



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica



Jefferson Raimundo Magalhães

**Projeto e construção de uma bancada de fluxo para motores de combustão
interna**

Uberlândia

2017

Jefferson Raimundo Magalhães

Bancada de fluxo

Relatório de projeto de fim de curso apresentado
à Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Ferreira
Borges

Uberlândia

2017

Dedico este trabalho a meus pais pelo incentivo aos estudos e dedicação na minha criação. Também, ofereço a meu orientador e todos demais professores que contribuíram no meu ensino. Por fim, presto meu agradecimento a todo meus amigos.

Resumo

As bancadas de fluxo são aparelhos simples, mas muito úteis para determinar propriedades relativas ao escoamento de um fluido. Em particular as bancadas de fluxo de ar possuem significativa importância na indústria automobilística e podem desempenhar um papel acadêmico quando utilizadas por estudantes do curso de engenharia em disciplinas como mecânica dos fluidos e instrumentação. Desta forma, foi proposto o desenvolvimento de um projeto com o objetivo final de construir uma bancada de fluxo para aplicação em cabeçotes de motores de combustão interna. Como consequência, foi primeiramente realizado um estudo dos conceitos pertinentes à uma bancada de fluxo. Posteriormente, com o intuito de validar os conceitos foi construído um protótipo no qual um secador de cabelo atuou como fonte de ar, um cooler de computador como sensor de vazão e um manômetro caseiro do tipo tubo em U como sensor de pressão. Na sequência, foi utilizada a ferramenta de SWOT para determinar qual deveria ser a composição da bancada, onde se determinou utilizar os sensores MAP e MAF no projeto. Posteriormente, foi desenhada a bancada no Solidworks e proposto um algoritmo para implementar o controle do seu funcionamento. Por fim, foi feita uma análise de custo. Esta última etapa implicou no fim do projeto, já que o custo de construção da bancada estava acima do orçamento disponível. Todavia, apesar da não confecção propriamente dita da bancada de fluxo, considera-se que o trabalho foi concluído com sucesso visto que o protótipo comprovou os princípios estudados e o estudante envolvido no projeto aplicou seus conhecimentos adquiridos no curso de engenharia mecânica.

Abstract

Flowbenches are useful tools. Although their principle of work is simple, they can be applied to different fields. For instance, they are important to the automotive industry to determine various properties of engines. Furthermore, they also can be an education tool because they allow students to understand some subjects like fluid mechanics and instrumentation. Due to these points, this work was developed with the goal of creating a project to construct a flowbench for application in internal combustion engine heads. As a result, the student responsible for this project studied what is a flowbench and how it works. Then, it created a prototype of a flowbench using a hair dryer as a fan, a cooler of desktops as a flow sensor and a self-made U-tube manometer to prove the topics that were previously studied. The next step was a SWOT study, which determined what type of sensor should be used. Afterwards, this paper shows the design of a new flowbench proposed. Then, the last step was a financial study that canceled the sequence of the project. Even though, the project was not finished due to this financial issue, the conclusion is that the goals were partially achieved since the student applied his knowledge and the prototype proved the physical principles used by a flowbench.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Exemplo de bancada de fluxo	3
Figura 2. O relógio comparador é utilizado para determinar a posição das válvulas e então o cabeçote é submetido à uma bancada de fluxo (CORRAO, 2014).....	4
Figura 3. Resultados produzidos por uma bancada de fluxo (CORRAO, 2014).....	4
Figura 4. Curvas que relacionam dados obtidos em um experimento com o funcionamento do motor (MotorPower)	5
Figura 5. (Notch Weir) Primeiras formas de medir escoamentos de fluídos. Fonte: (COTTRELL, 2006).....	8
Figura 6. Estrutura de uma bancada de fluxo. (a) Esboço da bancada de fluxo construída e estuda por (ECKL, et. al., 2008) – adaptada. (b) Esboço de uma bancada de fluxo (MotorPower).....	11
Figura 7. Principais máquinas geradoras de fluxo de acordo com pressão de trabalho e vazão de operação (HENN, 2006).....	12
Figura 8 Princípio PWM. (Fonte: http://www.mecaweb.com.br/electronica/content/e_pwm) ...	14
Figura 9. Análise de Bernoulli para bancada de fluxo	15
Figura 10. Tubo em U para medição de pressão (Fonte: http://www.hrcontrol.com.pe/7574/manometros-de-tubo-en-u-o-columna-vertical-2/).....	16
Figura 11. Sensor de pressão MAP (Fonte: http://viseinjecao.webstorelw.com.br/t/sensor-map-pressao/).....	16
Figura 12. Simbologia de um sensor map combinado com sensor de temperatura e pontos de ligação elétrica – (Fonte: http://www.hackinlife.com.br/Mecanica/INJECAO/Ca68.htm)	17
Figura 13. Tubo de Pitot, principio de funcionamento (Fonte: (VIANA et. al., 1999))	20
Figura 14. Sensor de vazão do tipo turbina (Fonte: (BRAGA DOS SANTOS, 2014))	21
Figura 15. Sensor MAF (Fonte: http://www.cursosonline.net.com.br/licao/aula-7-sensor-de-massa-de-ar/).....	22
Figura 16. Composição de um sensor MAF. (Toyota Motor Sales)	22
Figura 17. Sensor MAF e sua relação entre tensão elétrica de saída e vazão (Toyota Motor Sales)	23
Figura 18. Sensores de temperatura. (a) sensor variação de dimensão tipo placa; (b) sensor variação dimensão tipo mola; (c) sensor variação de resistência; (d) termopar	24
Figura 19 Bancadas Superflow (Fonte: (SuperFlow, 2017)) (a) SF-260 Flowbench (b) SF-750 Flowbench (c) SF-1020 Probench (d) SF -1020-SB SUPERBENCH	26
Figura 20. Bancada de fluxo Tecnomec (Tecnomec, 2017).....	26
Figura 21. Projeto de bancada de fluxo para uso automotivo (CORRAO, 2014)	27
Figura 22. Bancada de fluxo DTEC (TODD).....	27
Figura 23. Esquema de bancada de fluxo para equipamentos eletrônicos (RECKTENWALD, 2006).....	27
Figura 24. Bancada de fluxo Saenz Flowbenches (Jamison Equipment, 2017).....	28
Figura 25. Patente US 4213327 A.....	29
Figura 26. Patente US 5808188.....	30
Figura 27. Patente US 6923051 B2.....	30
Figura 28.Algoritmo de funcionamento da patente US 6941249 B1.....	31
Figura 29. Adaptadores de cilindro (fonte: superflow).....	33
Figura 30. Bolas de fluxo.....	33
Figura 31. Gerador de fumaça	33

Figura 32. Tubo de Pitot(Fonte: (SuperFlow, 2017))	34
Figura 33. Kits adaptadores de furos	34
Figura 34. Protótipo de bancada de fluxo.....	37
Figura 35. Validação do controle de velocidade de um ventilador axial de corrente contínua	38
Figura 36. Sensor MAP utilizado durante construção do protótipo	39
Figura 37. Secador de cabelos usado como fonte de ar e cooler de computador usado como sensor de vazão	40
Figura 38. Bocais utilizados para teste	41
Figura 39. Desenho da bancada de fluxo no solidworks.....	47
Figura 40. Desenho dos componentes utilizados	47
Figura 41. Algoritmo da bancada de fluxo (Bizagi)	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Primeiras adesões industriais de bancadas de fluxo.....	9
Tabela 2. Primeiros usos e projetos de bancadas de fluxo.....	10
Tabela 3. Análise de SWOT Medidor em U de pressão	42
Tabela 4. Análise de SWOT sensores MAP	43
Tabela 5. Análise de SWOT de sensores de vazão do tipo placa de orifício	44
Tabela 6. Análise de SWOT dos sensor MAF	45
Tabela 7. Análise de SWOT dos sensores do tipo rotativo (cooler de computador).....	45
Tabela 8. Preços de bancadas de fluxo.....	50
Tabela 9. Custos relativos a construção de uma bancada de fluxo planejada	51

Sumário

Resumo	3
Abstract.....	4
1. Introdução	2
2. Objetivo	6
3. Revisão bibliográfica.....	8
3.1. História da bancada de fluxo.....	8
3.2. Princípio físico – A bancada de fluxo e seus componentes.....	10
3.2.1. Bomba de ar/ ventilador.....	11
3.2.2. Sensor de pressão	14
3.2.3. Sensor de vazão	17
3.2.4. Sensor de temperatura	23
3.3. Tipos de bancada de fluxo.....	25
3.4. Aplicações.....	31
4. Materiais e Métodos.....	35
5. Resultados e discussão	37
5.1. Construção do protótipo	37
5.2. Análise de SWOT	41
5.3. Proposta de bancada de fluxo	46
5.4. Algoritmo de funcionamento da bancada de fluxo	47
5.5. Análise de custos	49
6. Considerações finais.....	52
7. Referências bibliográficas	53

1. Introdução

A necessidade de medir provavelmente surgiu nos primórdios da sociedade humana. Fazer medições permitiu ao homem estabelecer parâmetros e regras necessárias para suas construções. Em particular, quando se realiza experimentos, nos mais diversos campos do conhecimento, o objetivo é medir parâmetros físicos, químicos, biológicos ou sociais que permitem a caracterização de determinada propriedade ou objeto. Este é o caso dos estudos relacionados ao escoamento de fluidos. Muito que se sabe sobre o comportamento de fluidos foi estabelecido através de análises experimentais. Mais do que isso, ainda que haja muito investimento em análises computacionais, os experimentos ainda são fonte essencial para determinar as características relacionadas ao escoamento de um fluido sobre um objeto. Logo, instrumentos, como uma bancada de fluxo, são úteis para diversos setores compreenderem o funcionamento dos seus fluidos e máquinas de trabalho.

Realmente, uma bancada de fluxo, que é de forma simples uma ferramenta para medir a resistência de um objeto ao escoamento de um fluido (BETTES, 2010), é muito importante. Resumidamente, são aparelhos que fazem escoar um fluxo de ar sobre uma peça. O escoamento é gerado por um ventilador ou bomba e são medidas a pressão, a vazão e em alguns casos a temperatura. Desta forma, os principais equipamentos de uma bancada são uma fonte de ar e sensores de pressão, vazão e temperatura. A Figura 1 ilustra uma bancada da marca Superflow, que é composta por um manômetro tipo em U e sensor de vazão do tipo placa de orifício.

Como disse ECKL, et. al. (2008), uma bancada de fluxo é uma “peça valiosa para diversos experimentos com fluidos.” Seja para o meio industrial, ou para o meio acadêmico, uma bancada de fluxo oferece diversas possibilidades de experimentos. Diversos componentes industriais devem ser analisados antes de serem comercializados. Um motor de combustão interna é um caso ilustrativo. Seus dutos de admissão e exaustão devem ser adequados para oferecer o escoamento necessário para permitir a queima de combustível e seu consequente funcionamento. O comando de válvulas deve ser estudado para que haja a entrada

suficiente de ar no motor. Ou ainda, uma bancada de fluxo pode avaliar carburadores e filtros dentre outros dispositivos de um motor de combustão. Por outro lado, uma bancada de fluxo também é uma rica ferramenta para o ensino de engenharia. Disciplinas que envolvem instrumentação, metrologia, mecânica dos fluidos e máquinas térmicas são beneficiadas da funcionalidade de uma bancada de fluxo no ensino. Por exemplo, é possível estabelecer coeficientes de descarga de peças simples, bem como explicar os passos necessários para o processo de medição.



Figura 1. Exemplo de bancada de fluxo

São equipamentos úteis para determinar propriedades dos motores de combustão interna. Com a realização de experimentos pode-se caracterizar a eficiência volumétrica, eficiência térmica, bem como relacionar o fluxo de ar com a potência e torque do motor. Por exemplo, um tipo de utilização bastante comum em uma bancada de fluxo é usar um relógio comparador para posicionar as válvulas em uma

posição e então medir a pressão e vazão que escoam pelo duto. A Figura 2 ilustra um relógio comparador sendo utilizado para posicionar a abertura das válvulas e então avaliar o cabeçote através da bancada de fluxo. Já a Figura 3 ilustra possíveis resultados desta avaliação. Por fim estes resultados podem ser úteis para traçar curvas conforme as ilustradas pela Figura 4.



Figura 2. O relógio comparador é utilizado para determinar a posição das válvulas e então o cabeçote é submetido à uma bancada de fluxo (CORRAO, 2014)

PETTIS PERFORMANCE RACING ENGINES <=> MACHINE SHOP <=> DYNO 17585 LEMON ST. HESPERIA, CA. 92345 <=> 760-244-5239 or 760-244-4415 <=> fax: 760-244-1572 www.PettisPerformance.com <=> PettisPerformance@Verizon.net									
FLOW BENCH RESULTS									
Project:	NICK CORRAO			SB Chev 461					
	Test pressure: 15.728			Bore size: 4.135					
PORT: 3/6 Int	Valve: 1.940			STOCK TUNE					
	Valve seat: AS RECEIVED								
scale:	71.4	150	150	298	298	298	298	298	298
meter:	02.5	59	83	49	50	50	50	50	50
15" LIFT:	.100	.200	.300	.400	.500	.600			
CFM:	44.6	88.5	124.5	146.0	149	149			
gain:									
Notes:									
PORT: 3/6 Int	Valve: 1.940			STOCK TUNE					
	Valve seat: AS RECEIVED								
scale:	71.4	150	298	298	298	298	298	298	298
meter:	0.7	80.5	56	6.5	68	68	68	68	68
28" LIFT:	.100	.200	.300	.400	.500	.600			
CFM:	62.1	120.7	166.8	193.7	202.6	202.6			
gain:									
Notes:									

Figura 3. Resultados produzidos por uma bancada de fluxo (CORRAO, 2014)

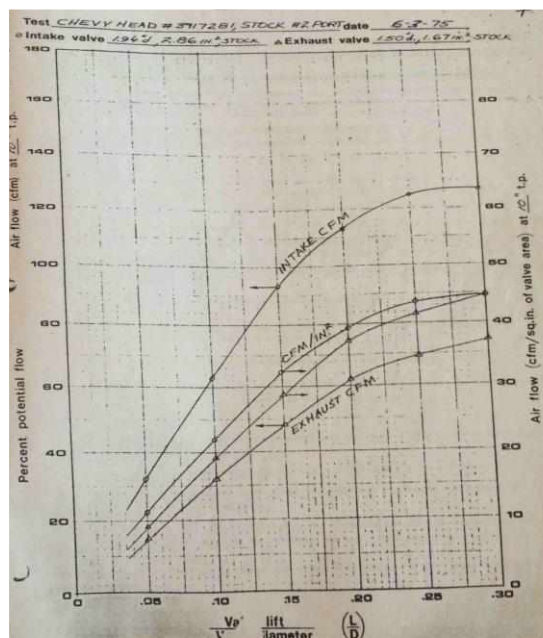


Figura 4. Curvas que relacionam dados obtidos em um experimento com o funcionamento do motor (MOTORPOWER, s.n.t.)

Desta forma dois pontos de atenção são com relação ao funcionamento deste tipo de equipamento e o outro com relação a sua construção. De fato, não basta somente submeter um objeto ao escoamento produzido por uma bancada de fluxo. Algumas pessoas produzem dados sem valor quando não se atentam aos significados físicos do escoamento de fluidos. Por exemplo, resultados de vazão obtidos em uma bancada de fluxo não possuem nenhum significado se não for informada a pressão de teste. Da mesma forma, a construção de uma bancada de fluxo que ignore fatores físicos que influenciam no resultado implica em um equipamento que irá produzir saídas de resultados incoerentes com a realidade. Ilustrativamente, existem bancadas nas quais o sensor de vazão utilizado está sujeito a produzir respostas diferentes devido a variações de temperatura e pressão. Caso não se corrija os valores para diferentes temperaturas, a bancada não será precisa. Portanto, é importante compreender como uma bancada de fluxo funciona e como ela é projetada e construída. Neste sentido, este trabalho visa destacar os princípios de uma bancada de fluxo e propor um projeto de bancada útil para aplicações de ensino, especialmente no âmbito da indústria automobilística.

2. Objetivo

Comercialmente, as bancadas de fluxo são equipamentos caros, que custam até R\$ 60.000,00, mas de grande valor agregado. Entretanto, como existe a necessidade de estudar o escoamento de fluidos para desenvolver projetos melhores, a análise experimental de seu comportamento ainda demanda o investimento de muitos recursos. Por exemplo, para aprimorar a eficiência de um motor de combustão interna é crucial verificar a resistência ao escoamento em diversas peças, porém, de forma, geral as empresas acabam optando por terceirizar este tipo de serviço dado o custo desta atividade. Portanto, é importante desenvolver técnicas capazes de ofertar um melhor custo benefício. Assim, à medida que a construção de bancadas de fluxo se tornar mais acessível é possível incentivar melhores projetos no campo da mecânica dos fluídos, bem como permitir a propagação do saber em instituições de ensino.

Neste contexto, a elaboração de um projeto de uma bancada de fluxo tem como intuito capacitar as pessoas envolvidas, permitindo a consolidação do conhecimento e aplicação de saberes teóricos. Através do entendimento das características de uma bancada de fluxo é possível aprimorar o aprendizado ofertado por disciplinas como mecânica dos fluidos, instrumentação e metrologia que são ministradas no curso de engenharia mecânica. Além disso, com o desenvolvimento de um projeto de bancada de fluxo é possível criar ferramentas úteis para futuras aplicações de ensino. Neste caso, o projeto pode ser futuramente usado para aulas ou validações práticas na Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

Assim, com o intuito de capacitar o discente envolvido no projeto e elaborar um plano que possa ser futuramente aproveitado pela UFU, o projeto será dividido em etapas. Primeiramente, foi realizada uma pesquisa bibliográfica para consolidação dos tópicos técnicos necessários para compreensão de uma bancada de fluxo. Segundo, pretende-se construir um protótipo de bancada de fluxo com o intuito de validar os conceitos estudados. Posteriormente, serão utilizados métodos de tomada de decisão e análise de custo benefício para definir o tipo de bancada a ser projetada. Em seguida, será proposto um modelo para construção de uma bancada de fluxo.

Quando o projeto proposto se mostrar financeiramente viável e compatível com os recursos disponíveis, será feita a construção da bancada de fluxo nos moldes propostos. Por fim, quando a bancada for de fato construída, o próximo objetivo a ser alcançado será o de calibrar o instrumento e reduzir as incertezas, assegurando que nas análises realizadas obtenha-se valores coerentes com outros equipamentos similares.

3. Revisão bibliográfica

3.1. História da bancada de fluxo

Mensurar as propriedades de um escoamento de fluido é uma atividade relevante para uma variedade de aplicações, uma vez que a utilização dos fluidos é muito importante na engenharia. É o caso do abastecimento de água das cidades, ou ainda, dos motores automotivos e aéreos que não operam sem oxigênio. Enfim, os fluidos estão relacionados ao dia a dia da sociedade humana. Portanto, não surpreende que o desenvolvimento do homem se relacione a expansão do conhecimento sobre fluidos e da mesma forma com sua capacidade de compreender e mensurar os fluidos de trabalho.

Desde as primeiras sociedades o homem utilizou algum fluido ao seu favor. Com o surgimento da agricultura, que foi fator chave para estruturação da sociedade, surgiu também a necessidade de irrigação. (COTTRELL, 2006) relata que as antigas cidades sumérias de UR e Kish, próximas aos rios Tigres e Eufrates, mediam o fluxo de água para alimentar os seus canais de irrigação. Eram sistemas simples, os chamados “notch weir” (Figura 5), que basicamente criavam uma obstrução no fluxo d’água e mediam a altura da coluna d’água gerada, permitindo assim estimar a quantidade de líquido que escorria em seus sistemas.



Figura 5. (Notch Weir) Primeiras formas de medir escoamentos de fluídos. Fonte: (COTTRELL, 2006)

Posteriormente, já em 1450, foi inventado o primeiro anemômetro, instrumento responsável por medir a velocidade de escoamento de um fluído. O aparelho surgiu do trabalho do arquiteto italiano Battista Alberti que criou um dispositivo no qual um

disco posicionado contra o vento girava à medida que era forçado pelo arrasto do escoamento de ar ao seu redor e assim pela consequente inclinação do disco era possível determinar a velocidade do ar. Esse foi o primeiro dispositivo criado, mas no futuro acabou sendo reinventado por Robert Hooke em 1709. (COTTRELL, 2006)

Apesar destas primeiras experiências de medição de escoamento de fluidos, as bancadas de fluxo surgiram somente com a necessidade de desenvolver motores de combustão. Foi no início do século XX que ocorreram os primeiros estudos mais direcionados ao escoamento de ar com caráter de teste de fluxo. Decorrente do nascimento da indústria aeronáutica, houve a necessidade de entender a influência do ar na performance dos motores e isso foi a causa destas abordagens. Em sequência, o conceito que hoje entende-se por bancadas de fluxo de ar só surgiu na década de 1960.

Por outro lado, (BETTES, 2010) e (Spindustry Digital, 2015) destacam que com a necessidade de desenvolver carros de alta performance, nasceu a demanda das bancadas de fluxo. De acordo com (Spindustry Digital, 2015), as primeiras bancadas eram caras, espaçosas e com baixa eficiência, apesar disto, eram usadas para manufatura de equipamentos originais. Elas foram aplicadas a partir do final da década de 1960 para sanar necessidades específicas conforme a sequência histórica apresentada pela Tabela 1.

Tabela 1. Primeiras adesões industriais ao uso de bancadas de fluxo

Empresa	Evento
Oldsmobile and Pontiac	Utilizou uma bancada de fluxo para desenvolver projetos.
Chevrolet	Criou seus primeiros laboratórios na década de 1970.
Chrysler	Em paralelo com a introdução do motor 426 Hemi adaptaram um laboratório para desenvolverem seus trabalhos com fluidos.
American Motors	Na década de 1970 utilizou uma bancada de fluxo para desenvolver novos projetos.
Ford Motor	Como parte do desenvolvimento dos carros de corrida GT40 utilizou dados de um laboratório com bancada de fluxo em meados da década de 1960.

Simultaneamente às abordagens, alguns pioneiros e apaixonados por carros ajudaram o desenvolvimento das bancadas de fluxo. A Tabela 2 ilustra uma sequência de fatos e personagens que contribuíram nos estudos relacionados com bancadas de fluxo.

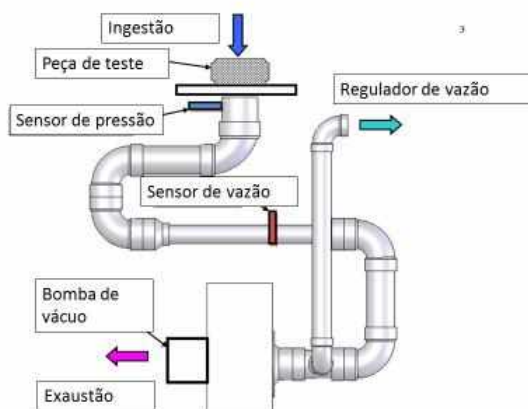
Tabela 2 Primeiros usos e projetos de bancadas de fluxo

Pesquisador	Evento
Warren Brownfield	Utilizou uma bancada de fluxo para desenvolver seu cabeçote. Aproveitou este fato para apresentar um protótipo na década de 1970.
Guy Williams from Tusla	Em 1972 introduziu uma bancada de fluxo mais acessível com menor custo.
C.R. Axtell	Entre as décadas de 1960 e 1970 construiu uma serie de bancadas de fluxo.

Como (COTTRELL, 2006) destacou, avaliando as primeiras bancadas de fluxo, elas parecem arcaicas, porém, seus fundamentos continuam a base para os equipamentos atuais. Pode-se dizer que houve uma melhoria continua nos equipamentos, porém os princípios físicos continuam os mesmos.

3.2. Princípio físico – A bancada de fluxo e seus componentes

Uma bancada de fluxo é um equipamento simples. Basicamente, consiste em produzir um escoamento em uma peça e determinar características físicas através da avaliação da vazão em uma determinada pressão de teste. E no que tange sua construção, uma bancada de fluxo nada mais é do que uma bomba de ar que induz um escoamento, sendo equipada com sensores e dispositivos de saída de informação. A Figura 6 mostra a estrutura de uma bancada de fluxo, onde (a) é um esboço utilizado por (ECKL, et. al., 2008) e (b) é um modelo apresentado por (MOTORPOWER, s.n.t.).



(a)

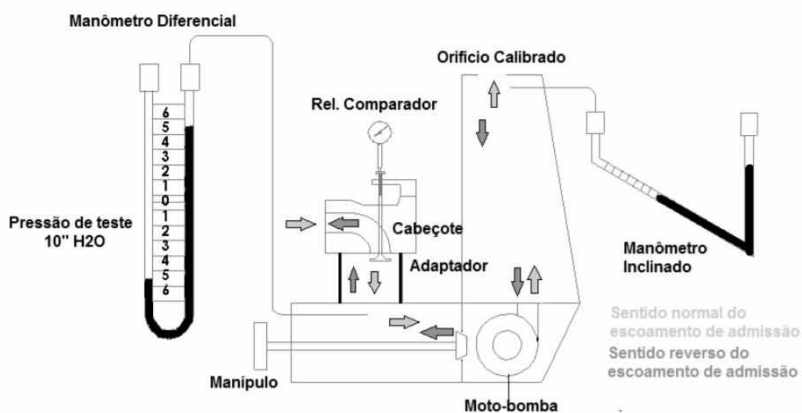


Figura 4.11- Esquema de funcionamento da bancada de fluxo

(b)

Figura 6. Estrutura de uma bancada de fluxo. (a) Esboço da bancada de fluxo construída e estuda por (ECKL, et. al., 2008) – adaptada. (b) Esboço de uma bancada de fluxo (MOTORPOWER, s.n.t.)

3.2.1. Bomba de ar/ ventilador

Para o funcionamento de uma bancada de fluxo é necessário promover o escoamento do ar, isto é, movimento ordenado das partículas do fluido. Neste contexto, pelo princípio de conservação de energia, é necessário transferir energia para o fluido de tal forma que o escoamento seja criado e mantido. A maneira mais

simples e tradicional é através da utilização de uma máquina geradora de fluxo, que de acordo com Henn, (2006) “é uma máquina que recebe trabalho mecânico e transforma em energia de fluido”.

As máquinas geradoras de fluxo são representadas por equipamentos que trabalham tanto com líquidos quanto com gases. Dando ênfase à aplicação com gases, como o ar, temos que os principais tipos de máquina de fluxo são os ventiladores e compressores. A Figura 7 mostra a diferenciação feita por (HENN, 2006).

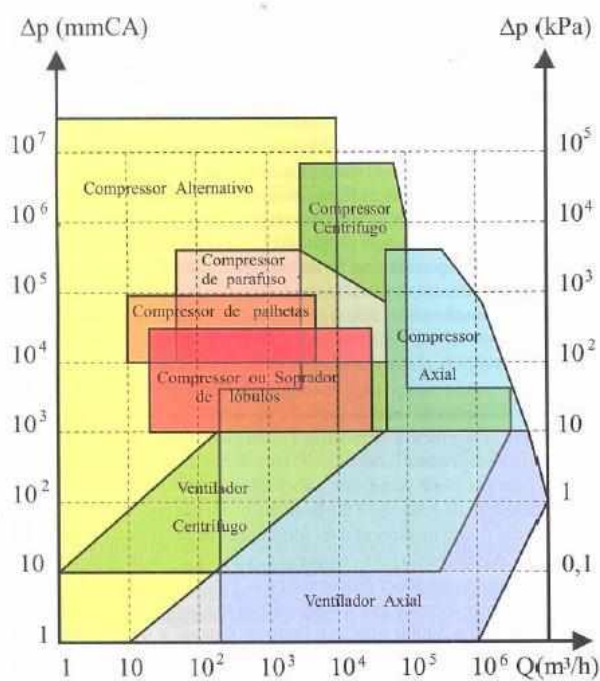


Figura 7. Principais máquinas geradoras de fluxo de acordo com pressão de trabalho e vazão de operação (HENN, 2006).

Como enfatizado pela Figura 7, observa-se que a diferenciação em destaque leva em conta justamente a pressão e a vazão de trabalho. Assim, normalmente define-se a pressão de trabalho e os valores de vazão esperada para selecionar o ventilador necessário para a bancada, considerando que em geral, as bancadas de fluxo operam a 10 inH₂O ou 28" com vazões de até 640 CFM.

Nestas condições, pode-se afirmar que o comportamento do ar pode ser aproximado para um fluido incompressível. Realmente, isto é verdade conforme (FEM - Unicamp,

s.n.t.) mostrou que ventiladores que criam gradientes de pressão inferiores a 500 mmH₂O são classificados como “de baixa pressão” ou olhando para velocidade de escoamento têm-se que para Mach inferior a 0,3 o escoamento ainda pode ser considerado como incompressível. E o mais importante é que, como consequência disso, a “análise fica simplificada e é realizada de forma similar àquela que se aplica à compressão de um líquido por uma bomba, ou ao escoamento de um líquido em tubulações”

Assim, quando falamos de uma bancada podemos assumir que o ar irá se comportar como um fluido incompressível e como resultado podemos caracterizar a máquina de fluxo e o escoamento pelas equações da conservação de massa, da conservação de energia, da quantidade de momento (HENN, 2006).

Além de poderem trabalhar de forma autônoma, também é possível associar ventiladores e/ou compressores para atingir a demanda física do projeto em questão. Neste sentido, qualquer bomba ou configuração de bomba capaz de criar o gradiente de pressão e a vazão de ar necessária para as aplicações em bancada de fluxo pode ser adotado como uma solução de projeto. De fato, (HENN, 2006) destaca que é normal utilizar associação em série ou em paralelo de bombeamento ou insuflação de gás seja por quesitos econômicos, segurança ou mesmo manutenção. Neste sentido ele ainda mostra como é realizado o projeto através de equações e gráficos. Em contrapartida a esta facilidade de se obter um sistema de bombas com as características desejadas, existe uma certa dificuldade relativa ao tempo de resposta e controle da bomba. Como o objetivo é operar a bancada de fluxo em uma pressão de trabalho específica, em determinados casos é difícil configurar a bancada, especialmente aquelas de produção caseira. Para solucionar este problema, uma possível abordagem é a chamada modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation* em inglês) ou simplesmente PWM, que converte um sinal contínuo em um sinal periódico de tal forma a manter uma rotação intermediária entre a máxima rotação possível e o sistema estacionário, conforme pode ser visto na Figura 8.

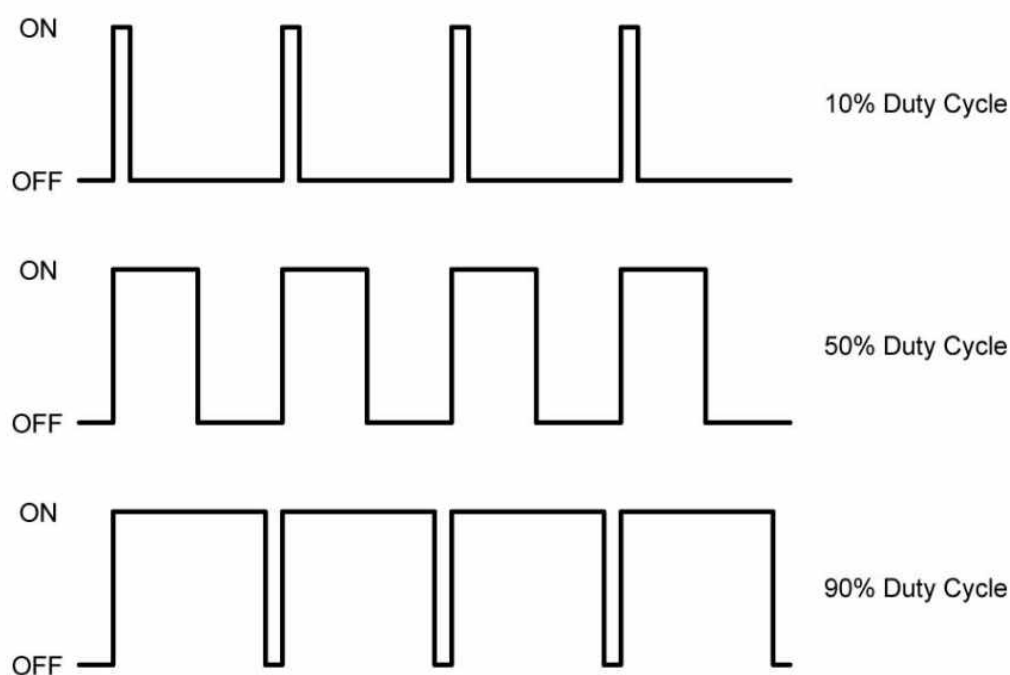


Figura 8 Princípio PWM. (Fonte: http://www.mecaweb.com.br/electronica/content/e_pwm)

3.2.2. Sensor de pressão

Com a presença de um escoamento dois fatores físicos são essenciais para caracterizar o fluxo, a pressão e a vazão. Durante um experimento com uma bancada de fluxo o escoamento resultante cria um gradiente de pressão na tubulação da bancada e com este escoamento nesta dada diferença de pressão mede-se a quantidade de ar que escoar por ali (HYPERFLOW, 1992).

No trabalho com mecânica dos fluidos pode-se usar as equações para provar a importância da pressão de trabalho. Explorando a ideia de volume de controle (V.C.) (FOX et. al., 2004) pode-se traçar o esquema ilustrado na Figura 9. Usando o ponto de estagnação A e o ponto B expostos na Figura 9 e desconsiderando as perdas térmicas e por atrito tem-se que por Bernoulli,

$$p_a = p_b + \frac{v_b^2}{2} \quad (1).$$

Reorganizando a equação, pode-se escrever,

$$\Delta p = \frac{v_b^2}{2} \quad (2)$$

Em outras palavras a velocidade do fluxo no ponto B está diretamente relacionada ao gradiente de pressão Δp . Porém, destaca-se que esta relação está incompleta. Ao considerar as perdas envolvidas no sistema tem-se a análise real e assim é possível determinar algumas características físicas da peça como o seu coeficiente de descarga. E por isso, mede-se também a vazão de escoamento.

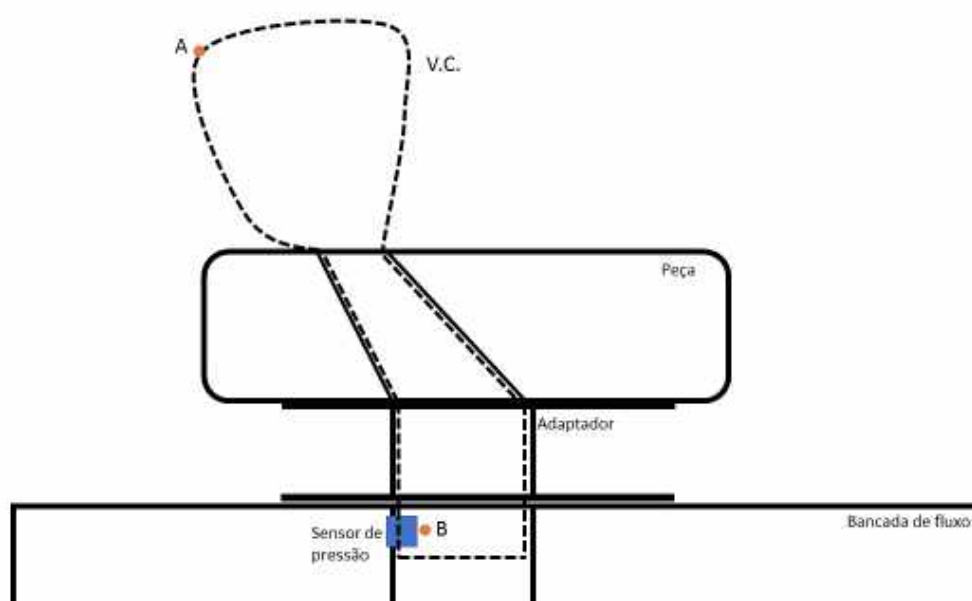


Figura 9. Análise de Bernoulli para bancada de fluxo

O gradiente de pressão Δp é denominada pressão de teste. É a diferença entre a pressão atmosférica e a pressão no tubo de sucção e que normalmente é expressa em polegadas d'água (HYPERFLOW, 1992). Sem esta pressão não é possível caracterizar o escoamento. Como pode-se observar pela equação de Bernoulli, a vazão e a pressão estão relacionadas. Portanto, para compreender de fato o processo físico que envolve o escoamento deve-se monitorar estas duas propriedades.

Logo, para caracterizar o experimento é necessário utilizar um medidor, ou sensor, de pressão. Este equipamento é normalmente chamado de barômetro ou manômetro e pode operar de acordo com diferentes princípios para realizar a medição. Um dos sensores mais comuns é o tubo em U, apresentado na Figura 10 que utiliza uma

massa de líquido como comparação. Outra possibilidade é usar um sensor elétrico do tipo MAP (Figura 11) que pode ser adaptado em uma bancada de fluxo para trabalhar como sensor de pressão. (LAGANÁ, s.n.t.) diz que, em termos gerais, os sensores de pressão podem ser piezoresistivos, ou seja, que usam o princípio do strain-gauge, capacitivos e piezelétricos.



Figura 10. Tubo em U para medição de pressão



Figura 11. Sensor de pressão MAP

No caso do tubo em U, a fundamentação física do seu funcionamento é devida ao princípio de Pascal, que diz que a variação de pressão em um dado ponto de um líquido é transmitida igualmente a todos os pontos do líquido. Já no caso dos demais

sensores eles funcionam através de respostas elétricas. Por exemplo, para os sensores pizoresistivos utiliza-se o princípio da extensometria elétrica, que é uma técnica onde a variação de pressão provoca deformações no arame que por sua vez faz a resistência elétrica do material variar e como consequência permite estimar a pressão através da variação de tensão gerada ao manter uma corrente constante. A Figura 12 mostra a simbologia de um sensor MAP combinado com um sensor de temperatura e suas entradas elétricas.

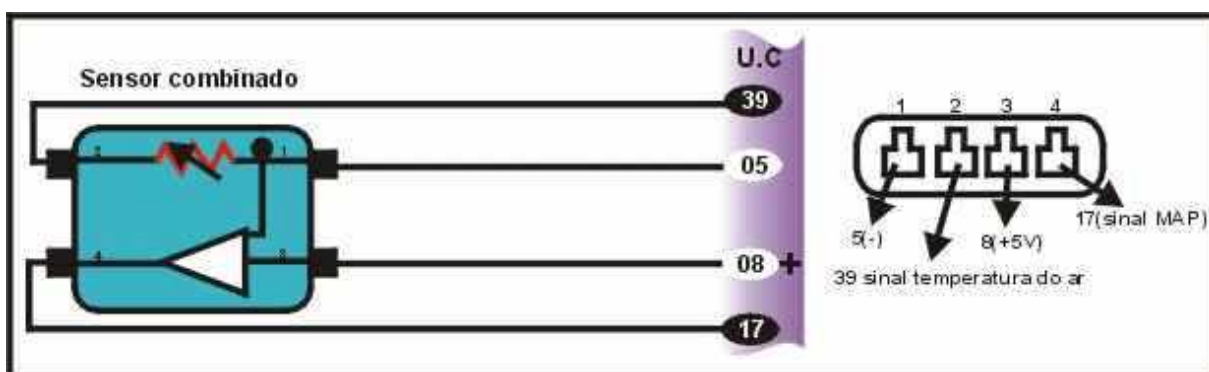


Figura 12. Simbologia de um sensor map combinado com sensor de temperatura e pontos de ligação elétrica

3.2.3. Sensor de vazão

A propriedade física que avalia a quantidade de matéria em volume que escoar em uma área definida em um dado intervalo tempo recebe o nome de vazão. A vazão é na verdade uma das grandezas físicas mais medidas em processos industriais, só fica atrás da pressão e da temperatura (CRISTINE et. al., 2013). De fato, a vazão caracteriza o processo que ocorre em uma bancada de fluxo juntamente com a pressão conforme mencionado anteriormente. Logo, é importante utilizar um sensor capaz de medir esta propriedade física com acurácia.

Existem diversos modelos de sensor de vazão, mas em geral podemos classificar os métodos de medir a vazão em duas diferentes metodologias, pelo método direto, ou pelo método indireto. Em outras palavras, medições que se dão pelas leis da dinâmica de fluidos a partir da observação das alterações introduzidas no

escoamento, ou medições que não alteram o escoamento, respectivamente (BRAGA DOS SANTOS, 2014).

Por outro lado, (VIANA et. al., 1999) separa os medidores de vazão em diretos, indiretos e especiais. De acordo com esta divisão, os medidores diretos são de deslocamento positivo, como disco nutante, pistão flutuante, rodas ovais e roots e os sensores que medem pela velocidade de impacto do fluido como os medidores tipo hélice e tipo turbina. Já os medidores indiretos seriam aqueles que operam por perda de carga variável, como tubo pitot, tubo de venturi, placa de orifício e os que operam por área variável, como um rotâmetro. E ainda enquanto medidores especiais se enquadram os sensores que medem por eletromagnetismo, vortex, ultra-sônico e coriolis.

Outra abordagem foi feita por (Magnetrol, 2012) que não classificou os sensores em diretos ou indiretos, mas sim com relação ao princípio físico de operação e então relacionou entre sensores com suas aplicações em termos de fluidos líquidos, gases ou vapores. Neste contexto, ele destacou os sensores por diferencial de pressão, vortex, turbina, magnetismo, deslocamento positivo, área variável, coriolis, ultrassônico e térmico.

i. Medidores de vazão por perda de carga variável – Orifício e Venturi

A placa de orifício é um mecanismo muito simples. Como o próprio nome diz é simplesmente uma placa onde se encontra um orifício, ou uma série de orifícios. Assim, mesmo sendo um instrumento criado em 1779 por Giovanni Venturi, a placa de orifício continua sendo o principal sensor para medição de vazão pela sua simplicidade (BETTES, 2010). Em somatória, outro sensor bastante utilizado e que segue os mesmos princípios da placa de orifício é o tubo venturi, porém ao contrário da placa de orifício este opera com uma queda suave na pressão de trabalho ao invés de uma queda brusca que ocorre nas placas de orifício.

Somando a este primeiro tocante de simplicidade, a placa de orifício é também o dispositivo que permite verificar de forma mais simples a necessidade de calibração com o passar do tempo. E ainda, não é um mecanismo que normalmente apresenta

dependência do ambiente e é muito resistente as mudanças impostas por possíveis contaminações do ar envolvido no trabalho da bancada do fluxo (BETTES, 2010).

Em contrapartida aos benefícios da placa de orifícios, encontra-se algumas limitações deste tipo de sensor. As principais desvantagens da placa de orifício são a sua capacidade limitada e a elevada perda de carga permanente devido à expansão não controlada à jusante do elemento medidor (SOUZA, 2010).

A placa de orifício é fundamentada pela conservação de energia e utiliza como ferramenta para cálculo da vazão a equação de Bernoulli (COTTRELL, 2006). Basicamente, a placa de orifício cria um gradiente de pressão e converte energia dinâmica em energia estática. Já que energia dinâmica está relacionada ao movimento (ao fluxo) e a energia estática está relacionada à pressão estática, é possível medir a vazão através do princípio da conservação de energia.

Porém, para levar em consideração os efeitos reais, é introduzido um termo chamado coeficiente de descarga, que leva em consideração efeitos de turbulência e perda de carga. Assim, a equação resultante para medir a vazão é:

$$Q = C_d \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \quad (3).$$

De forma mais geral (VIANA et. al., 1999) incorporou os medidores de orifício e venturi no conjunto de medidores que sofrem perda de carga. Neste caso, “Considerando-se uma tubulação com um fluido passante, chama-se perda de carga dessa tubulação a queda de pressão sofrida pelo fluido ao atravessá-la”. As causas da perda de carga são: atrito entre o fluido e a parede interna do tubo, mudança de pressão e velocidade devido a uma curva ou um obstáculo, etc. Os diversos medidores de perda de carga variável usam diferentes tipos de obstáculos ao fluxo do líquido, provocando uma queda de pressão. Relacionando essa perda de pressão com a vazão, determina-se a medição pela equação 4.

$$Q = K \sqrt{\frac{P_1 T_p}{P_p T_1}} \sqrt{\Delta P} \quad (4).$$

Onde, Q é a vazão do fluido do local do estreitamento, K é uma constante, P_1 é a pressão medida, P_p é a pressão do projeto, T_1 é a temperatura medida, T_p é a temperatura de projeto e ΔP é a perda de carga entre o fluxo a montante e jusante do estreitamento.

ii. Tubo de Pitot

Este tipo de dispositivo foi inicialmente criado por Henri Pitot em 1732 e consiste em identificar a diferença entre a pressão total e a estática. O tubo de Pitot, ou pitômetro, transforma energia do fluido em energia potencial gravitacional. O escoamento cria uma pressão sobre a camada superficial de um lado do fluido fazendo com que exista uma diferença na altura dos líquidos em cada lado. A diferença de altura é compensada pela pressão exercida pelo fluido (Figura 13). Desta forma, no caso do tubo de pitot, a vazão pode ser calculada pela equação 5. (CRISTINE et. al., 2013)

$$v = \sqrt{2g\Delta h} \quad (5).$$

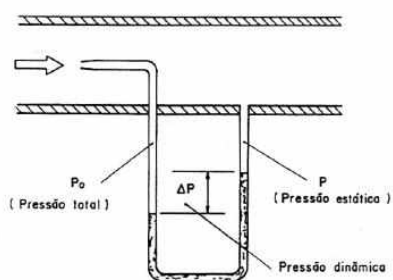


Figura 13. Tubo de Pitot, princípio de funcionamento (Fonte: (VIANA et. al., 1999))

(VIANA et. al., 1999) ainda destaca que no tubo de Pitot as extremidades são postas em posições específicas. Uma abertura do tubo é a favor da corrente e outro em sentido contrário a vazão de fluido. Essa estrutura permite estabelecer uma conexão entre a altura da coluna do fluido no tubo de Pitot e a pressão dinâmica, e consequentemente é possível calcular a vazão e velocidade de escoamento do fluido.

iii. Medidores de vazão do tipo turbina

Um tipo de sensor que utiliza ações dinâmicas para determinar a vazão é o do tipo turbina (Figura 14). Basicamente, o mecanismo é acionado, isto é, suas pás começam a rotacionar, quando existe um fluxo. Quanto maior o fluxo maior será a velocidade das pás, conseqüentemente é possível determinar a velocidade do fluido através da velocidade de rotação das pás. (BRAGA DOS SANTOS, 2014)



Figura 14. Sensor de vazão do tipo turbina (Fonte: (BRAGA DOS SANTOS, 2014))

iv. Fio quente

Uma outra maneira de determinar a vazão de um escoamento é através de considerações térmicas, como é o caso de um sensor de vazão de fio quente. Enquanto outros sensores utilizam a conversão de energia do fluido em energia mecânica, o anemômetro de fio quente determina a velocidade do fluido considerando fatores térmicos. (COTTRELL, 2006) afirma que o conceito é bem simples, mas é difícil de operar. Consiste em um sistema que mede quanto calor o fio libera para o ambiente. Isto é feito, basicamente com um fio integrado a um sistema de corrente contínua. Se a corrente é constante e conhecendo as propriedades do fio é possível determinar o fluxo de ar medindo a tensão. A dificuldade está no fato de que a massa específica e a temperatura influenciam na quantidade de calor absorvido. Logo, para transpor esta dificuldade normalmente se adotam dois fios. Um serve como parâmetro para o outro. Em geral um fica exposto ao fluxo e o outro não, assim é possível estabelecer uma relação clara.

Um dos principais representantes dos medidores de vazão por fio quente são os sensores MAF (Figura 15) que operam com este princípio. (Toyota Motor Sales,

s.n.t.) destaca que o sensor MAF é basicamente composto por um termostato, um fio de platina e um circuito eletrônico de controle (Figura 16). Assim, seguindo o princípio de funcionamento de um sensor de fio quente, tem-se que o fio é mantido a temperatura constante através de uma relação estabelecida entre o termostato, que mede a temperatura do ar, e o circuito eletrônico que compensa as perdas de calor ocorridas devido à variação de vazão através do aumento de corrente elétrica no circuito. Desta forma, o sensor é capaz de emitir um sinal que é equivalente a uma tensão elétrica que pode então ser relacionada ao fluxo de ar (Figura 17).

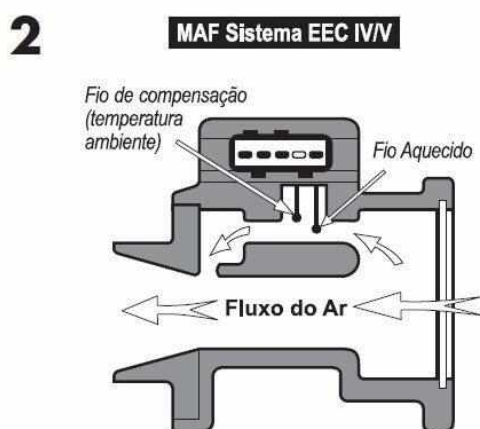


Figura 15. Sensor MAF (Fonte: <http://www.cursosonline.mte.com.br/licao/aula-7-sensor-de-massa-de-ar/>)

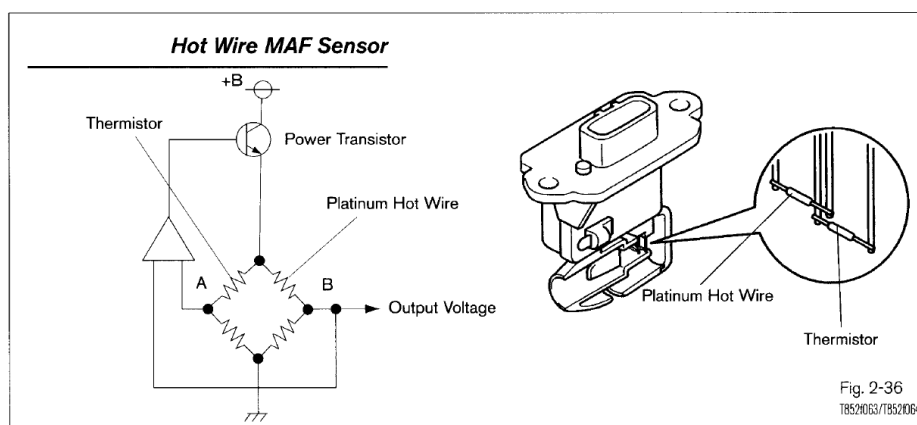


Figura 16. Composição de um sensor MAF. (Toyota Motor Sales, s.n.t.)

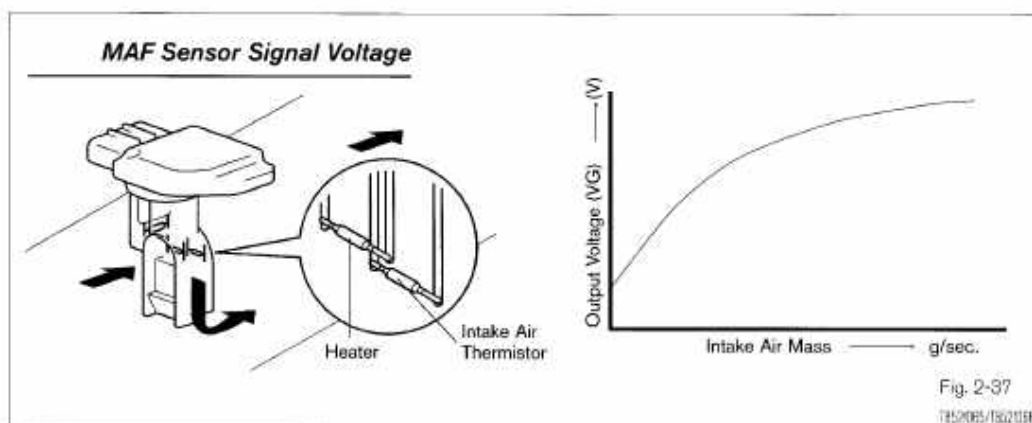


Figura 17. Sensor MAF e sua relação entre tensão elétrica de saída e vazão (Toyota Motor Sales, s.n.t.)

Todavia, é importante destacar que o sensor MAF também pode operar através de outros princípios de funcionamento. Por exemplo, ele pode ser do tipo película aquecida,

3.2.4. Sensor de temperatura

Outra importante propriedade física é a temperatura. A temperatura mostra-se uma propriedade de atenção quando as condições do ambiente estão sujeitas as variações que comprometam a repetitividade do experimento. De fato, isso ocorre pelo fato de que a massa específica do fluido está diretamente relacionada a pressão e temperatura. Em outras palavras, se alterada a temperatura de forma perceptível é como se houvesse a substituição do fluido de trabalho.

Logo, nas bancadas de fluxo existem duas opções. A primeira é utilizar uma bancada onde os efeitos térmicos não são importantes e, portanto, não é necessário um sensor de temperatura. Por outro lado, onde os efeitos térmicos são importantes, é necessário adotar um sensor de temperatura. Este pode utilizar diferentes princípios de funcionamento. (BRAGA DOS SANTOS, 2014) destaca que os sensores de temperatura podem operar baseados na variação de dimensão, sensores baseados

na variação de pressão, sensores baseados na variação de resistência, termopares e pirômetros ópticos (Figura 18).

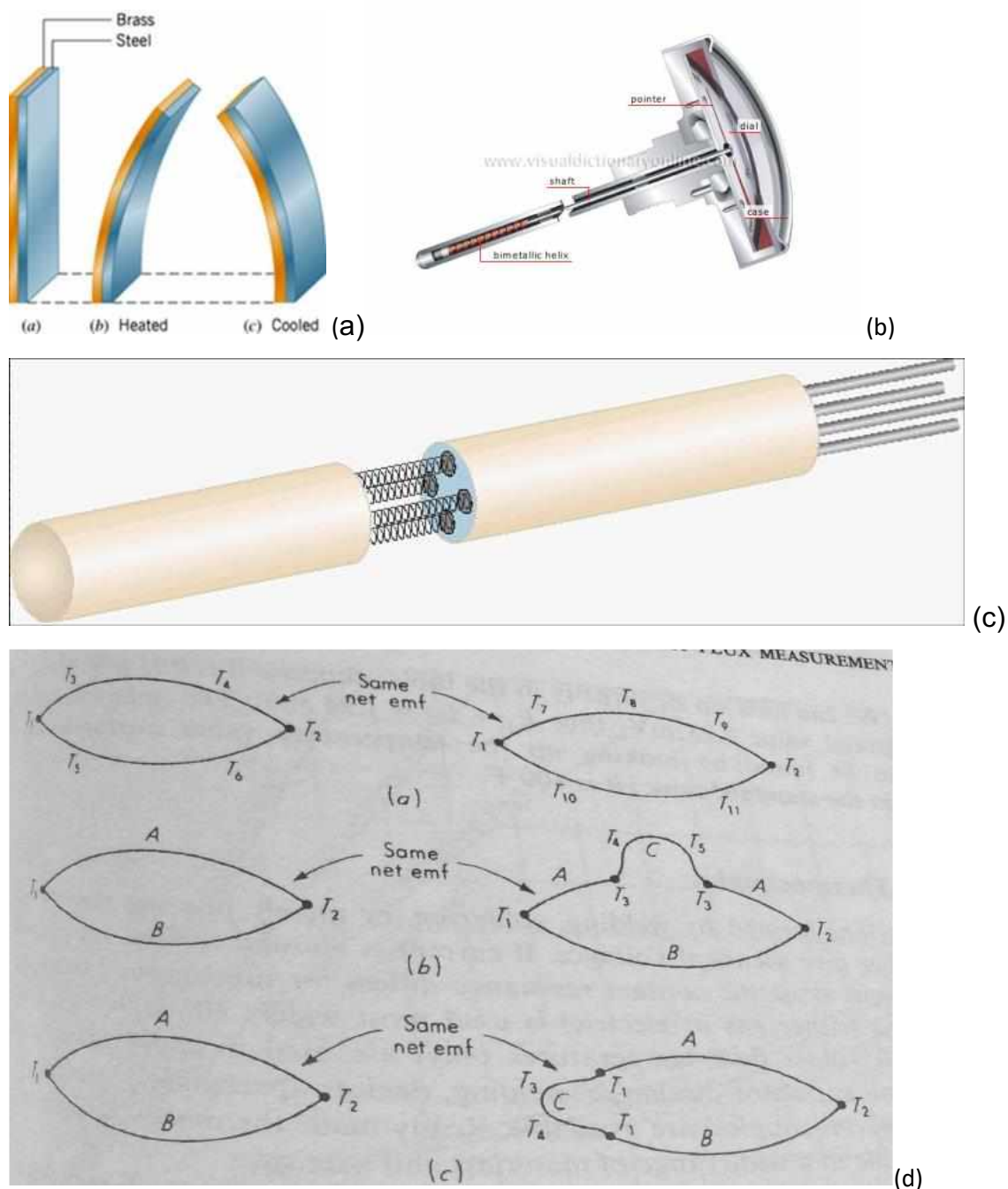


Figura 18. Sensores de temperatura. (a) sensor variação de dimensão tipo placa; (b) sensor variação dimensão tipo mola; (c) sensor variação de resistência; (d) termopar

3.3. Tipos de bancada de fluxo

Uma bancada de fluxo pode ser construída de diferentes formas. Cada combinação de sensores fornece um novo tipo de bancada. Em especial, os sensores de vazão possuem papel importante em determinar qual o tipo de bancada de fluxo. De acordo com (BETTES, 2010) o modelo mais comum de bancada de fluxo é aquele que mede o fluxo de ar com uma placa de orifício ou tubo de Pitot. Por outro lado, existem bancadas baseadas em princípios elétricos, dinâmicos, dentre outros. Enfim, existem diversos tipos de bancadas de fluxo.

Além disso, podemos dividir as bancadas de fluxo de acordo com sua aplicação. Existem bancadas para uso industrial e outras para uso caseiro ou de pequenas oficinas. Além disso, elas podem ser utilizadas por diferentes campos. Pode-se encontrar bancadas para fins automobilísticos, aeronáuticos, ou ainda de construção civil, dentre outros.

Além do tipo de sensor e da utilização da bancada pode-se ainda classificar as bancadas de fluxo em relação à forma com que elas são fabricadas. Elas podem ser fabricadas industrialmente ou de produção “artesanal”. As Figuras 19 a 24 ilustram alguns exemplos de bancadas de fluxo.



(a)



(b)



Figura 19 Bancadas Superflow (Fonte: (SuperFlow, 2017)) (a) SF-260 Flowbench (b) SF-750 Flowbench (c) SF-1020 Probench (d) SF -1020-SB SUPERBENCH



Figura 20. Bancada de fluxo Tecnomec (Tecnomec, 2017)



Figura 21. Projeto de bancada de fluxo para uso automotivo (CORRAO, 2014)



Figura 22. Bancada de fluxo DTEC (TODD, s.n.t.)

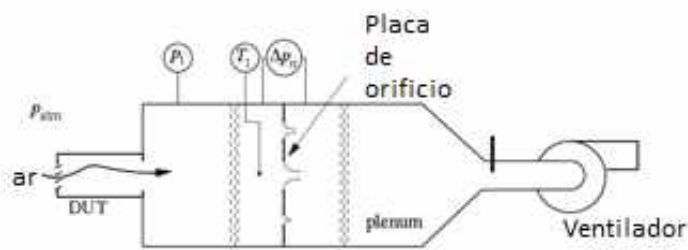


Figura 23. Esquema de bancada de fluxo para equipamentos eletrônicos (RECKTENWALD, 2006)



Figura 24. Bancada de fluxo Saenz Flowbenches (Jamison Equipment, 2017)

Além dos modelos ilustrados, existem diversos trabalhos cujo objetivo é desenvolver novos conceitos de bancadas. A prova disto, é o fato de que é possível encontrar uma série de patentes relativas ao assunto. Por exemplo a patente US 4213327 A diz respeito a uma bancada de fluxo desenvolvida pelo departamento de defesa norte americano e capaz de determinar a vazão de ar através dos poros de uma lamina de metal onde as porosidades são controladas. (Estados Unidos Patente Nº US4213327 A, 1979) (Figura 25). Outro exemplo de patente é a US 5808188 que diz respeito a um outro modelo, ilustrado na Figura 26, capaz de medir e comparar diferentes características de um escoamento com restrições (Estados Unidos Patente Nº US 5808188, 1996). Já a patente US 6923051 B2 diz respeito à uma bancada de fluxo que tem o propósito de trazer melhorias na avaliação de componentes de uma turbina de gás, conforme mostra a Figura 27. (Estados Unidos Patente Nº US6923051 B2, 2005). Ainda outro exemplo é a patente US 6941249 B1 que propõe um modelo para simulação de uma bancada de fluxo. Este tipo de abordagem também é algo muito importante, pois permite a conexão entre o lado

empírico das bancadas de fluxo com os modelos computacionais que também são extremamente úteis no cenário de desenvolvimento de produtos que levam em conta o escoamento de um determinado fluido. A Figura 28 ilustra como funciona este algoritmo de simulação (Estados Unidos Patente N° US6941249 B1, 2005).

U.S. Patent Jul. 22, 1980 Sheet 1 of 2 4,213,327

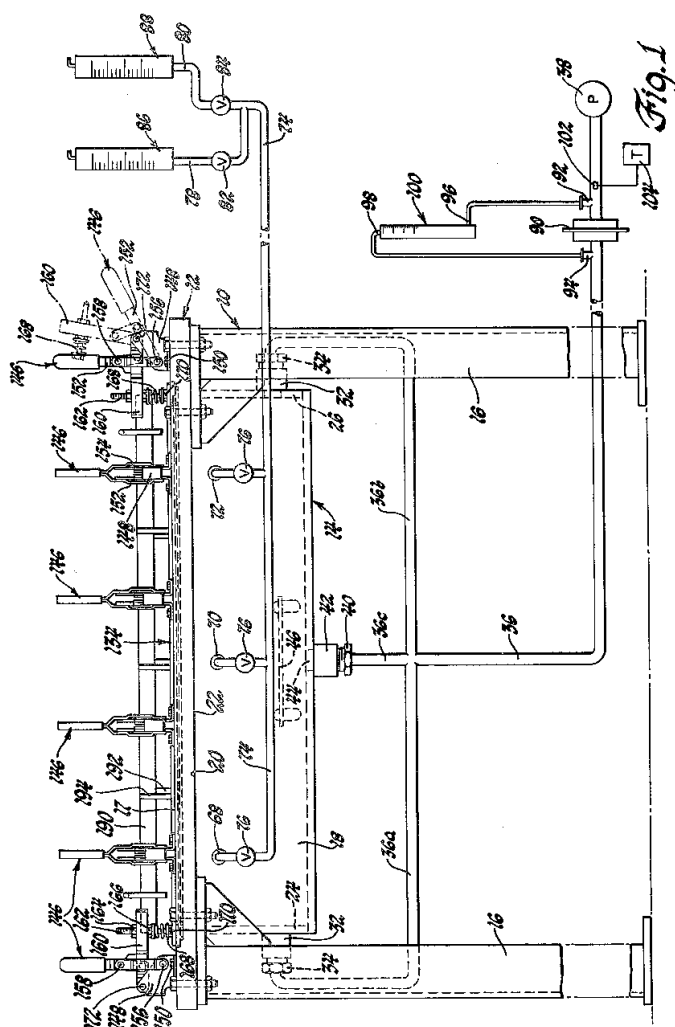


Figura 25. Patente US 4213327 A

U.S. Patent Sep. 15, 1998 Sheet 1 of 5 5,808,188

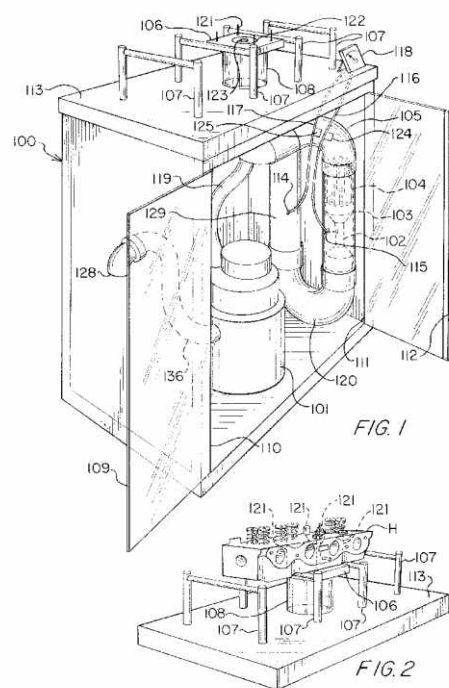


Figura 26. Patente US 5808188

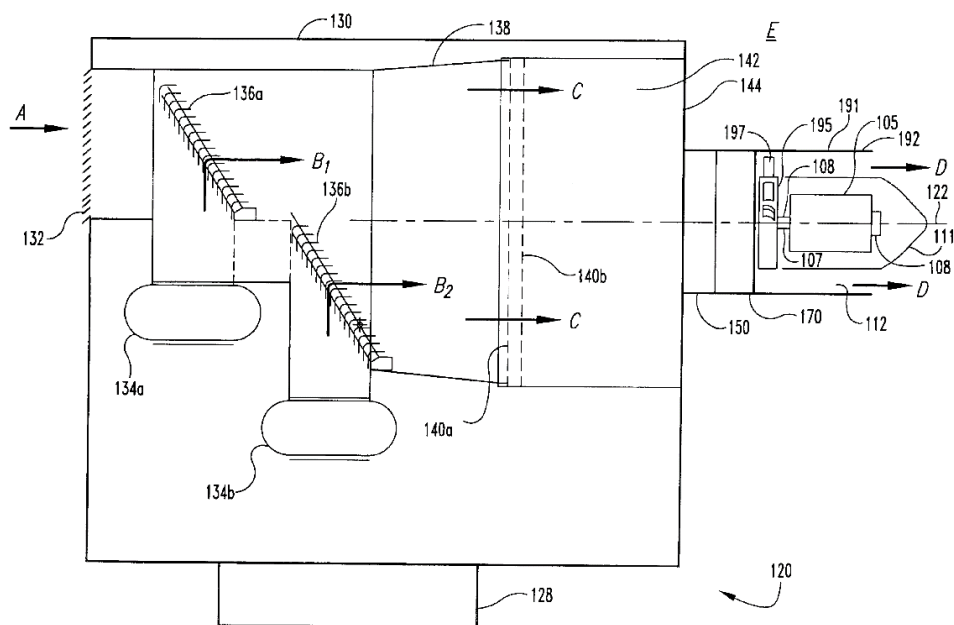


Figura 27. Patente US 6923051 B2

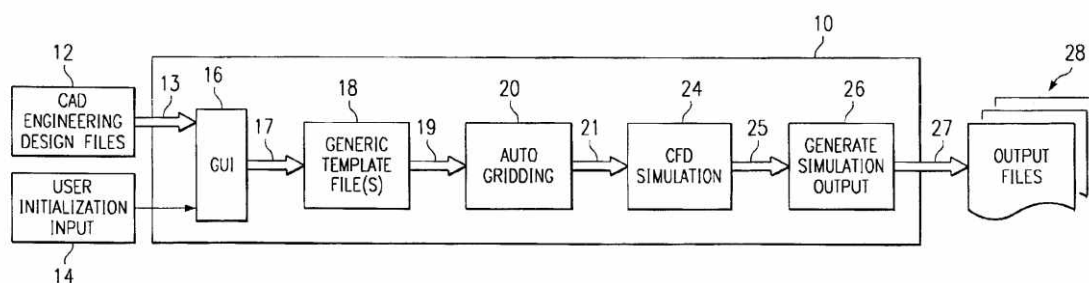


Figura 28. Algoritmo de funcionamento da patente US 6941249 B1.

3.4. Aplicações

Somada a sua simplicidade a bancada de fluxo também tem outra vantagem ainda mais importante, que é a sua aplicabilidade. Neste sentido, esta é a principal justificativa para direcionar o interesse deste estudo ao desenvolvimento deste tipo de equipamento.

Na realidade, vencidas as limitações do projeto, ela é capaz de medir diversas características de interesse. O fato de a bancada de fluxo permitir a experimentação sobre condições controladas permite uma série de vantagens. Conhecendo as condições de operação é possível estudar características como velocidade de escoamento e turbulência, através de equipamentos auxiliares como gerador de fumaça. Assim como é possível testar variáveis relativas à geometria do material e rugosidade (TODD, s.n.t.).

Em particular as bancadas de fluxo são especialmente úteis para o desenvolvimento de motores de combustão. Ela auxilia no desenvolvimento de praticamente qualquer peça ou sistema dos motores. Válvulas e sistemas de admissão e exaustão, intercoolers, velas e pistões são destaques. (TODD, s.n.t.)

(Hot-Flow, 2017) ao tratar do dimensionamento das válvulas de um motor afirma que: *“Existem vários modelos matemáticos e empíricos para se determinar as dimensões de uma válvula e o fluxo necessário no cabeçote para uma determinada potência desejada. Mas, uma vez que nós não iremos criar um motor novo, e sim trabalhar com cabeçotes já existentes, estes modelos algumas vezes não podem ser*

usados devido a restrições como configuração da câmara de combustão, diâmetro dos cilindros, desenho dos dutos, etc.”. Neste contexto, o trabalho com uma bancada de fluxo pode ser muito útil. A sua utilização pode ajudar a determinar propriedades físicas das válvulas e através de análises empíricas determinar os melhores perfis para as demandas do projeto. Ou ainda, a bancada de fluxo pode servir como fonte de informação para gerar dados para alimentar um modelo computacional.

(HYPERFLOW, 1992) fala da modelagem dos canais de admissão e exaustão. Ele destaca que fazer modificações diretamente em um cabeçote de motor é uma ação inviável, pois pode gerar resultados não desejados e causar a perda do cabeçote. Assim, ele propõe que sejam feitas réplicas através de moldes de silicone e então, a partir destes moldes, é possível realizar testes na bancada de fluxo. Com os resultados em mãos é possível criar uma estratégia para otimizar os aspectos desejados.

(MOTORPOWER, s.n.t.) traz um guia de instruções para o uso da bancada MotorPower 160 para realizar diferentes trabalhos. Entre os aspectos destacados ele relaciona o uso da bancada de fluxo às curvas de potência e torque do motor. Além disso, ainda mostra como o equipamento pode ser útil para compreender as câmaras de combustão e dimensionamento de válvulas.

(BETTES, 2010) aborda dois pontos em seu trabalho. Ele trata dos aspectos já mencionados de dimensionamento de válvulas e modelagem de cabeçote, mas também discute, dentre outros assuntos, como utilizar a bancada de fluxo para o estudo de carburadores, dutos de admissão e exaustão e do comando de válvulas. Neste trabalho fica claro ao leitor quais as dificuldades são encontradas ao tentar otimizar o motor de um carro e como as bancadas de fluxo podem auxiliar neste cenário. Ele destaca também a importância de utilizar ferramentas complementares que facilitam o trabalho com a bancada ou que permitem obter maiores informações durante a sua utilização.

Existem diversas ferramentas que colaboram para que o trabalho com as bancadas de fluxo se torne mais produtivo e fácil. Alguns exemplos são cilindros adaptadores, que oferecem uma forma de simular o cabeçote com os efeitos dos cilindros. Outros exemplos são as bolas de fluxo, que oferecem um método para verificar onde o fluxo

é ou não conectado a parede do objeto, os geradores de fumaça, que permitem observar a direção do fluxo, bem como o tipo de escoamento, tubos de Pitot, que são ferramentas muito úteis para determinar o escoamento em partes específicas da peça e kits para adaptação de diferentes furos, já que a área de saída dos equipamentos pode variar (BETTES, 2010). As Figuras 29, 30, 31 e 32 mostram estas ferramentas.

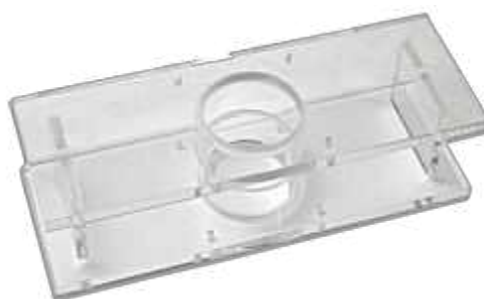


Figura 29. Adaptadores de cilindro (fonte: superflow)

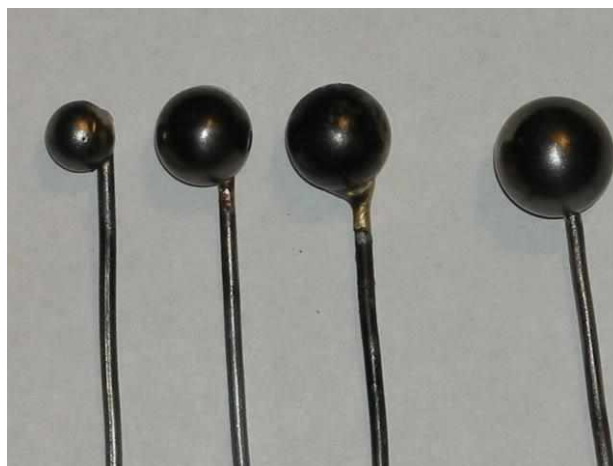


Figura 30. Bolas de fluxo



Figura 31. Gerador de fumaça

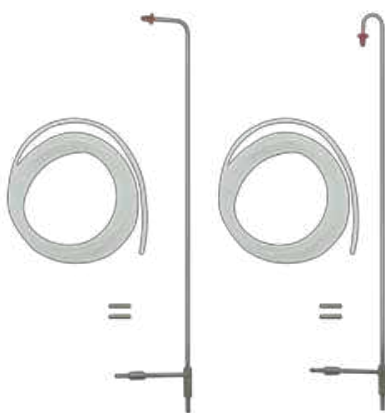


Figura 32. Tubo de Pitot(Fonte: (SuperFlow, 2017))



Figura 33. Kits adaptadores de furos

4. Materiais e Métodos

Com os conceitos relativos à bancada de fluxo estabelecidos, o trabalho subsequente é o de validação dos tópicos estudados. Desta forma, o trabalho inicial será em torno da criação de um protótipo de bancada de fluxo. Para tanto é necessário o uso de alguns elementos construtivos. No caso foram selecionados tubos de PVC para construção do duto, um cooler de computador para funcionar como sensor de vazão, uma fonte de ar externa, que pode ser outro cooler de computador ou um secador de cabelos, e sensores de pressão do tipo MAP e tubo em U. Assim espera-se ser possível comprovar os tópicos estudados e dar fundamentos para a confecção de um protótipo de bancada de fluxo.

Por sua vez, a elaboração de um projeto requer a escolha de requisitos principais. No caso de uma bancada de fluxo a primeira decisão consiste em definir o tipo de bancada. Em geral, isso se baseia em qual aplicação o equipamento terá, isto é, a finalidade da bancada de fluxo. Sendo assim, o objetivo deste projeto é desenvolver uma bancada para estudar cabeçotes de motores de combustão interna visando a evolução do seu desempenho, mas também com aplicações educacionais conectadas ao curso de engenharia mecânica.

Dentro deste contexto de aplicação, é importante também definir o custo de desenvolvimento e construção, bem como a precisão requerida. Neste sentido alguns parâmetros são destacados como requisitos:

- a) baixo custo
- b) fácil manutenção
- c) fácil calibração
- d) facilidade de registro da informação gerada
- e) capacidade para obter informações qualitativas
- f) baixa incerteza
- g) agilidade de resposta

Levando em conta as demandas levantadas, é possível realizar uma análise dos possíveis tipos de bancada, seus respectivos sensores e características com o intuito

de definir o projeto mais pertinente aos interesses em contexto. Para tanto, uma ferramenta bastante eficaz é a análise de SWOT, isto é, avaliação dos pontos fortes, fraquezas, oportunidades e ameaças de cada tipo de bancada. Sendo assim, esta foi a primeira etapa adotada.

Concluída esta primeira avaliação é possível desenvolver uma proposta de trabalho para dar continuidade às tarefas. Neste contexto, prevê-se que é necessária a construção de um esquema que oriente o projeto e permita o desenvolvimento das etapas seguintes. Para atingir este objetivo é necessário adotar algum software de desenho, como por exemplo o “SolidWorks”. Todavia, somado ao desenho é também necessário desenvolver o algoritmo de trabalho, isto é, como a bancada funcionará. Neste sentido, pode-se adotar algum modelo de linguagem que permita o desenvolvimento e compreensão do método sugerido. Uma proposta é utilizar a chamada linguagem BPMN e um dos seus softwares, como o “Bizagi”.

Após validado o projeto, pode-se verificar a disponibilidade financeira para construir o modelo proposto. Desta forma, pretende-se realizar uma análise de custos tomando os valores de mercado das bancadas de fluxo e cotando os componentes necessários para a construção do protótipo.

Por fim, com todas as etapas anteriores concluídas e, comprovada a viabilidade financeira do projeto, pode-se iniciar a última etapa, que consiste na construção propriamente dita. Neste sentido, prevê-se que são necessárias ferramentas de fabricação, como ferramentas para usinagem, soldagem, conformação mecânica, metrologia e outras.

5. Resultados e discussão

5.1. Construção do protótipo

A Figura 34 ilustra o protótipo final construído para validar o sistema a um custo de aproximadamente R\$ 230,00.



Figura 34. Protótipo de bancada de fluxo

Para validar os conceitos da bancada de fluxo foram adotados os seguintes materiais:

- i. Tubos de PVC de 50 e 100 mm
- ii. Conectores para tubulações de 50 e 100 mm
- iii. Redutores de PVC de 100 para 50 mm
- iv. Tampões de 100 e 50 mm
- v. Arduino Uno
- vi. Sensor MAP
- vii. Mangueiras
- viii. Fonte de computador modificada
- ix. Transistores
- x. Resistores
- xi. Coolers de computador
- xii. Secador de cabelos
- xiii. Multímetro

A ideia inicial para o protótipo consistia em usar um ventilador axial, um medidor de vazão do tipo rotâmetro e um sensor de pressão MAP capacitivo. Desta forma, foi adotado um cooler como fonte de ar, que funciona como ventilador axial, conectado a um segundo cooler usado como sensor de vazão do tipo turbina e um sensor TMAP funcionando como o sensor de pressão e temperatura. Assim, seria possível utilizar o Arduino para controlar a fonte de ar através da leitura de pressão, já que todo o sistema seria eletrônico. Os resultados foram:

- a. Com o arduino UNO, transistores conectados através e uma fonte de computador adaptada foi possível controlar a velocidade do ventilador e como consequência variar o fluxo de ar no circuito através do uso da função `analogWrite`, que emite sinal PWM, conforme ilustra a Figura 35.

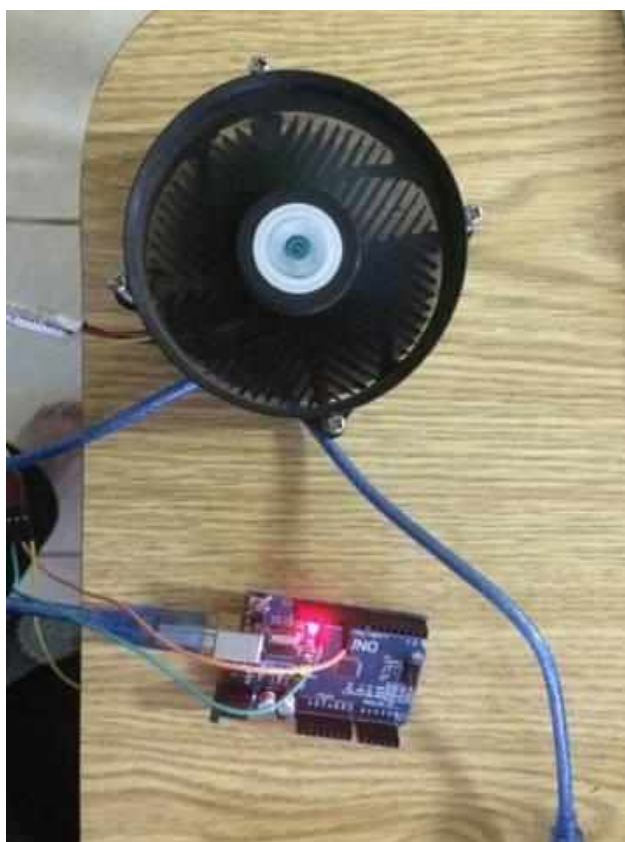


Figura 35. Validação do controle de velocidade de um ventilador axial de corrente contínua

- b. Apesar do controle da fonte de alimentação, observou-se na prática que o fluxo de ar gerado era mínimo e não era capaz de vencer a inércia do sensor de vazão;
- c. O sensor TMAP, por ser do tipo capacitivo, emitia sinais do tipo PWM e por isso não foi possível ler os sinais deste sensor com um multímetro. Para sanar o problema foi utilizada a função pulseIn do arduino que mede a frequência de um sinal HIGH ou LOW, ou seja, quando o sensor emitia um sinal de 5V ou 0V. Porém, as leituras não eram conclusivas, já que não havia repetibilidade no sistema e o desvio padrão das medições implicava em um intervalo de confiança muito grande.



Figura 36. Sensor MAP utilizado durante construção do protótipo

A partir destas observações, concluiu-se que para atingir o objetivo de validar os conceitos da bancada de fluxo seria necessário trocar a fonte de ar. Desta forma, optou-se por um ventilador mais potente, porém do tipo centrífugo, no caso um

secador de cabelos. Da mesma forma, considerando as limitações encontradas no trabalho com o sensor do tipo MAP, decidiu-se por usar um manômetro artesanal do tipo U e, conseqüentemente, a ausência de um sistema de controle. Os resultados foram:

- d. Com o uso do secador de cabelos foi possível vencer a inércia do sensor de vazão. Porém, perdeu-se a capacidade de controle inicial do arduino. Enquanto inicialmente o controle da fonte era por PWM para o cooler de computador, no caso do secador de cabelos seria necessário um inversor de frequência, já que o primeiro funciona com corrente contínua e o segundo com corrente alternada.
- e. O cooler funcionou bem operando como sensor de vazão. Graças ao efeito hall que induz uma tensão devido ao campo magnético gerado pela rotação do cooler foi possível mensurar o fluxo de ar gerado pelo secador através de uma tensão elétrica. De fato, obteve-se nas leituras dos multímetros 0,28 V para a velocidade mais alta do secador de cabelos e 0,19 V para a velocidade mais baixa. Desta forma, foi validado o uso do sensor de vazão.



Figura 37. Secador de cabelos usado como fonte de ar e cooler de computador usado como sensor de vazão

- f. Por sua vez, o tubo em U de construção artesanal também funcionou corretamente como fonte de informação. Com o bocal de maior área da Figura 38 e velocidade alta no ventilador houve uma variação de pressão de cerca de 12 mmH₂O. Para o bocal com menor área da Figura 34 foi obtido uma variação de pressão de cerca de 45 mmH₂O.



Figura 38. Bocais utilizados para teste

5.2. Análise de SWOT

Após a construção do protótipo, a etapa seguinte do trabalho foi avaliar os tipos de bancada com o intuito de definir as direções iniciais do projeto. Neste sentido foram consideradas as possibilidades para os tipos de sensores e avaliados os benefícios de cada um através de uma análise de SWOT. A partir desta abordagem, a discussão de quais sensores utilizar convergiu para alguns pontos mais específicos. Em outras palavras, foram avaliadas possibilidades específicas considerando as características gerais levantadas durante a pesquisa bibliográfica. Logo, foram avaliados três aspectos, sendo eles os sensores de pressão, sensores de vazão e ventiladores.

5.2.1. Sensores de pressão

A primeira análise de decisão foi relativa ao sensor de pressão. Considerando as características gerais dos sensores, a análise comparativa foi com relação aos medidores em U e os sensores MAP. Os resultados das análises de SWOT estão expostos nas Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 3. Análise de SWOT para o Medidor de pressão em U

Forças	Fraquezas
• Simplicidade; • Seu conceito de funcionamento é simples e pode ser facilmente explicado; • Conforme comprovado no protótipo permite resultados rápidos, porém a escala de erro pode ser maior.	• É um sensor com princípio de funcionamento mecânico e assim é difícil conectar ao programa de computador (haveria necessidade de algum outro mecanismo para transferir a informação). • Como aconteceu na fabricação do protótipo, normalmente o tubo em U irá atuar somente com malhas abertas.
Oportunidades	Ameaças
• Pode ser facilmente repostado; • Baixo Custo.	• É difícil perceber variações sutis; • Velocidade de resposta inferior a outros sensores caso haja mudanças bruscas de pressão.

Tabela 4. Análise de SWOT sensores MAP

Forças	Fraquezas
• Simplicidade • É um sensor com princípio de funcionamento elétrico, o que permite a integração a um circuito e possivelmente a um computador para coletar as informações. • Maior sensibilidade a variações sutis; • Velocidade de resposta inferior a outros sensores.	• Depende de um circuito elétrico para operar. • Caso o sensor seja posicionado em uma região com vazamentos isso implicaria em dados incoerentes com a realidade.
Oportunidades	Ameaças
• Pode ser facilmente repostado.	• Medições podem ser afetadas pela variação de temperatura; • Custo. • Como aconteceu durante a fabricação do protótipo, pode se tornar inviável caso outros componentes elétricos não estejam funcionando adequadamente.

Baseado nesta análise, conclui-se que a melhor opção para sensor de pressão são os sensores MAP. Apesar das dificuldades que podem acontecer, imagina-se que a adoção desse sensor seja a única alternativa viável perante a necessidade de controle por malha fechada. Uma opção interessante seria usar um sensor MAP que

emita sinais analógicos. Isso permitiria o uso de multímetros no sistema o que simplificaria o circuito elétrico.

5.2.2. Sensores de vazão

A segunda análise foi relativa aos sensores de vazão. Neste contexto a comparação ocorreu entre os sensores de placa de orifício, os sensores MAF e o sensor utilizado durante a construção do protótipo, isto é, um cooler de computador adaptado como sensor de vazão do tipo rotâmetro. Os resultados das análises de SWOT estão expostos nas Tabela 5, 6 e 7.

Tabela 5. Análise de SWOT de sensores de vazão do tipo placa de orifício

Forças	Fraquezas
• Simplicidade • Custo.	• Sensibilidade de fluxo • Difícil calibração • Leitura normalmente depende de gráficos. • Difícil adequar a um circuito eletrônico.
Oportunidades	Ameaças
• Acessibilidade – é comum e fácil de encontrar; • Princípio de funcionamento é mais tangível e pode ser explicado mais facilmente em um laboratório.	• Medições podem ser afetadas pela variação de temperatura; • Pode ocorrer problemas de vedação;

Tabela 6. Análise de SWOT dos sensores MAF

Forças	Fraquezas
• Podem ser facilmente encontrados; • Apresentam maior precisão; • Possuem maior repetitividade; • Facilidade de operar.	• Utiliza um princípio de funcionamento mais complexo
Oportunidades	Ameaças
• O processo de calibração pode ser simplificado uma vez que seja conhecida a curva de tensão de saída em função da vazão;	• Pode ser difícil obter a curva de tensão de saída em função da vazão;

Tabela 7. Análise de SWOT dos sensores do tipo rotativo (cooler de computador)

Forças	Fraquezas
• Podem ser facilmente encontrados; • São elétricos; • Possuem repetitividade razoável conforme comprovado durante a construção do protótipo; • Facilidade de operar.	• Utiliza um princípio de funcionamento mais complexo, baseado no chamado efeito hall; • Os sinais resultantes estão limitados a escala de 0 a 5V; • Existe a necessidade de criar algum mecanismo para calibração.
Oportunidades	Ameaças
• Possuem um custo baixo em comparação com os outros sensores.	• Pode ser difícil obter a curva de tensão de saída em função da vazão;

Baseado nesta análise e considerando a necessidade de obter uma bancada com elevada vida útil, conclui-se que a melhor opção de sensor de vazão seria utilizar um sensor do tipo MAF devido à maior precisão deste sensor e facilidade de encontrar sua curva de calibração.

5.2.3. Seleção de ventiladores

Por fim, foi feita uma análise de qual o melhor ventilador. Neste contexto, a decisão seria entre escolher um ventilador axial ou um radial e entre escolher um único ventilador ou um conjunto de ventiladores associados. Para tanto não foi realizada a análise de SWOT, mas foi levado em consideração que o ventilador escolhido deveria ser capaz de produzir uma grande vazão de ar. Como consequência, a decisão foi de que a melhor opção seria adotar um ventilador axial ou um conjunto de ventiladores axiais associados porque assim é possível obter maiores vazões e seria possível controlar o sistema através de PWM no caso de corrente contínua ou inversor de frequência no caso de corrente alternada. Todavia, a escolha entre um único ventilador ou vários não foi considerada relevante em termos técnicos, isto é, o mais importante seria determinar qual ventilador escolher após uma análise financeira. Desta forma, conclui-se esta primeira etapa de análises e tomada de decisão.

5.3. Proposta de bancada de fluxo

Uma vez decidido que sensores e equipamentos a serem utilizados, foi realizada a segunda etapa do projeto, a de modelar/ desenhar o protótipo da bancada de fluxo. Como resultado foram desenhados os componentes no SolidWorks conforme mostra a Figura 39. Nesta figura é mostrado um aspirador de pó atuando como fonte de ar, já que no aspirador de pó existe ventiladores adequados para gerar um grande fluxo de ar e, em alguns casos, em dois sentidos, ou seja, exaustão e insuflação. Percebe-se também o uso dos sensores MAF e MAP, que por suas dimensões reduzidas ficaram pouco nítidos na figura, mas estão representados pelo ponto superior da bancada próximo à abertura do duto.

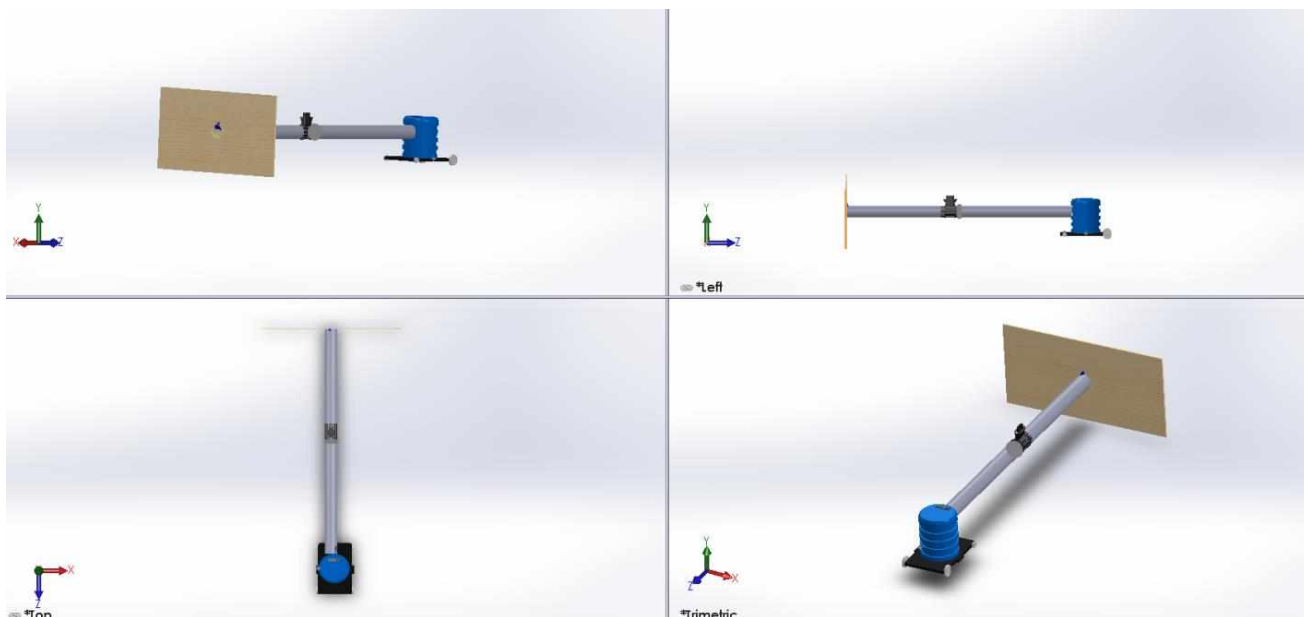


Figura 39. Desenho da bancada de fluxo no solidworks



Figura 40. Desenho dos componentes utilizados

5.4. Algoritmo de funcionamento da bancada de fluxo

Uma vez construído o modelo da bancada de fluxo e validados os primeiros conceitos, foi iniciada a etapa de modelagem de operação. Neste contexto foi utilizado o software Bizagi para o algoritmo do funcionamento. O resultado pode ser observado na Figura 41.

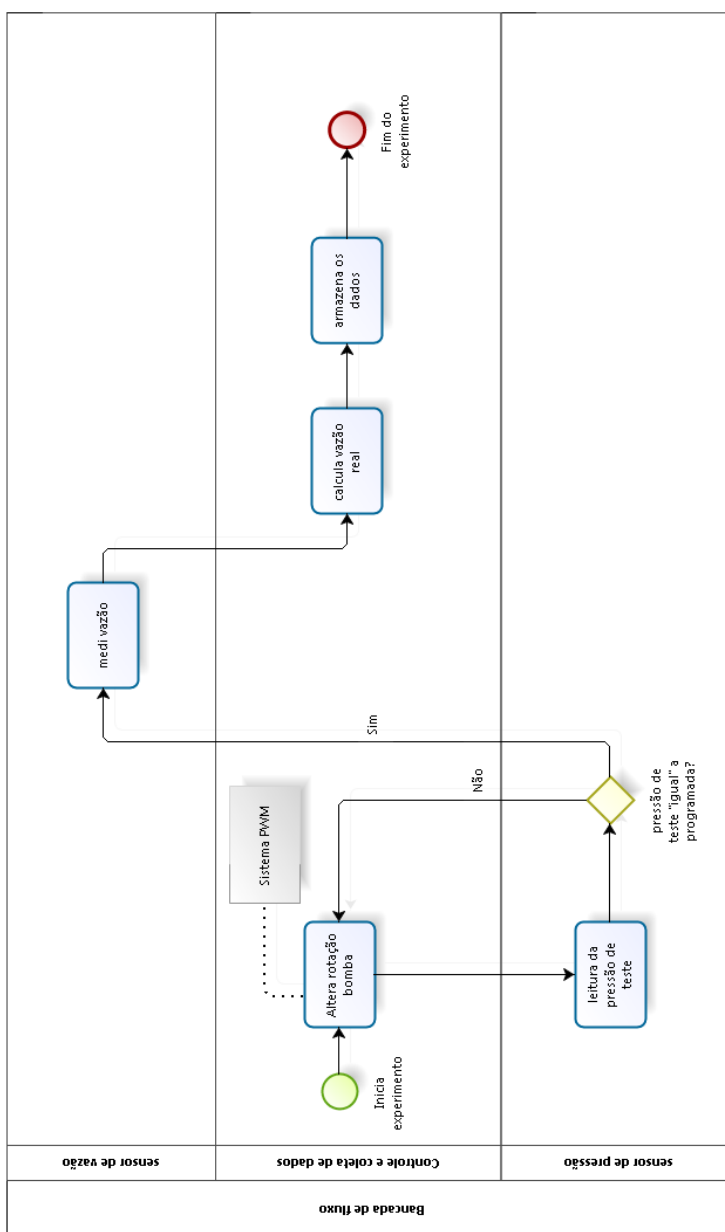


Figura 41. Algoritmo da bancada de fluxo (Bizagi)

Uma vez desenvolvido o algoritmo no Bizagi, este foi transcrito pensando na implementação de um programa em Arduino para que fosse possível controlar a bancada através de um sistema eletrônico. O código resultante foi:

Início do teste

Entrar “Pressão de Teste”

Ligar bomba de pressão

Ler pressão (Sensor de pressão)

Enquanto Valor absoluto (pressão – “Pressão de Teste”) > Erro aceitável,

Ajustar rotação da bomba (controle PWM)

Ler pressão (Sensor de pressão)

Fim Enquanto

Ler vazão (Sensor de vazão)

Armazenar dados do teste

Fim do teste

Observa-se que não é um código complexo. Na verdade, com a experiência da construção do protótipo pode se afirmar que o arduino é um código de programação extremamente acessível e que é fácil implementar este tipo de controle. Todavia, é necessária a construção de um circuito eletrônico. Caso seja adotado um motor que opere com corrente alternada, pode ser construído um sistema com inversor de frequência. Por outro lado, o sistema é ainda mais simples caso se utilize uma fonte de ar movida a corrente contínua, que poderá ser controlada pela função `arduinoWrite`. Contudo, como o Arduino é um sistema de controle e comando, é necessário o uso de outros componentes, como transistores, diodos e resistores para amplificar e filtrar sinais.

5.5. Análise de custos

Concluído o estudo inicial para desenvolver um programa em Arduino, considerou-se o momento para avaliar a viabilidade financeira do projeto. Neste sentido foi realizada uma pesquisa para determinar os valores de mercado de diferentes bancadas de fluxo, conforme pode ser visto na Tabela 8. O resultado foi que o valor de mercado de uma bancada de fluxo pode variar amplamente entre aproximadamente R\$ 3.000,00 e R\$ 60.000,00 dependendo do modelo. Desta forma, considera-se que, para investimentos acima de R\$ 3.000,00, é provável que seja melhor adquirir a bancada já construída no mercado de equipamentos.

Tabela 8. Preços de bancadas de fluxo

Bancada	Imagem	Preço
Saenz D-480 Junior Stalker Flowbench		\$7,200.00
SAENZ/JAMIZON K 1000 SUPERSTALKER		\$14,200.00
SuperFlow SF-600		\$5,500.00
Superflow 1020		\$18,500.00
FP 2.0 Basic System Flow bench Kit – kit para fabricação de bancada		\$997,00

Após estabelecer o limite de gastos que define a fronteira entre a construção e a compra de um equipamento no mercado, foi realizada uma estimativa dos custos relativos a construção da bancada de fluxo, conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9. Custos relativos a construção de uma bancada de fluxo planejada

Equipamento	Custo estimado
Sensor de pressão MAP	R\$ 80,00 – R\$ 150,00
Sensor de vazão MAF	R\$ 120,00 – R\$ 2.000,00
Ventilador axial (aspirador de pó)	R\$ 500,00 -
Conjunto arduino e demais componentes elétricos	R\$ 150,00
Conjunto de dutos e tubulação	R\$ 150,00
Computador para controle	R\$ 1.500,00
Placa de controle alternativa ao computador	R\$ 300,00

Portanto, estima-se que o custo mínimo para construir uma bancada de fluxo é de aproximadamente R\$ 1.150,00. Este é um valor considerado viável para construir a bancada de acordo com o que foi estabelecido como limite. No caso específico deste trabalho, este valor encontra-se acima do orçamento disponível para investimento. Como consequência, e conforme previsto inicialmente, não foi dada sequência à construção propriamente dita. Todavia, espera-se que em trabalhos futuros seja possível arrecadar recursos suficientes para a construção do protótipo.

6. Considerações finais

A bancada de fluxo é um equipamento importante para estudos com fluidos e por isto foi objeto de estudo deste trabalho. Com o intuito de capacitar o discente envolvido no projeto e criar algo pertinente às necessidades universitárias, foi proposto o desenvolvimento de um projeto visando a construção de uma bancada de fluxo para o estudo de cabeçotes de motores de combustão interna. Primeiro foi realizado um estudo das bancadas de fluxo e posteriormente proposto um método de trabalho que permitisse desenvolver uma nova bancada.

Na primeira etapa deste trabalho foram estudadas as características deste tipo de equipamento. Foi observado que, apesar de serem equipamentos simples, as bancadas de fluxo podem desempenhar um papel importante nas análises e medições que envolvem peças submetidas ao escoamento de um fluido. Além disso, mostrou-se que as bancadas são compostas basicamente por uma fonte que produz o escoamento do fluido e sensores de vazão, pressão e temperatura (opcional). Por fim, foram destacadas as aplicações das bancadas de fluxo, que em particular tem um papel muito relevante na indústria automobilista e nos trabalhos de otimização de motores.

Ao término do projeto a análise de custos evidenciou que, apesar da proposta deste trabalho ser economicamente viável, não seria possível desenvolver o projeto em função da ausência de recursos financeiros. Desta forma, os objetivos foram parcialmente atingidos e abriu-se espaço para o desenvolvimento de novos trabalhos. Considera-se também que o objetivo básico de todo Trabalho de Conclusão de Curso, que é exercitar a desenvoltura do aluno na aplicação dos conceitos de engenharia aprendidos ao longo do curso foi atingido. Espera-se que este trabalho motive outras pessoas à sua continuação e que, no futuro, a construção da bancada proposta seja realizada.

7. Referências bibliográficas

- BETTES, H. (2010). *A practical guide to airflow theory, parts testing, flow bench testing, and analyzing data to increase performance for any street or racing engine*. New York: HP Books.
- CHRISWELL, S. D. (1996). *Estados Unidos Patente Nº US 5808188*.
- CORRAO, N. (2014). *Design, Construction and Testing of Square-Edge Orifice Meter Flow Bench*. Pomona: California State Polytechnic University.
- COTTRELL, M. (2006). *Fluid Flow Instrumentation*.
- CRISTINE, A., MACHADO, B., FRANÇA, G., BERLIM, I., & NAKAMOTO, V. (2013). *Projeto de Física II - Tubo de Pitot*. Unesp.
- ECKL, R., JOHNSON, C., SHIELDS, S., CULLIPHER, B., & HELMER, W. (2008). *An Inexpensive Flow-Bench for Mechanical Engineering Labs*. Arkansas Tech University.
- FLEMING, R. J. (2005). *Estados Unidos Patente Nº US6923051 B2*.
- FOX, R. W., McDonald, A. T., & PRITCHARD, P. J. (2004). *Introdução a mecânica dos fluidos*. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
- HENN, É. A. (2006). *Máquinas de fluido*. Santa Maria: EditoraUFSM.
- Hot-Flow. (26 de 03 de 2017). *Teoria*. Fonte: Hot-flow: http://hot-flow.com.br/?page_id=173
- HUSAIN, Z. D. (2010). *Theoretical Uncertainty of orifice flow measurement*. Estados Unidos: Daniel Measurement and Control, Inc.
- HYPERFLOW. (1992). *Hyperflow. Testing pressure air flow*. Estados Unidos: HYPERFLOW.
- JUSTEN, A. L., HOERLLE, C. A., & WRUBLESKI, E. G. (s.d.). *Medidor tipo turbina de vaz.*
- LAGANÁ, A. A. (s.d.). *Apostila de Sensores*. Escola Politécnica da USP.
- Magnetrol. (2012). *Thermatel - Thermal Dispersion Mass Flow. Measurement Handbook*. USA: Magnetrol International, Incorporated.
- Miller, R. H., & Strumolo, G. S. (2005). *Estados Unidos Patente Nº US6941249 B1*.
- MONTEIRO, L. H. (2015). *Estudo e modelagem de um anemômetro a fio quente operando em temperatura constante*. Rio de Janeiro: Departamento de

Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MotorPower. (s.d.). *Instruções de uso Motorpower 160*. São Paulo: MotorPower.

PRESCOTT, J. F., & ROBERTS, W. H. (1979). *Estados Unidos Patente Nº US4213327 A*.

RECKTENWALD, G. (2006). *A flow bench for measuring fan curves and system curves for air-cooled eletronic equipment*. Portland: Mechanical Engineering Department, Portland State University.

SIMÕES, T. A. (2010). *Aspectos a serem considerados no desenvolvimento de um coletor de admissão plástico soldado por vibração*. São Carlos: Núcleo de Engenharia Térmica e Fluídos da Universidade de São Paulo.

SOARES, S. L. (2010). *Influência dos dutos de admissão do cabeçote no desempenho de motor Diesel*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas.

SOUZA, G. (2010). *Estudo experimental e numérico do sistema de admissão de um motor de combustão interna*. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Spindustry Digital. (04 de 08 de 2015). *History of the Flowbench*. Fonte: Blog Superflow: <http://blog.superflow.com/2015/08/04/hello-world/>

SuperFlow. (26 de 03 de 2017). *Flow Benches*. Fonte: Superflow: <http://www.superflow.com/aspx/cat.aspx?catid=4&navid=10>

SuperFlow. (26 de 03 de 2017). *SF-1020-SB Superbench*. Fonte: Superflow: <http://www.superflow.com/aspx/prodDetail.aspx?prodid=18&catid=4&navid=10>

Tecnomec. (26 de 03 de 2017). *Bancada de fluxo*. Fonte: Tecnomec: <http://tecnomec.com.br/banco-de-fluxo/>

TODD, D. (s.d.). *DIY Flowbench Design*. www.dtec.net.au.

VIANA, U. B., NETO, E. F., CARDOSO, R. S., DIAS, F. T., & OLIVEIRA, W. (1999). *Instrumentação Básica II - Vazão, Temperatura e Analítica*. Vitória - ES Brasil: Senai.

VIZARD'S, D. (2012). *How to port and flow test cylinder heads*. North Branch, MN: CarTech, Inc.