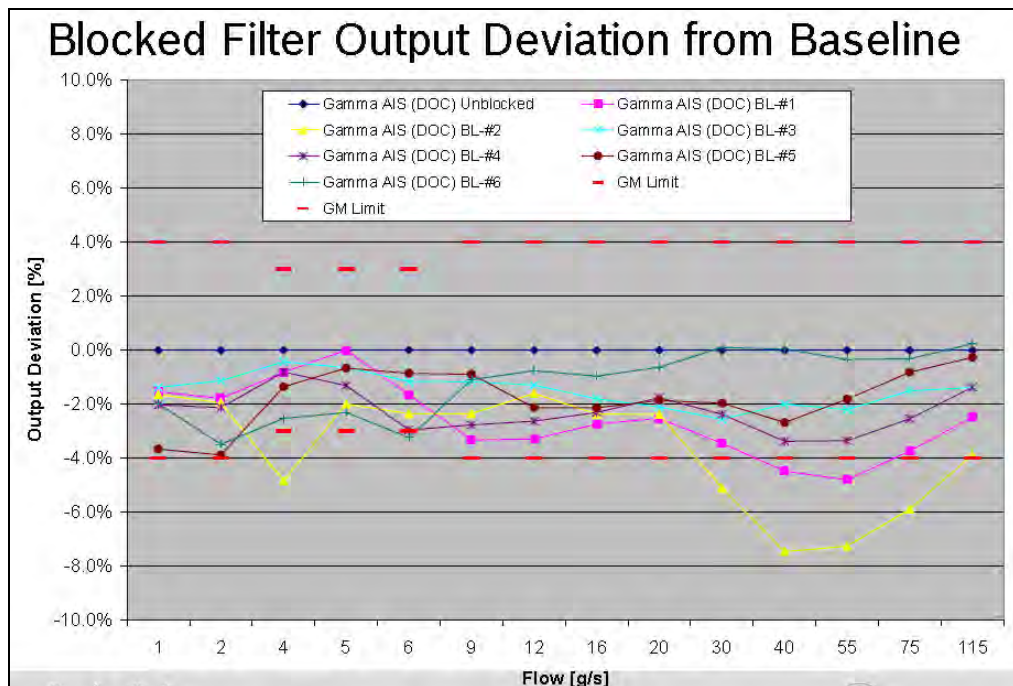


Figura 23 - Exemplo de resultado de 'Desvio' para um teste de 'Blocked Filter'. Imagem cedida gentilmente pela empresa Mahle do Brasil LTDA.

## **5 Projeto de instalação**

### **5.1 Projeto de pesquisa**

Pretende-se analisar com este projeto de pesquisa como o regime de escoamento do ar através do sensor afeta seu sinal de voltagem. A hipótese é que existe uma relação entre o erro do sinal de saída do sensor com as características do fluxo de ar e com a geometria do sistema de admissão de ar. Além disso, pretende-se verificar a importância de cada um dos parâmetros de projeto para entender como realizar a instalação robusta do sensor no sistema de admissão de ar antes da fabricação do primeiro protótipo.

A proposta do projeto é aprender como os elementos geométricos dos sistemas de admissão de ar desenvolvidos com sucesso no passado, via método tradicional (“tentativa e erro”) afetam o sinal do sensor. A partir desta análise, correlacionar os resultados destes sistemas com simulações computacionais para consolidar um procedimento de cálculo capaz de prever o perfeito e robusto funcionamento do sensor instalado no sistema de admissão.

Pretende-se dividir este estudo em duas etapas principais conforme descrito anteriormente. A primeira etapa será a pesquisa realizada nos bancos de dados da General Motors Company. Nesta etapa pretende-se selecionar uma série de sistemas de admissão de ar desenvolvidos com sucesso e analisar todos os relatórios de testes de desenvolvimento típicos deste componente.

A segunda etapa do estudo será analítica. Através do uso de modelos matemáticos dos sistemas de admissão selecionados para o estudo e simulações computacionais, pretende-se determinar qual o regime ou quais os regimes de escoamento ótimos, para o funcionamento pleno do sensor.

## **5.2 O processo de instalação do sensor MAF no sistema de admissão de ar**

O processo de instalação do sensor dentro do sistema tem início com a definição da montadora quanto ao tipo de sistema de admissão de ar (remoto ou integrado). A partir da definição quanto à estratégia da montadora de veículos sobre a escolha do tipo de sistema de admissão a ser utilizado inicia-se o projeto do sistema. Neste caso seguindo a estratégia definida anteriormente o tipo de sistema a ser analisado é o do tipo remoto.

O segundo passo então é determinar qual será a localização do sistema de admissão de ar incluindo seus subconjuntos dentro do „cofre do motor“ de um novo veículo e a partir daí definir quais serão suas dimensões principais. A partir deste ponto definem-se quais serão e como serão os elementos de atenuação dos ruídos oriundos do funcionamento do motor de combustão interna.

O projeto de instalação do sensor MAF começa somente após a conclusão das atividades descritas acima. Sistemas de admissão de ar do tipo remoto normalmente têm na caixa do filtro de ar as seções de entrada e saída bem definidas. Apenas como referência adicional a figura 24 ilustra os principais componentes de um sistema de admissão de ar remoto simples.

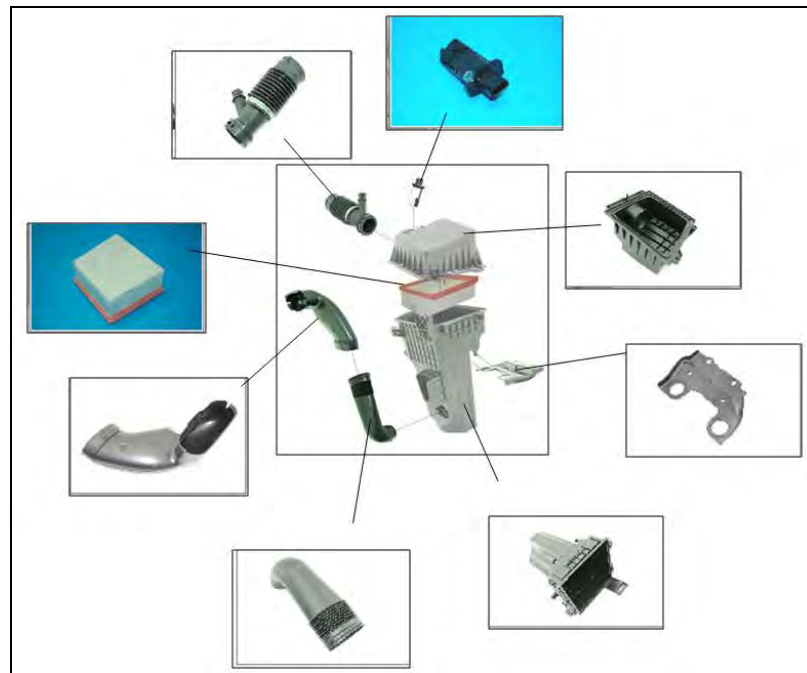


Figura 24 – Sistema de admissão de ar remoto  
Fonte: Ref. [01]

Com desenho inicial do sistema de admissão de ar concluído, o projeto de instalação do sensor MAF começa com a localização do sensor no tubo de saída da tampa da caixa do filtro de ar. Os fabricantes dos sensores MAF têm um manual com recomendações sobre o posicionamento destes sensores no tubo de saída para obtenção dos melhores resultados. Assim recomenda-se inicialmente seguir estas orientações para se ter um ponto de partida para a instalação do sensor.

O segundo passo é verificar através de simulações matemáticas o comportamento do escoamento do ar através do sensor entre as vazões máximas e mínimas do projeto. Nesta etapa verifica-se especificamente o comportamento em algumas velocidades críticas conhecidas e que foram determinadas através de desenvolvimentos anteriores.

O passo seguinte é a construção de protótipos para o teste físico em bancada. Esta é na realidade a etapa chave de todo o processo de desenvolvimento, porque é a partir dos protótipos que se torna possível o processo de ajuste da instalação.

A seguir será discutida cada uma das etapas do desenvolvimento seguindo a descrição proposta pelo fluxograma de projeto.

### 5.2.1 Fluxograma

A lógica básica deste processo de projeto segue a seqüência mostrada no fluxograma da figura 25. Cada uma das etapas representadas no fluxograma serão detalhadas de forma a melhor ilustrar como o processo funciona na sua totalidade.

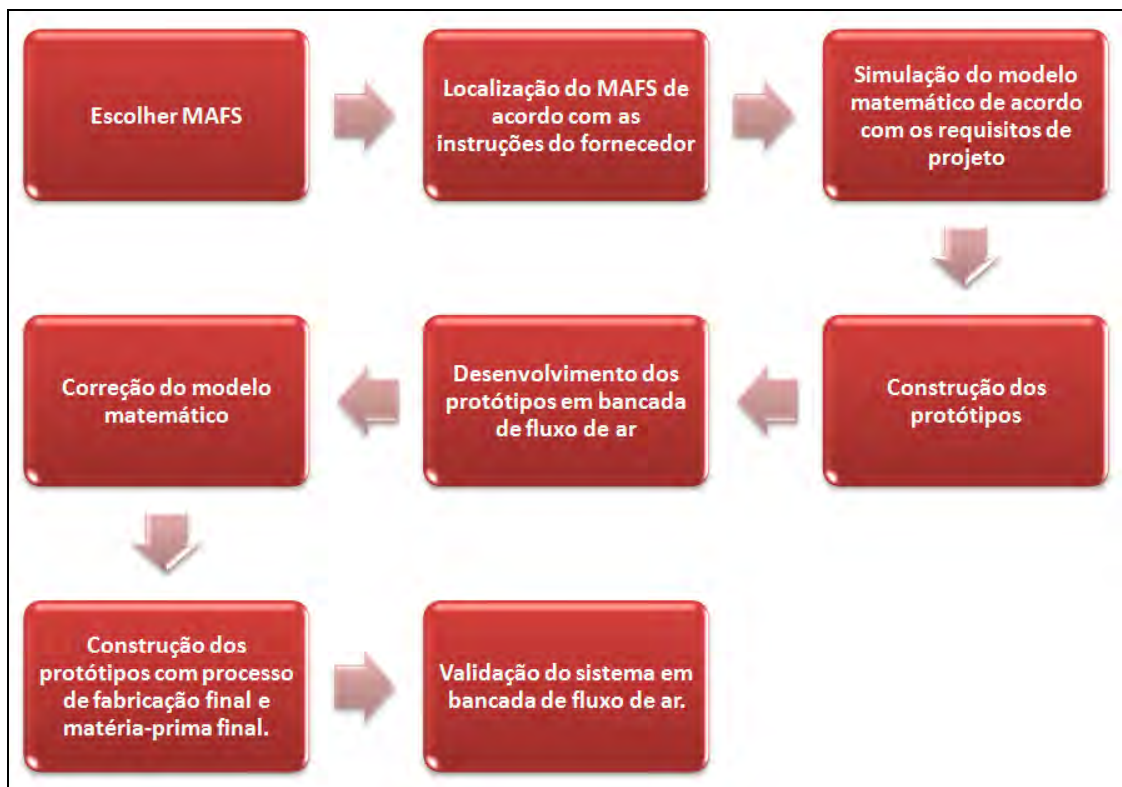


Figura 25 - Fluxograma de projeto de instalação do MAFS

### 5.2.2 Escolha do MAFS

Conforme já apresentado anteriormente existem dois tipos básicos de sensores mais comuns disponíveis no mercado, o sensor de fio quente e o sensor de membrana. A General Motors assim como as outras montadoras possui uma lista com os tipos de sensores recomendáveis à aplicação automotiva. Esta lista inclui somente sensores pré-aprovados através de testes de validação específicos do sensor. Um dos requisitos mais importantes para este sensor é obviamente a qualidade do sinal elétrico proveniente da medição realizada pelo sensor quando instalado em um tubo padrão. Outro critério analisado para este tipo de sensor é a sua resistência mecânica. Todos os componentes instalados em um veículo devem ser submetidos a testes de durabilidade em condições extremas de temperatura, umidade e salinidade. O uso de substâncias restritas como, por exemplo, chumbo na fabricação do sensor também é considerado como um item relevante para desclassificação.

Concluí-se então que a mencionada lista não é muito extensa em função dos testes requeridos para comprovar a robustez do sensor e que o mesmo atende a todos os requisitos impostos para aplicação automotiva.

Por esta razão o processo de seleção do fornecedor do sensor medidor de vazão mássica de ar é relativamente curto. Isto ocorre porque somente os fornecedores pré-aprovados podem participar do processo enviando cotações. Através deste procedimento determina-se qual dos sensores aprovados apresenta o menor custo e menor investimento para o projeto do sistema de admissão de ar e do veículo como um todo.

A decisão neste ponto do projeto é estritamente comercial visto que todos os sensores disponíveis na lista apresentam um desempenho mínimo aceitável. Mesmo assim existe por parte dos engenheiros responsáveis pelo desenvolvimento do sistema de admissão de ar uma preferência técnica de um fornecedor de sensores sobre outro. Isto ocorre por duas razões principais. A primeira é que nem todos os sensores apresentam o mesmo desempenho. A segunda é que alguns fornecedores deste tipo de sensor provem um melhor suporte técnico quando necessário.

### **5.2.3 Localização do sensor dentro do sistema seguindo o procedimento recomendado pelo fornecedor do sensor escolhido.**

Conforme apresentado no item anterior o sensor a ser aplicado a um novo sistema é definido através da definição de seu fabricante. Naturalmente cada fabricante de sensor medidor de vazão mássica de ar (MAFS) tem seu próprio guia de instalação. Neste guia são descritas por eles as características preferenciais para instalação do sensor em uma aplicação qualquer. O maior problema que se enfrenta quando o assunto é instalação de qualquer componente em um veículo, principalmente quando o componente deve ser instalado no „cofre do motor“, recai sobre o espaço disponível para esta instalação. Por esta razão nem sempre é possível construir o sistema de admissão de ar de acordo com as linhas de guia desenvolvidas pelo fornecedor do sensor. Este é mais um dos motivos pelos quais este trabalho justifica sua necessidade.

As principais orientações e características descritas nos manuais de instalação deste tipo de sensor são:

- A integração do sensor a tampa do filtro de ar;
- No tubo onde o sensor será posicionado deve-se ter pelo menos 50 mm de tubo reto à montante do sensor;
- O tubo deve ser desenhado de tal forma que o elemento sensor fique posicionado exatamente no centro da seção transversal do tubo;
- Quando linhas de partição nos moldes de fabricação da tampa do filtro de ar são necessárias as mesmas devem ser posicionadas com pelo menos 20 mm de distancia à jusante e à montante da linha média do sensor tomando como referência a vista lateral direita da seção de montagem em corte;



Para melhor ilustrar as recomendações listadas acima, na figura 26 pode-se observar um exemplo de integração recomendada para o MAFS no sistema de admissão de ar. Note que o sensor está instalado na tampa da caixa do filtro de ar.

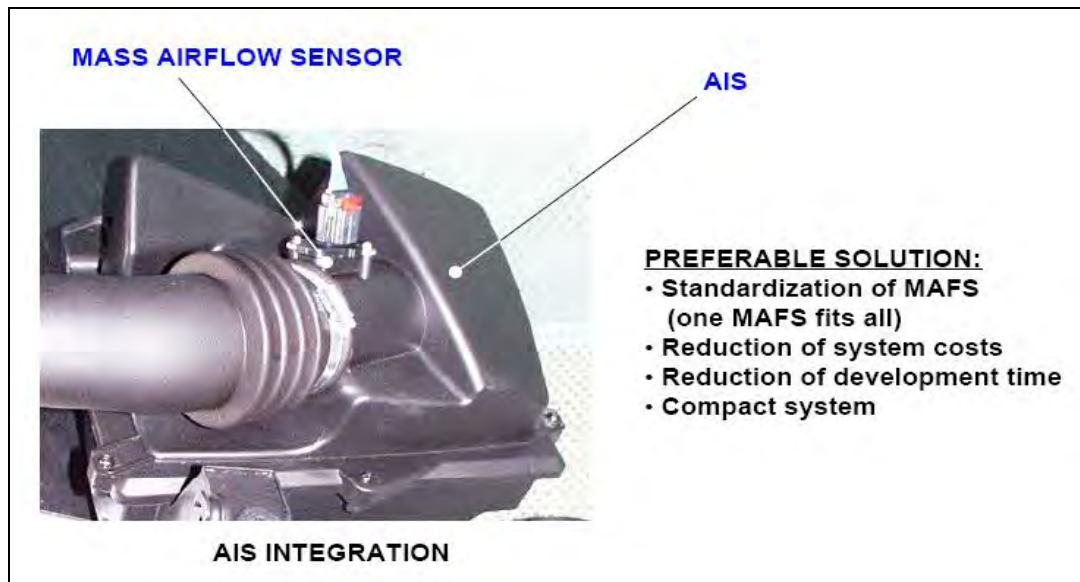


Figura 26 - Exemplo de Integração do MAFS à tampa da caixa do filtro de ar  
Fonte: Ref. [20]

Conforme descrito na figura 26 este tipo de solução proporciona ainda:

- Maior padronização do sensor MAFS;
- Redução de custos no sistema de admissão de ar em questão;
- Redução do tempo de desenvolvimento do sistema de admissão de ar;
- Projeto mais compacto para o sistema de admissão de ar;

Já na figura 27 pode-se observar um exemplo ilustrativo de montagem com os requisitos e tipos desejáveis de elementos filtrantes.

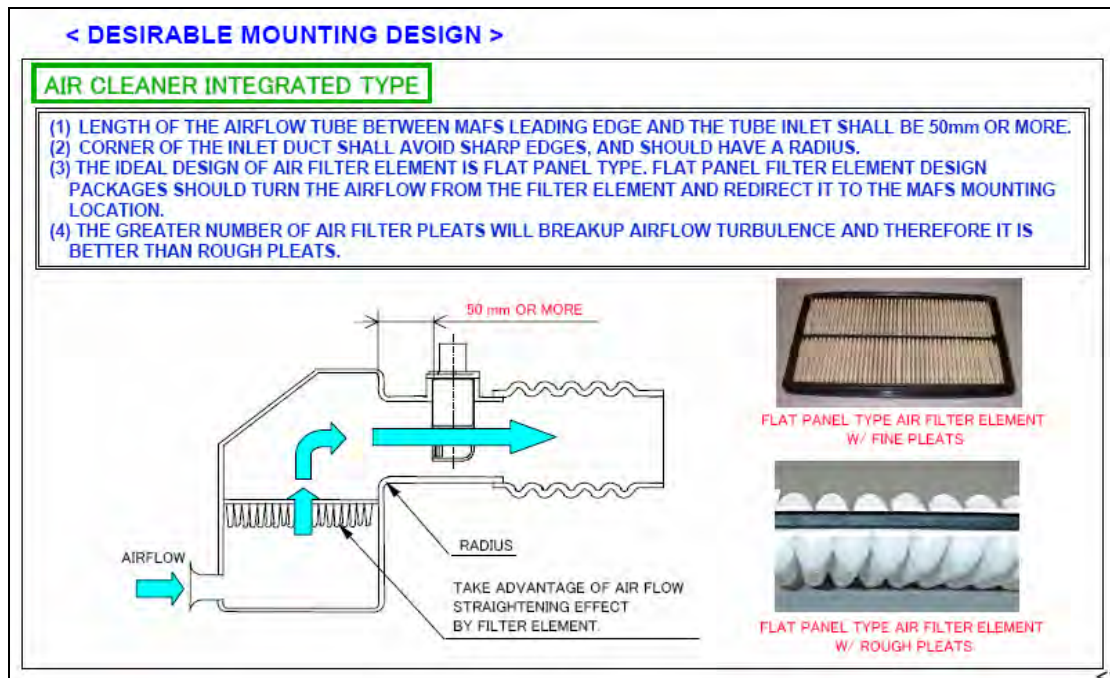


Figura 27 - Exemplo ilustrativo de montagem e requisitos desejáveis  
Fonte: Ref. [20]

A melhoria no fluxo de ar em função do tipo de elemento não foi citada acima. Todavia a adição dos chamados „plissês” nos elementos filtrantes (as dobras existentes nos elementos filtrantes manufaturados em papel) serve para melhorar o alinhamento dos vetores do ar que atravessam sua face. A inclusão de mais plissês reduz a turbulência na seção à jusante da secção de filtragem e, portanto melhora o fluxo do ar antes da entrada no tubo de saída da tampa do filtro de ar.

Nas figuras 28 e 29 podem-se observar exemplos ilustrativos de montagens indesejáveis. Dutos com expansão à montante da secção de alojamento do MAFS ou dutos com curvas também à montante da secção de alojamento do MAFS não são recomendados.

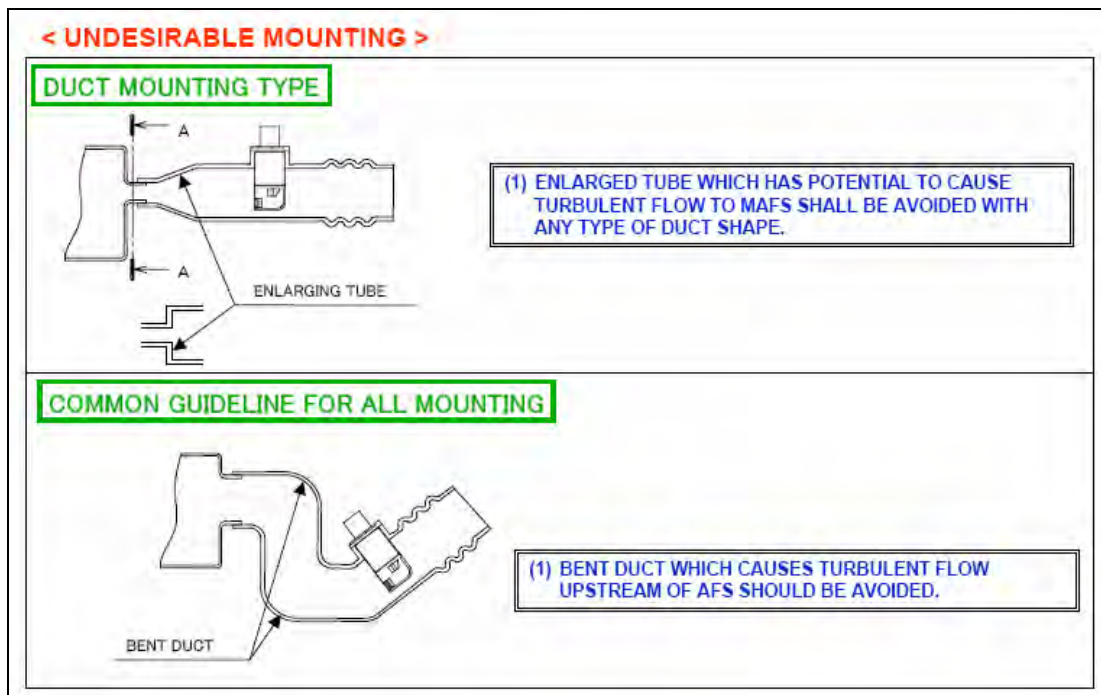


Figura 28 - Exemplo ilustrativo de montagens indesejáveis 1  
Fonte: Ref. [20]

Realizar a montagem do sensor em dutos ou em peças com pouca rigidez onde a pulsação do ar pode causar desvios na medição do sensor é outro exemplo de montagem indesejada.

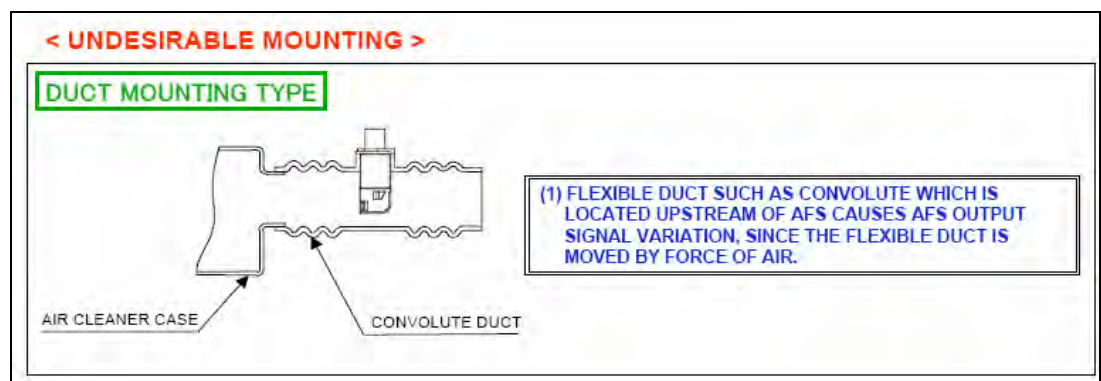


Figura 29 - Exemplo ilustrativo de montagens indesejáveis 2  
Fonte: Ref. [20]

#### **5.2.4 Localização do sensor via simulação matemática**

As imagens das simulações matemáticas foram adicionadas de forma a ilustrar o processo de localização do sensor dentro do sistema. NOTA: As escalas de velocidade e pressão foram suprimidas nas figuras apresentadas nesta seção. Todavia as figuras são relativas a análises comparativas das mesmas condições de vazão, temperatura, umidade e pressão. O efeito das mesmas nesta seção é meramente qualitativo.

Acredita-se ainda ser importante destacar que a simulação do escoamento através do uso de ferramentas computacionais serve apenas como um guia. Ainda não é possível determinar diretamente o desempenho da leitura do sensor medidor da vazão mássica de ar através de uma análise computacional somente. Entretanto os resultados obtidos através das simulações apresentadas a seguir são relativos a um sistema que antes das modificações não preenchia todos os requisitos de funcionamento esperado. Somente após as modificações propostas o através das simulações o sistema de admissão foi testado e o modelo desenvolvido foi validado.

Posto isto a primeira parte da simulação é a determinação do volume de controle (neste caso do sistema de admissão de ar completo) e as características físicas do fluido (neste caso do ar). Esta etapa do processo tem como função determinar o modo como o ar atravessa o sistema de admissão de ar.

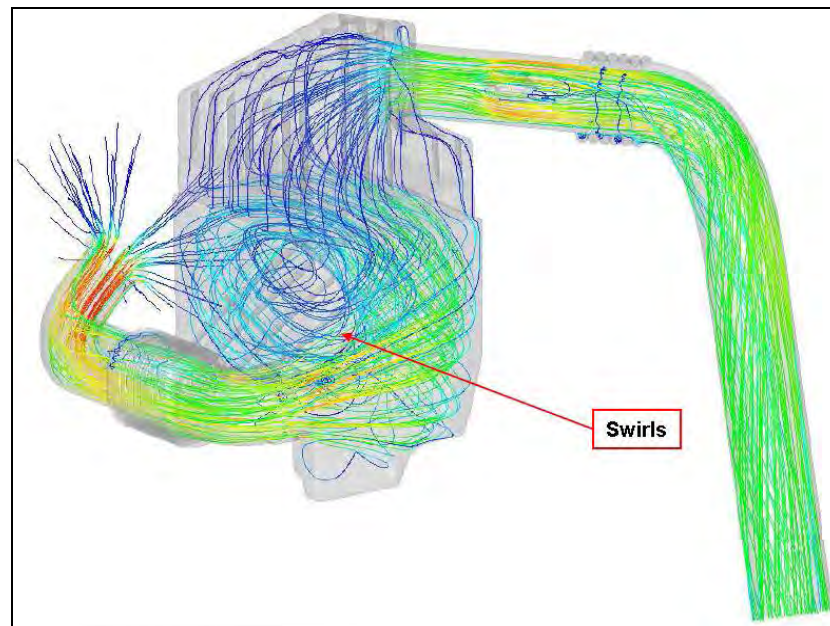


Figura 30 - Simulação matemática: Determinação do volume de controle. Imagem de uma simulação cedida gentilmente pela empresa Mann+Hummel.

Após determinar o modo como o ar atravessa o sistema de admissão de ar é possível analisarmos o comportamento do ar localizado na seção de saída do filtro de ar região onde o MAFS é instalado.

A figura 31 apresenta um zoom no tubo de saída da tampa do filtro de ar mostrado na figura 30. A intenção aqui é focar na região de instalação do sensor.

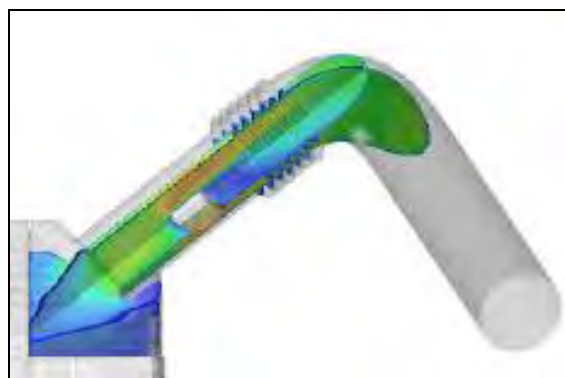


Figura 31 - Zoom na região de instalação do sensor. Imagem de uma simulação cedida gentilmente pela empresa Mann+Hummel.

Pode-se observar na figura 32 o perfil de velocidades ao redor do MAFS em uma vista lateral da seção de montagem. Nesta análise nota-se que o ar na seção de entrada no tubo onde o MAFS está alojado apresenta um

grande gradiente de velocidades em função da posição radial. Este gradiente de velocidades na seção à montante do sensor gera problemas de medição e é um forte indicador de que o sensor não será capaz de atender os requisitos de ruído de sinal e, portanto não será capaz de medir corretamente a quantidade em massa de ar que atravessa o sistema em todas as condições de uso do sistema.

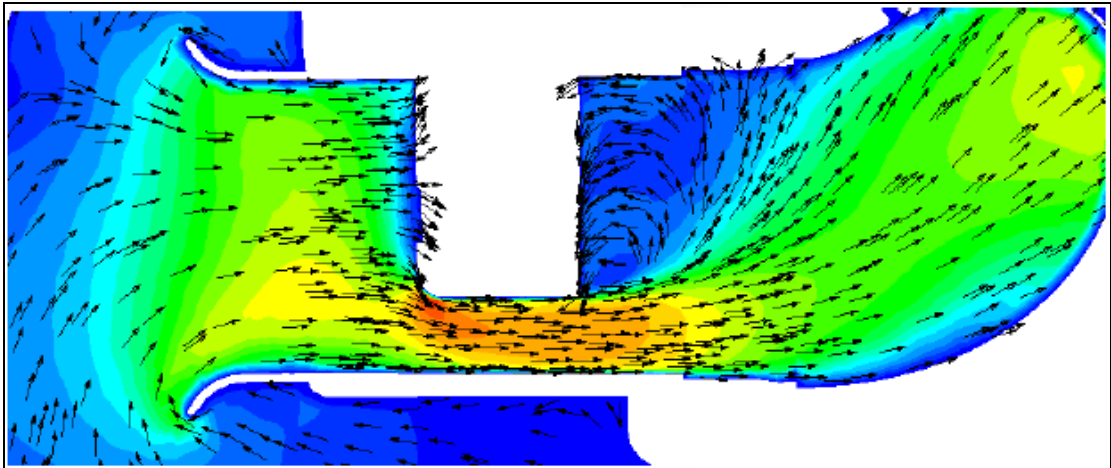


Figura 32 - Vista lateral direita da seção do tubo na região de instalação do sensor - proposta original.

Imagem de uma simulação cedida gentilmente pela empresa Mann+Hummel.

Na figura 33 pode-se observar o perfil de velocidades ao redor do MAFS em uma vista em planta da seção de montagem. Novamente nesta vista pode-se notar que existe uma diferença de velocidades em função da posição radial na região de montagem do MAFS. Conforme mencionado acima, este gradiente de velocidades na seção à montante do sensor gera problemas de medição e é um forte indicador de que o sensor não será capaz de atender os requisitos de ruído de sinal necessários para validar o sistema.

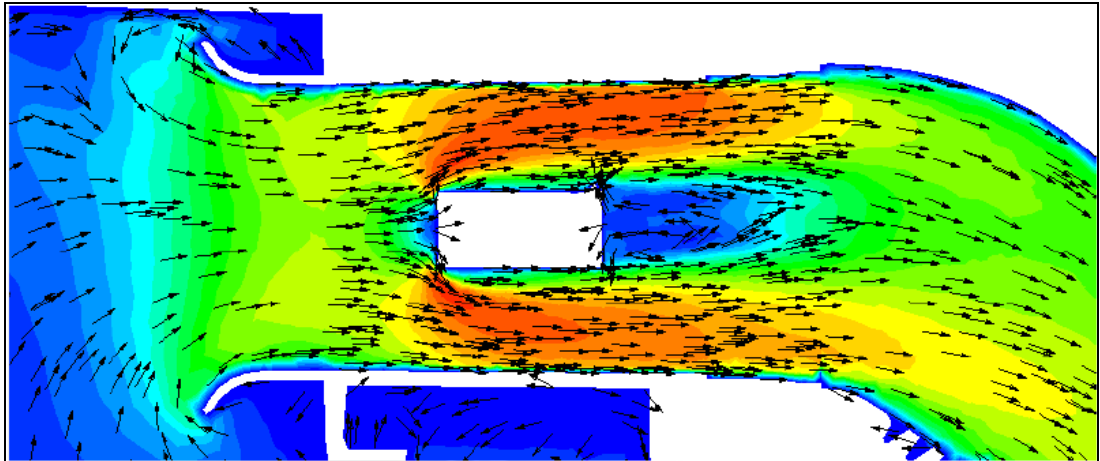


Figura 33 - Vista em planta da seção do tubo na região de instalação do sensor - proposta original.

Imagem de uma simulação cedida gentilmente pela empresa Mann+Hummel.

Pode-se observar na figura 34 o perfil de velocidades ao redor do MAFS em uma vista lateral da seção de montagem em um sistema otimizado. Pode-se observar nesta nova análise que o ar na seção de entrada no tubo onde o MAFS é alojado apresenta gradiente de velocidades em função da posição radial menor do que no caso original. Quando este ponto é atingido pode-se passar para a próxima etapa que é a construção dos primeiros protótipos para medição em bancada de fluxo.

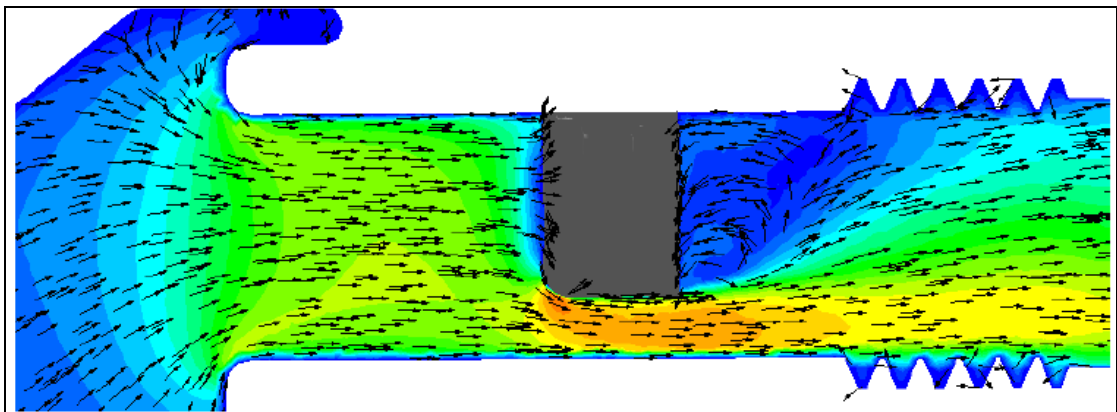


Figura 34 - Vista lateral direita da seção do tubo na região de instalação do sensor - proposta otimizada

Imagem de uma simulação cedida gentilmente pela empresa Mann+Hummel.

Na figura 35 pode-se observar o perfil de velocidades ao redor do MAFS em uma vista em planta da seção de montagem em um sistema

otimizado. Novamente nesta vista pode-se notar a melhoria ocorrida no sistema após a otimização.

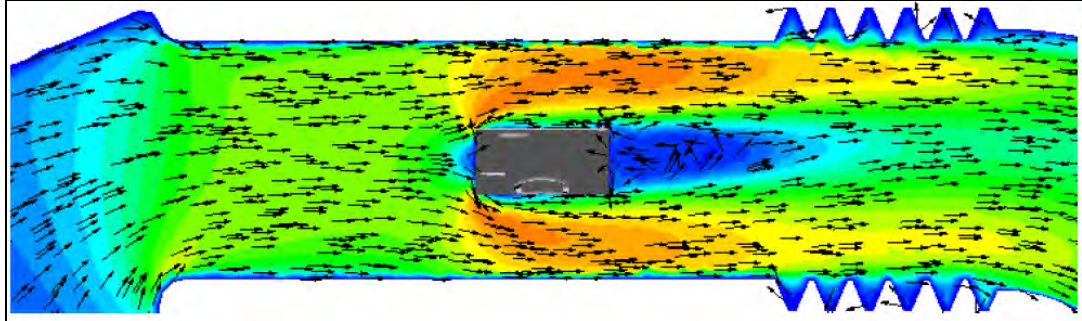


Figura 35 - Vista em planta da seção do tubo na região de instalação do sensor - proposta otimizada.

Imagem de uma simulação cedida gentilmente pela empresa Mann+Hummel.

### 5.2.5 Processos de construção de protótipos para validação do desenho do sistema

Para garantir fidelidade ao modelo matemático construído e simulado virtualmente os protótipos dos sistemas de admissão veicular devem ser fabricados através de processos que garantam todas as características da geometria otimizada na simulação. No Apêndice C encontra-se disponível uma descrição dos principais processos de prototipagem rápida disponíveis no mercado.

O processo normalmente escolhido para criação dos primeiros protótipos de sistema de admissão de ar é o SLS ou „Selective Laser Sintering“ que pode ser aplicado na fabricação de peças plásticas ou metálicas. Este processo começa com a preparação do arquivo matemático do modelo tridimensional do sistema de admissão de ar a ser testado. O processo de construção do protótipo em plástico inicia-se com o aquecimento de uma „cuba“ que abriga nylon em pó e um laser „sinteriza“ camada por camada o modelo projetado na etapa anterior. Então é feito o acabamento e resfriamento da peça para que a mesma então possa ser colocada a prova.



## **5.2.6 Desenvolvimento do protótipo em bancada**

Após a construção dos primeiros protótipos através do processo de fabricação descrito acima pode-se então iniciar a atividade de validação em bancada de fluxo de ar. Esta é fundamentalmente a etapa mais importante do processo visto que é nesta etapa que se define se o sistema está robusto ou não para uso veicular.

### **5.2.6.1 Ajuste do sistema diretamente em bancada de fluxo de ar sônico (correção do modelo matemático)**

Na figura 36 pode-se verificar um exemplo de sistema de admissão de ar compacto com todos seus componentes montados. Note-se que este sistema não possui nenhum tipo de elemento volumétrico para ajuste de ruídos oriundos do motor. Neste caso o duto de entrada do filtro de ar é manufaturado em um material especial fonoabsorvente responsável por exercer a função de redução de ruídos oriundos do motor, de modo a reduzir o tamanho e a massa do sistema desenvolvido.



Figura 36 - Exemplo de um sistema de admissão de ar.  
Imagem cedida gentilmente pela empresa Mahle do Brasil LTDA.

Assim que os primeiros protótipos são construídos os mesmos são submetidos a validação em bancada de fluxo. Normalmente é necessário algum tipo de ajuste no sistema após a primeira bateria de testes.

Na figura 37 apresenta-se um exemplo de ajuste para verificação da influência do nervramento estrutural interno na relação Sinal-ruído do sistema. Este tipo de verificação é feito somente para analisar a influência da geometria interna do filtro de ar.



Figura 37 - Exemplo de modificações realizadas para testes em bancada.  
Imagens cedidas gentilmente pela empresa Mahle do Brasil LTDA.

Na figura 38 pode-se verificar outro exemplo deste tipo de trabalho na geometria interna da tampa do filtro de ar. Além da adição de nervuras pode-se ainda modificar a posição do elemento filtrante em relação à distância entre sua face „limpa“ e o bocal de saída da tampa do filtro de ar.

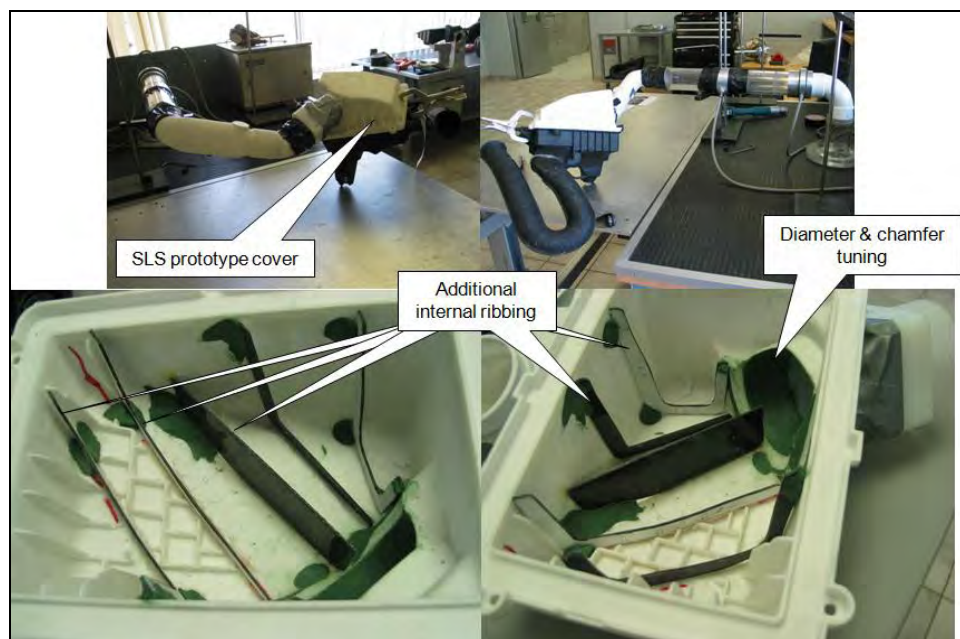


Figura 38 - Modificações para verificação de sensibilidade do sistema.  
Imagens cedidas gentilmente pela empresa Mahle do Brasil LTDA.

Note que o protótipo mostrado na figura 39 foi construído de forma a permitir movimentos de translação e rotação ao sensor em relação ao eixo longitudinal do tubo de saída da tampa do filtro de ar. Este tipo de alternativa é

normalmente utilizada para reduzir o tempo de „set-up“ de teste. Além disso, esse tipo de alternativa reduz gastos com protótipos visto que ao reposicionar o tubo de saída temos uma nova configuração de sistema. Este tipo de dispositivo proporciona ainda infinitas possibilidades de posicionamento o que permite ao engenheiro de desenvolvimento encontrar a melhor posição de instalação do sensor no tubo de saída da tampa do filtro de ar.



Figura 39 – Detalhe do dispositivo para permitir movimentos de translação e rotação. Imagem cedida gentilmente pela empresa Mahle do Brasil LTDA.

A figura 40 mostra o desenvolvimento do design após uma série de interações e modificações feitas em bancada. Após este trabalho de adição e exclusão de peças do sistema chega-se a um design otimizado.

Por fim é construído um protótipo contendo todas as alterações para uma verificação final e para a caracterização da curva de transferência do sensor. Isto porque a central eletrônica de gerenciamento do motor identifica a quantidade de ar que está sendo admitida através da análise da variação do sinal de voltagem da saída do sensor.

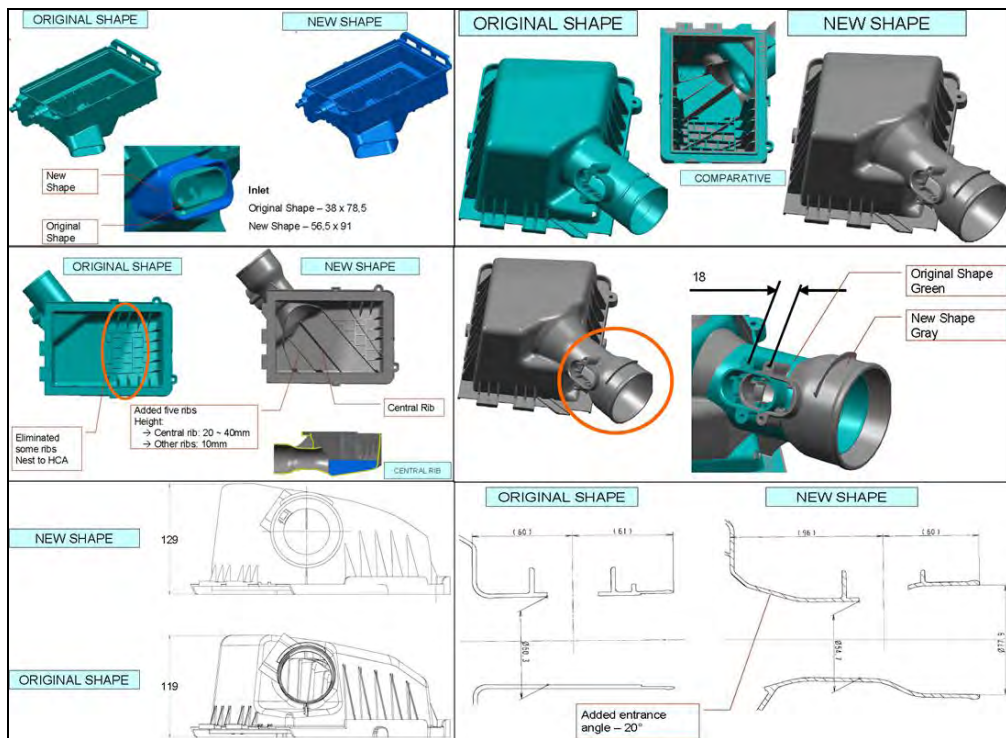


Figura 40 - Detalhamento de uma evolução de design  
Imagens cedidas gentilmente pela empresa Mahle do Brasil LTDA.

A figura 41 mostra mais detalhes sobre as interações realizadas na tampa do filtro de ar.

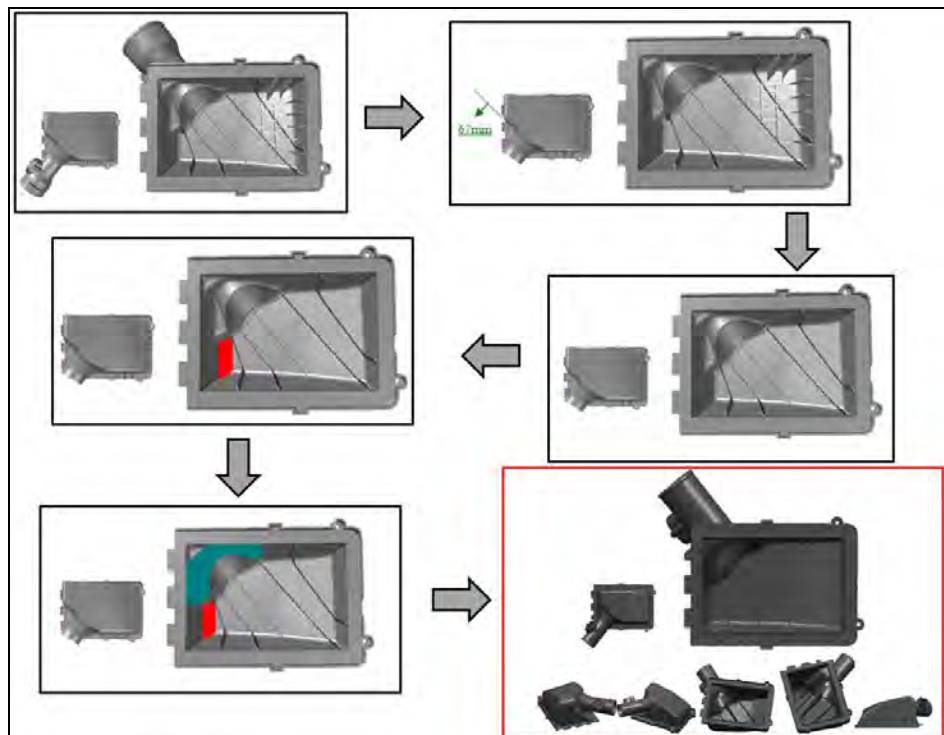


Figura 41 - Design otimizado desde um sistema básico inicial.  
Imagens cedidas gentilmente pela empresa Mahle do Brasil LTDA.

### 5.2.6.2 Ajuste do sistema de admissão de ar através do SPIV (correção do modelo matemático)

Existem situações onde o projeto permite um tempo maior de investigação. Nestes casos é possível um aprofundamento maior no estudo de instalação do sensor no sistema de admissão de ar. Um dos métodos a que se pode recorrer nestes casos é a „Velocimetria“ por Imagem de Partículas. Isto é a análise do escoamento através de um sistema de visualização das partículas marcadoras inseridas no fluxo de ar. Este método é conhecido no idioma inglês como Particle Image Velocimetry (PIV).

No caso dos sistemas de admissão de ar se faz necessária uma visualização tridimensional. Recorresse então para „Velocimetria“ por Imagem Estéreo de Partículas ou Stereo Particle Image Velocimetry (SPIV). Aqui o processo de medição é fundamentalmente o mesmo, porém com duas câmeras. No Apêndice B foi acrescentada uma explicação a respeito destes dois processos de medição de forma a melhor ilustrar como eles são realizados.

As figuras 42 e 43 mostram como o posicionamento das câmeras é realizado de forma a permitir a medição do fluxo de ar em dois planos distintos. Isto é feito desta forma para permitir a visualização do fluxo de ar de forma tridimensional.



Figura 42 - Posicionamento das câmeras para medição SPIV na direção do fluxo de ar  
Imagem cedida gentilmente pela empresa Mann+Hummel.

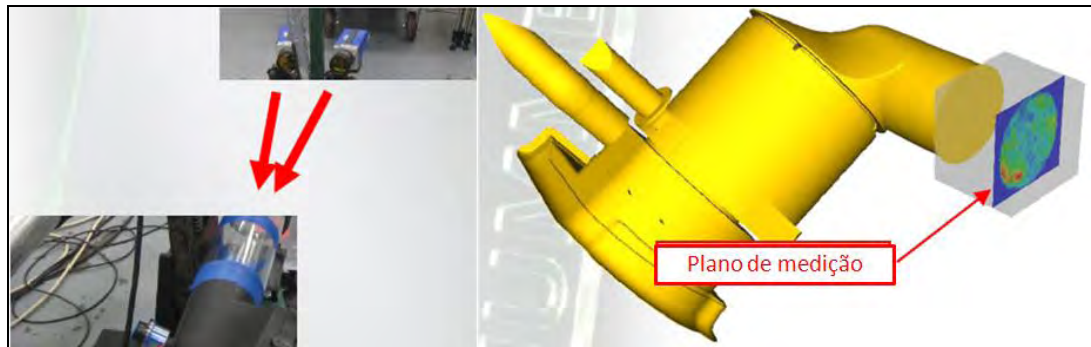


Figura 43 - Posicionamento das câmeras para medição SPIV ortogonalmente ao fluxo de ar  
Imagem cedida gentilmente pela empresa Mann+Hummel.

Para o pós-processamento dos dados coletados através do método SPIV normalmente utiliza-se a computação gráfica. A computação gráfica auxilia os engenheiros a enxergar melhor os resultados da medição. Para facilitar ainda mais a visualização dos dados, além do volume de controle destacado no cubo em verde na figura 44, normalmente é modelado no arquivo de pós-processamento um modelo do filtro de ar ou algum outro componente do sistema de admissão de ar.

Novamente acredita-se ser importante destacar que os resultados obtidos através das medições apresentadas a seguir são relativos a um sistema que antes das modificações não preenchia todos os requisitos de funcionamento esperados para o sensor instalado no sistema de admissão de ar. Somente após as modificações propostas o sistema foi testado e o modelo desenvolvido foi validado.

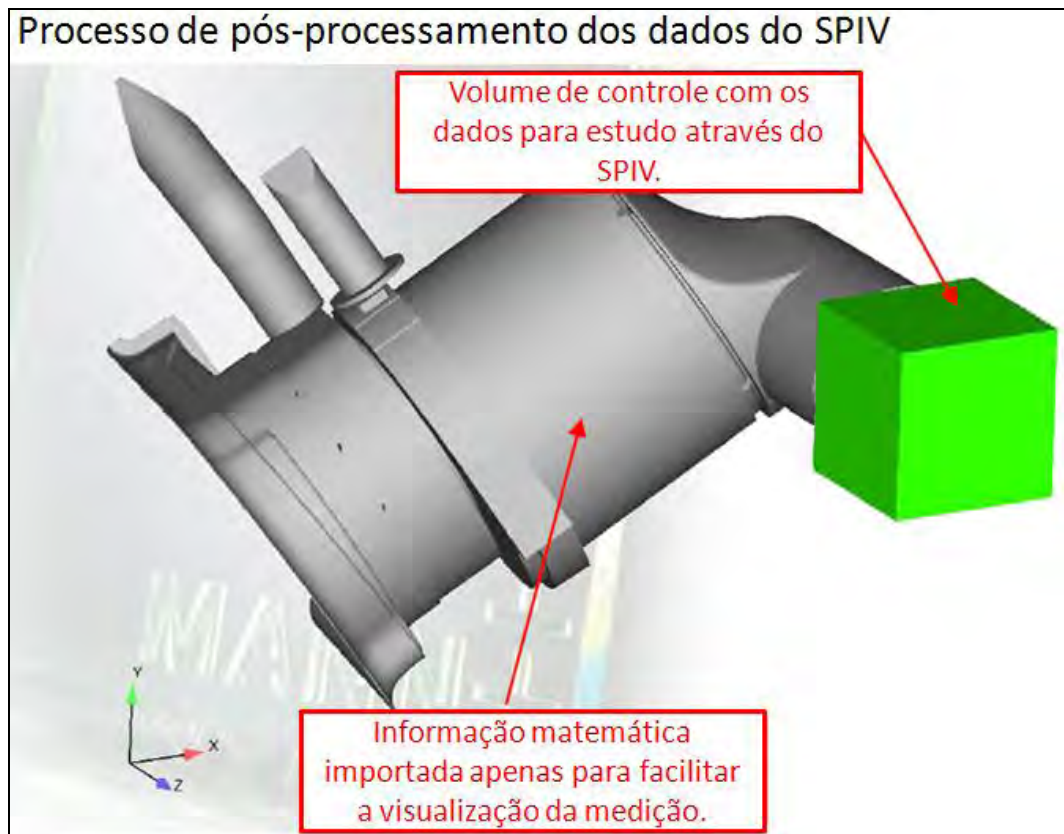


Figura 44 – Visualização dos volumes de controle para a análise final através do SPIV  
Imagem cedida gentilmente pela empresa Mann+Hummel.

De posse do modelo de pós-processamento pode-se então começar a análise sobre o que está ocorrendo com o fluxo de ar na seção de estudo. Na figura 45 é possível observar a maneira como o fluxo de ar se desenvolve dentro do volume de controle. Novamente é interessante verificar que em função qualidade dos dados que se pode obter através deste tipo de análise fica fácil definir os movimentos das partículas de ar atravessando a fronteira do volume de controle. Porém mais do que isto é possível criar inúmeras seções dentro do volume estudado e a partir delas verificar qualquer outro detalhe que for de interesse.



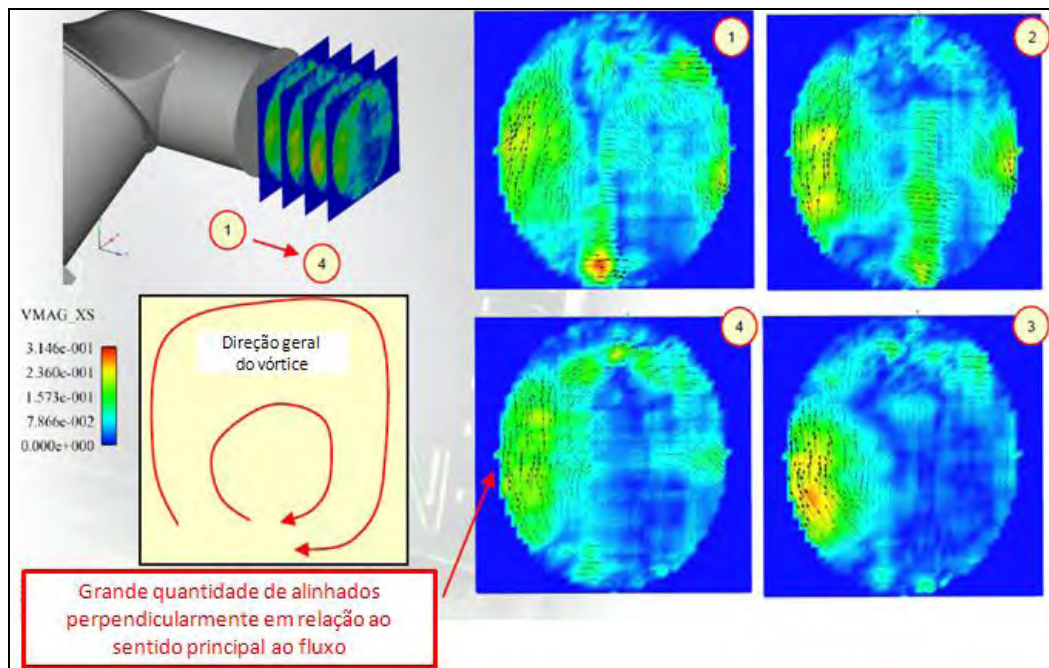


Figura 45 – Padrão de escoamento dentro do volume de controle  
Imagem cedida gentilmente pela empresa Mann+Hummel.

Conforme mencionado o SPIV permite a criação de uma visualização tridimensional do fluxo de ar ou de gás em estudo. A figura 46 ilustra exatamente a criação desta visualização. Note-se que neste caso o estudo foi realizado com diferentes tipos de configurações do elemento filtrante. A figura 46 apresenta as diferenças encontradas no fluxo de ar quando o elemento filtrante é bloqueado nas seis posições.

A „nuvem” verde representa as regiões onde existe um alto grau de dispersão dos vetores de velocidade do ar ou as regiões onde a turbulência é maior. Esta visualização só é possível através de uma medição realizada através deste método.

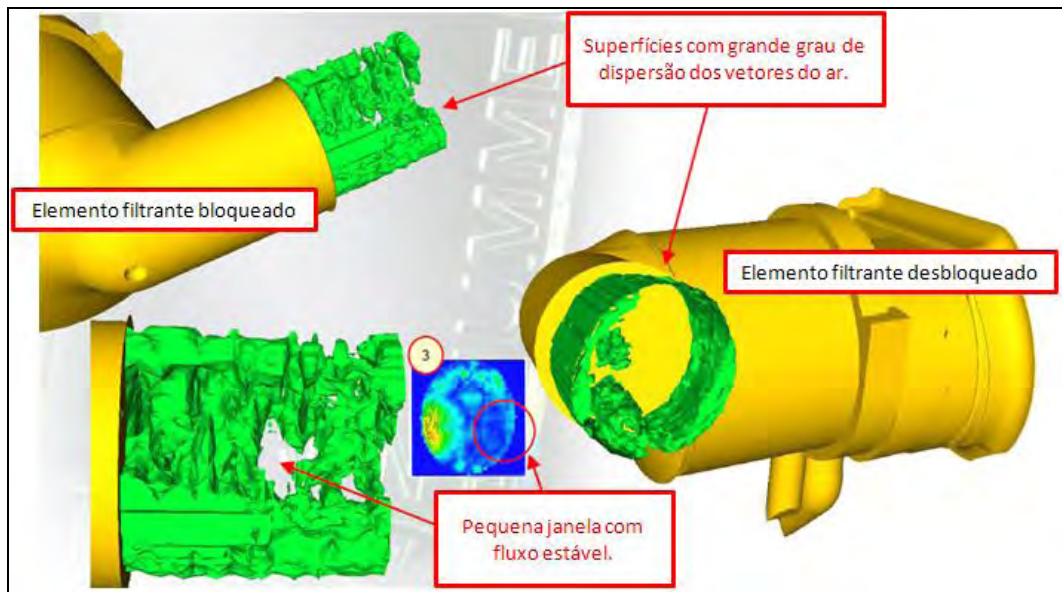


Figura 46 – Visualização tridimensional do perfil de turbulência do ar atravessando o duto de saída de um filtro de ar  
Imagem cedida gentilmente pela empresa Mann+Hummel.

É possível observar na figura 47 quão difícil é encontrar a melhor região para a instalação do sensor neste sistema em particular. A figura 33 auxilia ainda no entendimento sobre a criação da visualização tridimensional do fluxo. Sem este tipo de análise seria quase impossível encontrar o melhor ponto para instalação do sensor dentro deste sistema especificamente.

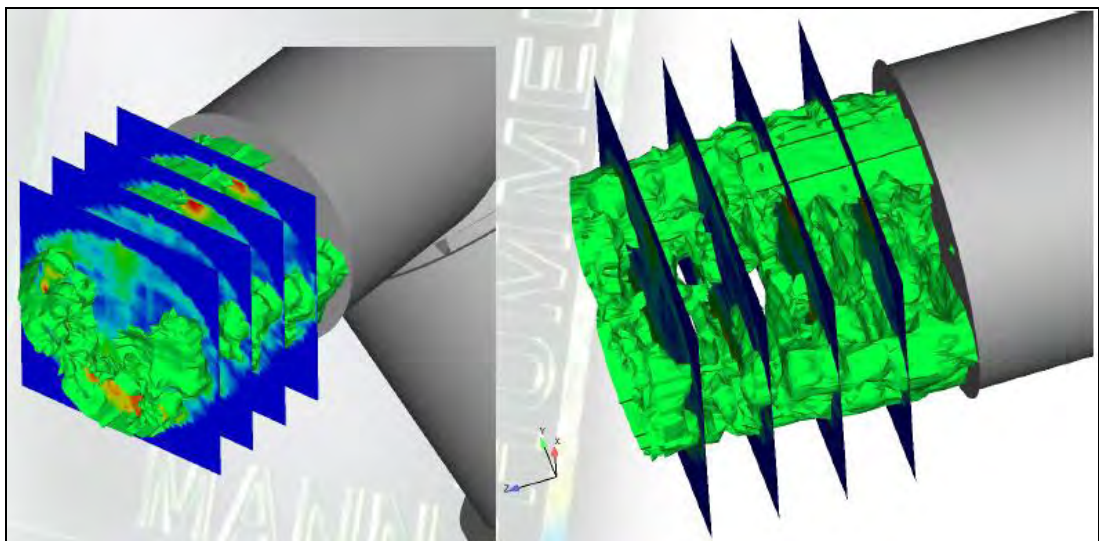


Figura 47 – Visualização tridimensional do perfil de turbulência do ar atravessando o duto de saída de um filtro de ar  
Imagem de uma simulação cedida gentilmente pela empresa Mann+Hummel.

Na figura 48 podem-se observar alguns planos de medição selecionados apenas para exemplificar como a visualização é gerada. É possível ainda notar como os vetores de velocidade encontram-se desalinhados em relação ao sentido do fluxo de ar.

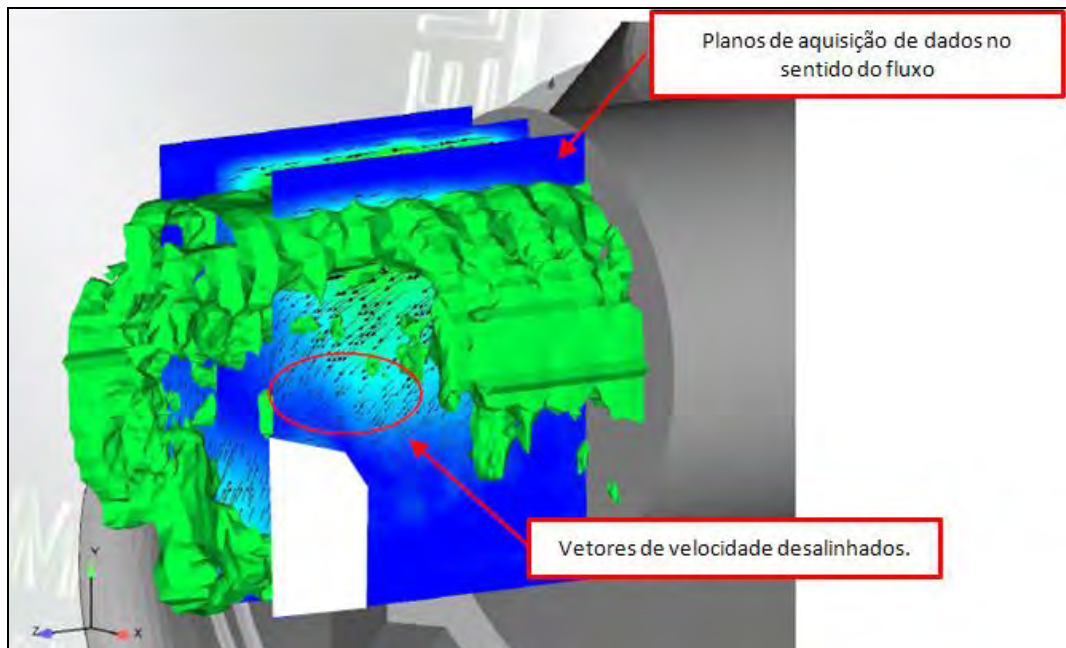


Figura 48 – Visualização tridimensional do perfil de turbulência do ar atravessando o duto de saída de um filtro de ar  
Imagem cedida gentilmente pela empresa Mann+Hummel.

Pode-se observar na figura 49 que existe uma região onde os vetores de velocidade estão alinhados na direção do fluxo, mesmo assim a região em destaque não é recomendada em função da velocidade do escoamento e da turbulência existente no local.

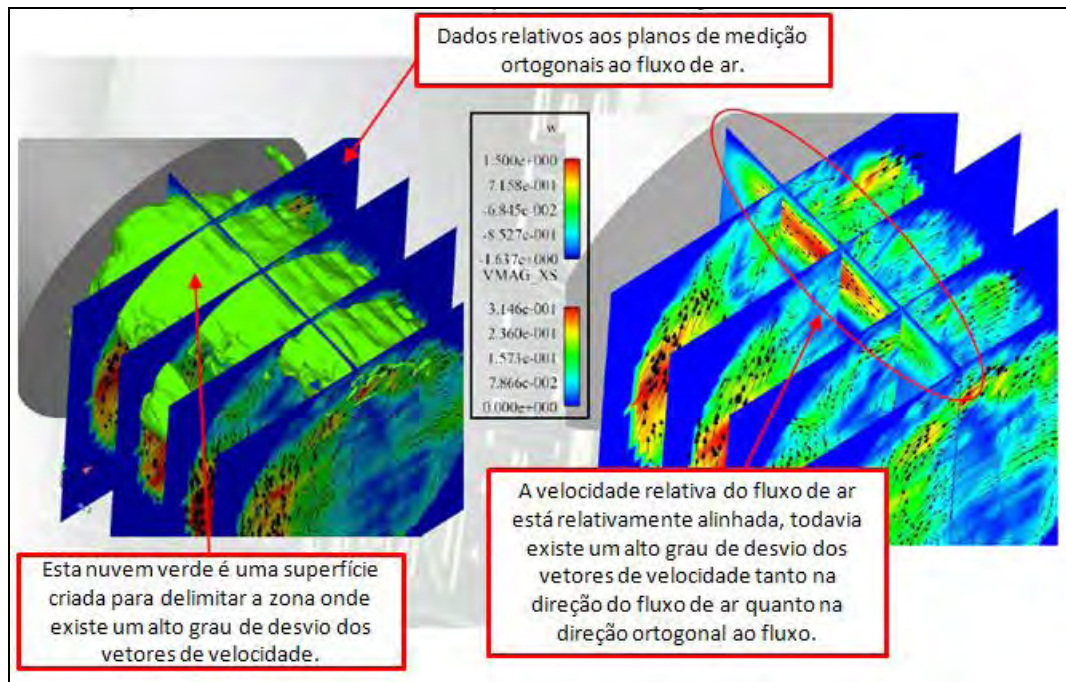


Figura 49 – Análise do fluxo para instalação do MAFS baseada na medição da velocidade no sentido do fluxo de ar  
Imagem cedida gentilmente pela empresa Mann+Hummel.

Assim baseando-se nos resultados apontados apresentados acima se propôs a instalação do sensor conforme mostrado na figura 50.

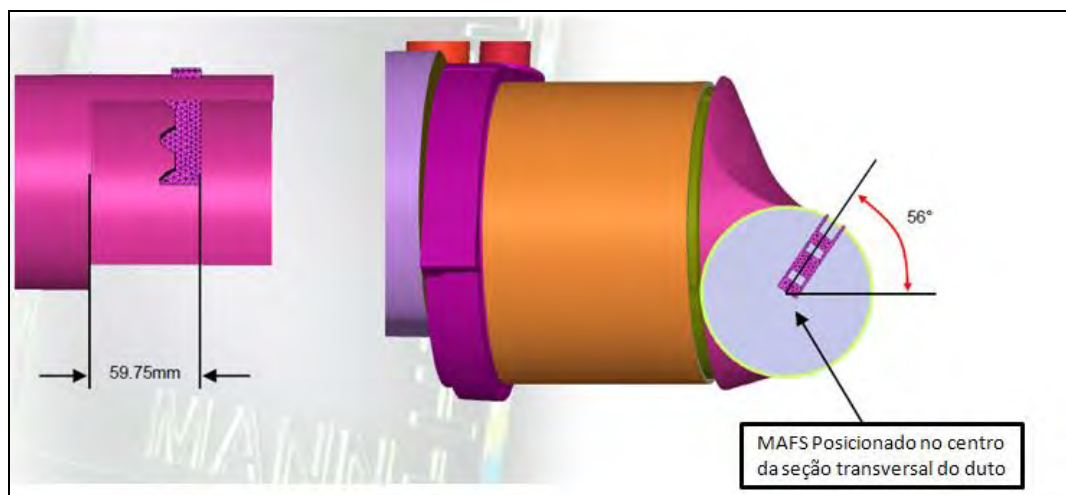


Figura 50 – Posicionamento do MAFS em função da medição da velocidade no sentido do fluxo de ar  
Imagem cedida gentilmente pela empresa Mann+Hummel.

A posição proposta para o sensor foi analisada conforme mostrado na figura 51. O sensor MAFS foi adicionado virtualmente à análise apenas para

visualização. NOTA: O sensor não estava presente durante a aquisição dos dados e, portanto não influenciou o escoamento do ar. Aqui observando-se o resultado da análise pode-se concluir que esta região não é recomendável. Esta conclusão se baseia no alto grau de dispersão dos vetores de velocidade verificados na região de instalação do sensor.

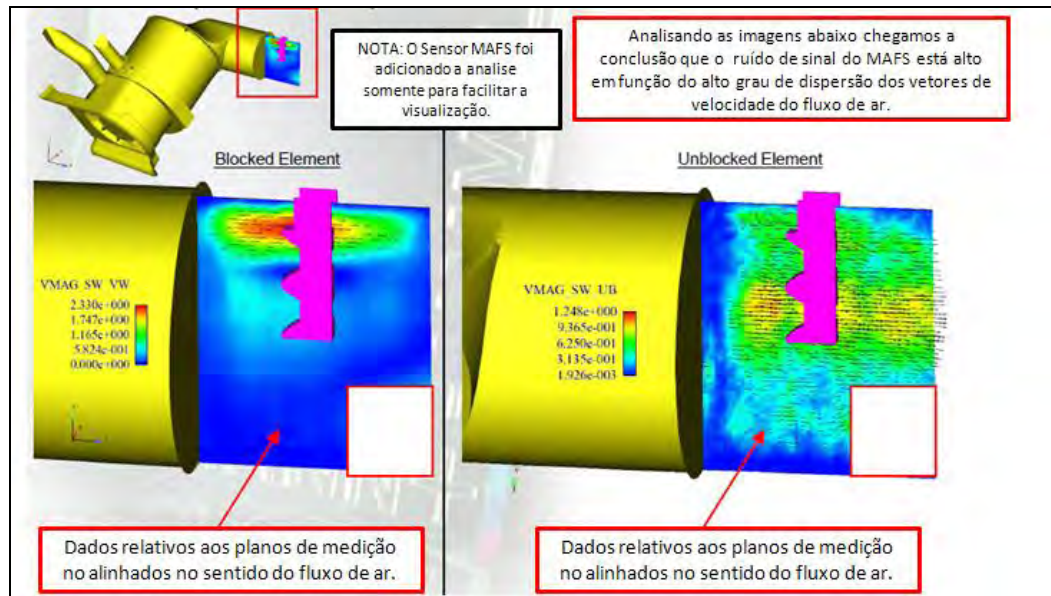


Figura 51 – Visualização do sensor instalado na seção proposta  
 Imagem cedida gentilmente pela empresa Mann+Hummel.

A figura 52 apresenta outra visualização do perfil de velocidades na seção de estudo somente como informação adicional.

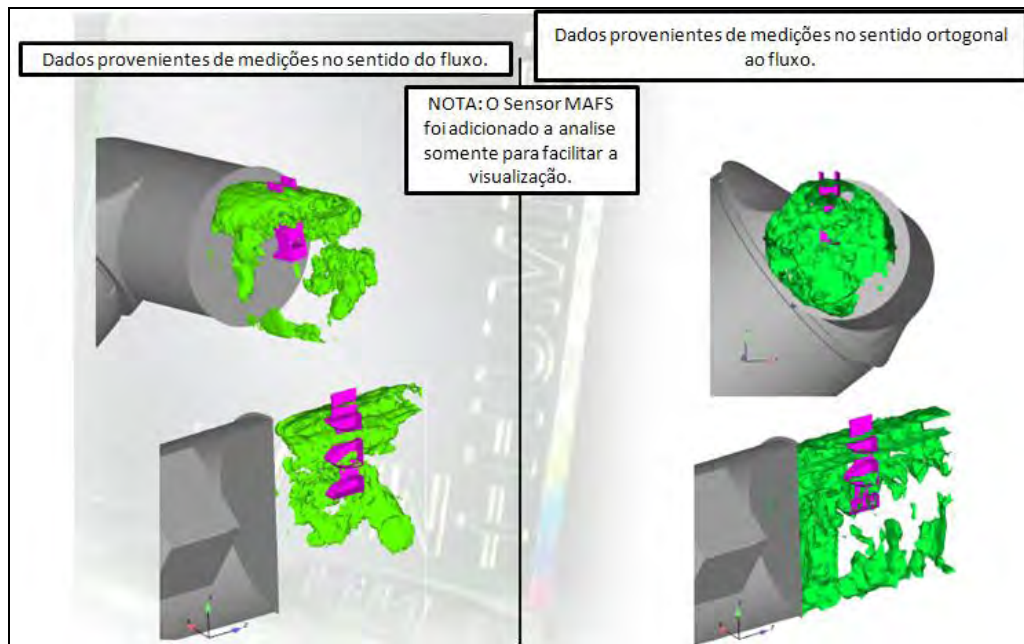


Figura 52 – Visualização do sensor instalado na seção proposta  
Imagem de uma simulação cedida gentilmente pela empresa Mann+Hummel.

Baseando-se nos dados provenientes da medição no sentido ortogonal ao fluxo de ar, propôs-se uma nova posição para instalação do sensor MAFS. A nova posição pode ser observada na figura 53.

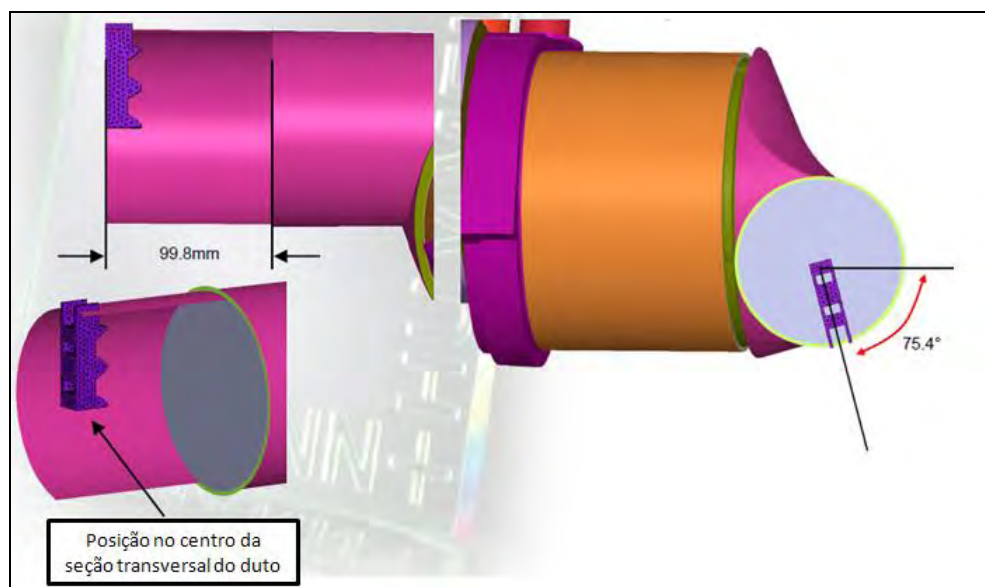


Figura 53 – Posicionamento do MAFS em função da medição da velocidade no sentido ortogonal ao fluxo de ar  
Imagem de uma simulação cedida gentilmente pela empresa Mann+Hummel.

Novamente na figura 54 o sensor MAFS foi adicionado virtualmente a análise apenas para visualização. O sensor não estava presente durante a aquisição dos dados e, portanto não influenciou o escoamento do ar.

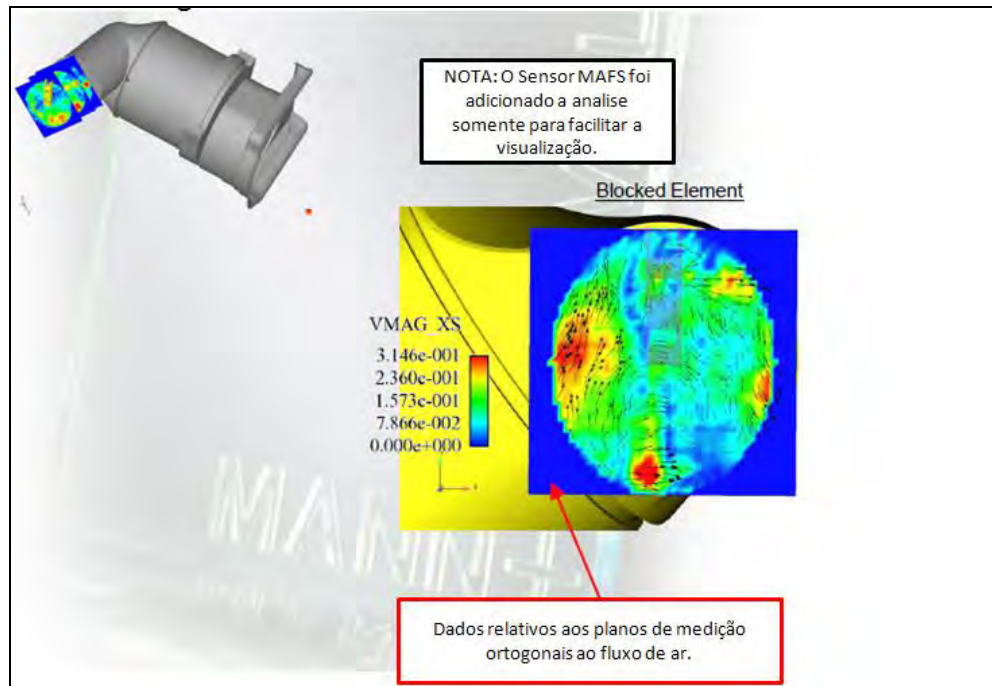


Figura 54 – Visualização do sensor instalado na seção proposta  
Imagem cedida gentilmente pela empresa Mann+Hummel.

A figura 55 apresenta outra visualização do perfil de velocidades na seção de estudo, agora com o sensor posicionado na nova posição proposta. Aqui é possível notar que nesta região a seção sensível está posicionada exatamente na região com melhor uniformidade do campo de velocidades.

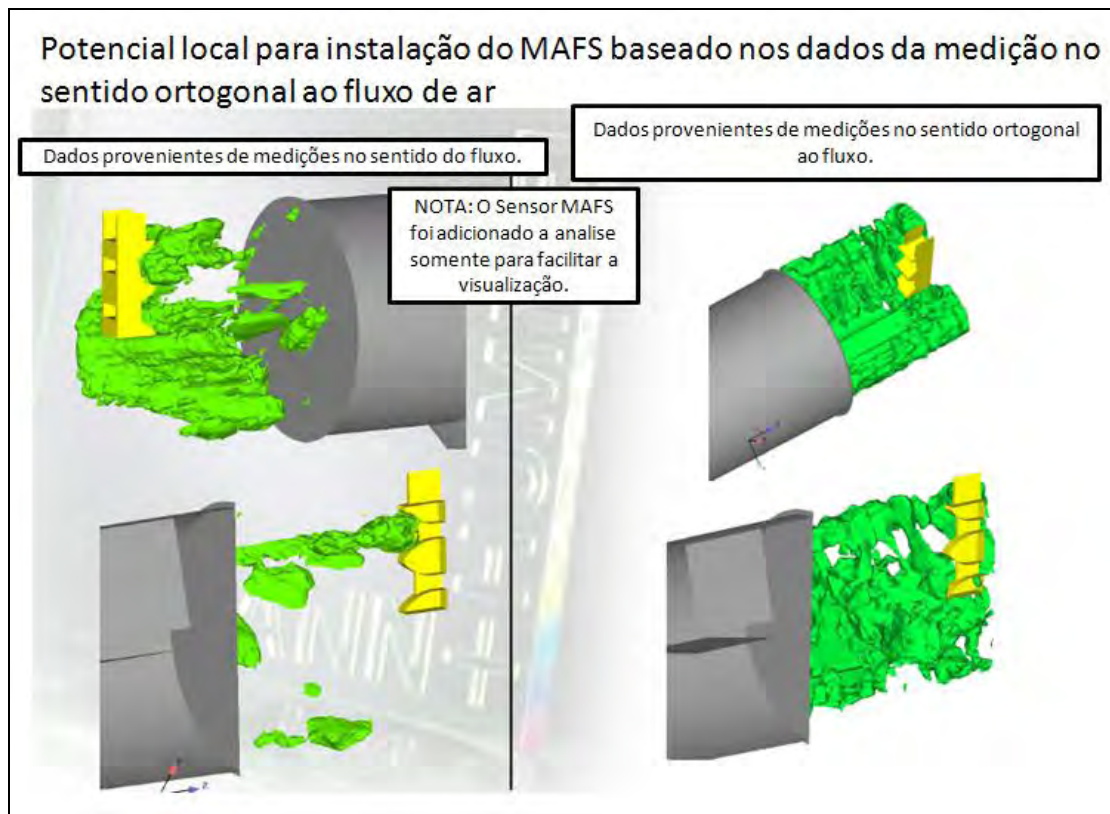


Figura 55 – Visualização do sensor instalado na nova seção proposta  
Imagem cedida gentilmente pela empresa Mann+Hummel.

Através desta análise o protótipo pode ser construído e testado com o sensor na bancada de fluxo de ar sônico. Neste caso após esta análise foi possível atender os critérios de funcionamento e robustez do sensor.

Assim como a simulação este estudo serve apenas como um indicativo. Ele permite uma visualização fiel da seção de escoamento nas principais condições de operação do sistema. Entretanto para certificação do sistema é necessária a verificação dos parâmetros de instalação do sistema em uma bancada de fluxo de ar sônica. Somente assim é possível garantir que o sistema está robusto para utilização automotiva.



### 5.2.7 Validação final do sistema

Posteriormente a fase de desenvolvimento apresentada, vem a fase de construção de protótipos contendo todo o trabalho de „ajuste” em ferramental do protótipo. Nesta fase já se é possível construir protótipos de acordo com o desenho da peça que será utilizada na produção em larga escala.

Quando esta fase do programa de desenvolvimento é atingida é então requerido o teste chamado de “5 por 5” onde cinco sistemas de admissão de ar completos são testados contra cinco sensores MAF. Este teste é realizado para se encontrar a MTF que é a função de transferência mestre mencionada anteriormente.

A figura 56 mostra o resultado do ruído de sinal de um teste 5x5, ou seja, 5 sensores ensaiados em 5 sistemas de admissão de ar. O resultado são vinte e cinco curvas com a relação Sinal-ruído.

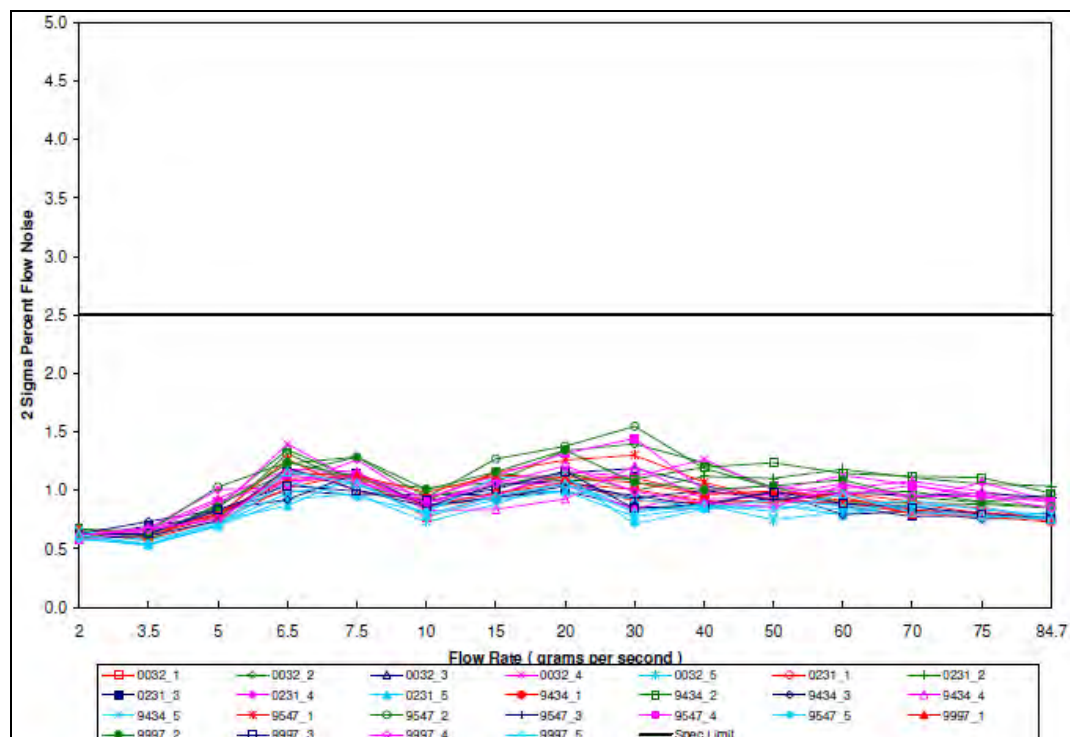


Figura 56 - Exemplo de resultado de um teste 5x5 sinal-ruído.

Fonte: Ref. [15]

A figura 57 mostra o resultado do desvio do erro de sinal em função da vazão.

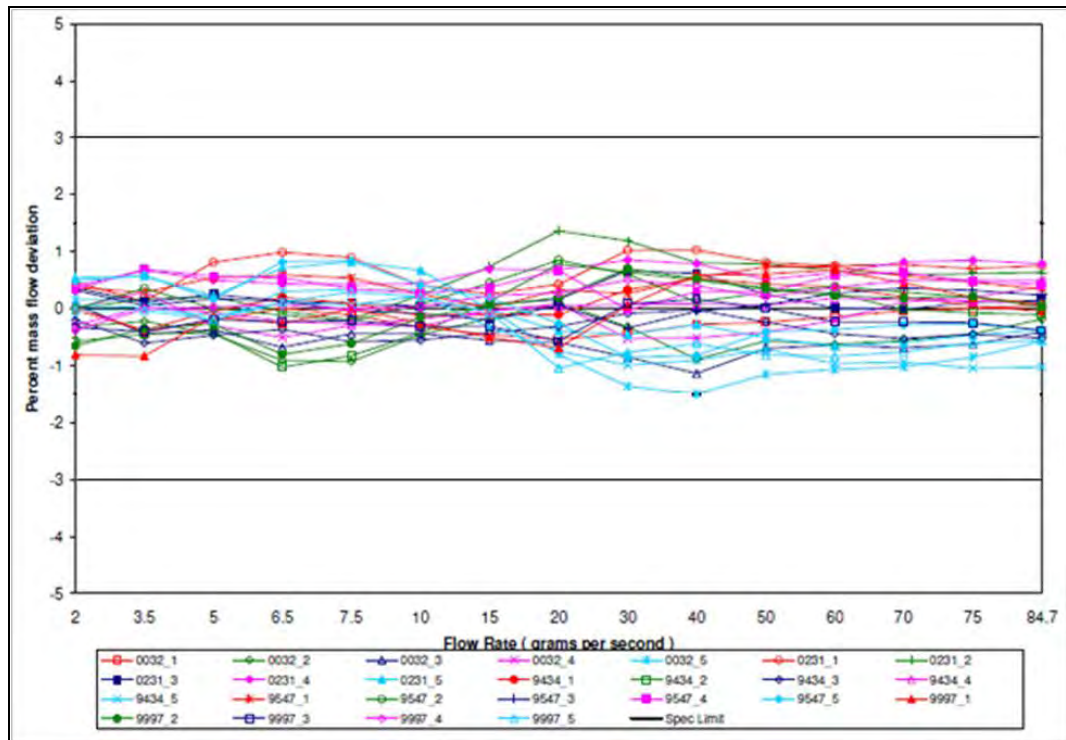


Figura 57 - Exemplo de resultado de um teste 5x5 Desvio.  
Fonte: Ref. [15]

Deste resultado extraímos então a função de transferência. Esta função de transferência será utilizada nos veículos de calibração e veículos de validação de um determinado programa de desenvolvimento veicular.

Para produção em massa, o sistema deve ser submetido a um teste chamado de “30x1”, onde trinta sistemas de admissão veicular são testados contra um sensor e uma nova MTF é estabelecida. Este teste é realizado somente quando as ferramentas finais de produção do sistema de admissão estão disponíveis.

## 6 Conclusão

A medição realizada através do sensor medidor da vazão mássica de ar é extremamente importante para que o sistema de gerenciamento eletrônico do motor possa garantir uma mistura estequiométrica para queima em cada cilindro do motor em todas as condições de operações e cargas. A premissa acima é uma das principais vantagens que o sensor medidor de vazão mássica de ar apresenta em relação aos dispositivos atuais de controle de emissões de gases poluentes. Motores que utilizam esta tecnologia podem, por exemplo, reduzir a carga de materiais preciosos alocados no (os) catalisador (es) do sistema de escapamento do motor.

A inclusão deste sensor garante ainda o atendimento às principais leis de emissões vigentes e das que serão colocadas em vigor nos próximos cinco anos tanto no Brasil quanto nos países mais desenvolvidos.

Neste trabalho foram apresentadas técnicas e métodos para o desenvolvimento e instalação do sensor medidor da vazão mássica de ar em um sistema de admissão de ar. A partir deste estudo pôde-se concluir ainda que é impossível determinar se o funcionamento do sensor irá atender os critérios de desempenho e robustez somente através de simulações computacionais.

Conclui-se ainda que é possível reduzir o tempo e a quantidade de testes necessários para a validação da função de transferência do sensor quando o sensor trabalha dentro de uma determinada faixa de velocidades. A localização do sensor em uma região adequada através de uma verificação do perfil de velocidade do ar escoando dentro do conduto onde o sensor está instalado é também fundamental para atingir esta meta.

Todavia os testes de validação da função de transferência do sensor apresentados aqui são indispensáveis para garantir que os veículos vendidos com tal tecnologia embarcada não sofrerão falhas em campo em função de problemas de leitura do sensor.

Além disso, algumas recomendações de projeto podem ser feitas de acordo com o que foi avaliado neste estudo para facilitar o trabalho de

desenvolvimento de um sistema de admissão de ar com estes requisitos técnicos. São elas:

- Deseja-se que o sensor seja instalado perpendicularmente em relação à linha de centro da seção de saída do duto de saída da caixa do filtro de ar. A figura 58 ilustra melhor a sentença acima:

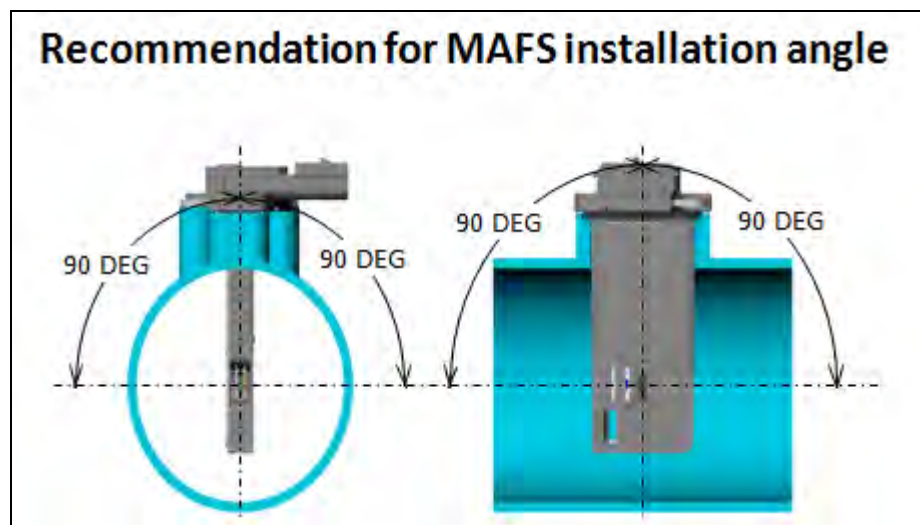


Figura 58 – Recomendação para instalação no conduto de saída do filtro de ar  
Fonte: Ref. [15]

- Em relação ao posicionamento do sensor no duto deseja-se ainda que o mesmo seja instalado o mais distante possível dentro do duto de saída da caixa do filtro de ar. A razão técnica para isto é que desta forma o fluxo de ar tem espaço para se desenvolver melhor dentro do conduto e eliminar os efeitos de entrada na seção de saída da caixa do filtro de ar. A figura 59 ilustra melhor a sentença acima:

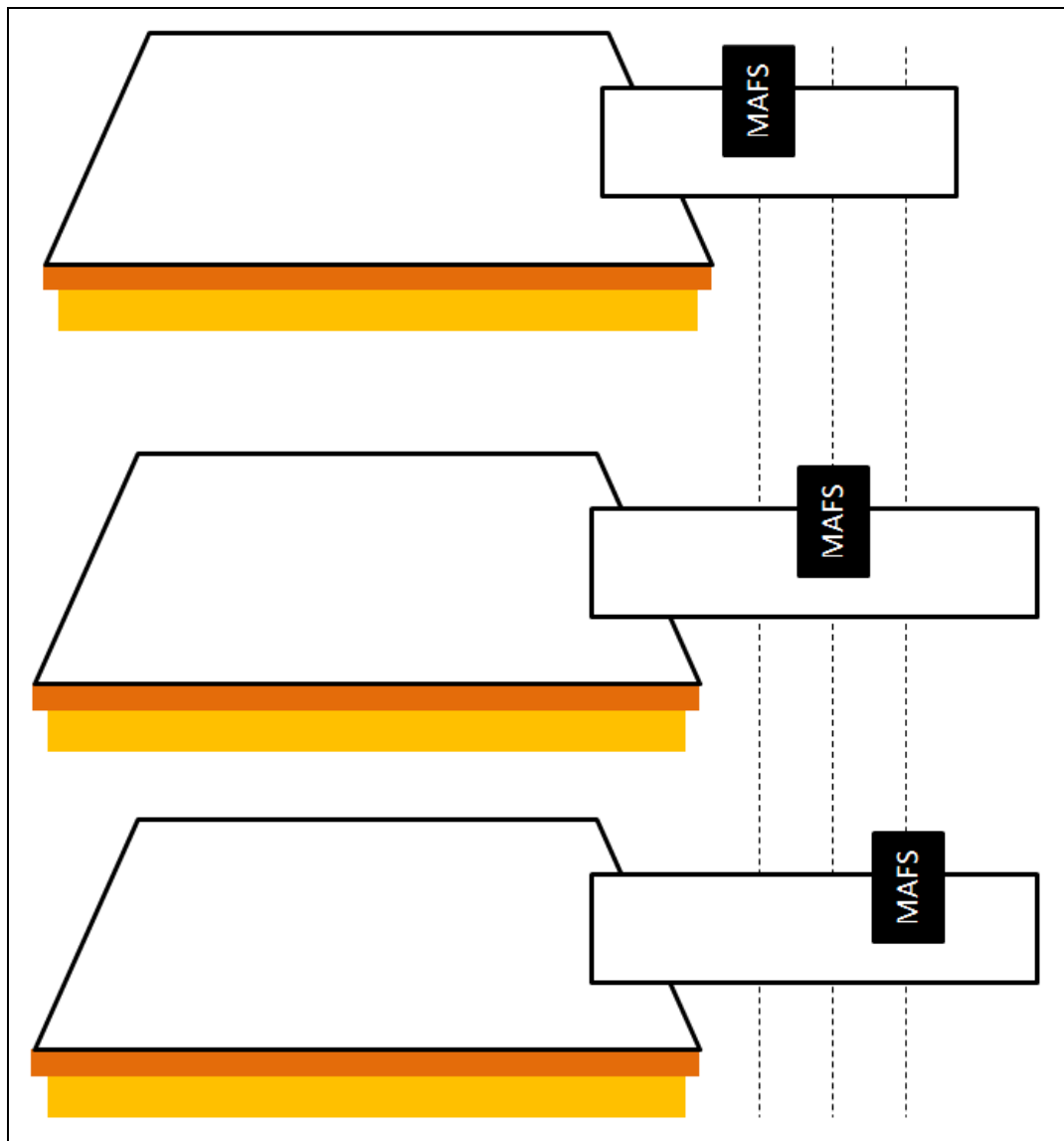


Figura 59 – Figura esquemática relativa ao posicionamento do sensor no conduto de saída do filtro de ar.

- Quanto ao formato do conduto de saída do filtro de ar analisando se as figuras 60, 61, e 62, pode-se afirmar que o desenho mais favorável a leitura do sensor é o apresentado na figura 60. A extensão do duto de saída do filtro de ar dentro do volume de expansão permite uma melhor distribuição do fluxo de ar através do elemento filtrante. Além disso a extensão do duto de saída do filtro de ar para dentro da caixa do filtro de ar permite ainda um aumento no comprimento do duto seguindo o conceito apresentado acima.

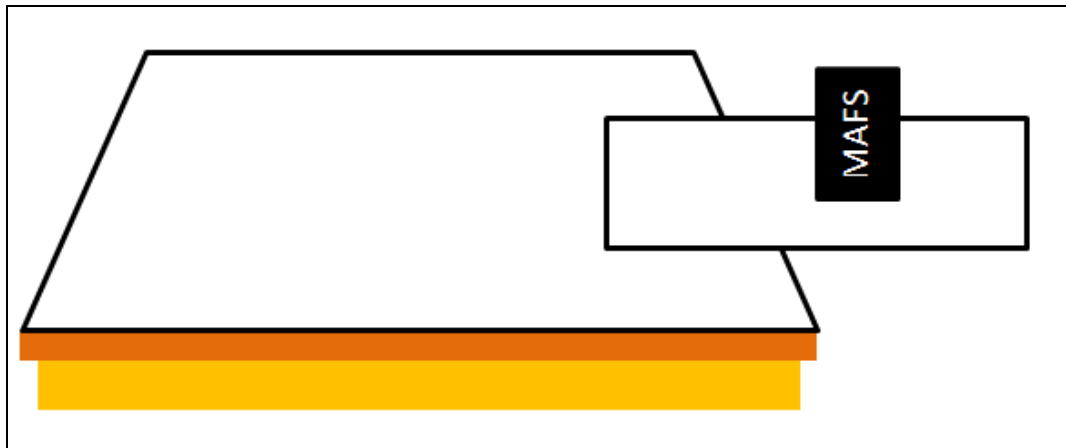


Figura 60 – Posicionamento do duto de saída do filtro em relação à tampa

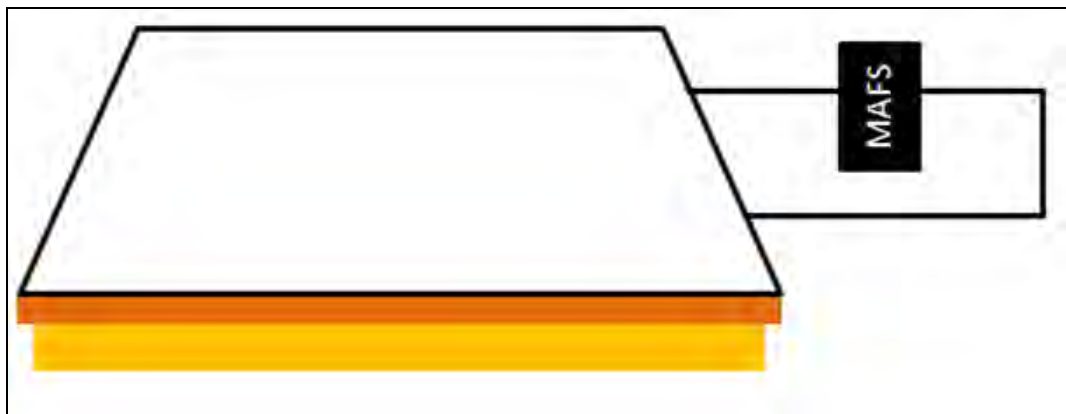


Figura 61 – Posicionamento do duto de saída do filtro em relação à tampa

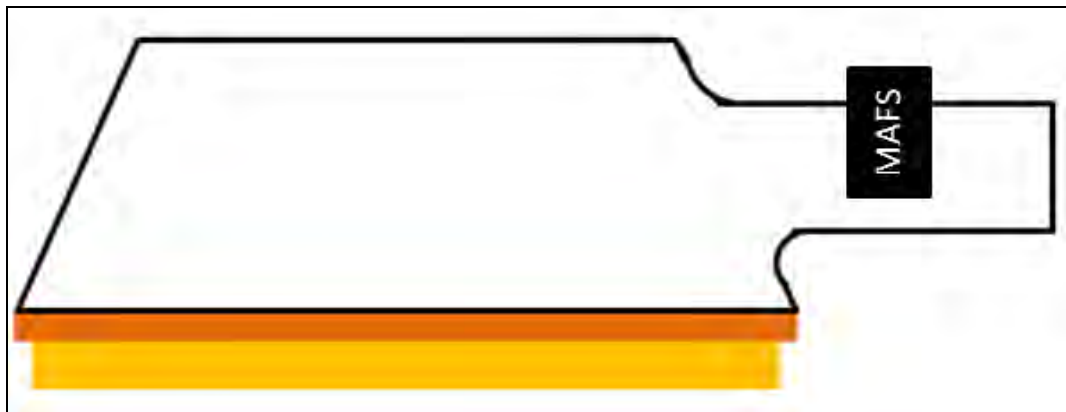


Figura 62 – Posicionamento do duto de saída do filtro em relação à tampa

- Outro conceito de projeto que se mostrou efetivo na redução da relação Sinal-ruído e o desvio da função de transferência do sistema foi o aumento do volume de expansão do lado limpo do filtro de ar. A figura 63 ilustra melhor a sentença acima:

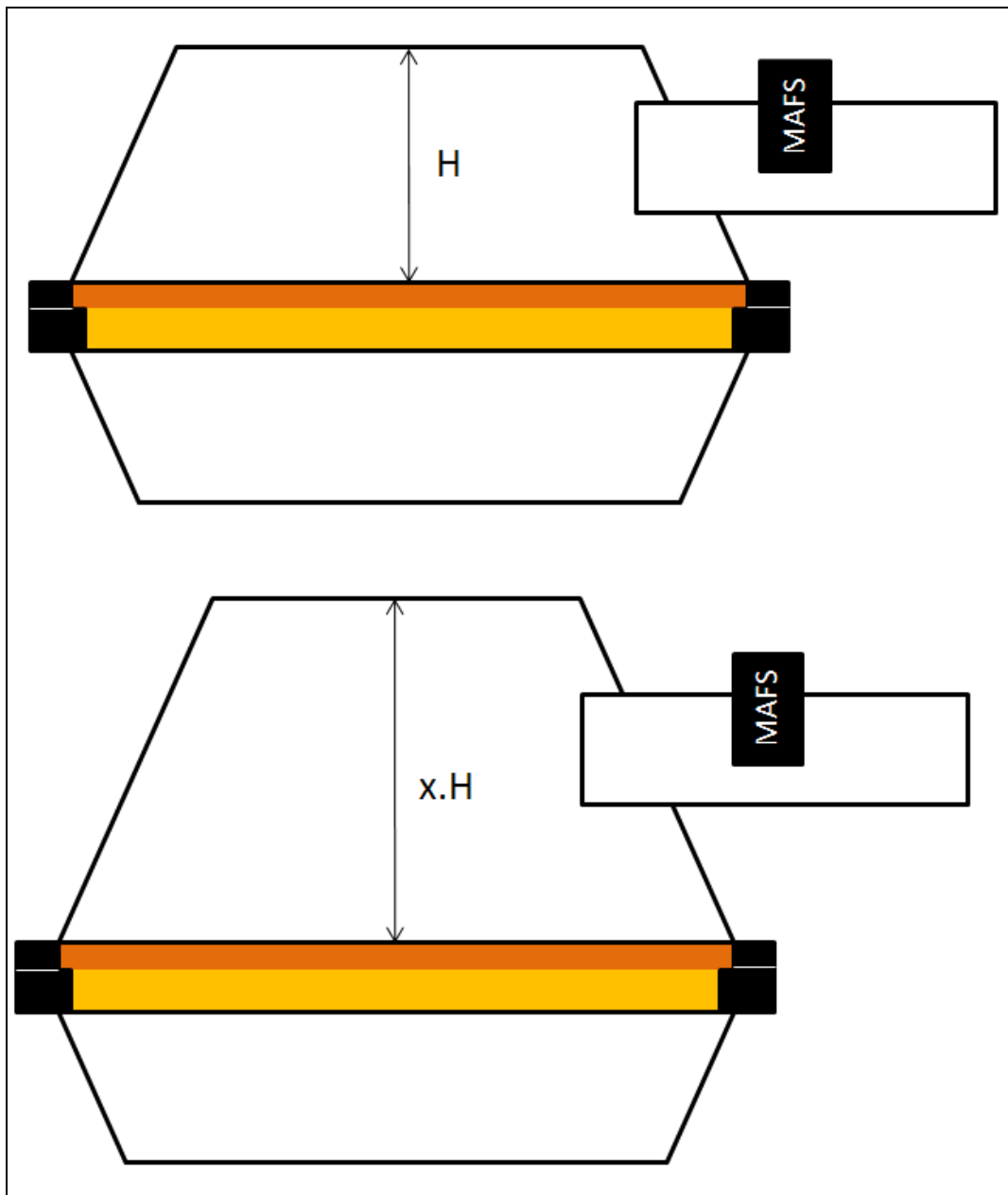


Figura 63 – Recomendação quanto ao aumento de volume no lado limpo do filtro de ar

- Existem ainda casos onde o sistema de admissão já foi desenvolvido e espaço disponível para alterações é restrito nestes casos pode-se recorrer para alternativas como as mostradas nas figuras 64 e 65.

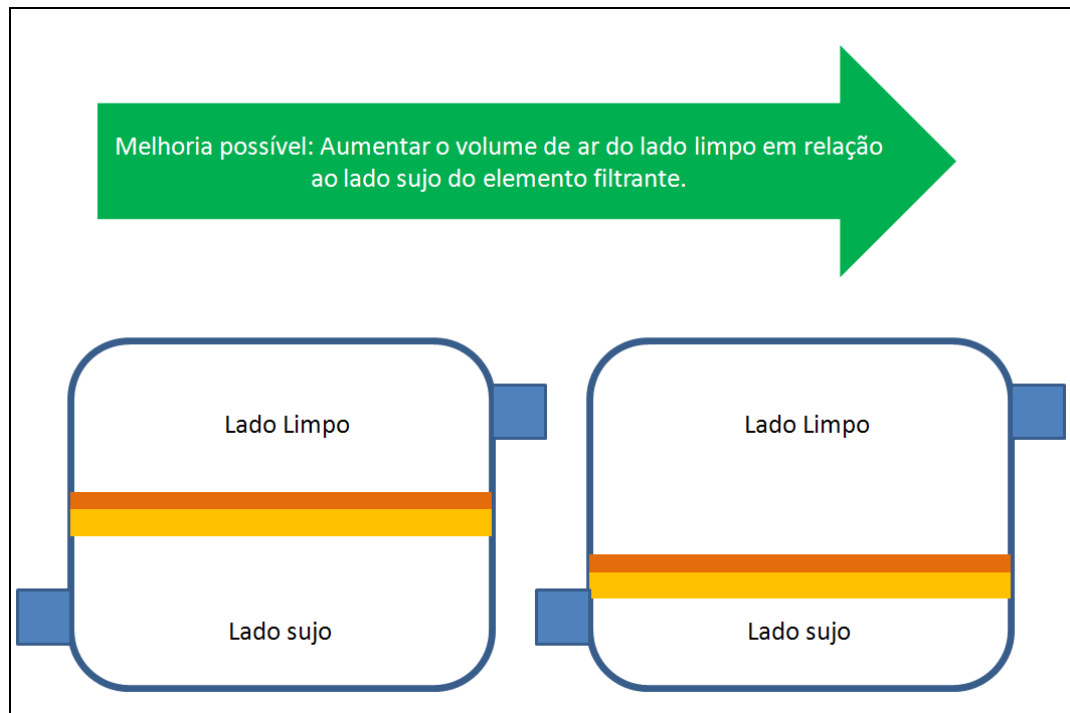


Figura 64 – Recomendações de projeto para sistemas já desenvolvidos

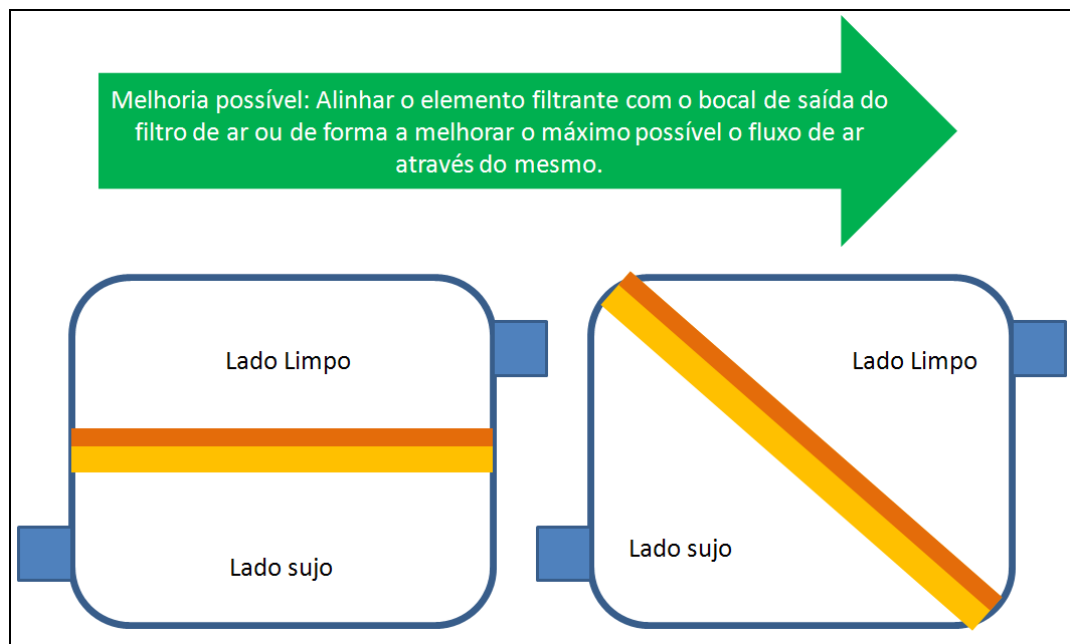


Figura 65 – Recomendações de projeto para sistemas já desenvolvidos

Todas estas recomendações de projeto foram testadas e se mostraram eficazes na redução dos problemas de leitura encontrados nos desenvolvimentos de sistemas que utilizavam esta tecnologia.



## Referências

- [1] A2MAC. **Automotive Benchmarking**. Disponível em <<http://www.a2mac1.com>>. Acesso em: 5 maio 2010.
- [2] \_\_\_\_\_. **ABNT NBR ISO 5167-1**: Medição de vazão de fluidos por dispositivos de pressão diferencial, inserido em condutos forçados de seção transversal circular – Parte 1: Princípios e requisitos gerais
- [3] \_\_\_\_\_. **ABNT NBR ISO 12103-1**: Veículos rodoviários automotores – Poeira de ensaio para avaliação de filtros – Parte 1: Poeira de ensaio do Arizona
- [4] \_\_\_\_\_. **ASME/ANSI Standard: MFC-7M-1987**: Measurement of Gas Flow by Means of Critical Venturi Nozzles, ASME, 1987.
- [5] Brunetti, Franco; Ignácio, Raimundo Ferreira. **Escoamento de Fluidos Compressíveis**. São Paulo: FEI 2000. et al. Apostila para disciplina de graduação Departamento de Engenharia Mecânica, EG522 – Mecânica dos Fluidos II.
- [6] CONTINENTAL CORPORATION **Product Information**. Disponível em: <[http://www.vdo.com/products\\_solutions/cars/powertrain/sensors/index.htm](http://www.vdo.com/products_solutions/cars/powertrain/sensors/index.htm)>. Acesso em: 22 de maio de 2008.
- [7] CFD ONLINE **Introduction to turbulence/Turbulence kinetic energy**. Disponível em: <<http://www.cfd-online.com>> Acesso em: 15 de Abril de 2010.
- [8] DELPHI CORPORATION **Product Information**. Disponível em: <<http://delphi.com/manufacturers/auto/powertrain/gas/aircontrol/airmtrs/>>. Acesso em: 22 de maio de 2008.
- [9] A. G. Hansen. **Fluid mechanics**. John Wiley & Sons, New York, 1967.
- [10] FORD MOTOR COMPANY, Chester J. Blechinger. **Mass Air Flow Sensor**. US004434656. 06 Mar 1984.
- [11] FORD MOTOR COMPANY, David K. Bidner, Michael J. Cullen. **Method Of Controlling Internal Combustion Engine Exhaust Hydrocarbons**. US005515832A. 14 Maio 1996.
- [12] Incropera, Franck P.; DeWitt, David P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 6th Edition. John Wiley & Sons, inc. NY, 2006

- [13] Garcia, Oswaldo; Brunetti, Franco. **Motores de Combustão Interna**. São Paulo: FEI 2000. et al. Apostila para disciplina de graduação Departamento de Engenharia Mecânica, EG961 – Motores de Combustão Interna I.
- [14] GILL SENSORS **Product Information**. Disponível em: <<http://www.gillsensors.co.uk/>>. Acesso em: 22 de maio de 2008.
- [15] GENERAL MOTORS COMPANY **Internal presentation**. GM AIS engineering - Training material.
- [16] GENERAL MOTORS CORPORATION, Kelvin Shih, Kurt A. Pochert, James M. Dunford. **Mass Air Flow Sensor**. US004433576. 28 Fev 1984.
- [17] \_\_\_\_\_. **GM WORLDWIDE ENGINEERING STANDARDS. GMW16234: Mass Airflow Sensor Testing in an Air Induction System - Test Procedure Powertrain Integration**. Oct 2009.
- [18] \_\_\_\_\_. **GM WORLDWIDE ENGINEERING STANDARDS. GMW14908: Induction Subsystem Air Flow Restriction Bench Test - Test Procedure Powertrain Integration**. Jan 2007.
- [19] HITACHI AMERICA LTD, Toshiharu Nogi, Robert I. Bruetsch. **Fuel Control System For A Gaseous Fuel Internal Combustion Engine With Improved Fuel Metering And Mixing Means**. US005806490A. 15 Set 1998.
- [20] HITACHI CORPORATION **Product Information**. Disponível em: <<http://www.hitachi-hap-la.com/products/Sensors/MAFS/>>. Acesso em: 24 de maio de 2008.
- [21] \_\_\_\_\_. **ISO Standard: 9300: Measurement of Gas Flow by Means of Critical Flow Venturi Nozzles**, ISO, 1990.
- [22] MASS AIRFLOW SENSORS. **Motor Age**, ABI/INFORM Trade & Industry, Feb 2004, pg. 52.
- [23] ROBERT BOSCH CORPORATION **Product Information**. Disponível em: <[http://rbk.bosch.de/en/powerconsumptionemissions/electric\\_controls/sensors/enginemangement/hfm.html](http://rbk.bosch.de/en/powerconsumptionemissions/electric_controls/sensors/enginemangement/hfm.html)>. Acesso em: 22 de maio de 2008.
- [24] Robtec. **Protótipos Rápidos**. Disponível em <<http://www.robtec.com/pt/servicosequipamentos/prototiposrapidos.htm>>. Acesso em: 20 Out 2009.
- [25] Best Cars WebSite. **Avaliações**. Disponível em <[www.bestcars.com.br](http://www.bestcars.com.br)>. Acesso em: 22 Jul 2009.

- [26] SIEMENS VDO AUTOMOTIVE, Jason Pettipiece Chatham. **Combined Air Cleaner Resonator**. US 2003/0126841 A1. 10 Jul 2003.
- [27] SIEMENS AUTOMOTIVE, Jeff Powell. **Low Restriction Air Filter With Structural Pleats**. US 2002/0108359 A1. 15 Ago 2002.
- [28] A.H. Shapiro. **The dynamics and thermodynamics of compressible flow**. Volume I. The Ronald Press Comp., NY, 1953.
- [29] UNIVERSITY OF CAMBRIDGE. **Department of Engineering – Whittle Laboratory**. Disponível em <<http://www-g.eng.cam.ac.uk/whittle/current-research/hph/hot-wire/hot-wire.html>>. Acesso em: 28 jun. 2008.
- [30] UOL Carros. **Fotos**. Disponível em < <http://carros.uol.com.br/fotos>>. Acesso em: 02 Julho 2010.
- [31] VELOCIMETRY PORTAL. **StereoPIV**. Disponível em < <http://www.velocimetry.net/index.htm>>. Acesso em: 28 maio 2010.
- [32] VISTEON GLOBAL TECHNOLOGIES INC, Eric Christopher Myers, Lawrence A. Zurek. **Mass Air Flow Sensor With Stress Free Sensor Element Mounting**. US 2004/0226356 A1. 18 Nov 2004.

## Apêndice A – Exemplos de aplicação do sensor medidor de vazão mássica de ar (MAFS)

Neste estudo foram relacionados uma série de veículos vendidos no mercado Brasileiro e no mercado internacional. O intuito deste levantamento é indicar a tendência crescente do uso do sensor medidor de vazão de mássica de ar para auxiliar o funcionamento do sistema do controle eletrônico dos motores modernos.

Destaca-se ainda que o uso desta tecnologia não se restringe a apenas um tipo de veículo e tão pouco a uma empresa ou „marca” em específico. Abaixo seguem imagens de alguns exemplos de veículos analisados. Em todas as figuras o Sensor Medidor da Vazão Mássica de ar foi destacado para facilitar a visualização.

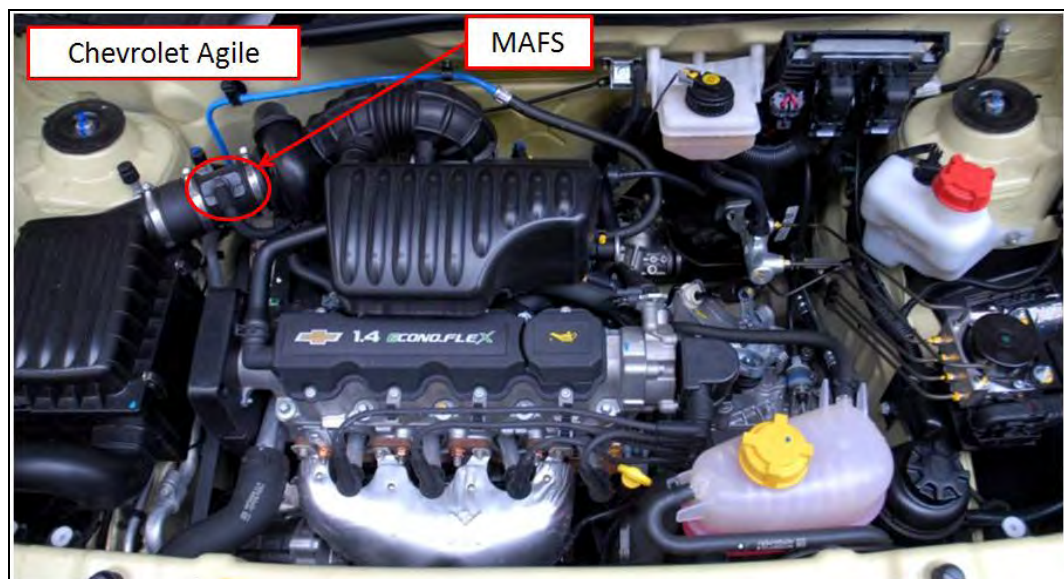


Figura 66 – Chevrolet Agile  
Fonte: Ref. [30]

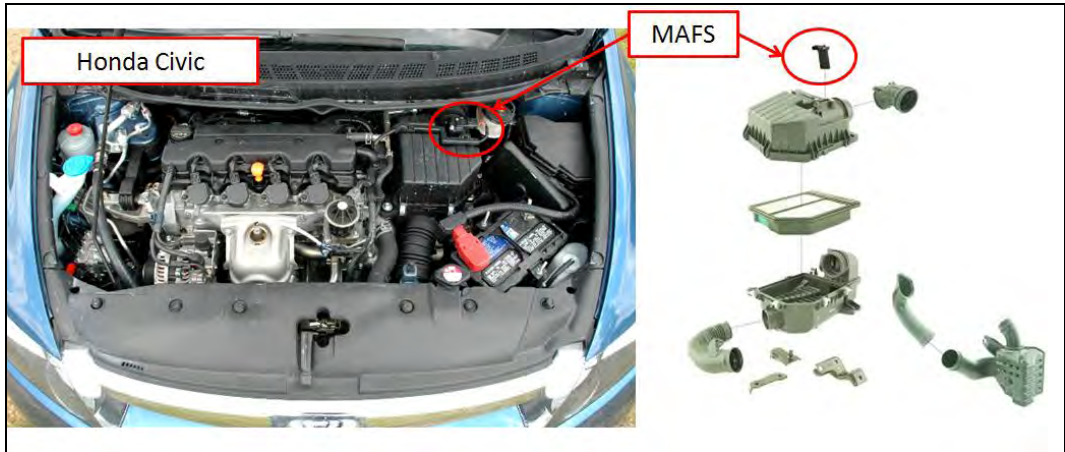


Figura 67 – Honda Civic  
Fonte: Ref. [01]



Figura 68 – Chevrolet HHR  
Fonte: Ref. [01]

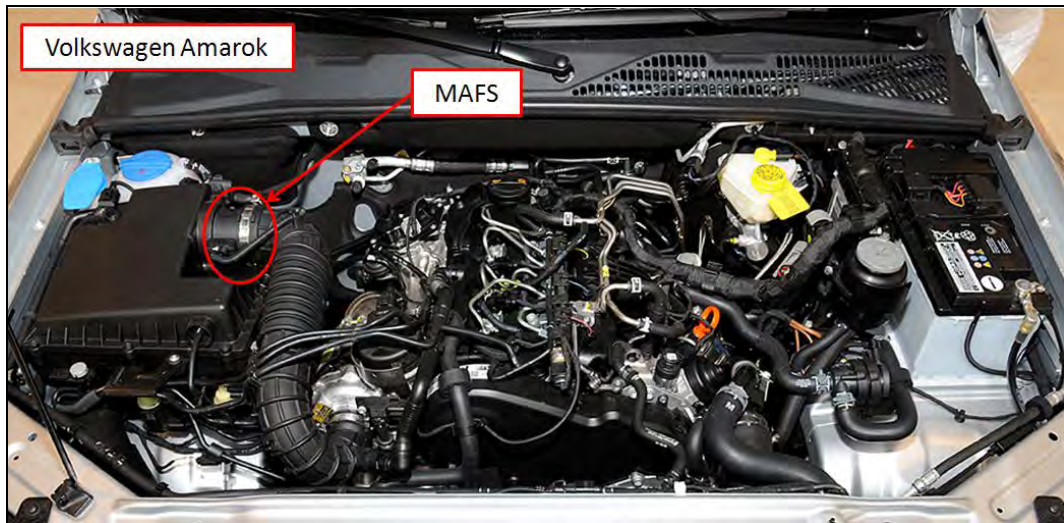


Figura 69 – Volkswagen Amarok  
Fonte: Ref. [30]

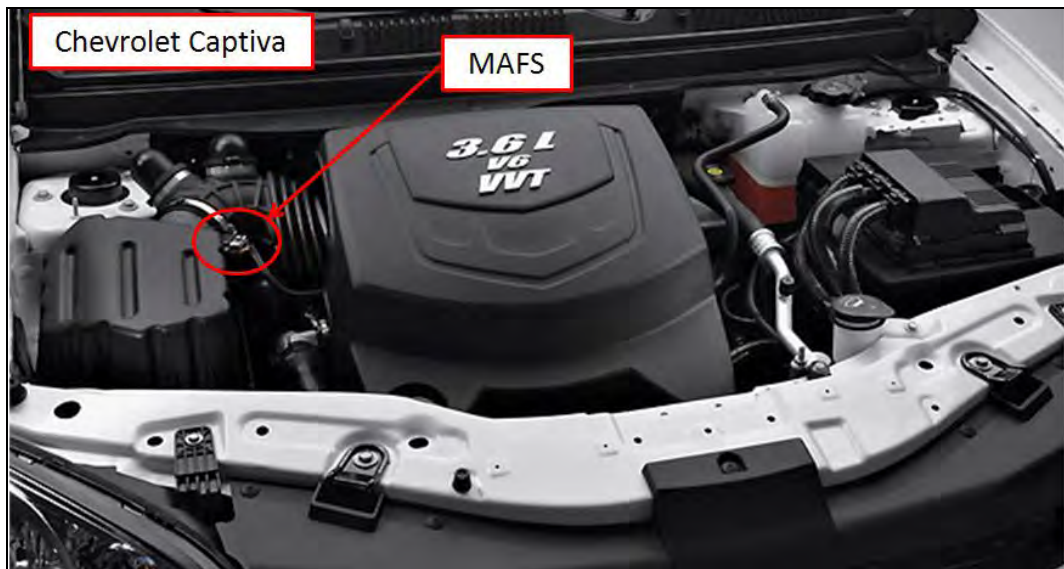


Figura 70 – Chevrolet Captiva  
Fonte: Ref. [30]



Figura 71 – Honda City  
Fonte: Ref. [30]



Figura 72 – Ford Edge  
Fonte: Ref. [30]



Figura 73 – Ford Fusion  
Fonte: Ref. [30]



Figura 74 – Volkswagen Jetta  
Fonte: Ref. [30]



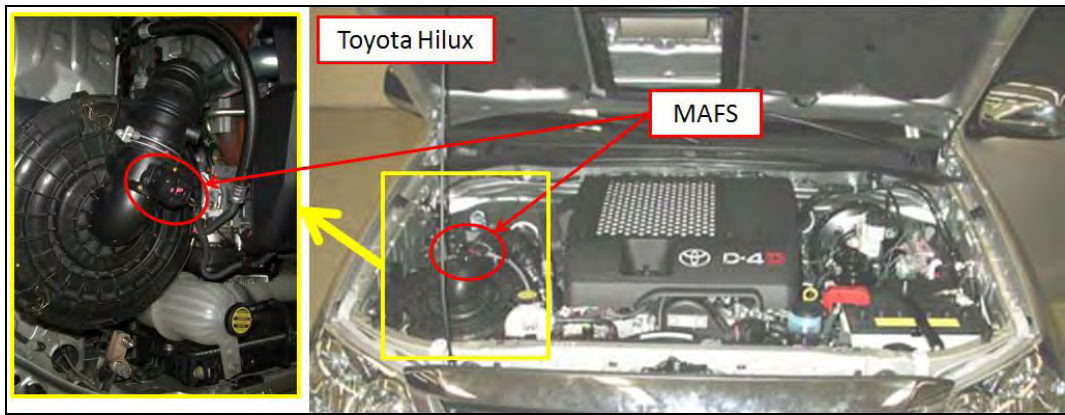


Figura 75 – Toyota Hilux  
Fonte: Ref. [01]

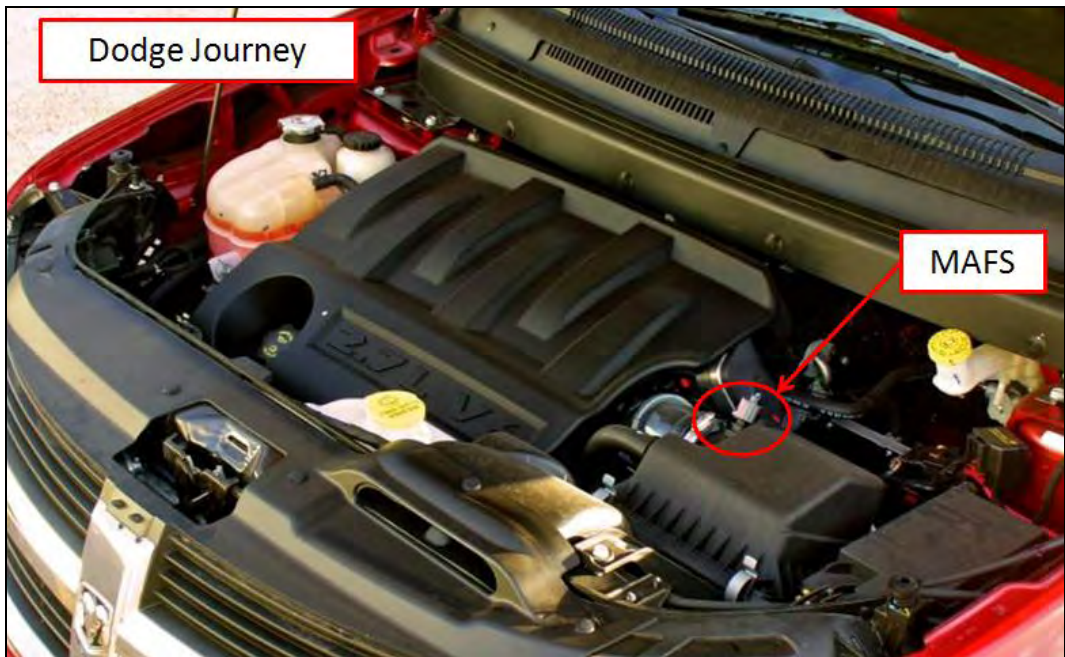


Figura 76 – Dodge Journey  
Fonte: Ref. [30]

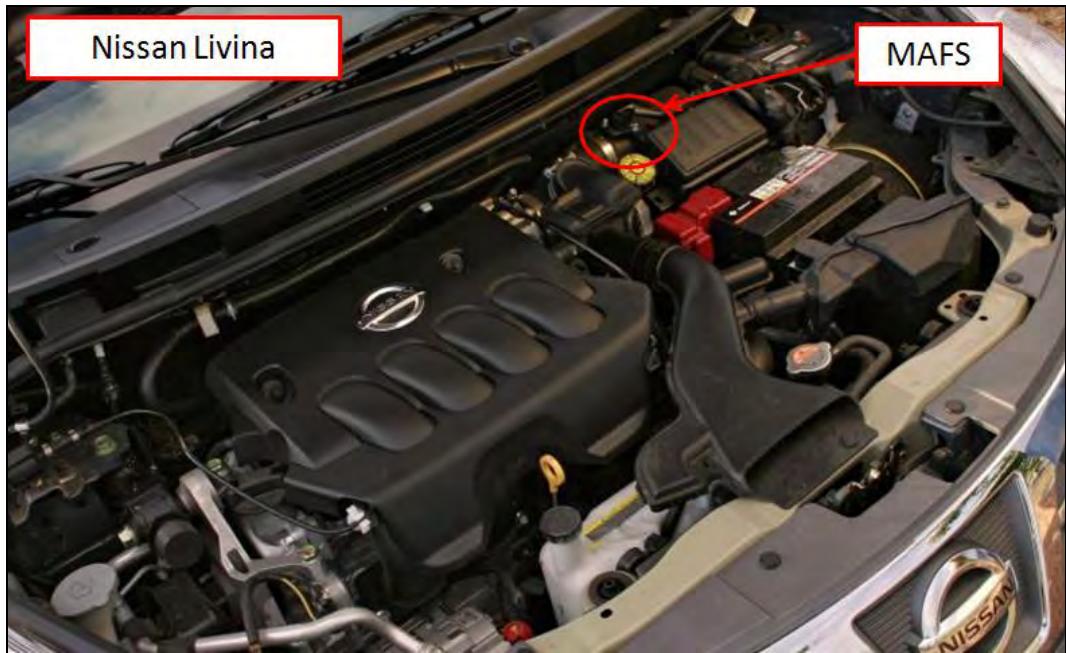


Figura 77 – Nissan Livina  
Fonte: Ref. [30]

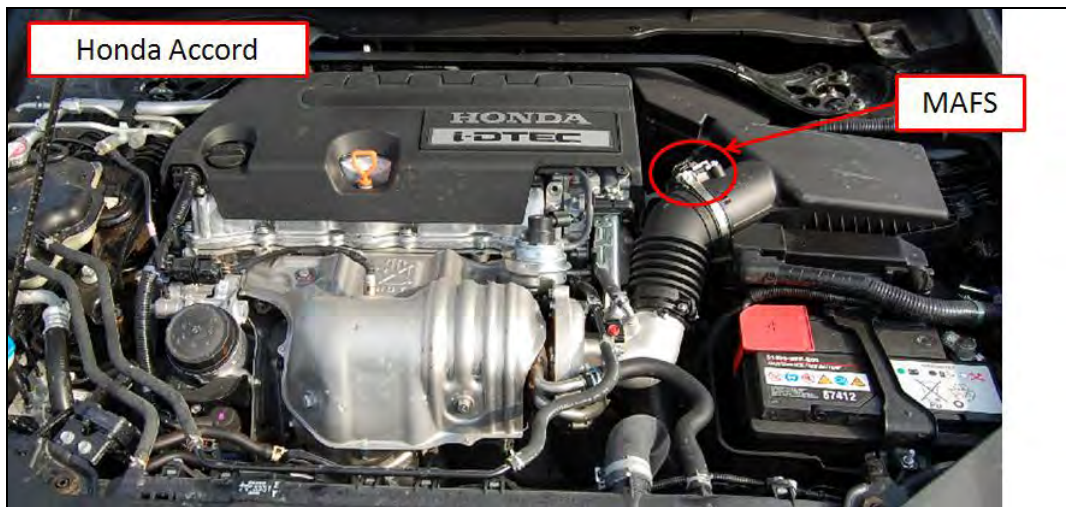


Figura 78 – Honda Accord  
Fonte: Ref. [01]



Figura 79 – Hyundai I30  
Fonte: Ref. [01]

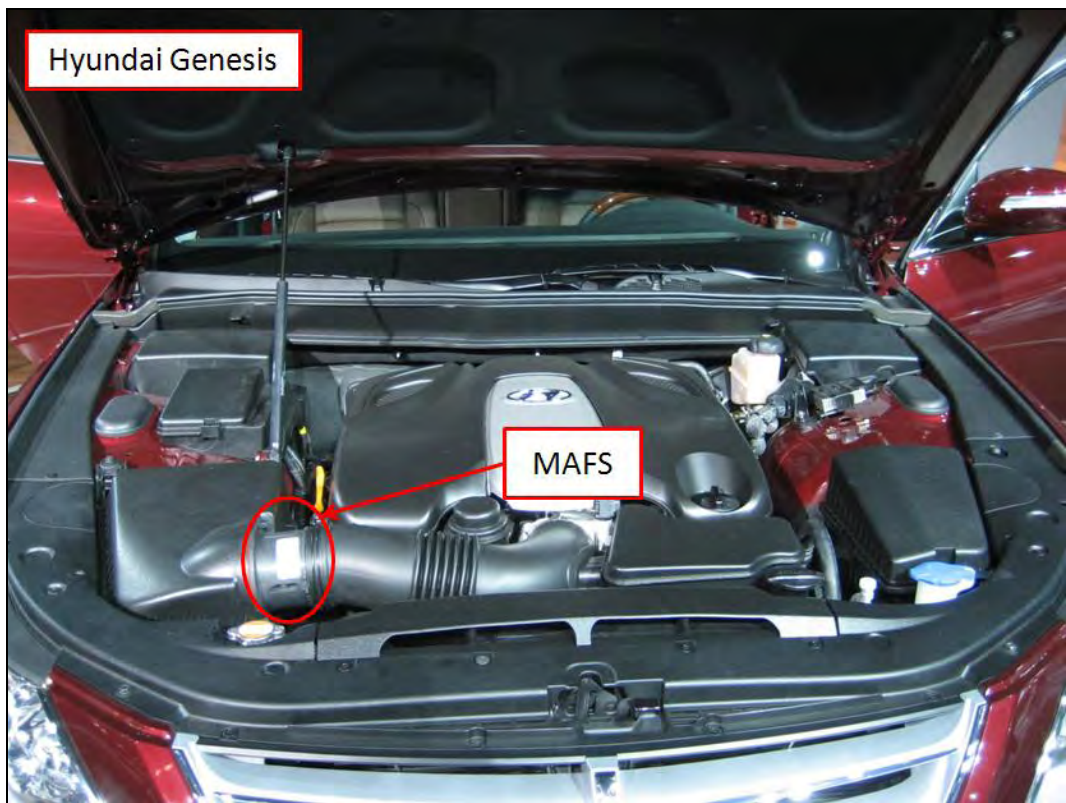


Figura 80 – Hyundai Genesis  
Fonte: Ref. [01]

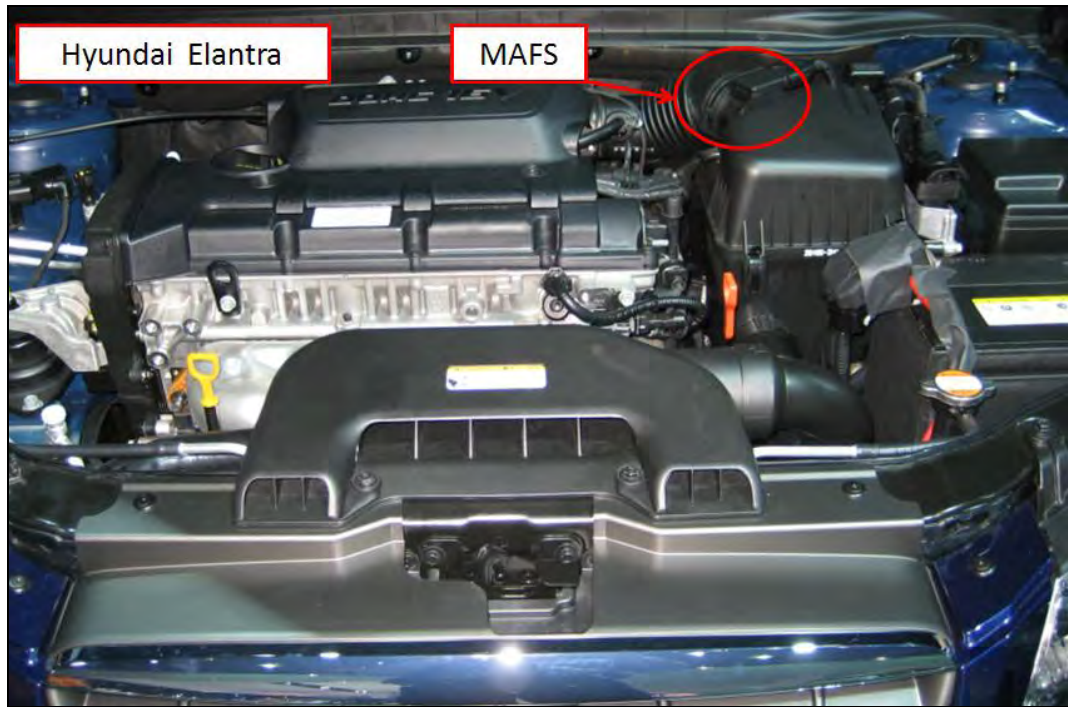


Figura 81 – Hyundai Elantra  
Fonte: Ref. [01]

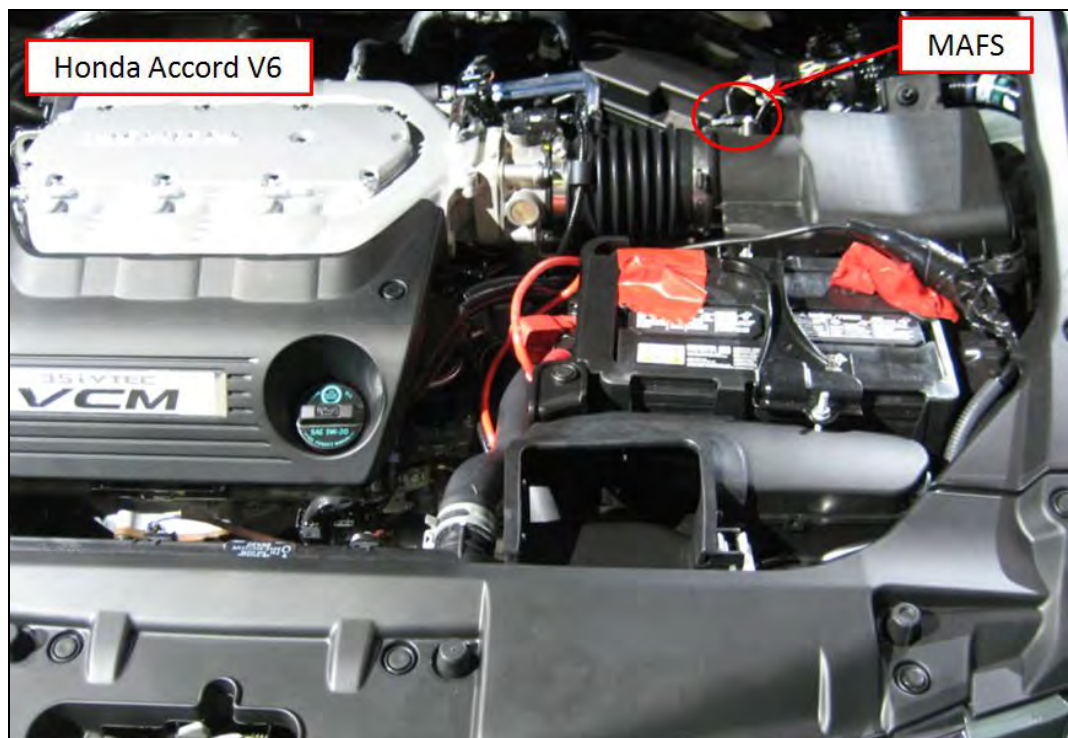


Figura 82 – Honda Accord  
Fonte: Ref. [01]

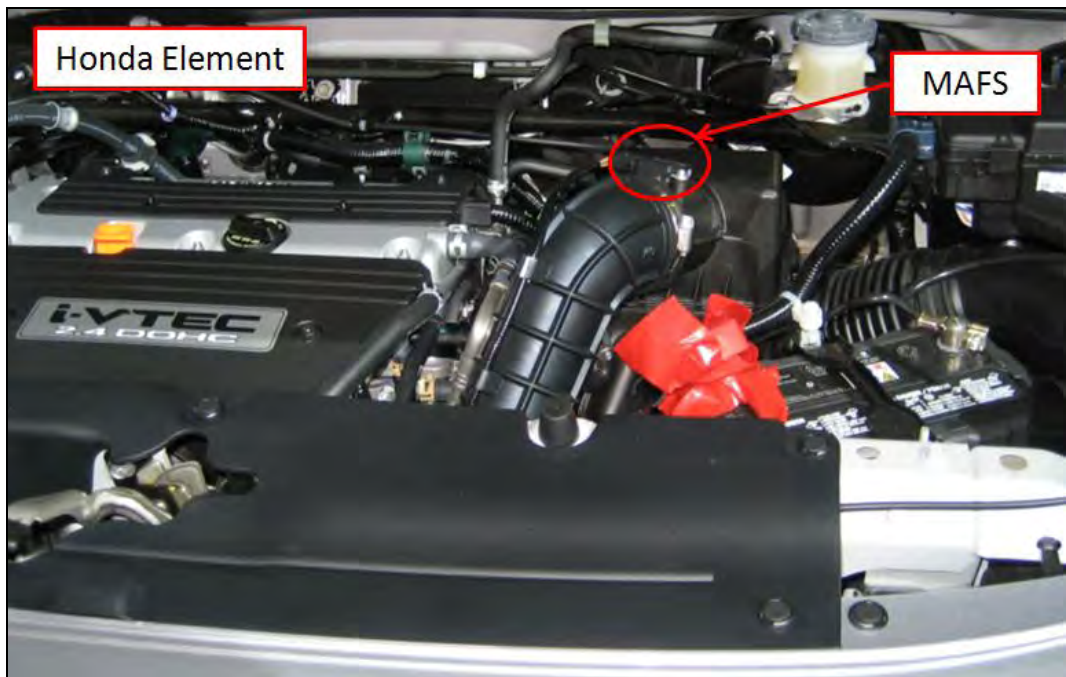


Figura 83 – Honda Element  
Fonte: Ref. [01]



Figura 84 – Toyota Camry  
Fonte: Ref. [01]

## **Apêndice B – PIV (Particle Image Velocimetry) e SPIV (Stereo Particle Image Velocimetry) – Como funciona o sistema de medição de velocidades através de partículas inseridas em um fluido.**

### PIV – Particle Image Velocimetry

„Velocimetria“ por Imagem de Partículas (PIV) é uma técnica usada para medir a velocidade instantânea de todas as partículas de um fluido escoando em uma seção de estudo. Esta técnica pode ser aplicada em fluxos de alta velocidade, ou a estudos da camada limite.

A técnica é aplicável a fluxos de líquidos ou gases. Para analisar um fluido são adicionadas partículas que seguem fielmente a dinâmica do escoamento. É o movimento dessas partículas que é utilizado para calcular a velocidade instantânea em cada ponto do fluxo. Isto é realizado através da obtenção de duas imagens tomadas em instantes muito próximos. Analisa-se então o espaço percorrido pelas partículas e suas posições relativas. Com essas informações é possível calcular a velocidade e direção de cada uma das partículas inseridas no fluxo.

Tipicamente para realização de um ensaio através da técnica PIV são necessários uma câmera CCD (charge-coupled device), um laser de alta potência, um dispositivo óptico para converter a luz do laser em um feixe de luz, as partículas marcadoras e um sincronizador.

Para evitar imagens „tremidas“ ao analisar grandes vazões, são utilizados pulsos de laser. Eles capturam qualquer movimento agindo como um flash fotográfico em uma câmera digital. Laser é utilizado porque somente a luz de um laser pode ser focalizada como se fosse uma fina folha de luz, facilitando assim a separação do fluxo em camadas, permitindo com isso a geração das imagens para medição.

As partículas marcadoras são a base para a medição da velocidade utilizando-se a técnica PIV. Obviamente as partículas marcadoras devem ser tão pequenas quanto possível e ter massa específica próxima da do fluido, para que sejam capazes de acompanhar o fluxo. No entanto, não podem ser pequenas demais, porque neste caso dispersam a luz e não é possível produzir

imagens. Qualquer partícula que segue o fluxo de forma satisfatória e espalha luz suficiente para ser capturada pela câmera pode ser usada.

A figura 85 ilustra esquematicamente a configuração de um sistema para medição da velocidade das partículas dispersas em um fluxo de fluido utilizado-se a técnica PIV.

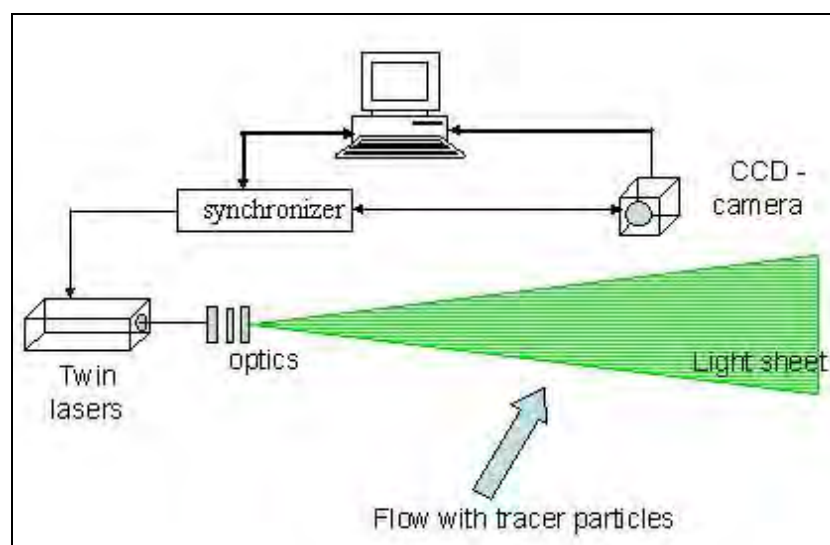


Figura 85 – Esquema de configuração para medição PIV. NOTA: A sincronização entre o laser e a câmera é controlada pelo Sincronizador.

Fonte: Ref. [31]

Cuidados para aplicação da técnica PIV:

- i) O tempo de atraso entre os pulsos de laser deve ser longo o suficiente para capturar o deslocamento das partículas marcadoras e curto o suficiente para que se possa observar partículas marcadoras que atravessam o plano formado por cada folha de luz.
- ii) Com o uso de lasers de alta potência, o tamanho de partículas marcadoras pode ser reduzido. A precisão das medições PIV irá melhorar drasticamente com partículas menores capazes de seguir o fluxo mais de perto.

## SPIV - Stereo Particle Image Velocimetry

O sistema de medição PIV descrito acima é capaz de medir apenas dois componentes de velocidade gerando então como resultado uma imagem bi-dimensional do fluxo de ar. Para medir as três componentes dos vetores de velocidade e gerar uma imagem tridimensional do fluxo é necessário o uso de um sistema estereoscópico. O princípio básico de medição é o mesmo apresentado para o PIV padrão, porém neste caso são necessárias duas câmeras.

Um sistema estereoscópico é baseado no mesmo princípio do olho humano. Cada um dos dois olhos humanos vê uma imagem diferente, e ao comparar as duas imagens, o cérebro é capaz de fazer uma interpretação em 3 dimensões. Aqui, as câmeras desempenham o papel de "olhos". A câmera e a lente devem ser alinhadas em um ângulo apontadas para a folha de luz. Como se sabe existe distorção da imagem. Portanto, o ângulo entre as câmeras é mantido pequeno para que a distorção seja tão pequena quanto possível. Para superar o problema de foco imposto pelo deslocamento angular, a condição de Scheimpflug deve ser preenchida (O plano da lente e o plano do objeto e o plano da imagem para cada uma das câmaras tem que se cruzar em uma linha comum). O método apresenta porém um efeito colateral que é a distorção de perspectiva. Já a distorção de perspectiva pode ser evitada pelo uso de uma função de mapeamento de segunda ordem (Raffel et al., 1998). A função de mapeamento é a matriz que transforma o sistema de coordenadas em pixel para coordenadas reais.



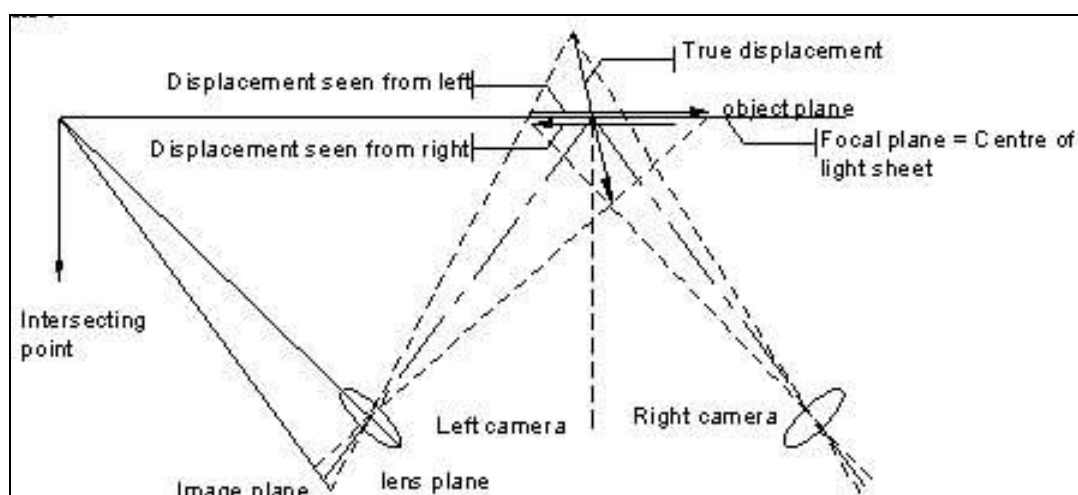


Figura 86 - Condição de Scheimpflug  
Fonte: Ref. [31]

O arranjo Scheimpflug permite manter o foco no plano da folha de luz para os fluxos de ar e de água. Nesta configuração de Scheimpflug a distorção na imagem em perspectiva com a forma de um retângulo que deve ser interpretada pelo sensor de imagem como um trapézio.

A figura 87 apresenta um esquema de montagem para medição de velocidades das partículas através da metodologia SPIV.

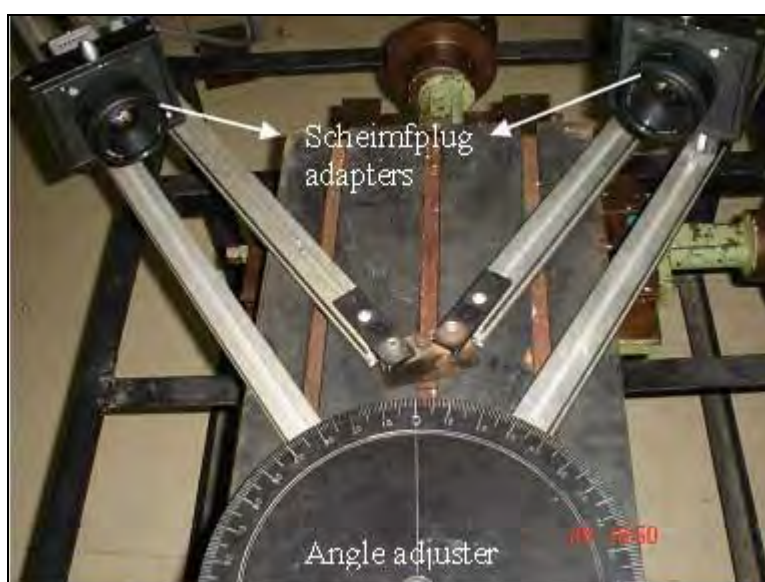


Figura 87 - Exemplo de esquema para um experimento SPIV.  
Fonte: Ref. [31]

## Apêndice C – Processos de construção de protótipos rápidos para validação de conceitos.

O primeiro deles é um processo conhecido estereolitografia. Este processo começa com a preparação do arquivo matemático do modelo. O modelo é então inserido em um software específico que gera o modelo construtivo do protótipo. Uma vez concluída esta etapa do processo inicia-se a construção do protótipo propriamente dita onde em uma cuba de resina líquida um laser solidifica camada por camada o modelo projetado na etapa anterior. A terceira parte do processo é o acabamento do protótipo. A peça então esta pronta para ser testada. Na figura 88 pode-se verificar um exemplo de um componente sendo construído segundo este processo.



Figura 88 - Processo de fabricação de protótipos em estereolitografia  
Fonte: Ref. [24]

O segundo processo é conhecido como SLS ou „Selective Laser Sintering“ é aplicado na fabricação de peças plásticas ou metálicas. Este processo começa também com a preparação do arquivo matemático do desenho do componente. O processo de construção do protótipo em plástico inicia-se com o aquecimento da „cuba“ que abriga nylon em pó e um laser „sinteriza“ camada por camada o modelo projetado na etapa anterior. A terceira parte do processo é o acabamento. A peça é então resfriada até a temperatura ambiente e em seguida está pronta para o uso em testes. Na figura 89 pode-se

verificar um exemplo de um componente plástico sendo construído segundo o processo descrito.



Figura 89 – Processo de fabricação de protótipos plásticos em SLS  
Fonte: Ref. [24]

Já o processo de construção do protótipo em metal inicia-se com o aquecimento da „cuba“ que abriga um composto de aço inox em pó e um aglutinante, o laser novamente „sinteriza“ camada por camada do modelo projetado na primeira etapa que é sempre igual quando se utiliza este tipo de equipamento. A terceira parte do processo é a „infiltração“ de bronze. Esta etapa adicional é necessária porque as peças saem da segunda etapa ainda frágeis. Assim para adquirir as propriedades mecânicas adequadas para um teste funcional as chamadas „peças verdes“ são levadas novamente a um forno onde barras de bronze são posicionadas de forma a preencher os vazios deixados pelo aglutinante quando o mesmo começa a evaporar. O bronze então substitui o aglutinante permitindo então que o protótipo adquira as características necessárias para ser testado.

A última etapa é o acabamento onde a peça é então resfriada e usinada para eliminação de rebarbas e excesso de material. Feito isto as peças estão prontas para o uso em testes. Na figura 90 pode-se verificar um exemplo de um componente metálico sendo construído segundo o processo descrito.

• SLS – Selective Laser Sintering • Peças Plásticas Funcionais • Insertos Metálicos •

### O Processo de SLS – Peças Metálicas

**Preparando o arquivo**  
A partir de um desenho CAD 3D, o equipamento de sinterização à laser divide o modelo em camadas para posteriormente iniciar sua construção.



**A construção**  
A área de trabalho do equipamento é aquecida e em uma cuba com pó composto de aço inox e aglutinante, um laser sinteriza camada por camada, até a construção total do modelo.



**Infiltração**  
Finalizada a construção as peças são retiradas do equipamento ainda frágeis (chamadas peças verdes) e são levadas a um forno com barras de bronze, passando por um processo de infiltração. Nessa fase as peças atingem uma temperatura suficiente para ocorrer a evaporação do aglutinante deixando espaço para a infiltração do bronze.



**Acabamento**  
Após a infiltração as peças são resfriadas e mecanizadas para eliminação de excesso de material e acabamento de acordo com as necessidades do projeto.



Figura 90 – Processo de fabricação de protótipos metálicos em SLS  
Fonte: Ref. [24]

O terceiro processo é conhecido como impressão em 3D ou Multi-Jet-Modeling. Este processo, como todos os descritos anteriormente, começa com a preparação do arquivo matemático do modelo construtivo. Neste caso a peça precisa de uma plataforma ou uma estrutura sobre a qual a será construída. O Software do equipamento calcula então o tempo e a melhor distribuição de material para otimizar a construção do protótipo. O processo de construção do protótipo inicia-se com a camada de suporte que é depositada em cera. Em seguida a máquina deposita camada por camada do modelo a resina de construção e quase que simultaneamente uma lâmpada ultravioleta acelera a polimerização do composto para que a próxima camada possa ser depositada. Assim que a impressão é finalizada é realizada então a extração dos suportes. A última parte do processo é o acabamento. As peças estão então prontas para o uso em testes. Na figura 91 pode-se verificar um exemplo de um componente sendo construído segundo o processo descrito acima.

• Impressora 3D • Multi-Jet-Modeling •

### O Processo de Construção

**Gerenciador de impressão**  
O equipamento InVision recebe um ou mais arquivos 3D formato stl em um gerenciador de impressão, que calcula o tempo e a melhor distribuição dos mesmos na plataforma de construção.

**Impressão**  
A construção do modelo se inicia com uma camada de suporte (em cera) e posteriormente camada por camada dos modelos (em resina). Essa construção é feita por um processo de fotopolimerização, através da cura da resina por uma lâmpada ultra violeta

**Exatidão dos suportes**  
Uma vez encerrada a impressão os modelos passam por um acabamento, onde os suportes são eliminados. Nesse momento é possível iniciar uma nova construção trocando-se a plataforma de construção.

**Acabamento final**  
Os modelos produzidos na InVision podem ser pintados, colados, montados e apresentados de acordo com as características do projeto inicial.

Figura 91 – Processo de fabricação de protótipos através da impressão em 3D  
Fonte: Ref. [24]