



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa

Controlo de camada limite em comboios de alta velocidade

Alexandre Miguel Calhau Martins

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Júri

Presidente: Prof. Luís Rego da Cunha de Eça
Orientador: Prof. José Maria Campos da Silva André
Vogal: Prof. Mário José Gonçalves Pinheiro

Outubro 2010

Resumo

O controlo de escoamentos em torno de um veículo desempenha um papel bastante importante na segurança, no conforto, na possibilidade de aumentar a velocidade máxima ou na poupança de energia. Dos vários métodos de controlo de escoamentos, os actuadores de plasma, parecem ser promissores pelas pequenas dimensões, o seu baixo peso, a fácil construção e adaptação às superfícies aerodinâmicas. Os actuadores de plasma possuem dois eléctrodos separados por um dieléctrico. Nos actuadores pulsados é aplicada nos eléctrodos tensões elevadas (kV), que criam uma disrupção no ar separando os electrões dos núcleos, pela disposição geométrica dos eléctrodos positivos e negativos, consegue-se um campo que acelera os iões na direcção pretendida. Por sua vez os iões arrastam o ar que os rodeia, produzindo-se assim o chamado vento iónico.

Neste trabalho foi construído um actuador de plasma DBD (*Dielectric Barrier Discharge*) assim como o sistema electrónico que lhe está associado. Foram ainda testadas várias configurações de actuadores para escolher a que produzia melhores resultados.

No “nariz dos comboios”, devido a gradientes de pressão transversais, ocorre torção da camada limite, que dá origem a vórtices longitudinais. Estes vórtices contribuem para uma assimetria na pressão nas paredes laterais do comboio e portanto originam forças laterais, limitando assim a velocidade máxima que os comboios podem atingir em segurança. O ruído também é influenciado, pois a maior parte do ruído produzido pelo comboio é de origem aerodinâmica.

Foram feitos ensaios num túnel de vento, para testar o controlo destes escoamentos com actuadores de plasma. Com uma rampa criou-se um gradiente de pressão transversal que deu origem a uma componente transversal de velocidade com o sentido oposto ao gradiente e com o actuador de plasma aumentou-se a quantidade de movimento junto da parede no sentido do gradiente de pressão, para assim contrariar a torção da camada limite. Verificou-se que o actuador de plasma permitiu melhorar significativamente o escoamento e evitar a produção de vorticidade longitudinal.

Palavras-chave

Controlo de escoamentos, Actuador de Plasma, Comboios, Camada Limite, Vórtices Longitudinais.

Abstract

The control of flow around a vehicle plays a very important role in safety, in comfort, possibility of increasing the speed or energy savings. Of the various methods of flow control, plasma actuators seem promising, due to their small dimensions, low weight, easy construction and adaptation to the aerodynamic surfaces. The plasma actuators have two electrodes separated by a dielectric. In the electrodes, when are applied high voltages (kV), it's created a disruption in the air separating the electrons from the nuclei. The geometrical arrangement of positive and negative electrodes can produced a electric field that accelerates ions in the desired direction. In turn ions drag the surrounding air, thus producing the so-called ionic wind.

In this work we have constructed a plasma actuator DBD (Dielectric Barrier Discharge) as well as the electronics associated with it. We also tested various configurations of actuators to choose which produced better results.

In the “nose of the train” due to transverse pressure gradients, torsion occurs in the boundary layer, which gives rise to longitudinal vortices. These vortices contribute to an asymmetry in the pressure on the sidewalls of the train and therefore originate lateral forces, thus limiting the maximum speed that trains can reach safely. The noise is also influenced, as most of the noise generated by trains is aerodynamic origin.

Tests were made in a wind tunnel to test plasma actuators in flows. With a ramp was created a transverse pressure gradient, this gradient gave rise to a transverse component of velocity. The linear momentum along the wall was increased by a plasma actuator for thus counteracting the torsion of the boundary layer. It was found that the plasma actuator has improved significantly the flow and prevent the production of longitudinal vorticity.

Keywords

Flow control, Plasma Actuator, Trains, Boundary Layer, Longitudinal Vortices

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostava de agradecer ao meu orientador, o Professor José Maria Campos da Silva André pelo apoio, orientação deste trabalho e numerosas sugestões que levaram à elaboração desta dissertação. Estou-lhe sinceramente agradecido pelo conhecimento, experiência e inspiração que me transmitiu nestes últimos anos, como professor de várias disciplinas.

Um agradecimento especial ao Dr. João Carlos Henriques, ao Eng. Luís Rosado e ao Eng. Alexandre A. Martins, alunos de doutoramento de Electrónica e Física respectivamente, pela ajuda na construção do actuador de plasma e do sistema electrónico.

Gostaria de saudar todos os meus colegas e amigos do Instituto Superior Técnico.

Este trabalho é dedicado à minha mãe Celinia e a toda a minha família. Agradeço-lhes o apoio incondicional e o incentivo.

Alexandre Martins

Índice

Resumo	II
Palavras-chave	II
Abstract	III
Keywords	III
Agradecimentos	IV
Índice	V
Lista de Figuras	VII
Lista de Tabelas	IX
Lista de Símbolos	X
Capítulo 1– Introdução	2
1.1 Motivação.....	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Organização do documento.....	3
Capítulo 2 – Controlo de escoamentos	4
2.1 Generalidades do controlo de escoamentos	4
2.2 Métodos de controlo activo.....	4
2.2.1 Métodos tradicionais de controlo de camada limite	4
2.2.2 Controlo mediante a excitação periódica do escoamento	5
2.2.3 Actuadores Magneto-hidrodinâmicos	6
2.3 Actuadores de plasma	7
2.3.1 Actuadores DBD	8
Capítulo 3 – Construção do actuador de plasma e optimização	14
3.1 Configuração física	14
3.1.1 Electrónica	15
3.1.2 Vantagens do actuador de plasma	18
3.2 Optimização	18
3.2.1 Caracterização do sistema electrónico	18
3.2.2 Caracterização dos actuadores de plasma	21
3.3 Precisão dos aparelhos de medição.....	27
Capítulo 4 – Aerodinâmica de comboios	30
4.1 Resistência dos comboios	30
4.2 Resistência aerodinâmica.....	31
4.3 O nariz do comboio.....	32

4.4 Estabilidade lateral.....	34
Capítulo 5 – Análise analítica e experimental de um escoamento de teste	36
5.1 Descrição do escoamento	36
5.2 Montagem experimental	42
5.3 Resultados observados	44
Capítulo 6 – Conclusões	47
Referências	49
Anexo I	51

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Aplicação de cilindros rolantes ao controlo da separação da camada limite [8].....	5
Figura 2.2 - A e B – Excitação mecânica. C – Excitação de um piezoeléctrico [10]	6
Figura 2.3 - Dispositivos que introduzem perturbações junto da parede [11]	6
Figura 2.4 - Esquema de montagem sobre um perfil alar [13]	7
Figura 2.5 - Diferentes tipos de actuadores EHD	8
Figura 2.6 - Vector força paralelística ao longo do tempo. a – back discharge b – forward discharge [23]	9
Figura 2.7 - Diferentes configurações de eléctrodos [16].....	10
Figura 2.8 - Medidas de resistência (viscosa), 3 kV e 4 kHz [16].....	11
Figura 2.9 - (a) - legenda do actuador de plasma. (b) – escoamento livre. (c) – escoamento controlado [18]	12
Figura 2.10 - NACA0015 . Ângulo de ataque 12° , $U = 2,85\text{m/s}$ [21]	13
Figura 3.1 - Esquema de um actuador de plasma DBD	14
Figura 3.2 - Esquema de um ciclo de descarga de um actuador DBD [16]	15
Figura 3.3 - Descarga de plasma.....	15
Figura 3.4 - Esquema de montagem do sistema electrónico e actuador de plasma.....	16
Figura 3.5 - Esquema electrónico	17
Figura 3.6 - Sistema electrónico e actuador de plasma	17
Figura 3.7 - Esquema de montagem da caracterização do sistema electrónico.....	20
Figura 3.8 - Caracterização do sistema electrónico (1)	20
Figura 3.9 - Caracterização do sistema electrónico (2)	21
Figura 3.10 - Esquema de montagem da caracterização dos actuadores de plasma	21
Figura 3.11 - Distância dos actuadores ao anemómetro.....	23
Figura 3.12 - Aumento da velocidade induzida com a tensão.....	23
Figura 3.13 - Frequência optima para cada actuador.....	24
Figura 3.14 - Comparação de actuadores que originam velocidades iguais para diferentes potências	25
Figura 3.15 - Potência requerida para os diferentes pares de electrodos.....	26
Figura 3.16 - Optimização da frequência para os diferentes pares de electrodos	26
Figura 3.17 - Anemómetro de fio quente	27
Figura 3.18 - Osciloscópio	29
Figura 4.1 - Shinkansen Séries 500.....	33
Figura 4.2 - Algumas linhas de corrente junto da “cabeça” do comboio obtidas numericamente [1]...	34
Figura 4.3 - Formação de vórtices a meia altura do chão [1]	35
Figura 5.1 - Esquematisações do escoamento potencial	36
Figura 5.2 - Mudança de referencial	38
Figura 5.3 - Esquematisação de duas linhas de corrente sobre uma rampa inclinada.....	39

Figura 5.4 - Partícula de fluido descrevendo uma curva	39
Figura 5.5 - Perfis de camada limite tridimensional.....	40
Figura 5.6 - Perfil de velocidade obtido por um actuador DBD [30]	41
Figura 5.7 - Perfis de camada limite e perfil de velocidade criado pelo plasma.....	41
Figura 5.8 - Diferentes raios de curvatura para duas direcções do escoamento	42
Figura 5.9 - Esquema da montagem experimental no tunel de vento	43
Figura 5.10 - Ilustração da montagem experimental no tunel de vento	43
Figura 5.11 - Rampa com actuador de plasma instalado	44
Figura 5.12 - Observação do efeito do gradiente de pressão	45
Figura 5.13 - Observação do efeito do actuador de plasma DBD	46
Figura I.1 - Descrição dos parametros analisados na optimização do actuador de plasma	51

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Caracterização da bobine.....	17
Tabela 3.2 - Características geométricas dos actuadores de plasma.....	22
Tabela 3.3 - Especificações do anemómetro (1)	28
Tabela 3.4 - Especificações do anemómetro (2)	28
Tabela 3.5 - Especificações do osciloscópio	29

Lista de Símbolos

ρ_f	- Densidade volumétrica de carga. $[\rho_f]=C/m^3$
ϵ_0	- Constante dielétrica do vácuo.
\vec{E}	- Campo eléctrico. $[\vec{E}]=V/m=N/C$
\vec{f}_e	- Força eléctrica por unidade de volume. $[\vec{f}_e]=N/m^3$
\vec{f}_e^-	- Força eléctrica média na forward discharge. $[\vec{f}_e^-]=N/m^3$
\vec{f}_e^+	- Força eléctrica média na back discharge. $[\vec{f}_e^+]=N/m^3$
Re	- Número de Reynolds.
ρ	- Densidade do ar. $[\rho]=kg/m^3$
ν	- Viscosidade cinemática do ar. $[\nu]=m^2/s$
l, A	- Comprimento de referência. $[l]=m$, Área de referência. $[A]=m^2$
V_∞	- Módulo da velocidade do escoamento de aproximação. $[V_\infty]=m/s$
D	- Resistência aerodinâmica. $[D]=N$
C_D	- Coeficiente de resistência aerodinâmica.
\vec{V}	- Vector velocidade. $[\vec{V}]=m/s$
q	- Intensidade de uma fonte. $[q]=m^2/s$
u, u'	- Componente da velocidade segundo x, x'. $[u, u']]=m/s$
v, v'	- Componente da velocidade segundo y, y'. $[v, v']]=m/s$
w, w'	- Componente da velocidade segundo z, z'. $[w, w']]=m/s$
P_{rel}	- Pressão relativa à hidrostática local. $[P_{rel}]=Pa$

Capítulo 1 – Introdução

1.1 Motivação

Atrasar o mais possível a separação de alguma camada limite ou diminuir as zonas de escoamento separado teria vantagem nalguns sistemas de transporte, nomeadamente nos comboios de alta velocidade. A resistência aerodinâmica, é a maior parcela da resistência total dos transportes terrestres, principalmente nos comboios [1]. Outros problemas que ocorrem em comboios de alta velocidade, também são de origem aerodinâmica. Os elevados esforços aerodinâmicos a que os comboios estão sujeitos, podem originar derrube lateral que obviamente limite a velocidade máxima a que estes podem circular. A maior parcela de ruído nos comboios de alta velocidade é de origem aerodinâmica e deve-se à turbulência do escoamento (vórtices longitudinais), particularmente intensas nalgumas zonas de escoamento separado. O controlo de escoamentos poderá ser a solução para estes problemas.

O controlo de escoamentos, actualmente tem atraído muita atenção em várias aplicações industriais, tanto a nível económico como a nível ecológico. Usando sistemas de controlo de escoamento eficientes pode-se melhorar ou alterar os fenómenos aerodinâmicos mencionados em atrás. Foram desenvolvidos alguns sistemas de controlo de escoamentos, por exemplo geradores de vórtices ou jactos sintéticos de parede. Esses sistema de controlo têm encontrado sucesso, no controlo da separação da camada limite, no controlo de mistura usando jactos, etc. Contudo existem alguns inconvenientes quando se usa este tipo de sistema de controlo, nomeadamente as suas estruturas são complicadas, pesadas, além de poderem gerar vibrações.

Os actuadores de plasma são uma alternativa com algumas vantagens: a estrutura simples, a não existência de partes móveis (sem fontes de ruído ou vibrações) e a resposta em alta frequência, que permite adequar facilmente o uso à necessidade, fazem com que os actuadores de plasma sejam bastante promissores. Com a implementação destes simples dispositivos, pode-se reduzir alguns esforços aerodinâmicos, por exemplo o derrube lateral, que tem origem aerodinâmica, aumentar a eficiência dos comboios e aumentar a velocidade máxima que estes poderão atingir. Outro grande objectivo importante seria mitigar a produção de ruído.

1.2 Objetivos

A finalidade deste trabalho é construir um actuador de plasma e observar o seu desempenho em túnel de vento. Para completar esta tarefa, foram estabelecidos três objectivos:

- Construir um actuador de plasma.
- Testar várias configurações dos eléctrodos, de modo a otimizar o actuador.
- Testar o actuador de plasma em túnel de vento.

1.3 Organização do documento

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica dos métodos de controlo de escoamentos. São apresentadas várias técnicas de controlo, dando maior relevo aos actuadores de plasma, mais concretamente aos actuadores DBD (*Dielectric Barrier Discharge*).

Na primeira parte do capítulo 3 é feita a descrição do actuador de plasma, da sua constituição física e do seu funcionamento. Na segunda parte deste capítulo são descritos os componentes electrónicos do actuador de plasma e apresentadas algumas vantagens dos actuadores de plasma. A terceira parte é dedicada à optimização do actuador, onde são testadas várias configurações geométricas dos eléctrodos e escolhida aquela que produz melhores resultados. A ficha técnica e os limites de precisão dos aparelhos de medição usados neste trabalho, encontram-se na quarta parte deste capítulo.

O capítulo 4 explica de uma forma breve, os esforços a que os comboios estão sujeitos quando se deslocam. É dada especial atenção à resistência aerodinâmica e a alguns fenómenos de origem aerodinâmica.

A montagem experimental e os ensaios no túnel, fazem parte do capítulo 5. Ainda neste capítulo são apresentadas as equações físicas que descrevem o escoamento junto do nariz do comboio.

Por fim no capítulo 6 são apresentadas as conclusões gerais deste trabalho assim como algumas propostas que podem ser estudadas em trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Controlo de escoamentos

2.1 Generalidades do controlo de escoamentos

O controlo de escoamentos tem vários objectivos, nomeadamente atrasar ou adiantar a transição da camada limite, aumentar ou reduzir a turbulência para inibir ou promover a separação da camada limite. Como consequência destas acções alguns trabalhos [2], verificaram: aumentos da sustentação, diminuição da resistência aerodinâmica, incrementos nas taxas de transferência de calor e redução do ruído provocado por escoamentos superficiais.

Uma das formas de classificar os métodos de controlo de escoamentos tem a ver com o consumo de energia. Se houver consumo de energia para accionar o controlo do escoamento, denomina-se controlo activo. O controlo passivo não requer energia do actuador para se fazer o controlo do escoamento.

Muitos trabalhos tratam de estratégias de controlo passivo tais como a modificação de forma do corpo ou a disposição de geradores de vórtices sobre as superfícies. Alguns destes trabalhos podem ser encontrados em [3].

O método de controlo utilizado neste trabalho é um método de controlo activo, por essa razão vamos dar mais importância a esse tipo de controlo. Em [2], existe uma grande compilação de trabalhos, tanto na área do controlo activo como na área de controlo passivo.

2.2 Métodos de controlo activo

2.2.1 Métodos tradicionais de controlo de camada limite

O controlo que tradicionalmente se faz na camada limite que se forma nas superfícies dos corpos, passa pela injeção ou remoção de fluido ou pelo movimento da superfície na direcção do escoamento [4].

Se as partículas desaceleradas que se encontram junto das superfícies forem substituídas por outras partículas com maior quantidade de movimento, contraria-se a separação da camada limite [5]. A extração da camada limite já foi estudado em perfis alares, embora ainda se utilize, apresenta alguns pontos negativos, como a elevada complexidade mecânica o elevado peso do mecanismo de bombeio necessário para produzir a sucção e elevada energia consumida. [6].

Um mecanismo alternativo é fornecer quantidade de movimento à camada limite, por exemplo injectando fluido junto da superfície e desta forma atrasar a separação. A injeção de fluido apresentou os seus efeitos mais notáveis quando é aplicada junto do ponto de separação, [7].

Outra forma de fornecer quantidade de movimento à camada limite é mediante o movimento da superfície. A superfície necessita de ter uma velocidade próxima do escoamento exterior, eliminando localmente a camada limite. Esta técnica é muito utilizada em túneis de vento para

estudar os efeitos do chão sobre a aerodinâmica dos automóveis. Uma aplicação para esta técnica é a utilização de cilindros rotativos na parte dianteira de camiões para reduzir a resistência, Figura 2.1 [8].

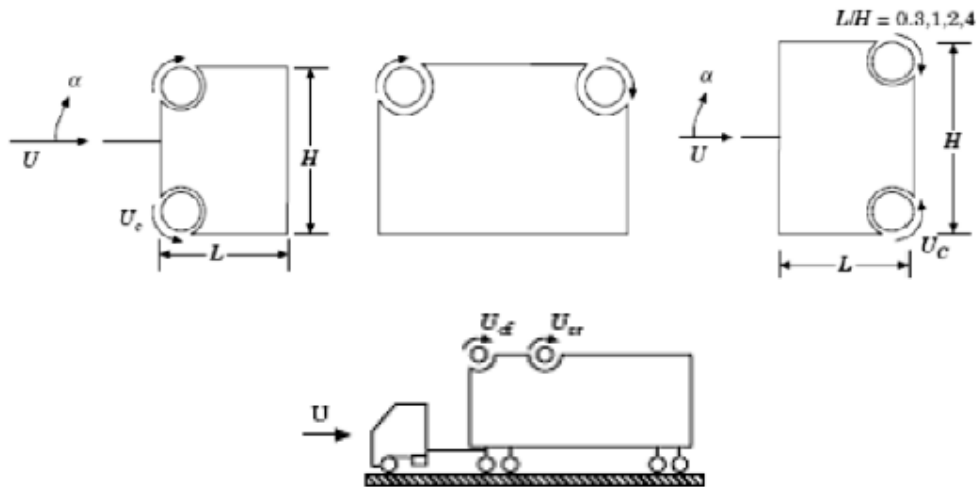


Figura 2.1 - Aplicação de cilindros rotantes ao controlo da separação da camada limite [8]

2.2.2 Controlo mediante a excitação periódica do escoamento

Excitação acústica externa

A formação de ondas sonoras estacionárias nos túneis de vento, induz flutuações da velocidade junto da superfície e são essas flutuações, mais que o nível sonoro, que alteram as condições do escoamento, [9]. As principais desvantagens desta técnica é a forte dependência do arranjo experimental utilizado, outra dificuldade para a aplicação prática é o elevado nível de excitação requerido para produzir estas flutuações de velocidade.

Oscilações na superfície

A perturbação periódica do escoamento pode ser conseguida de forma mecânica ou eléctrica, colocando *flaps* nas superfícies, Figura 2.2.

Foram montados actuadores piezoeléctricos deste tipo na superfície de perfis alares, conseguindo-se aumentos de 20-22 % no $C_{L_{max}}$ e um aumento de cerca de 4° no ângulo de entrada em perda.

Outro estudo interessante foi a instalação de um *flap* oscilante no bordo de ataque de um perfil alar e mostrou que se consegue aumentar a sustentação, quando a frequência de excitação corresponde à frequência de desprendimento dos vórtices do perfil. Contudo a relação sustentação/resistência nem sempre foi melhorada, [10].

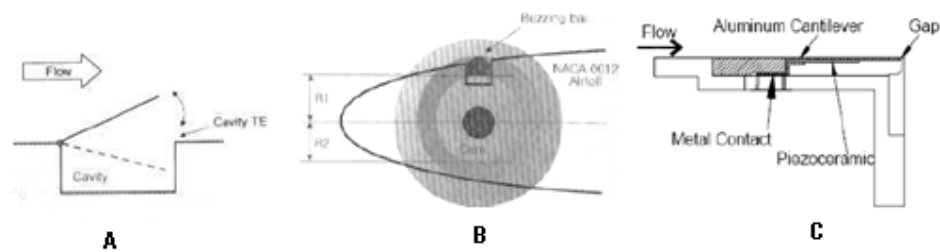


Figura 2.2 - A e B – Excitação mecânica. C – Excitação de um piezoelétrico [10]

Oscilações do escoamento a partir de dispositivos montados internamente

Outra forma de induzir oscilações junto da parede e promover o transporte transversal de quantidade de movimento longitudinal, é através de sistemas montados em cavidades no interior do corpo. As oscilações podem ser produzidas por sistemas de excitação acústica (A) ou sistemas de bombeamento/sucção de fluido, por pistão (B) ou por piezoelétricos (C). Os fluxos induzidos comunicam com a superfície através de orifícios na superfície do corpo, Figura 2.3. É possível encontrar alguns estudos usando estas técnicas em, [11] e [12].

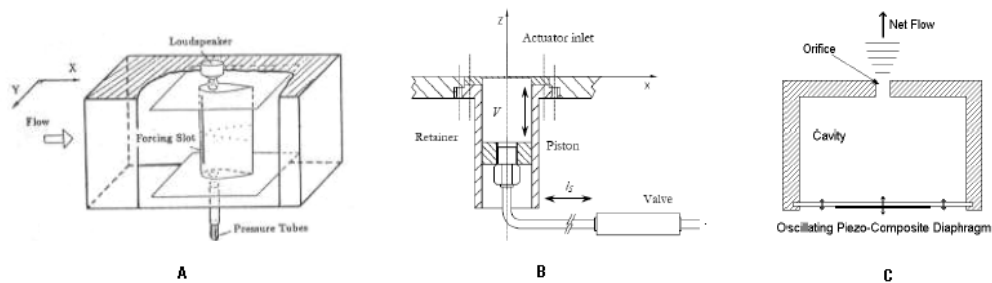


Figura 2.3 - Dispositivos que introduzem perturbações junto da parede [11]

2.2.3 Actuadores Magneto-hidrodinâmicos

Estes actuadores consistem numa serie de eléctrodos e ímans permanentes, sobre a superfície dos corpos, Figura 2.4. A criação de uma densidade de corrente \vec{j} , junto com a aplicação de um campo magnético \vec{B} , permite introduzir uma força volumétrica junto da superfície do corpo, é conhecida como a *força de Lorentz* $\left(\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B}\right)$.

Em corpos submergidos numa corrente de água, observaram-se reduções na resistência por fricção de cerca de 90%, produzida por uma camada limite turbulenta [13].

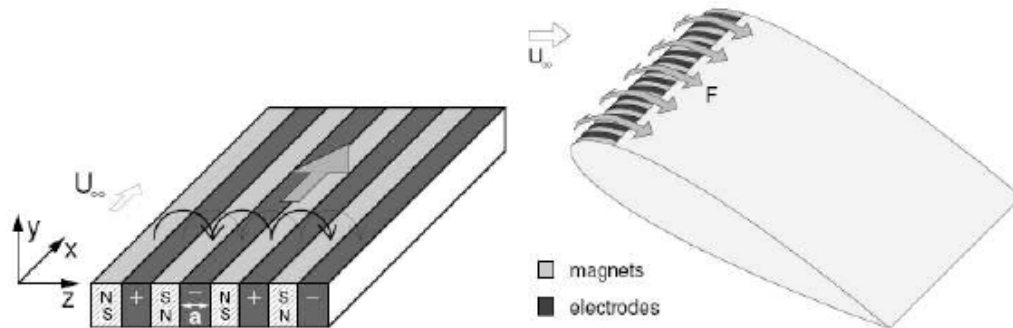


Figura 2.4 - Esquema de montagem sobre um perfil alar [13]

2.3 Actuadores de plasma

Parece-nos que entre as propostas para o controlo activo de escoamentos, a utilização de plasmas frios é uma técnica que se encontra em plena expansão. Os actuadores mecânicos têm tido um resultado bastante satisfatório, quando aplicado ao controlo de escoamentos, no entanto têm alguns pontos fracos, como a presença de partes móveis, o seu grande volume em alguns casos e a sua complexidade de montagem. Contrariamente os actuadores de plasma não possuem partes móveis, a sua montagem não apresenta grande complexidade, pois eles próprios passam a ser a superfície e os tempos de resposta são relativamente curtos (tempo de estabelecimentos da descarga na ordem dos nano segundos).

Particularmente os actuadores de plasma em que as correntes obtidas são relativamente baixas e não são aplicados campos magnéticos de forma externa são conhecidos por actuadores *electro-hidrodinâmicos* (EHD).

Os actuadores EHD podem ser classificados em dois grupos. Os actuadores em que os eléctrodos estão separados por uma barreira dielétrica (DBD, *Dielectric Barrier Discharge*). Os eléctrodos podem ainda encontrarem-se expostos ao ar e frente a frente, nesse caso denominam-se BED (*Bare Electrode Devices*).

Os actuadores DBD usam necessariamente tensão alterna (AC), a barreira dielétrica interposta entre os eléctrodos é a responsável por a descarga não dar origem a um arco eléctrico. Existem ainda descargas em superfície e descargas em volume nos actuadores DBD. Os actuadores BED podem produzir vários tipos de descargas, dependendo do potencial aplicado entre os eléctrodos e das condições do escoamento. Assim estes actuadores podem funcionar com descargas: de corona unipolares (UC), coronas bipolares (BC) e descargas gasosas com formação de lâminas de plasma (PS). Em qualquer destes três casos a tensão pode ser contínua (DC) ou alterna (AC). Na Figura 2.5 é apresentado dos diferentes tipos de actuadores EHD.



Actuador	Esquema	Tipo de descarga	Alimentação
DBD		DBD	AC
BED		Corona unipolar (UC) Corona bipolar (BC) Lâmina de plasma (PS)	AC ou DC

Figura 2.5 - Diferentes tipos de actuadores EHD

Não é de todo o objectivo deste trabalho fazer uma descrição exaustiva dos diferentes tipos de actuadores de plasma. Contudo achou-se importante fazer uma pequena descrição dos actuadores DBD uma vez que o actuador construído neste trabalho é deste tipo.

2.3.1 Actuadores DBD

Mecanismos de Acoplamento

Um das diferenças entre os actuadores de plasma baseados em descargas de corona e descarga DBD, é que os actuadores DBD são unicamente alimentados por tensão alterna (AC). O mecanismo de acoplamento que está subjacente a este tipo de descarga é um assunto que ainda não está totalmente descoberto, no entanto *Roth* umas das autoridades mais citadas na matéria, oferece uma explicação plausível [21].

Roth diz que a força que actua no fluido provém da *força de Coulomb* sobre as partículas carregadas, (expressão 2.1), considerando a equação de *Gauss* (expressão 2.2), *Roth* derivou para o caso unidimensional uma expressão para a força eléctrica \vec{f}_e , que decidiu chamar *força paraeléctrica* (expressão 2.3).

$$\vec{f}_e = \rho_f \cdot \vec{E} \quad (2.1)$$

$$\epsilon_0 \cdot \nabla \cdot \vec{E} = \rho_f \quad (2.2)$$

$$\vec{f}_e = \rho_f \cdot \vec{E} = \epsilon_0 \cdot (\nabla \cdot \vec{E}) \cdot \vec{E} \Rightarrow \vec{f}_e = \epsilon_0 \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} E^2 \right) \quad (2.3)$$

O modelo de *Roth* baseia-se na derivação das forças em dielectricos gasosos. A força paraeléctrica é proporcional ao gradiente do quadrado do campo eléctrico.

A expressão 2.3 é correcta mas é preciso interpretar o modelo de *Roth*, já que o valor do campo eléctrico a considerar na expressão é o que resulta da soma do campo eléctrico aplicado e do gerado pelas cargas no volume. A única situação na qual o campo eléctrico local coincide com o

campo eléctrico aplicado externamente é aquela na qual se considera $\rho_f = 0$ (hipótese de carga diluída). Esta condição é justamente contrária à presença de uma força de Coulomb considerável.

A simulação numérica é a única ferramenta que permite avaliar os valores instantâneos de ρ_f e de \vec{E} , e consequentemente o valor de \vec{f}_e , ao longo do ciclo de tensão da fonte AC aplicada para produzir as descargas DBD em superfície.

Foi simulada uma descarga DBD em oxigénio puro, [23]. O autor distingue duas fases da descarga, por um lado um período chamado *forward discharge*, durante o qual o eléctrodo exposto (superior) está a um potencial negativo em relação ao eléctrodo coberto (inferior), onde temos assim os electrões a serem repelidos do eléctrodo exposto. Por outro lado é definida a *back discharge* durante a qual o eléctrodo exposto está a um potencial positivo em relação ao coberto, e os electrões são atraídos para o eléctrodo exposto. O autor verificou que durante o *back discharge* a força média (\vec{f}_e^-) está dirigida para o eléctrodo exposto, enquanto que na *forward discharge* a força média (\vec{f}_e^+) está dirigida para jusante do eléctrodo exposto, Figura 2.6. O estudo mostrou que a força média durante a *forward discharge* é aproximadamente uma ordem de grandeza maior ($\vec{f}_e^+ = 8,5 \times 10^3 \frac{N}{m^3}$), que o ciclo anterior ($\vec{f}_e^- = 1 \times 10^3 \frac{N}{m^3}$) e por esta razão o fluxo induzido pela descarga toma sempre a mesma direcção.

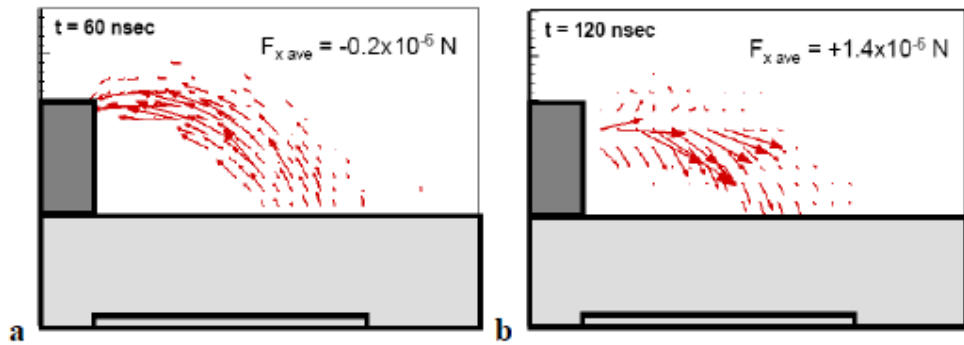


Figura 2.6 - Vector força paralela ao longo do tempo. a – back discharge b – forward discharge [23]

Outro estudo levado a cabo por *Pinheiro* [31], pretende descrever o regime de descarga usando um modelo numérico, com ênfase para aplicações de controlo de escoamentos usando actuadores de plasma. O modelo baseia-se na cinética das espécies carregadas electricamente (N_2^+ , N_4^+ , O_2^+ , O_2^- e electrões) por serem estas que desempenham um papel determinante na pressão atmosférica. O modelo cinético tem sido implementado para descrever as propriedades eléctricas e cinéticas do OAUGDP. Foi confirmado que o campo eléctrico obedece à lei de Aston acima do eléctrodo superior. Foi também verificado, que entre as duas fases da descarga, as forças geradas variam cerca de 1-1,5 ordens de grandeza.

Estudos mostram também que a densidade do gás por cima do eléctrodo exposto é maior que a densidade do escoamento não perturbado e pelo contrário a jusante deste existe sempre uma densidade menor que a densidade do escoamento não perturbado (em ambos os casos os valores de densidade flutuam conforme o ciclo de tensão considerado), [24].

One Atmosphere Glow Discharge Uniform Plasma

A interposição de um dieléctrico entre os eléctrodos tem por objectivo prevenir a criação do arco nas descargas gasosas. Em [14] e [15] podemos encontrar trabalhos de referência, utilizando descargas volumétricas.

Nos anos 90 *Roth* desenvolveu um novo actuador DBD à pressão ambiente. Nestes actuadores denominados actuadores DBD em superfície, o que os distingue dos actuadores DBD volumétricos é a descarga se concentrar junto da superfície quando os eléctrodos são colocados assimetricamente de cada lado do dieléctrico. Este trabalho foi patenteado em 1994 com o nome de *One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma* (OAUGDP). Na Figura 2.7 são apresentadas três tipos de configurações usadas neste tipo de actuadores, (a) distribuição simétrica, (b) distribuição assimétrica e (c) simétrico com eléctrodo plano em baixo, [16].

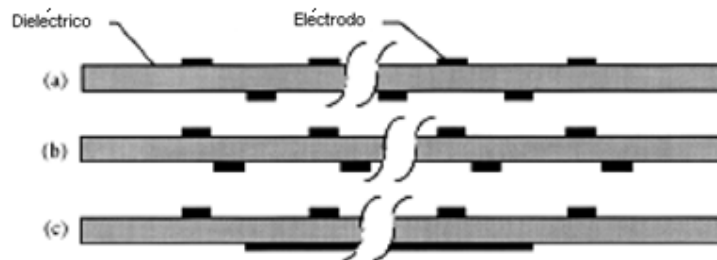


Figura 2.7 - Diferentes configurações de eléctrodos [16]

Os primeiros trabalhos de *Roth* centraram-se no estudo do controlo da camada limite sobre uma placa plana aplicando diferentes formas de arranjo dos eléctrodos. Na Figura 2.8 podemos observar alguns dos resultados obtidos, utilizando a configuração (b) da Figura 2.7, os eléctrodos estão orientados na direcção perpendicular ao escoamento. Verifica-se uma redução da resistência (de origem viscosa) quando a descarga tem a direcção do escoamento (*co-flow*), pois a força de propulsão gerada pelo vento iónico é mais significativa que as tensões de corte geradas na parede. Por outro lado observa-se um aumento de resistência quando a força de propulsão têm o sentido oposto (*counter-flow*).

Depois destes resultados foram feitos numerosos estudos para estudar a eficácia das descargas DBD em superfícies para o controlo de escoamentos. No geral as superfícies que têm vindo a ser estudadas são placas planas, cilindros e perfis alares.

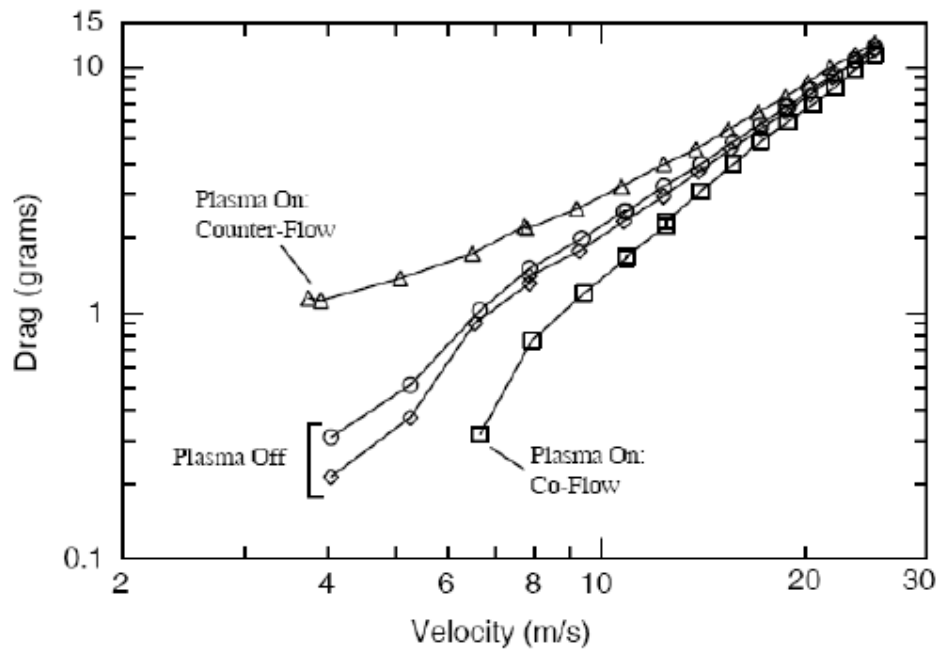


Figura 2.8 - Medidas de resistência (viscosa), 3 kV e 4 kHz [16]

Placas planas

Seguindo a linha de estudo de *Roth*, foram realizados outros estudos que comprovaram a redução da resistência sobre placas planas por meio de actuadores DBD [17].

Cilindros

Os actuadores DBD também foram aplicados ao controlo de escoamentos em torno de cilindros. Na Figura 2.9 podemos observar um trabalho nessa área, [18]. No cilindro foram montados dois pares de eléctrodos com ângulos de $\pm 90^\circ$ e $\pm 135^\circ$ na direcção do escoamento incidente, (imagem (a) da Figura 2.7), induzindo velocidades de alguns m/s. Sem o actuador ligado, o escoamento separa dando lugar a uma ampla esteira, como é habitual (imagem (b) da Figura 2.9). Quando o actuador é ligado, o seu efeito de sopro reduz apreciavelmente a esteira e deixa de haver libertação alternada de vórtices em estrada de *Von Kármán*, o que é uma indicação de que o escoamento se tornou bastante mais estável. Na imagem (a) é possível ver em (1) o dieléctrico, em (2) o eléctrodo exposto, em (3) o eléctrodo coberto, em (4) um segundo dieléctrico e por fim a região de formação do plasma em (5).

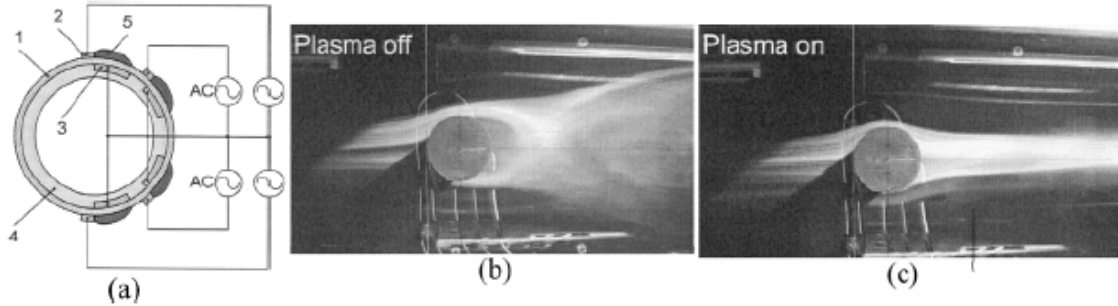


Figura 2.9 - (a) - Legenda do actuador de plasma. (b) – escoamento livre. (c) – escoamento controlado [18]

Estes ensaios foram realizados em escoamentos com $Re < 7400$, [19] e com $Re < 33500$, [18], com actuadores com descargas pulsadas.

Numa descarga estacionária a descarga é mantida activa em todo o ensaio. É o caso em que a frequência de excitação da descarga (kHz) é suficientemente alta e o ar é constantemente acelerado. Por sua vez a actuação pulsada implica a formação/extinção da descarga com uma frequência menor que a excitação da fonte.

Os vários trabalhos com cilindros circulares indicam que a excitação do ar com frequências correspondentes a um número de *Strouhal* unitário, corresponde à excitação óptima. Quando atingiram este nível de excitação, os níveis de turbulência na esteira do cilindro foram reduzidos em 66% e uma redução de 25% no consumo energético em relação à excitação continua.

Perfis alares

O trabalho pioneiro na aplicação de actuadores DBD nos perfis alares é um trabalho de *Shcherbakov*, [20]. Os eléctrodos utilizados correspondem aos da Figura 2.7 (c). Os resultados obtidos mostram uma diminuição na resistência (de origem viscosa) em escoamentos turbulentos, com reduções que estão entre 5.3% e 2.2% com velocidades ensaiadas de 35 e 53,6 m/s respectivamente. Por outro lado em escoamentos laminares a diminuição da resistência não foi apreciável. Os autores associam a redução da resistência ao caso turbulento a uma redução da viscosidade dinâmica como consequência da introdução de uma fina camada de gás ionizado.

Contrariamente aos trabalhos de *Shcherbakov*, a maioria dos trabalhos onde se aplica actuadores DBD aos perfis alares, tem como objectivo o controlo da separação da camada limite. Por exemplo *Roth* [21], estudou o efeito de aplicar um actuador DBD composto por oito pares de eléctrodos accionados por fontes de tensão independentes. A velocidades relativamente baixas é notório o “recolamento” do fluido à parede, Figura 2.10. Nesta figura a imagem (a) é a situação sem actuar no escoamento e em (b) é com o actuador de plasma ligado.

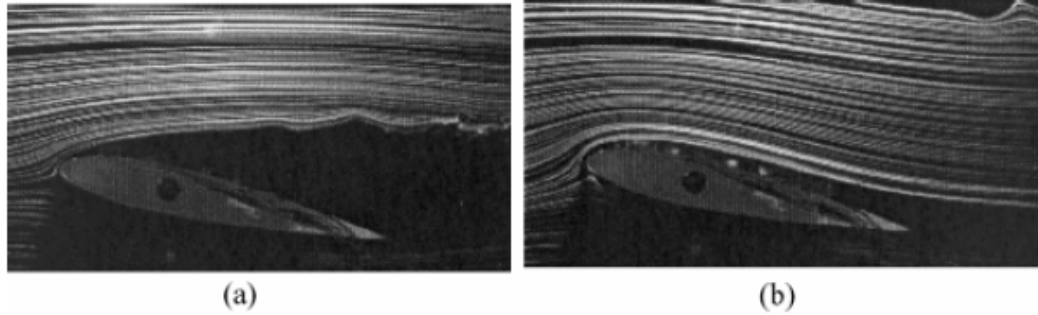


Figura 2.10 - NACA0015. Ângulo de ataque 12°. U = 2,85m/s [21]

Foram feitas comparações entre actuadores de plasma DBD e geradores de vórtices. As medidas foram realizadas numa gama de números de *Reynolds*, $79000 < Re < 158000$. Os principais resultados mostram que para os perfis ensaiados o actuador DBD permite uma “recolagem” do escoamento para ângulos de ataque até 8° acima do ângulo de entrada em perda, assim como um aumento significativo na razão C_L / C_D . [22].

Capítulo 3 – Construção do actuador de plasma e optimização

3.1 Configuração física

Tipicamente o actuador de plasma DBD consiste em um ou mais pares de eléctrodos de cobre, separados por um dieléctrico. Na Figura 3.1 é apresentado um esquema genérico. O eléctrodo superior é exposto ao ar exterior, enquanto o eléctrodo inferior é completamente revestido, neste trabalho o eléctrodo inferior foi coberto por um verniz. A geometria dos eléctrodos é assimétrica e entre eles existe um desfasamento (na ordem dos mm), mais à frente irá ser explicado o porque deste desfasamento.

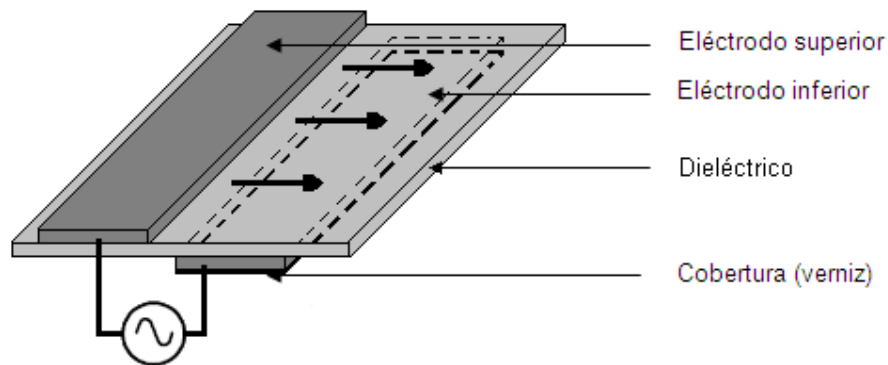


Figura 3.1 - Esquema de um actuador de plasma DBD

Os eléctrodos são naturalmente feitos de material condutor, neste trabalho foram usadas finas tiras de cobre com cerca de 0,1 mm de espessura. Os dieléctricos são os materiais que fazem oposição à passagem da corrente eléctrica, os quais podem ser: borracha, porcelana, vidro, plástico, madeira e muitos outros. O dieléctrico escolhido para os actuadores que foram ensaiados foi o *FR-4*. O *FR-4* é o substrato mais comum usado em placas de circuito impresso (PCB), usa resina *epoxy* para fazer a ligação entre a fibra de vidro e as folhas de cobre. Este material apresenta boas propriedades nomeadamente; uma densidade de 1850 kg/m³ e rigidez dieléctrica de 20 kV/mm.

Quando nos eléctrodos é aplicada uma tensão elevada (na ordem dos kV e nas dezenas de kV), ocorre uma disrupção do ar, onde as moléculas do ar se separam em electrões e iões formando-se um gás ionizado ou plasma. Constantemente estão a ocorrer colisões entre electrões e moléculas inertes que se ionizam, formando iões e conseqüentemente a formação de novos electrões e iões, este mecanismo é chamado, avalanche de electrões. Na Figura 3.2 está esquematizado a emissão

de electrões por parte do eléctrodo descoberto (a), que são depositados na parte superior do dieléctrico, e que no meio-ciclo seguinte da descarga retornam ao eléctrodo descoberto (b), (de notar que nestes actuadores é usada corrente alterna). Devido a este fenómeno de constante alteração de carga no dieléctrico, que não se forma um arco eléctrico. Desde que os eléctrodos sejam longos e estreitos, a descarga de plasma forma-se sobre o eléctrodo exposto e o eléctrodo coberto. Na Figura 3.3 encontra-se uma imagem de uma descarga de um actuador de plasma usado numa das experiencias deste trabalho.

Na presença de um campo eléctrico elevado, o ar ionizado é acelerado chocando com as moléculas inertes do ar e transmitindo-lhe quantidade de movimento. A configuração dos eléctrodos, (finos, longos, estreitos e desfasados) permite acelerar o ar numa direcção paralela à parede e criar uma fina camada de vento junto desta.

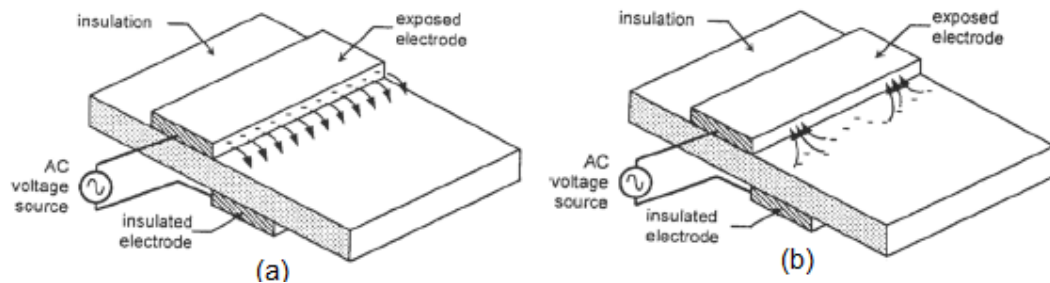


Figura 3.2 - Esquema de um ciclo de descarga de um actuador DBD [16]

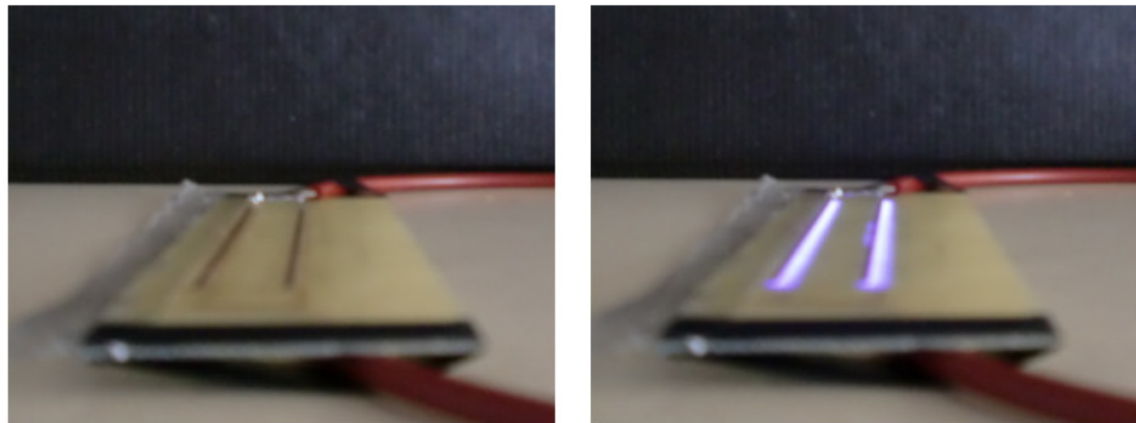


Figura 3.3 - Descarga de plasma

3.1.1 Electrónica

Juntamente com o actuador de plasma foram necessários vários componentes electrónicos para formar o plasma. Uma fonte de alimentação, um circuito electrónico para gerar uma onda e um transformador. Na Figura 3.4 é apresentado o esquema da montagem do sistema.

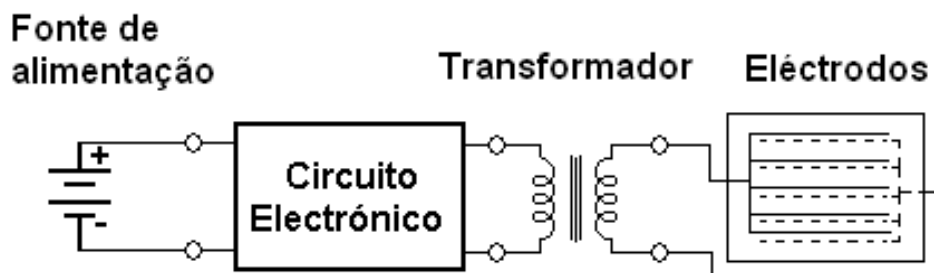


Figura 3.4 - Esquema de montagem do sistema electrónico e actuador de plasma

A fonte de alimentação usada permite regular a tensão e a corrente fornecida ao circuito electrónico. Os valores de tensão e corrente são apresentados num mostrador digital, podendo assim serem registados. Neste caso só é mantida constante a tensão imposta ao circuito (0 – 30 V), a corrente é aquela que o sistema precisar. A fonte de alimentação fornece corrente e tensão contínua e é alimentada numa tomada convencional de 220V e 50Hz.

O circuito electrónico é constituído por 4 resistências, 2 condensadores, 1 díodo, um regulador de tensão, um comutador de sinal e um temporizador. O circuito integrado 555 (CI 555) é utilizado como temporizador, associado a ele está um condensador, uma resistência e um potenciómetro. O potenciómetro permite variar o intervalo de temporização, ou seja o tempo durante o qual há sinal na saída. Assim, com o CI 555 conseguimos produzir uma onda quadrada e com o potenciómetro variar a sua frequência. A tensão de alimentação do CI 555 é de +12V. O regulador de tensão 7812 tem a função de estabilizar (manter constante) a tensão de saída, mesmo havendo variações na tensão de entrada ou na corrente de saída. Neste caso, o objectivo é manter a tensão de saída em 12V para alimentar o CI 555. O transistor IRF 840 é um comutador de sinal, fazendo com que o sinal que sai do CI 555 seja amplificado e assim sejam gerados pulsos de tensão à sua saída. Na Figura 3.5 é apresentado o esquema electrónico e respectiva legenda dos componentes usados neste trabalho.

O transformador funciona como um elevador de tensão, usou-se uma bobine de automóvel (*Fiat Punto*) para criar a esta elevação. Foi feita uma pequena caracterização da bobine, na Tabela 3.1. Verificou-se que quando aumenta a frequência do sinal a resistência aumenta e a indutância diminui. Este fenómeno designa-se “*skin effect*”. O *skin effect* traduz a redução da secção efectiva de um condutor com o aumento da frequência dos portadores de carga, ou seja os electrões começam a depositar-se junto da secção de passagem do fio condutor e assim aumenta a resistência à passagem dos outros electrões. Este efeito é mais notório quando se aumenta a frequência do sinal. Para fazer a caracterização do transformador foi utilizado um caracterizador de impedâncias, HIOKI LRC 3522-50.

Na Figura 3.6 é apresentado uma imagem com o actuador de plasma e todos os componentes electrónicos.

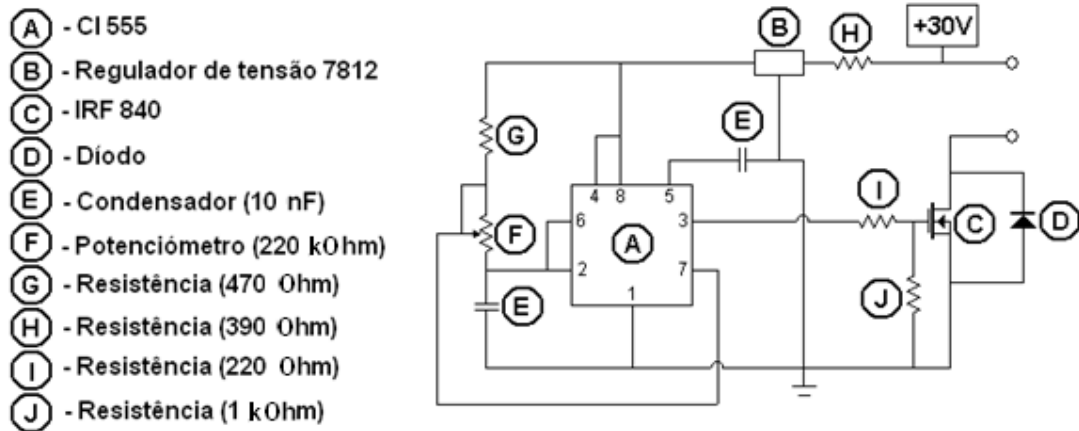


Figura 3.5 - Esquema electrónico

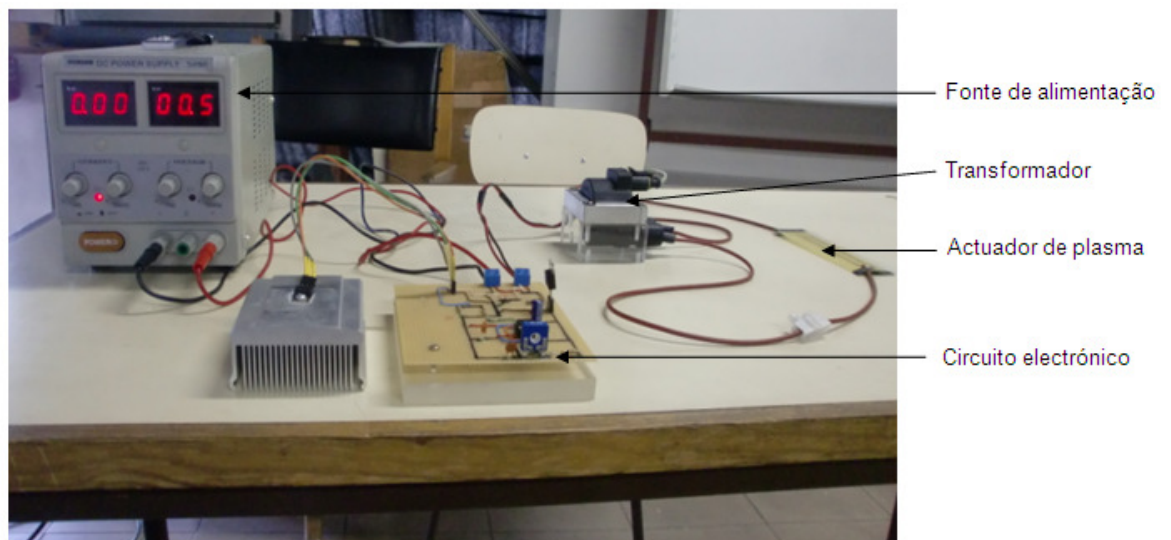


Figura 3.6 - Sistema electrónico e actuador de plasma

	Primário		Secundário	
	Resistência (Ω)	Indutância (mH)	Resistência (k Ω)	Indutância (H)
D.C. (0 Hz)	0,62	-	7,23	-
100 Hz	0,607	3,1	7,72	23
1 kHz	2,29	3,01	19,3	22
10 kHz	317	0,321	250	2,43

Tabela 3.1 - Caracterização da bobine

3.1.2 Vantagens do actuador de plasma

Os actuadores de plasma têm o potencial de ser efectivos no controlo de escoamentos. Algumas das numerosas vantagens dos actuadores de plasma no controlo de escoamentos incluem:

- **Composição totalmente electrónica:** os actuadores de plasma são totalmente electrónicos, sem partes mecânicas e assim sem estarem sujeitos a esforços.
- **Dimensões variáveis:** Os eléctrodos podem possuir várias dimensões, podem ser pequenas estruturas desde 0,5 mm ou maiores por exemplo 20 cm. Devido ao seu baixo perfil podem ser instalados por exemplo em asas, sem requerer cavidades.
- **Baixo peso:** Os actuadores possuem um peso bastante baixo, este é um factor extremamente importante quando se pretende actuar em estruturas móveis.
- **Resposta a alta frequência:** esta característica permite o fácil controlo dos actuadores e usa-los só quando é necessário.

3.2 Optimização

Nesta secção caracterizou-se o sistema electrónico e aborda-se a optimização do actuador de plasma. É analisada a relação input/output do sistema electrónico (em vazio) e posteriormente com o actuador de plasma. Por fim tenta-se encontrar a geometria do actuador mais eficiente em termos energéticos e que nos permite obter maior velocidade.

3.2.1 Caracterização do sistema electrónico

O principal objectivo desta caracterização é encontrar uma ordem de grandeza das tensões de saída, que é possível obter aos terminais do sistema electrónico e perceber como variam essas tensões com a frequência do sinal. Em numerosos artigos foi possível verificar que a velocidade induzida pelo actuador de plasma aumenta com a tensão aplicada nos eléctrodos, [25]. Outro aspecto interessante é perceber qual a potência gasta para produzir essas tensões.

Foi utilizado um osciloscópio (TEKTRONIX THS 710 TEKSCOPE) para monitorizar a tensão e a frequência do sinal aos terminais dos eléctrodos, foi também utilizada uma sonda de alta tensão. Na Figura 3.7 pode observar-se uma imagem do esquema de montagem desta caracterização.

As medições foram feitas fixando valores de frequência do sinal e variando a tensão do primário. De seguida foram registados os valores de corrente no primário, e de tensão no secundário. Com estes dados foram feitos dois gráficos que permitem avaliar qual a frequência que permite obter maior tensão no secundário (Figura 3.8), com um menor gasto de potência (Figura 3.9).

As frequências entre 500Hz e 1000 Hz são as que originam maior tensão no secundário. Frequências menores de 500Hz necessitam de correntes bastantes elevadas, chegando mesmo a 5 A, o que além de ser perigoso trabalhar com estas correntes no laboratório, originava potências

relativamente elevadas, o que não interessava. As frequências maiores que 5000Hz também não interessaram pois são obtidas tensões no secundário bastante baixas.

Novamente as frequências entre 500Hz e 1000Hz, são aquelas que originam uma maior tensão no secundário para uma potência fixa no primário. Por exemplo, olhando para a Figura 3.9 para uma potência próxima de 10 W com uma frequência de 1500Hz consegue-se cerca de 10,5 kV, enquanto com 1000Hz consegue-se cerca de 12,5 kV. Concluí-se assim que as frequências entre 500Hz e 1000Hz (para a gama de frequências estudadas) são as frequências mais eficientes.

É preciso notar que estes valores de tensão no secundário não vão corresponder aos que se vão verificar quando se tiver o actuador de plasma instalado, pois o actuador altera a impedância do circuito e a tensão do secundário é alterada, (este fenómeno vai ser apresentado mais á frente).

Por outro lado com o actuador de plasma instalado, a rigidez dieléctrica do dieléctrico usado limita a tensão aos terminais actuador. Como já foi dito o dieléctrico utilizado foi um substrato de FR-4, que possui uma rigidez dieléctrica de 20 kV/mm. Os actuadores de plasma testados mais à frente na parte da optimização têm espessuras de 0,8mm e de 1,6mm. Tendo em conta que os terminais estão mais ou menos em oposição de fase, a tensão máxima que se pode aplicar em cada um é metade daquela que se obtêm multiplicando a rigidez dieléctrica pela espessura do dieléctrico.

$$V_{máxima} = \left(20 \frac{\text{kV}}{\text{mm}} \times 0,8\text{mm} \right) / 2 = 8\text{kV} \quad (3.1)$$

$$V_{máxima} = \left(20 \frac{\text{kV}}{\text{mm}} \times 1,6\text{mm} \right) / 2 = 16\text{kV} \quad (3.2)$$

Ou seja no dieléctrico de 0,8mm podemos aplicar até 8kV em cada terminal, somando 16kV de diferença de potencial, enquanto no dieléctrico de 1,6 mm podemos ter até 16 kV, somando 32 kV de diferença de potencial.



Figura 3.7 - Esquema de montagem da caracterização do sistema electrónico

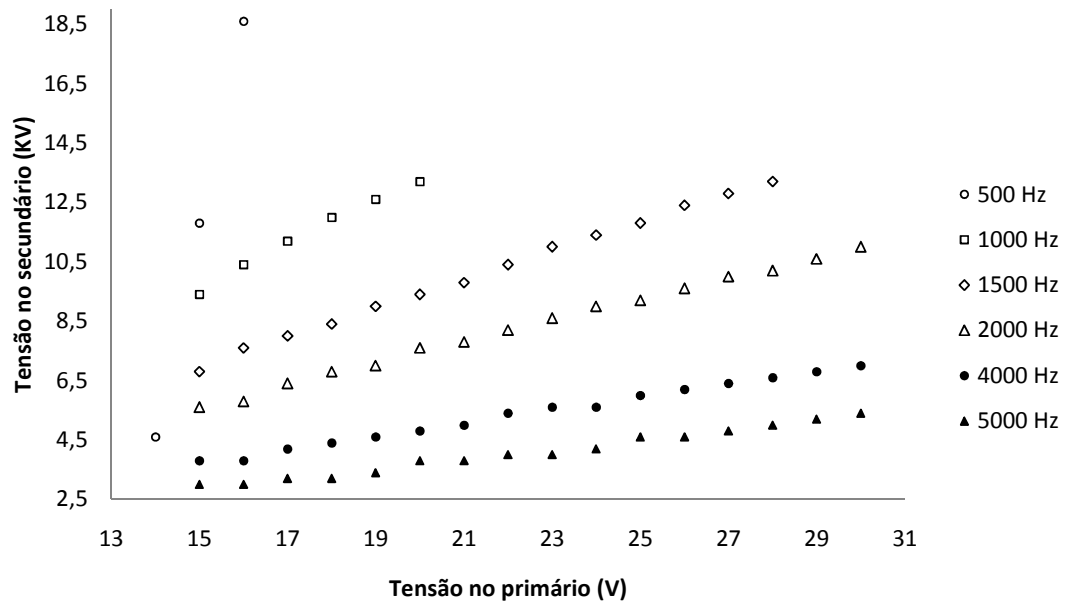


Figura 3.8 - Caracterização do sistema electrónico (1)

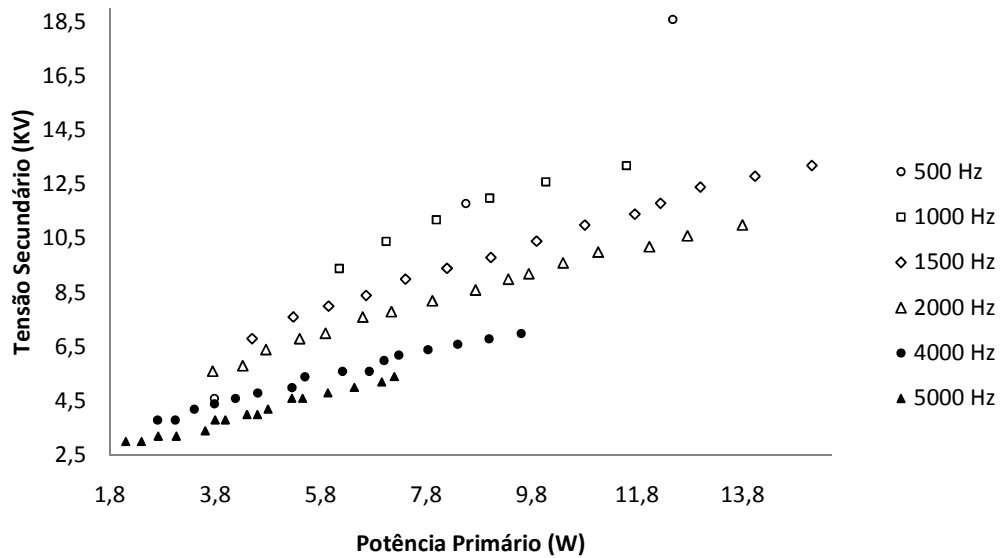


Figura 3.9 - Caracterização do sistema electrónico (2)

3.2.2 Caracterização dos actuadores de plasma

Um dos objectivos deste trabalho foi otimizar o actuador de plasma para obter maiores velocidades. Para tal testaram-se várias configurações de actuadores. Foram estudadas várias geometrias dos actuadores, nomeadamente; largura dos eléctrodos, espessura do dieléctrico e pares de eléctrodos. Tentou-se encontrar a geometria do actuador mais eficiente em termos energéticos e também a geometria que permite obter maiores velocidades. As características destes actuadores encontram-se na Tabela 3.2.

Os ensaios foram realizados num local fechado, para não haver perturbações do exterior. Os ensaios consistiram em medir a velocidade e a tensão do secundário que cada eléctrodo conseguia produzir, para diferentes condições eléctricas, frequência do sinal e tensão de alimentação no primário, Figura 3.10.

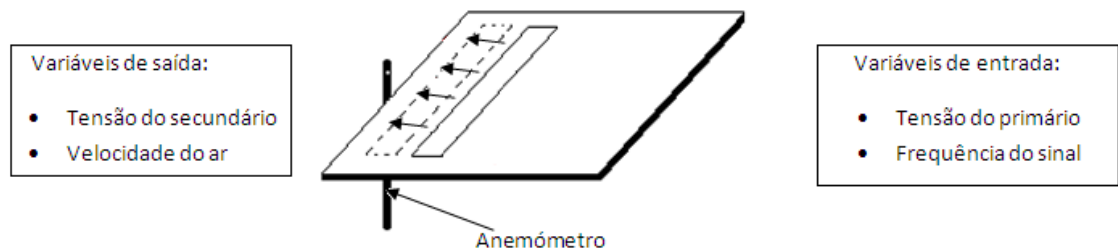


Figura 3.10 - Esquema de montagem da caracterização dos actuadores de plasma

Actuador de plasma	Espessura do dieléctrico (mm)	Espaçamento entre Eléctrodos (mm)	Largura dos eléctrodos (mm)	Distância ao anemómetro (mm)
1	0,8	1	8	80
2	0,8	1	10	40
3	0,8	2	8	80
4	0,8	2	10	40
5	1,6	1	1	35
6	1,6	1	4	85
7	1,6	1	8	80
8	1,6	1	10	40
9	1,6	2	1	35
10	1,6	2	4	85
11	1,6	2	8	80
12	1,6	2	10	40

Tabela 3.2 - Características geométricas dos actuadores de plasma

A velocidade do vento foi medida com um anemómetro de fio quente (COMPACT THERMAL ANEMOMETER TESTO 425), mais á frente neste texto será apresentada a descrição deste aparelho e as suas gamas de medida.

Os critérios de escolha da melhor configuração foram, obviamente os eléctrodos que permitem obter uma maior velocidade iónica, mas também aqueles que requerem uma menor potência eléctrica para produzir o vento iónico. Os diferentes actuadores de plasma Figura 3.11, não puderam ser comparados directamente, pois a distância a que estavam do anemómetro variava. O que se fez foi comparar os actuadores que estavam à mesma distância (ou parecida) do bordo, ou seja, os actuadores de 1 mm (3,5 cm do bordo) e 10 mm (4 cm do bordo) e os actuadores de 4 mm (8,5 cm do bordo) e 8 mm (8 cm do bordo), Figura 3.11. No Anexo I estão todos os resultados obtidos para os 12 actuadores de plasma DBD.

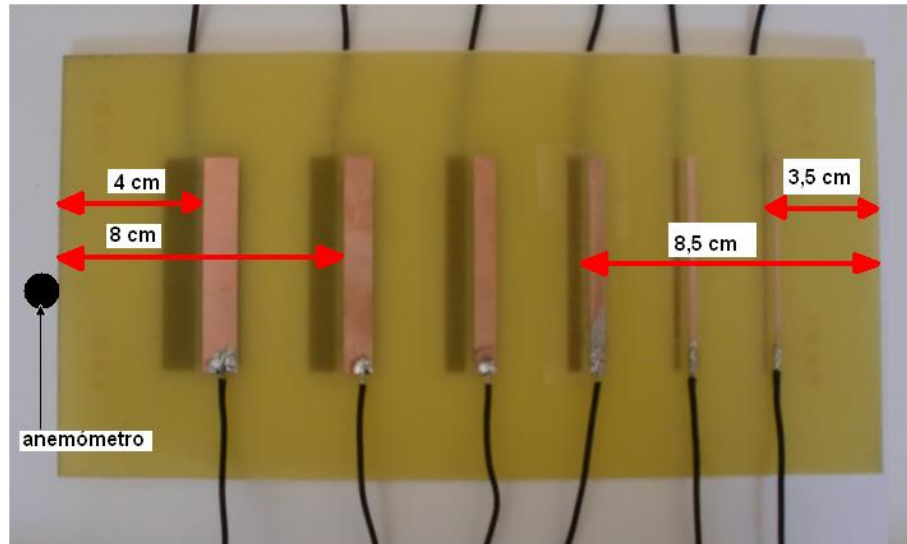


Figura 3.11 - Distância dos actuadores ao anemómetro

Na Figura 3.12 tira-se a primeira conclusão. A velocidade induzida aumenta com a tensão aplicada aos terminais dos eléctrodos, [25]. Este resultado já era esperado pois quanto maior a diferença de potencial entre os eléctrodos, maior será o campo eléctrico (uma vez que é proporcional à tensão), e conseqüentemente maior será a força paraeléctrica que vai acelerar os iões e os electrões. Outro resultado interessante é o facto de existir uma “frequência óptima” para cada actuador, ou seja, a uma determinada frequência a velocidade obtida é máxima, este resultado pode verificar-se na Figura 3.13.

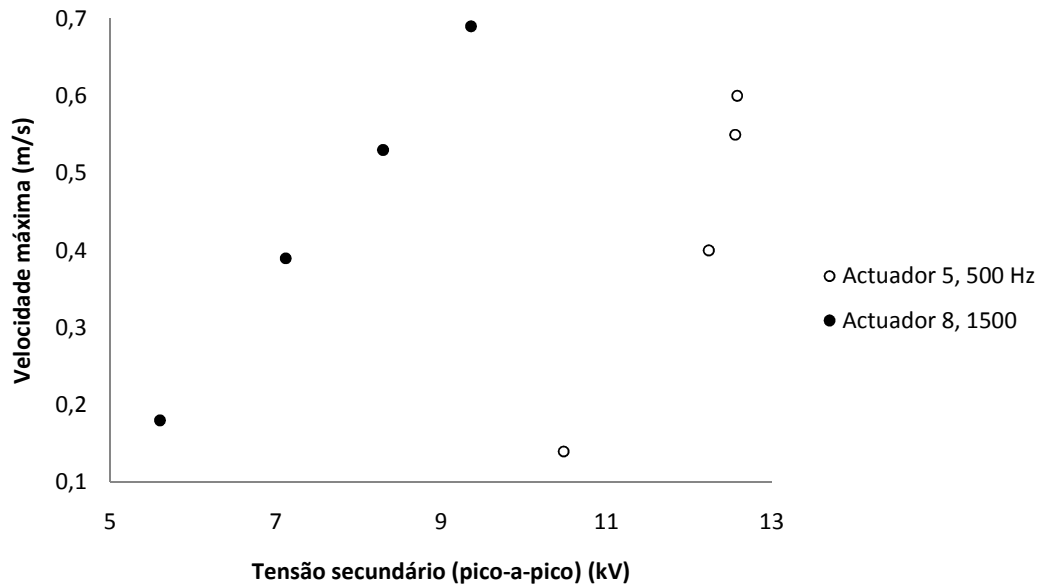


Figura 3.12 - Aumento da velocidade induzida com a tensão

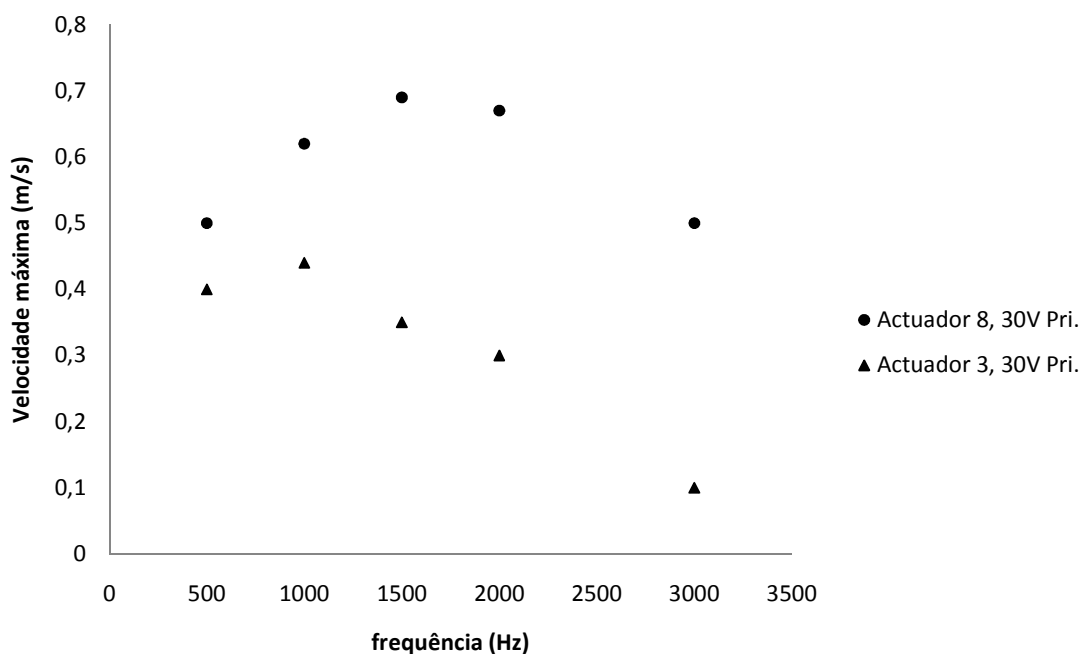


Figura 3.13 - Frequência óptima para cada actuador

Pode-se observar no actuador 8, que a “frequência óptima” é perto dos 1500Hz enquanto que no actuador 3, é perto dos 1000Hz.

A potência gasta facilmente é calculada multiplicando a tensão do primário pela corrente do primário. A potência gasta é um parâmetro a ter em conta. Por exemplo na Figura 3.14 pode-se observar que existem actuadores que permitem obter velocidades diferentes para a mesma potência gasta. Obviamente o que interessa é produzir o máximo de velocidade e gastar o menos possível de energia, para assim aumentar o rendimento do actuador de plasma.

Após analisar os resultados de todos os actuadores, conclui-se que a configuração que produziu melhores resultados foi a do actuador 8, ou seja, foi aquele que induziu uma maior velocidade no ar e que comparativamente com outros precisou de uma menor potência.

È preciso notar que nestes ensaios, os actuadores eram todos constituídos por um par de eléctrodos, Figura 3.11. No entanto na experiência aerodinâmica do túnel, o actuador de plasma é constituídos por vários pares de eléctrodos, para assim tentar-se obter uma maior área de acção do actuador e uma maior velocidade do ar.

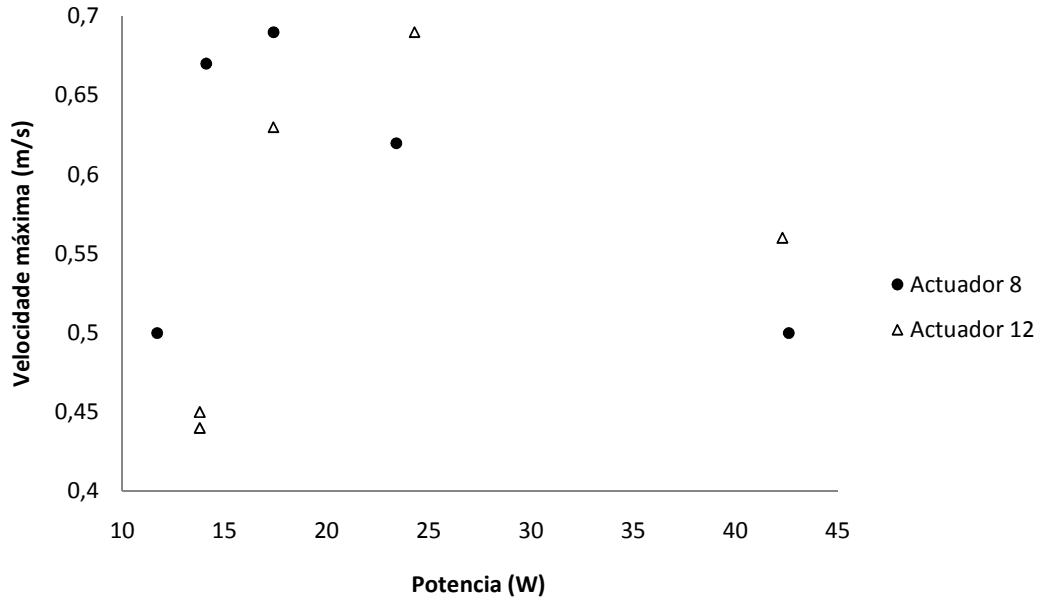


Figura 3.14 - Comparação de actuadores que originam velocidades iguais para diferentes potências

Encontrada a melhor configuração dos eléctrodos (actuador 8), foi feita uma análise onde se aumentou o número de par de eléctrodos. Nesta análise a tensão do primário foi mantida a 30V (máxima fornecida pelo circuito) e variou-se a frequência do sinal. Foram ensaiados actuadores com 2, 3, 4, 5 e 6 pares de eléctrodos.

Numa primeira análise, esperava-se que a velocidade do ar aumenta-se com o aumento do número de pares de eléctrodos, pois a área de geração de iões iria ser maior e assim a quantidade de movimento transmitida ao ar iria ser maior. Verificou-se que os actuadores com 5 e 6 pares de eléctrodos produziam velocidades menores que os restantes actuadores, este facto pode ser explicado, pela insuficiência de tensão nos terminais dos eléctrodos devido à alteração da impedância do circuito, ou por outras palavras, ultrapassávamos a capacidade do circuito fornecer a tensão necessária. Os resultados que foram obtidos encontram-se na Figura 3.15 e Figura 3.16.

Observando os resultados obtidos, valida-se assim a primeira análise, ou seja quanto mais pares de eléctrodos, maior a velocidade que se consegue atingir.

De notar que as medições de velocidade foram feitas muito próximo da parede (1 a 3 mm) pois foi ai que se notou uma maior velocidade.

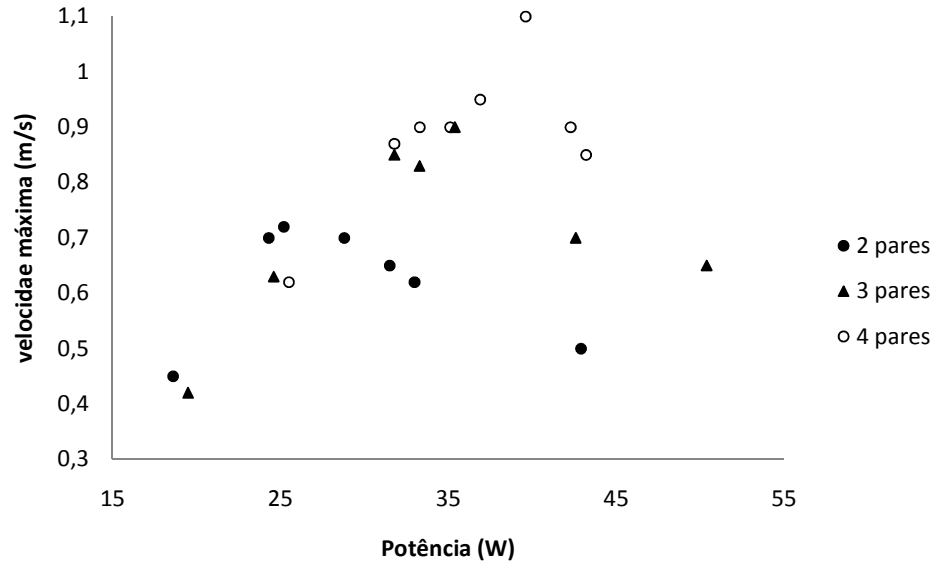


Figura 3.15 - Potência requerida para os diferentes pares de eléctrodos

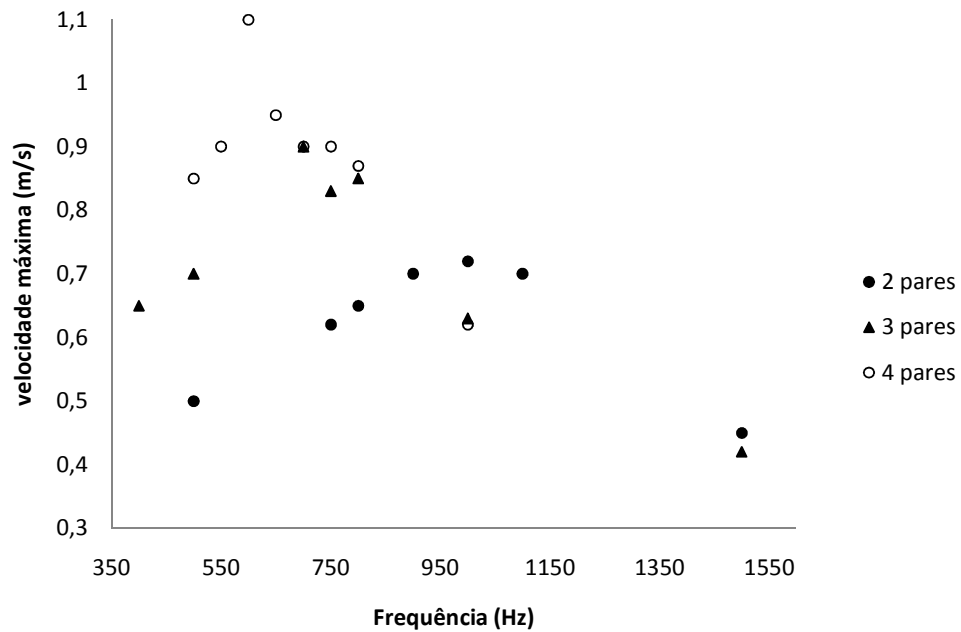


Figura 3.16 - Optimização da frequência para os diferentes pares de eléctrodos

Após a análise de optimização, do universo de estudo, chegou-se a uma configuração dos eléctrodos, que permite obter 1,1 m/s, quando a frequência do sinal ronda os 600 Hz e a tensão 30 V no primário. São gastos cerca de 40 W nestas condições. Este actuador é constituído por 4 pares de eléctrodos, espaçados de 10mm entre si e com 1mm de espaçamento entre cada eléctrodo consecutivo. Os eléctrodos possuem ainda 10mm de largura, 90mm de comprimento e 0,1mm de espessura.

É preciso notar ainda dois factos interessantes que foram observados nesta análise de optimização. Primeiro o facto de existirem frequências do sinal na ordem dos 3kHz onde foi possível atingir velocidades de 2,5 m/s na velocidade do ar. No entanto, quando o actuador trabalhava a estas frequências aquecia demasiado chegando mesmo a romper o dieléctrico e desta forma deixando-o inactivo, este facto foi mais notório nos eléctrodos de 0,8 mm de espessura. O segundo facto foi a produção de ozono. Quando o actuador se encontrava ligado durante algum tempo, era possível sentir o cheiro típico a ozono. Este ozono é proveniente das reacções de ionização que ocorriam no ar junto do eléctrodo.

3.3 Precisão dos aparelhos de medição

Anemómetro de fio quente

Este anemómetro baseia-se em um filamento aquecido que fica exposto ao escoamento de um fluido. Este filamento aquecido fica conectado a um circuito electrónico que é capaz de monitorizar a sua variação de resistência eléctrica pela acção de um escoamento. Pode-se então, estabelecer uma relação entre a velocidade do escoamento e a resistência eléctrica do filamento aquecido, [26]. Este aparelho permite ainda medir a temperatura.

O anemómetro de fio quente utilizado neste trabalho está representado na Figura 3.17, com o braço telescópico recolhido. O sensor localiza-se na abertura da secção quadrada junto da extremidade da haste.



Figura 3.17 - Anemómetro de fio quente

Este aparelho permite medir a velocidade, e armazenar diversos valores, apresentando a média ao longo de um intervalo de tempo. No entanto, a sua taxa de amostragem (ou pelo menos, de visualização no ecrã) é de cerca de 1 segundo, o que já reflecte, por si só, que a velocidade apresentada no ecrã é a média desse segundo, [27].

Na Tabela 3.3 e Tabela 3.4 são apresentadas as escalas de temperatura e de velocidades e as respectivas margens de erro a que o anemómetro opera.

Escala de Temperaturas (°C)	Margem de erro (°C)
[-20 ; 0]	± 0.7
[0 ; 50]	± 0.5
[50 ; 70]	± 0.7

Tabela 3.3 - Especificações do anemómetro (1)

Escala de Velocidades (m/s)	Margem de erro (m/s)	Escala de Temperaturas (°C)
[0 ; 5]	± 0.01	[-20 ; 0]
[0 ; 10]	± 0.01	[0 ; 20]
[0 ; 20]	±0.1	[20 ; 70]

Tabela 3.4 - Especificações do anemómetro (2)

Osciloscópio

O osciloscópio é um instrumento de medida electrónico que cria um gráfico bidimensional visível de uma ou mais diferenças de potencial. O eixo horizontal do ecrã normalmente representa o tempo, tornando o instrumento útil para mostrar sinais periódicos e o eixo vertical normalmente mostra a tensão. Na Figura 3.18 é apresentada uma imagem do osciloscópio utilizado. Este osciloscópio tem ainda umas funcionalidades muito úteis, como por exemplo, mostra directamente a frequência do sinal e a tensão pica-a-pico. Na Tabela 3.5 é apresentada a resolução do osciloscópio.



Figura 3.18 - Osciloscópio

Parâmetros	Erros
Tensão alterna (ondas sinodais)	$\pm 2\%$ da leitura
Tensão alterna (ondas não sinodais)	$\pm 4\%$ da leitura
Precisão do tempo de retardamento	200ppm para tempos > 1ms

Tabela 3.5 - Especificações do osciloscópio

Capítulo 4 – Aerodinâmica de comboios

Este capítulo trata da resistência aerodinâmica dos comboios e de alguns outros fenómenos aerodinâmicos.

4.1 Resistência dos comboios

A força motriz do comboio é designada, força de tracção. Esta força de tracção tem de vencer a resistência aerodinâmica, a resistência de rolamento, a força de inércia correspondente à aceleração pretendida e se houver uma elevação, terá ainda que vencer a componente do peso oposto ao movimento. Em alguns casos existe ainda a resistência em curva, devido ao atrito de verdugo das rodas contra o carril. Na página 254, quadro 12.1 da referência [1], são apresentadas algumas expressões empíricas, para a resistência de veículos de caminho de ferro, em função da velocidade.

A resistência de rolamento é muito baixa quando comparada com as outras forças, por isso têm pouco interesse, para o cálculo da resistência total. Esta força aparece quando há uma distribuição assimétrica nas rodas, devido à deformação plástica das superfícies em contacto (roda e carril).

A resistência aerodinâmica é de longe a maior parcela da resistência total, no caso típico é praticamente proporcional ao quadrado da velocidade. A velocidade constante, a resistência aerodinâmica é claramente dominante nos transportes que se deslocam a velocidade elevada, ainda mais nos comboios, devida á baixa resistência de rolamento.

É importante realçar dois pontos. O primeiro é o facto da potência necessária durante o período de aceleração poder ultrapassar largamente a potência exigida para manter a velocidade constante, em linha horizontal e sem vento. O segundo ponto é, o facto da resistência aerodinâmica ser proporcional ao quadrado da velocidade e desta forma ser bastante afectada pelas condições atmosféricas.

Peguemos agora num exemplo concreto para termos uma ordem de grandeza das forças em jogo. Considere-se um comboio com uma secção frontal (A) de 10 m², uma massa (m) de 40 toneladas, um coeficiente de rolamento (r), de 10^{-4} e um coeficiente de resistência (C_D) igual a 1. Admita-se ainda que o comboio terá de ter uma aceleração de 0,2 m/s² para manter a sua velocidade constante, numa rampa.

$$F_{tracção} = R_{Aerodinâmica} + R_{Rolamento} + F_{aceleração} \quad (4.1)$$

Considera-se inicialmente que não há vento e que o comboio se desloca a uma velocidade (V) de 150 km/h (41,6 m/s). Calculemos as diferentes componentes da força de tracção necessária:

$$R_{Aerodinâmica} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_D \cdot V^2 = 10383,4N \quad (4.2)$$

$$R_{Rolamento} = m \cdot g \cdot r = 39,2N \quad (4.3)$$

$$F_{Aceleração} = m \cdot a = 8000N \quad (4.4)$$

$$F_{tracção} = 18422,6N \quad (4.5)$$

$$P_{tracção} = F_{tracção} \cdot V = 766,4kW \quad (4.6)$$

Considerando um vento de 100 km/h no sentido oposto ao movimento do comboio, a resistência aerodinâmica passaria para 28935,2 N e potência de tracção passaria para 2567,7 kW. Pode-se observar que as potências não são muito elevadas para o tipo de transporte em questão, mas não nos podemos esquecer que o esforço de tracção está limitado pela aderência das rodas ao carril e esta depende do peso do veículo, [1].

Pretende-se com este texto mostrar que a resistência aerodinâmica é o principal termo da resistência total, e por este facto é aquela que merece maior atenção neste trabalho.

4.2 Resistência aerodinâmica

Normalmente em aerodinâmica a força de resistência aerodinâmica é representada pela letra D (*drag*). Utilizando a análise dimensional é possível formar apenas dois números adimensionais independentes, que se relacionam entre si pelo meio de uma única função $f1$. Normalmente utilizam-se os seguintes números adimensionais: coeficiente de resistência aerodinâmica (C_D) e o número de Reynolds (Re).

$$C_D = f1(Re) \quad (4.7)$$

$$C_D = \frac{D}{A \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^2} \quad (4.8)$$

$$Re = \frac{l \cdot V_\infty}{\nu} \quad (4.9)$$

Na expressão do coeficiente de resistência aerodinâmica, a letra (A) representa a área de referência, normalmente a área da secção transversal do comboio. Como $A \propto l^2$, o número de variáveis independentes mantêm-se o mesmo.

Os números de Reynolds representativos dos escoamentos em torno de comboios são tão elevados (acima de 10^7) que as funções $f(Re)$ são praticamente constantes, para uma dada

geometria do comboio e determinada direcção do vento relativo. Isto permite calcular forças e tensões a partir de modelos sem a necessidade de igualar exactamente o número de Reynolds. Desde que o número de Reynolds seja suficientemente elevado, o C_D obtido para o modelo é igual ao do comboio em verdadeira grandeza, portanto a resistência D calcula-se pela expressão 4.8.

A relação que há entre a velocidade e o coeficiente de resistência aerodinâmica C_D é muito importante, vejamos. O C_D é praticamente constante nesta gama de Reynolds, assim olhando para a expressão 4.8, concluímos que a resistência varia com o quadrado da velocidade, aliás como já foi dito atrás. Uma primeira conclusão que se tira da expressão 4.8 é, para C_D iguais convém diminuir a área transversal (A), para assim diminuir a resistência aerodinâmica. Olhando novamente para a expressão 4.8, verifica-se que a resistência também é proporcional á densidade do ar (ρ), assim se o ar for mais rarefeito a resistência aerodinâmica é menor, (caso dos aviões). Já existem casos onde se estuda a circulação de comboios em túneis herméticos a pressões cerca de 10 vezes inferior à pressão atmosférica.

Outra questão interessante é saber as proporções dos vários contributos da resistência aerodinâmica. Vários autores fizeram várias estimativas das proporções e revelaram-se algo diferentes, o que é normal, pois há inúmeros tipos de comboios e além do mais é difícil separar o contributo de cada parte. Contudo os contributos de maior relevo são a resistência de pressão dos *bogies* e a fricção superficial. Os outros contributos da resistência aerodinâmica resultam da diferença de pressão nas extremidades anterior e posterior do comboio e também do pantógrafo. [1]

4.3 O nariz do comboio

A parte dianteira do comboio não é o elemento mais importante do ponto de vista aerodinâmica, contudo, é determinante nos fenómenos aerodinâmicos não estacionários e também influencia a resistência.

Os comboios não devem ter o nariz com arestas quinadas. Os efeitos transientes como o cruzamentos de comboios entre si e a passagem em estações, dependem da forma do nariz do comboio. Convém que o nariz seja especialmente comprido e além disso, as arestas devem ter um raio de curvatura suficiente, [1].

Os comboios Shinkansen da série 500, são um exemplo disso mesmo. O nariz longo e pontiagudo faz lembrar mais um avião supersónico do que um convencional comboio de alta velocidade Figura 4.1. Estes comboios foram desenhados para poderem atingir velocidades de 320 km/h, apesar de actualmente circularem a 300 km/h em serviço regular [28].



Figura 4.1 - Shinkansen Séries 500 [28]

O nariz do comboio também influencia as forças e momentos a que o comboio está sujeito. Se o nariz do comboio for mais curto, a camada limite é tridimensional (com variação de velocidade em módulo e direcção ao longo da espessura) e produz vorticidade longitudinal por efeitos de gradiente de pressão transversais. A própria curvatura da secção transversal da carenagem faz variar a distribuição superficial de vorticidade dando também origem, por conservação, a vórtices longitudinais. Na Figura 4.2 é possível observar um desenho de algumas linhas de corrente do escoamento relativo em torno de uma “cabeça” de um comboio, representado sinteticamente á esquerda. Quando o escoamento de aproximação está alinhado com o comboio este fenómeno já se observa, mas se houver vento lateral o fenómeno é mais intenso. Se houver um pequeno desvio que seja no escoamento incidente, podem ocorrer aumentos significativos na resistência aerodinâmica, na força lateral e também no momento de derrube no comboio. É feita uma análise da variação da resistência de várias geometrias com o ângulo de guinada em [1], página 302, quadro 13.7.

Os vórtices longitudinais depois de estirados pelo escoamento principal, fragmentam-se em múltiplos filamentos turbulentos que fazem variar o campo de pressão com frequência elevada, produzindo ruído intenso.

Só uma geometria bastante alongada é que permite a não formação deste tipo de vórtices, pois esta geometria proporcionaria transições suaves. Vários estudos concluíram que o afilamento do nariz é o que produz variações significativas na resistência, ou seja, o comprimento do nariz é mais importante que a forma, [1].

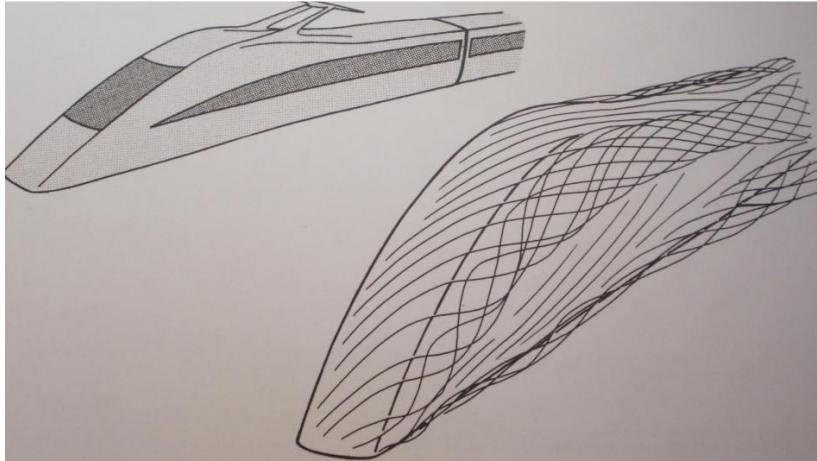


Figura 4.2 - Algumas linhas de corrente junto da “cabeça” do comboio obtidas numericamente [1]

4.4 Estabilidade lateral

O derrube lateral é um problema bastante sério, pois pode colocar em risco vidas humanas. Há vários registos de acidentes que ocorreram devido ao derrube lateral de comboios. As forças aerodinâmicas laterais são um grande problema nos comboios, principalmente nos comboios de alta velocidade. Devido ao vento lateral e ao cruzamento de comboios, estes ficam sujeitos a fortes impulsos que podem por em risco o seu equilíbrio. Note que na maioria dos casos a base de sustentação de um comboio (bitola) é menos de metade da altura do comboio. O derrube lateral limita ainda a velocidade máxima dos comboios. Este problema é mais notório nos comboios de alta velocidade, pois como já foi visto as forças aerodinâmicas crescem com o quadrado de velocidade.

Quando existe vento lateral o fenómeno é mais intenso, mas mesmo sem vento lateral, o efeito do gradiente de pressão transversal na camada limite e a não uniformidade da distribuição de vorticidade dão origem a vórtices longitudinais. São estes vórtices que impedem que a pressão seja a mesma nas duas faces laterais do comboio, Figura 4.2.

Os túneis por originarem campos de pressão assimétricos que desenvolvem forças laterais e as pontes por serem normalmente zonas de vento forte, são locais onde este problema poderá ser mais grave.

O levantamento de barreiras aerodinâmicas é uma das técnicas que está a ser estudada, estas barreiras podem chegar a ter 3,2 metros de altura. Esta técnica além de fazer com que o derrube lateral diminua, funciona também como barreira acústica.

Outra forma de diminuir a formação destes vórtices é a que é usada no modelo do comboio testado no IST. Este estudo optimiza a geometria transversal do comboio de forma a tentar igualar o mais possível a pressão, na presença de vento lateral. O estudo conseguiu resultados interessantes, conseguindo eliminar os vórtices para ângulos de guinada até 15°, a não ser a cerca de meia altura do chão, Figura 4.3, [1].

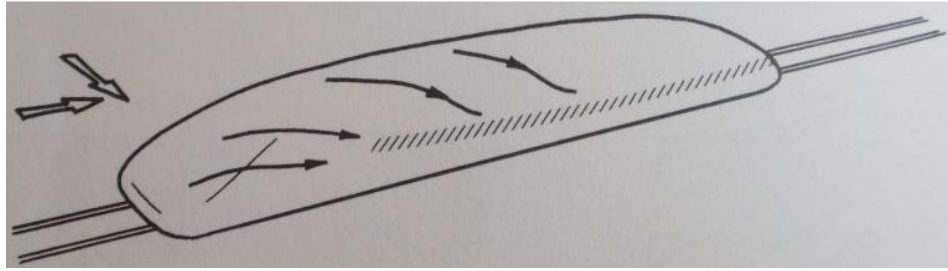


Figura 4.3 - Formação de vórtices a meia altura do chão [1]

Capítulo 5 – Análise analítica e experimental de um escoamento de teste

Pretende-se descrever o escoamento que ocorre sobre uma rampa inclinada, Figura 5.11. Esta rampa têm como objectivo criar um gradiente de pressão transversal e assim simular um fenómeno um ocorre no “nariz de um comboio”.

5.1 Descrição do escoamento

Escoamento exterior

Tirando partido do escoamento potencial (campo de velocidades facilmente definido), aproxima-se o escoamento que ocorre em cada secção de uma rampa inclinada, ao escoamento que se desenvolve ao longo de um semi-corpo de Rankine.

Considerando uma linha de fontes infinita ao longo da direcção z e sobrepondo uma corrente uniforme na direcção x, com um certo ângulo θ em relação à perpendicular da linha fontes, facilmente obtemos o campo de velocidades em qualquer parte do espaço, Figura 5.1.

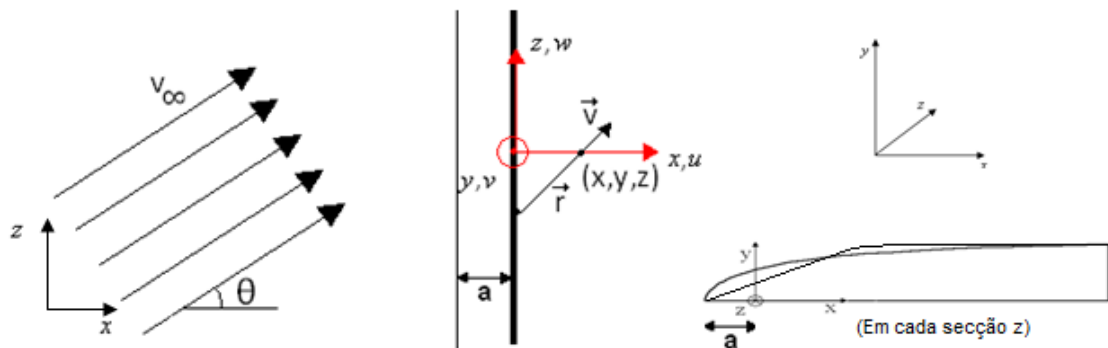


Figura 5.1 - Esquematisações do escoamento potencial

Começando pela linhas infinita de fontes, sendo q (m^2/s) a intensidade das fontes e r o vector posição, pode-se obter a seguinte expressão através da condição de continuidade.

$$\vec{V}_{dz} = \frac{(qdz)}{4\pi r^2} \frac{\vec{r}}{|r|} = \frac{qdz}{4\pi|r|^3} \vec{r} \quad (5.1)$$

$$\vec{r} = (x, y, z) \quad |r|^3 = (x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}$$

O caudal de fluido através de uma superfície para qualquer valor de r é constante igual a q . Se for integrada a expressão 5.1, nas três direcções do espaço, fica-se a saber o campo de velocidades em qualquer ponto do espaço dado por uma linha infinita de fontes.

$$\vec{V}_{fonte} = \begin{cases} \frac{q}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{-x}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} dz = \frac{q}{4\pi} \cdot \frac{2x}{(x^2 + y^2)} = \frac{q}{2\pi} \cdot \frac{x}{(x^2 + y^2)} & (5.2) \\ \frac{q}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{-y}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} dz = \frac{q}{4\pi} \cdot \frac{2y}{(x^2 + y^2)} = \frac{q}{2\pi} \cdot \frac{y}{(x^2 + y^2)} & (5.3) \\ \frac{q}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{-z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} dz = 0 & (5.4) \end{cases}$$

O campo de velocidades obtido por uma corrente uniforme é dado pela seguinte expressão.

$$\vec{V}_{uniforme} = \begin{cases} V_{\infty} \cdot \cos(\theta) & (5.5) \\ V_{\infty} \cdot \sin(\theta) & (5.6) \end{cases}$$

Por fim aplicando o princípio da superposição, pode-se somar os dois campos de velocidades obtidos atrás e obter o campo de velocidades final.

$$\vec{V}(u, v, w) = \vec{V}_{fonte} + \vec{V}_{uniforme} = \begin{cases} u = \frac{q}{2\pi} \cdot \frac{x}{(x^2 + y^2)} + V_{\infty} \cdot \cos(\theta) & (5.7) \\ v = \frac{q}{2\pi} \cdot \frac{y}{(x^2 + y^2)} & (5.8) \\ w = V_{\infty} \cdot \sin(\theta) & (5.9) \end{cases}$$

Obtido o campo de velocidades, podemos obter o campo de pressões, bastando para isso aplicar a equação de *Bernoulli*. Considerando a pressão no infinito nula, a pressão relativa à hidrostática local em cada ponto fica igual à diferença das pressões dinâmicas.

$$\begin{aligned}
p_{rel}(x, y, z) &= \left(p_{\infty} + \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 \right) - \frac{1}{2} \rho V^2 = \frac{1}{2} \rho (V_{\infty}^2 - V^2) = \frac{1}{2} \rho (V_{\infty}^2 - (u^2 + v^2 + w^2)) \\
&= \frac{1}{2} \rho \left(V_{\infty}^2 - \left(\left(\frac{q}{2\pi} \cdot \frac{x}{(x^2 + y^2)} + V_{\infty} \cdot \cos(\theta) \right)^2 + \left(\frac{q}{2\pi} \cdot \frac{y}{(x^2 + y^2)} \right)^2 + (V_{\infty} \cdot \sin(\theta))^2 \right) \right) \quad (5.10)
\end{aligned}$$

Pode ser mais vantajoso arranjar-se um referencial que “siga o fluido”, ou seja, um referencial que em cada posição do espaço esteja alinhado com o vector velocidade, (referencial móvel) Figura 5.2. Utilizando este referencial em cada ponto do espaço o campo de velocidades é definido pelas expressões 5.11, 5.12, 5.13.

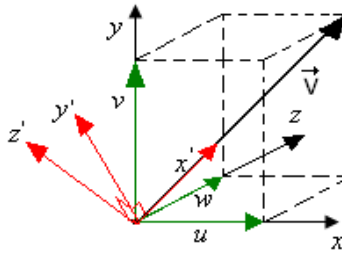


Figura 5.2 - Mudança de referencial

$$u' = \sqrt{\left(\left(\frac{q}{2\pi} \cdot \frac{x}{(x^2 + y^2)} + V_{\infty} \cdot \cos(\theta) \right)^2 + \left(\frac{q}{2\pi} \cdot \frac{y}{(x^2 + y^2)} \right)^2 + (V_{\infty} \cdot \sin(\theta))^2 \right)} \quad (5.11)$$

$$v' = 0 \quad (5.12)$$

$$w' = 0 \quad (5.13)$$

Na figura 5.3 estão representadas (de forma esquemática), uma vista em planta e uma vista lateral, de duas linhas de corrente que se desenvolvem no escoamento exterior. A linha mais afastada da parede representa uma linha de corrente que não é deflectida por estar longe da parede.

Junto à parede, um volume de fluido infinitesimal que se encontra mais à direita, encontra primeiro a parede do que aquele que está à sua esquerda, pela simples razão de a rampa ter uma certa inclinação, Figura 5.3. A consequência é o aparecimento de um gradiente de pressão transversal que faz deflectir as linhas de corrente. Este gradiente facilmente é calculado fazendo um balanço de forças na direcção radial de uma partícula que descreve uma curva, Figura 5.4. A força centrífuga terá de ser equilibrada por uma força exterior resultante da aplicação de esforços normais de pressão, [29].

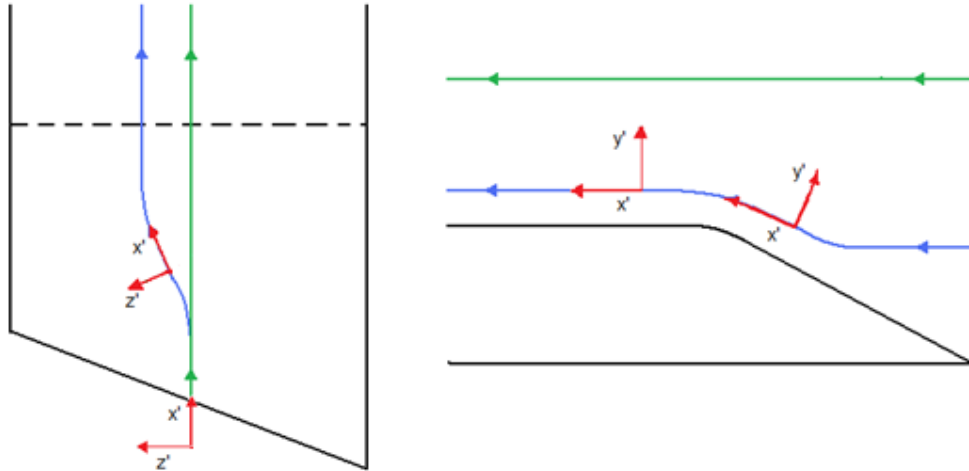


Figura 5.3 - Esquematização de duas linhas de corrente sobre uma rampa inclinada

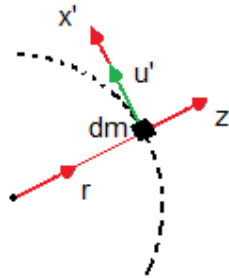


Figura 5.4 - Partícula de fluido descrevendo uma curva

$$\rho \frac{u'^2}{r} = \frac{\partial p_{rel}}{\partial r} \quad (5.14)$$

Camada limite

Num referencial alinhado com o escoamento exterior (Figura 5.3), aplique-se a equação de transporte de quantidade de movimento na direcção transversal z' , dentro da camada limite, expressão 5.15. Admitiu-se que o escoamento é estacionário e incompressível (modelos claramente adequados ao escoamento em questão). O terceiro termo da expressão 5.15 é nulo pois não há componente v' neste referencial. Tendo em conta que este tipo de escoamentos ocorre a números de Reynolds elevados, numa primeira aproximação podem desprezar-se os termos difusivos face aos restantes, a não ser sobre a própria parede. Recorde-se que estamos a considerar a equação de transporte na direcção z' e verifica-se que os efeitos difusivos nesta direcção são efectivamente muito pequenos face ao transporte convectivo, a não ser na imediata vizinhança da parede. Uma avaliação de ordens de grandeza relativa permite eliminar o quarto termo do lado esquerdo, face às

restantes. Com efeito, $\partial p_{rel} / \partial z'$ é muito pequeno e praticamente uniforme em z' , de modo que $\partial^2 p_{rel} / \partial z'^2 \sim 0$. Sendo o transporte de quantidade de movimento praticamente dominado por gradientes de pressão (efeitos viscosos desprezáveis), o facto de $\partial^2 p_{rel} / \partial z'^2 \sim 0$ indica que w' não varia significativamente em z' , daí $\partial w' / \partial z' \sim 0$. Além disso $w' \ll u'$ o que reforça mais esta ideia.

$$\rho \left(\frac{\partial w'}{\partial t} + u' \frac{\partial w'}{\partial x'} + v' \frac{\partial w'}{\partial y} + w' \frac{\partial w'}{\partial z'} \right) = \mu \left(\frac{\partial^2 w'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 w'}{\partial y'^2} + \frac{\partial^2 w'}{\partial z'^2} \right) - \frac{\partial p_{rel}}{\partial z'} \quad (5.15)$$

$$\rho \left(u' \frac{\partial w'}{\partial x'} \right) = - \frac{\partial p_{rel}}{\partial z'} \Rightarrow \frac{\partial w'}{\partial x'} = - \frac{1}{\rho u'} \frac{\partial p_{rel}}{\partial z'} \quad (5.16)$$

Vórtices longitudinais

Olhando para a expressão 5.16 e tendo em conta que o gradiente de pressão não varia ao longo da espessura da camada limite, esta expressão demonstra que a variação espacial da componente transversal da velocidade é inversamente proporcional à velocidade do escoamento longitudinal e explica porque as variações de w' são maiores junto da parede. Na Figura 5.5 os dois perfis esquemáticos da camada limite (na direcção longitudinal x' e na direcção transversal z').

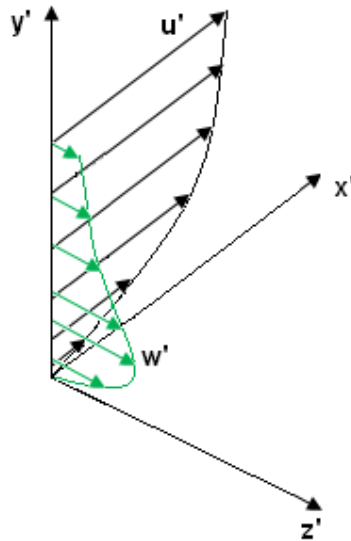


Figura 5.5 - Perfis de camada limite tridimensional

Como as componentes u' e w' não variam proporcionalmente em y' , as várias linhas de corrente são deflectidas de maneira diferente (junto da parede, o escoamento desvia-se mais da

direcção longitudinal). Assim, a camada limite fica torcida segundo um eixo longitudinal e dá origem a vórtices longitudinais no nariz dos comboios, Figura 4.2.

Nos ensaios de optimização do actuador de plasma, a velocidade máxima ocorria junto da parede (1 a 3 mm) e diminuía quando se afastava desta. Várias medições foram realizadas por Roth [30], estas vieram mostrar que o perfil de velocidades criado pelo actuador de plasma, também apresentou uma velocidade máxima muito próxima da parede, Figura 5.6.

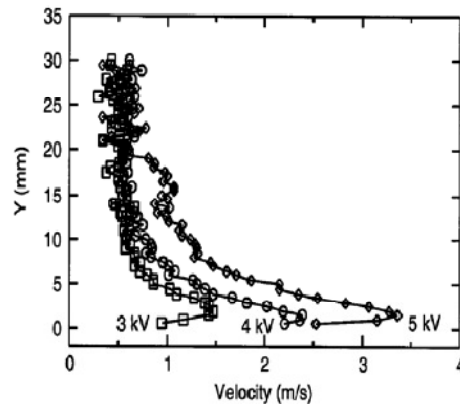


Figura 5.6 - Perfil de velocidade obtido por um actuador DBD [30]

No caso teórico, se fosse possível criar um perfil de velocidades simétrico em cada secção ao que é produzido pelo gradiente de pressão transversal, eliminava-se a componente transversal de velocidade, Figura 5.7, e assim a torção da camada limite, e os problemas que dela surgem.

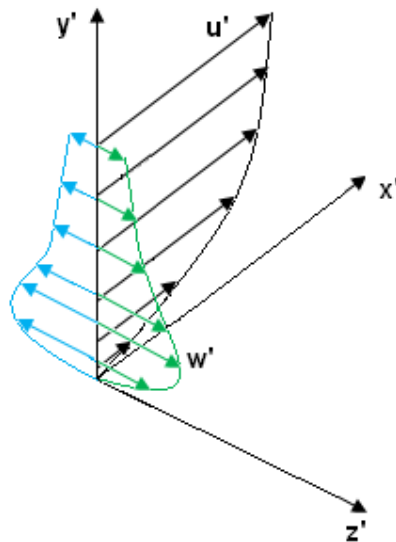


Figura 5.7 - Perfis de camada limite e perfil de velocidade criado pelo plasma

Por outro lado há também a formação de um vórtice junto da carenagem superior do comboio. Como existe uma componente transversal de velocidade esta vai contornar a curvatura

lateral superior, se esta curvatura for muito pequena o fluido acelera e depois desacelera devido a gradientes de pressão radiais, acabando por ocorrer uma separação da camada limite tridimensional, formando-se um vórtice. Actuando na direcção transversal de forma a diminuir a velocidade, usando o actuador de plasma, “consegue-se aumentar o raio de curvatura” e assim diminuir a força centrífuga que actua no fluido, atrasando a formação do vórtice ou mesmo eliminá-lo, Figura 5.8.

O vórtice que se forma na carenagem superior do comboio tem uma energia cinética pequena, mas depois alimentado pelos vórtices que se formam no nariz do comboio e pelo escoamento principal aumenta a sua energia cinética, criando uma assimetria de pressão nas faces laterais do comboio, provocando derrube lateral e produzindo ruído.

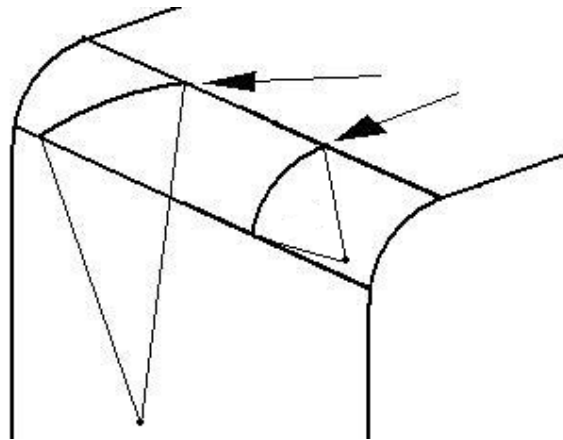


Figura 5.8 - Diferentes raios de curvatura para duas direcções do escoamento

Depois de os vórtices estarem formados é praticamente impossível elimina-los. A solução que resta é evitar ou atrasar a sua formação. Para tal, se o actuador de plasma estiver cirurgicamente bem situado no nariz do comboio poderá ser possível eliminar a formação dos vórtices.

5.2 Montagem experimental

A experiência foi realizada num túnel de vento subsónico no laboratório de turbo máquinas do Instituto Superior Técnico. À saída do difusor foi instalada uma estrutura paralelepípedica que possui uma secção rectangular com 0,24 m por 0,16 m. É nesta conduta que se encontra a zona de teste. As faces desta conduta são feitas de *plexiglass*, na face inferior estão instalados pequenas tomadas de pressão ao longo da estrutura. A face superior da conduta está fixa numa das extremidades e gira em volta dela, o que permite assim variar a secção da conduta e assim variar o gradiente de pressão longitudinal. Na figura 5.9 é apresentado um esquema do túnel de vento e da montagem que é ilustrado na Figura 5.10.

Este túnel de vento como a maioria dos túneis possui uma tomada de pressão total dentro da contracção, que juntamente com as tomadas de pressão ao longo da conduta e com a ajuda de um multi-manómetro permite calcular a velocidade do escoamento em várias zonas.

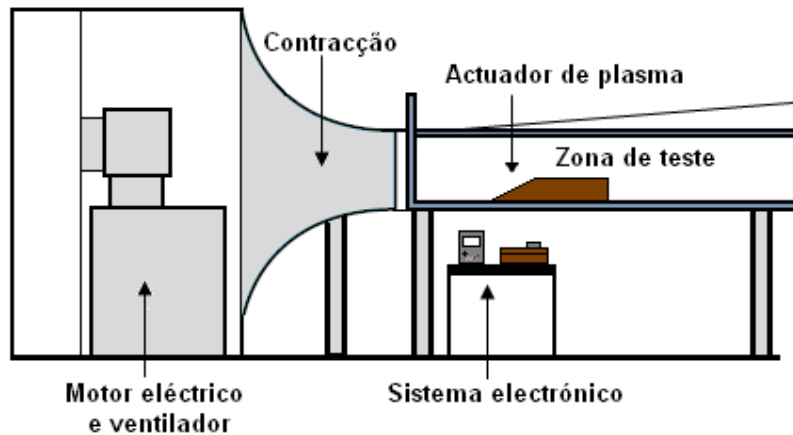


Figura 5.9 - Esquema da montagem experimental no túnel de vento

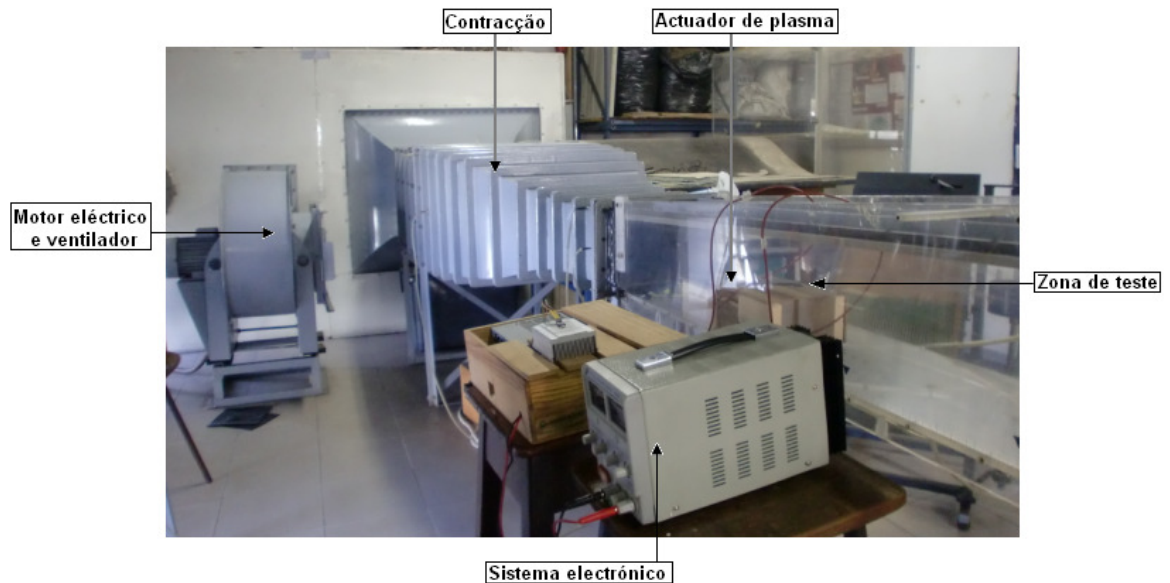


Figura 5.10 - Ilustração da montagem experimental no túnel de vento

Descrição da experiência

O objectivo desta experiência é observar as alterações que se verificam no escoamento, quando se liga o actuador de plasma.

Como já foi referido no capítulo anterior, o que dá origem aos vórtices longitudinais, que por sua vez dão origem a derrube lateral e produzem ruído, é o gradiente de pressão transversal.

Construiu-se uma rampa inclinada em relação ao escoamento de aproximação para assim criar o gradiente de pressão transversal e consequentemente uma componente transversal de velocidade. Na rampa foi instalado o actuador de plasma que aumenta a quantidade de movimento

no sentido do gradiente de pressão, para assim tentar-se eliminar ou diminuir a componente transversal de velocidade do escoamento, Figura 5.11.

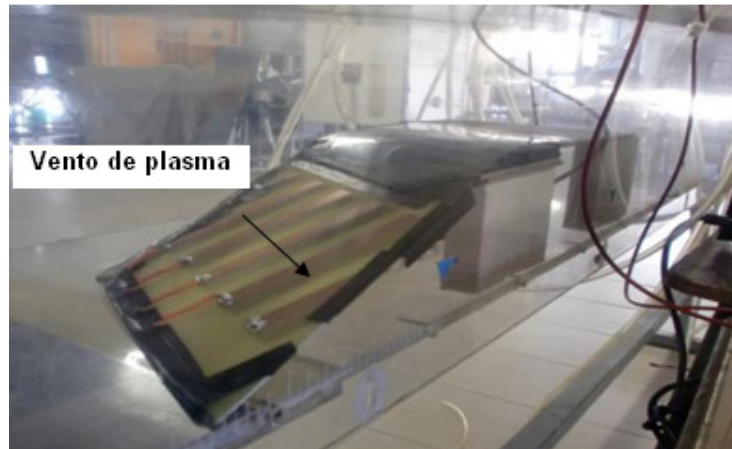


Figura 5.11 - Rampa com actuador de plasma instalado

5.3 Resultados observados

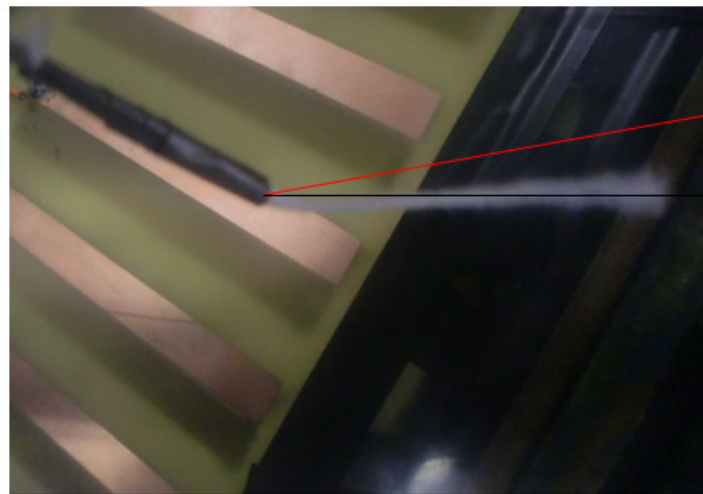
Através da tomada de pressão total (tubo de *pitot*) e das várias tomadas de pressão junto da parede superior da conduta, foi possível medir a velocidade do escoamento principal no início da rampa, a qual foi aproximadamente 11 m/s.

Os resultados que se seguem foram realizados utilizando um fio de lã, um arame fino e uma máquina fotográfica. O objectivo do fio de lã, é orientar-se segundo a direcção do escoamento. As fotografias foram realizadas fixando a máquina fotográfica na superfície superior da conduta, alinhada com o escoamento principal. A máquina tem uma opção que exhibe uma graduação no ecrã, tirando partido desta opção pode-se "fixar" o fio de lã sempre na mesma posição xy (plano horizontal) variando assim a dimensão z (altura).

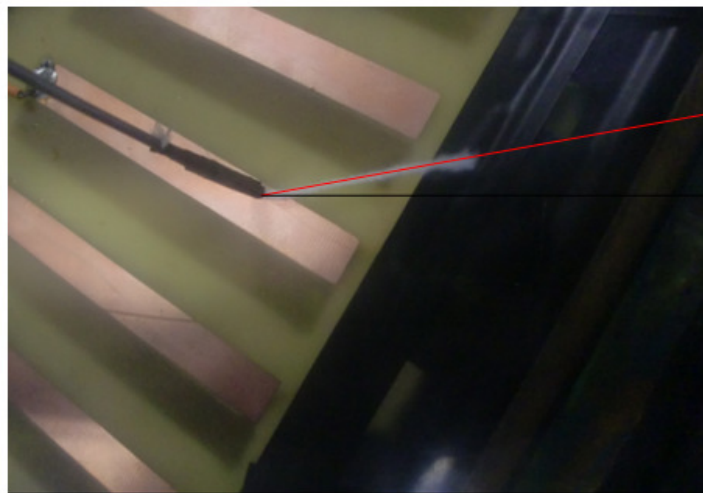
O primeiro resultado observado foi que de facto existe um gradiente de pressão transversal que faz curvar as linhas de corrente junto da parede da rampa. Na Figura 5.12 a), o fio de lã encontra-se sensivelmente a 130mm da face horizontal da conduta (30mm do topo). Verifica-se que o escoamento não é afectado pelo gradiente de pressão, pelo facto das linhas de corrente não serem deflectidas e estarem orientadas segundo o escoamento principal. Na Figura 5.12 b), o fio de lã encontra-se a sensivelmente 5mm da parede da rampa, verifica-se que o escoamento apresenta uma deflexão em relação à direcção do escoamento principal, o que confirma que junto da parede o gradiente de pressão causa a deflexão das linhas de corrente, como já era esperado.

A segunda observação foi observar o efeito actuador de plasma na zona próxima da parede (perto de 5mm). Para tal, fixou-se o fio de lã numa posição e registou-se o que aconteceu com o actuador desligado, Figura 5.13 a) e com o actuador ligado Figura 5.13 b). O resultado é bastante interessante, a quantidade de movimento produzida pelo plasma foi suficiente para voltar a orientar a linha de corrente com a direcção do escoamento principal.

Com a ajuda do fio de lã, foi possível também observar o vórtice que se formava junto da parte lateral da rampa (junto do superfície de curvatura). Variando este raio de curvatura conseguimos notar alterações no vórtice, confirmando que aumentado o raio de curvatura conseguimos atrasar ou eliminar a formação do vórtice.

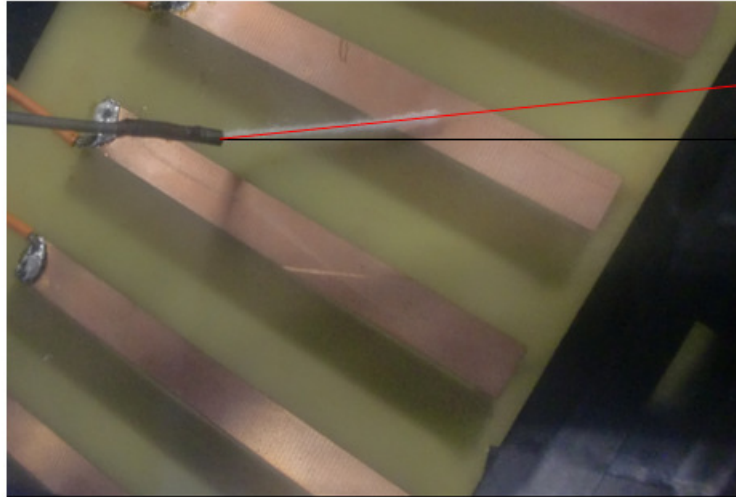


a)

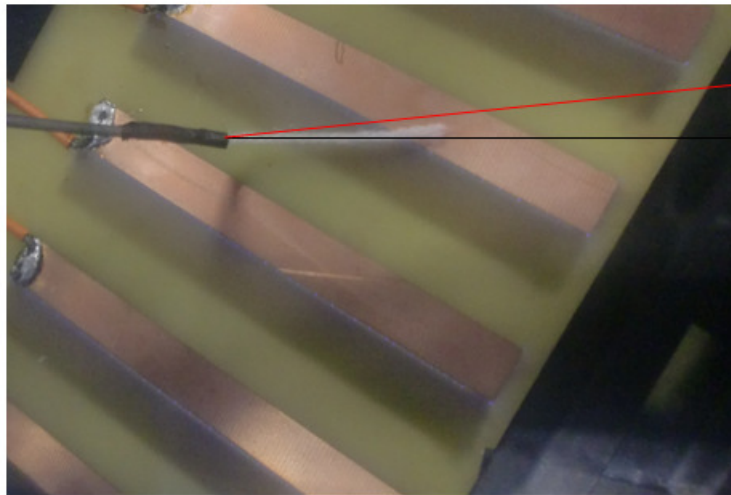


b)

Figura 5.12 - Observação do efeito do gradiente de pressão



a)



b)

Figura 5.13 - Observação do efeito do actuador de plasma DBD

Capitulo 6 – Conclusões

Neste trabalho foi construído e otimizado um actuador de plasma DBD e respectivo sistema electrónico. O actuador foi ainda testado numa aplicação específica num túnel de vento. Para cumprir os objectivos propostos, foi necessário desenvolver algum conhecimento nas áreas da electrónica, física de plasmas e aerodinâmica. De todas as etapas e discussões, as seguintes conclusões foram registadas.

Associado ao actuador de plasma, foi construído um sistema electrónico. Este sistema electrónico é relativamente fácil de construir, pois as suas funções são gerar uma onda, variar o período da onda e criar pulsos da onda gerada. Foi necessário amplificar ainda mais o sinal, para gerar alta tensão nos eléctrodos, para tal foi usada uma bobine de um automóvel (*Fiat Punto*). A grande vantagem desta construção é o facto de o actuador e o sistema electrónico serem portáteis (pequenas dimensões e baixo peso), em contra partida ficámos limitados ao tipo de onda que é produzida, neste caso uma onda quadrada. Em comparação com outros circuitos que são constituídos por geradores de sinais e fontes de alta tensão, no entanto de grandes dimensões e pesados.

A geometria optima do actuador é um assunto que ainda não está totalmente conhecido. Desde o material e dimensões dos eléctrodo (largura, espessura, comprimento), a distâncias entre sucessivos eléctrodos e entre pares de eléctrodos, passando pelo tipo de dieléctrico e a sua espessura. Além de todos estes parâmetros geométricos, cada actuador comporta-se de maneira diferente para diferentes condições electrónicas (tipo de onda, frequências do sinal, etc.). Não era de todo fazer uma análise exaustiva na optimização do actuador. Contudo dos diferentes actuadores testados, o que apresenta melhores resultados é constituído por 4 pares de eléctrodos, cada eléctrodo tem 10mm de largura, 0,1mm de espessura e 90mm de comprimento. Cada eléctrodo está espaçado 1mm e cada par de eléctrodos espaçado de 10mm. O dieléctrico utilizado foi o FR-4 (placas de circuito impresso usuais), com 1,6mm de espessura. A velocidade máxima que foi atingida com o actuador de plasma seleccionado foi de 1,1 m/s, para uma tensão de 30V no primário e uma frequência perto dos 600Hz. A potência necessária para criar estas condições é cerca de 40W. A velocidade é máxima, a uma distância muito próxima da parede (entre 1 a 3 mm). A frequências na ordem dos 3kHz, foram atingidas velocidades perto de 2,5m/s, no entanto o dieléctrico ficava danificado, inviabilizando mais a sua utilização.

Grande parte da força motriz produzida pelo motor dos comboios é destinada a vencer a resistência aerodinâmica. A resistência aerodinâmica e as forças laterais que actuam nos comboios, são influenciadas pelo “nariz dos comboios”. A forma do nariz dos comboios pode conduzir a formação de vórtices longitudinais por efeitos de gradientes de pressão transversais, originando assim uma camada limite tridimensional, este efeito é mais notório quando há vento lateral. O facto do perfil da camada limite na direcção transversal ter uma velocidade máxima junto da parede, e de o actuador de plasma ter um perfil de velocidades semelhante, dá-nos a possibilidade de actuar na camada limite. Aumentando a quantidade de movimento na direcção transversal e no sentido do

gradiente de pressão, podemos evitar a formação de vórtices longitudinais e os problemas que dele resultam.

Com uma rampa inclinada montada no túnel de vento, foi possível observar a deflexão das linhas de corrente junto da parede. Apesar da velocidade imposta pelo actuador ser relativamente pequena (o que obrigou também a uma velocidade longitudinal pequena para assim se testar o actuador), foi montado na rampa de forma a aumentar a quantidade de movimento na direcção transversal. Os resultados observados foram bastante interessantes. Quando o actuador se encontrava ligado era notório o alinhamento das linhas de corrente junto da parede, com a direcção longitudinal. Este resultado comprova que o actuador consegue actuar junto da parede. Também se observou junto da curvatura da secção transversal, quanto maior era o raio de curvatura mais suaves eram as transições e assim eliminava-se a formação dos vórtices.

Sendo os actuadores de plasma uma área ainda em desenvolvimento e no controlo de escoamentos em comboios ainda mais, o numero de tarefas a desenvolver em trabalhos futuros é relativamente grande.

- Em relação ao circuito electrónico estudar novos tipos de ondas poderá ter algum impacto na velocidade produzida pelo actuador. Ao estudar novos tipos de ondas (por exemplo ondas dente de serra), podemos optimizar as várias fases da descarga.
- A geometria do actuador de plasma é outro assunto a aprofundar. Uma restrição no actuador usado neste trabalho foi a rigidez do dieléctrico, o que limitou a tensão e por sua vez a velocidade. A utilização de folhas Kapton ou de Mylar são uma solução para este problema. São dieléctricos bastantes fortes, e além disso tem espessuras muito pequenas (na ordem dos μm). O facto de serem flexíveis também é uma grande vantagem pois permite moldar o actuador à superfície.
- Na maioria deste tipo de trabalhos, as medições são feitas usando medidas PIV (Particle Image Velocimetry), no entanto não estava no âmbito deste trabalho usar esta técnica. É uma técnica que apesar de exigir alguma experiência, fornece imagens bastante claras do escoamento e permite obter o campo de velocidades.

Referências

- [1] André, José Maria., *Transporte Interurbano em Portugal: Concepção técnica de uma alternativa ferroviária para o transporte de passageiros (Volume 2)*, Lisboa: IST Press, 2008.
- [2] Gad-El-Hak, M., *Flow Control*, Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [3] Gad-El-Hak, M., Pollard, A., Bonnet, J., "*Flow Control: Fundamental and practices (Springer Lecture Notes in Physics)*", Berlin: New Series Monographs, 1998.
- [4] Flatt, J. "*Boundary Layer and flow control. Its principles an application*", Vol.1, pp 22-143. New York: Pergamon Press, 1961.
- [5] Prandtl, L. "*Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner-reibung*", *Proceedings of Third International Mathematical Congress*, pp 4984-4991. Heidelberg, 1904
- [6] Betz, A. "*Boundary layer and flow control. Its principles and application*", Vol.1, pp 1-20. New York: Pergamon Press, 1961.
- [7] Attinello, J., "*Boundary layer and flow control. Its principles and application*", Vol.1, pp 122-143. New York: Pergamon Press, 1961.
- [8] Modi, V., Hill, S., Yokomizo, T., "*Drag reduction of trucks throught boundary layer control*", Vol.54, pp 583-594. 1995.
- [9] Zaman, K., Mangalam, S., "*Effect of acoustic excitation on the flow over low-Re airfoil*", *J. Fluid Mech.*, Vol.182, pp 127-148. 1987.
- [10] Hsiao, F., Wang, T., Zohar, Y., "*Flow separation control of a 2-D airfoil by leading edge oscillating flap*", *Pacific International Conference on Aerospace Science an Technology*, Vol.1, pp 250-256. Taiwan, 1993.
- [11] Hsiao, F., Liu, C., Shyu, R., "*Control of wall-separated flow by acoustic excitation*", *AIAAJ*, 28(8), pp 1440-1446. 1990.
- [12] Chang, R., Hsiao, F., Shyu, R., "*Forcing Level Effects of Internal Acoustic Excitation on the Improvement of Airfoil Performance*", *Journal of Aircraft*, Vol.29, No.5, pp.823-829. 1992.
- [13] Nosenchuck, D., Brown, G., "*The direct control od wall shear stress in a turbulent boundary layer*", *MAE Report T1954*. New Jersey, 1992.
- [14] Massines, F., Rabehi, A., Decomps, P., Gadri, R., Segur, P., Mayoux, C., "*Experimental and theoretical study of a glow discharge at atmosphere pressure control by dielectric barrier*", *J.Appl.Phys.*83 2950-7. 1998.
- [15] Fridman, A., Chirokov, A., Gutsol, A., "*Non-thermal atmospheric pressure discharges*", *J. Phys.* 38 R1-24. 2005.
- [16] Roth, J. "*Electrohydrodynamically induced airflow in a one atmosphere uniform glow discharge plasma*", *25th IEEE int. Conf. Plasma Science*. Raleigh, 1998.
- [17] Wilkinson, S. "*Investigation of an oscillating surface plasma for turbulent drag reduction*", *AIAAA Meeting, paper-1023*. Reno, 2003.

- [18] Thomas, F., Kozlov, A., Corke, T., "Plasma actuators for bluff body flow control" *AIAA Meeting, paper - 2845*. San Francisco, 2006.
- [19] McLaughlin, T., Munska, M., Vaeth, J., Dauwalter, T., Goode, J., Siegel, S., "Plasma-based actuators for cylinder wake vortex control", *AIAA Meeting*. Portland, 2004.
- [20] Shcherbakov, Y., Isanov, N., Baryshev, N., Frolovskij, V., *AIAA Meeting, paper - 2670*. Reno, 2000.
- [21] Roth, J. *Phys. Plasmas* 10 2117-26. 2003.
- [22] Post, M., Corke, T., "Separation control on high angle of attack airfoil using plasma actuators", *AIAA Meeting, paper - 1024*. Reno, 2003.
- [23] Font, G. "Boundary layer control with atmospheric plasma discharges", *AIAA J.* 44, pp. 1572–8. 2006.
- [24] Enloe, C., McLaughlin, T., Font, G., "Parametrization of Temporal Structure in the Single Dielectric Barrier Aerodynamic Plasma Actuator", *43th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 10 -13. Reno, 2005.
- [25] Enloe, C., et al. "Mechanisms and responses of a single dielectric barrier plasma actuator: geometric effect", *AIAA J.* 42 595–604. 2004.
- [26] Atila, F., Silva, P., Anderson, I., Colaço, M., *Escola de Primavera em Transição e Turbulência, Vol 5*. Rio de Janeiro, 2006.
- [27] Santos, N., "Actualização de uma instalação para estudo de diversas influências na propagação de chamas em leitos florestais de agulhas de pinheiro", *Projecto Final de Termodinâmica Aplicada, DEM, IST*. Lisboa, 2006.
- [28] Web site: www.neumeister-partner.com.
- [29] Brederode, V., "Fundamentos de aerodinâmica incompressível", Lisboa: Edição do Autor, 1997.
- [30] Roth, J., Sherman, D., Wilkinson, S., "Boundary layer flow control with a one atmosphere uniform glow discharge surface plasma" *AIAA Meeting, paper - 328*. Reno, 1998.
- [31] Pinheiro, M., "EHD ponderomotive forces and aerodynamic flow control using plasma actuators", *Plasma Process. Polym.* 3 135-141, 2006

Anexo I

Neste anexo são apresentados os resultados obtidos para várias configurações dos eléctrodos, com vista a otimizar alguns parâmetros geométricos e de operação. Recorda-se que a velocidade produzida e a potência requerida foram os aspectos fundamentais para a escolha do melhor eléctrodo. O esquema abaixo mostra os parâmetros geométricos dos 12 actuadores de plasma ensaiados.

De notar que as medições de velocidade foram feitas muito próximo da parede (1 a 3 mm) pois foi aí que a velocidade produzida é maior.

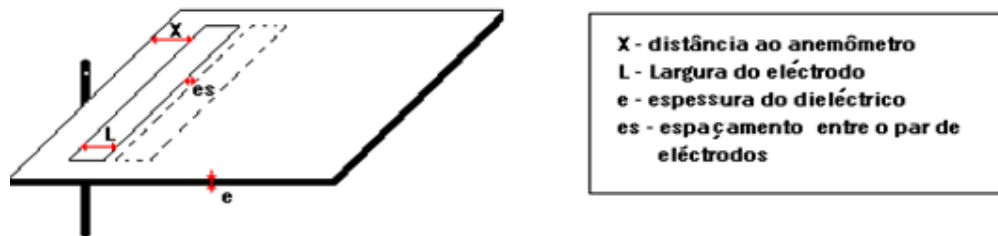


Figura I.1 - Descrição dos parâmetros analisados na optimização do actuador de plasma

Actuador de plasma	Espessura do dieléctrico (mm)	Espaçamento entre Eléctrodos (mm)	Largura dos eléctrodos (mm)	Distância ao anemómetro (mm)
1	0,8	1	8	80
2	0,8	1	10	40
3	0,8	2	8	80
4	0,8	2	10	40
5	1,6	1	1	35
6	1,6	1	4	85
7	1,6	1	8	80
8	1,6	1	10	40
9	1,6	2	1	35
10	1,6	2	4	85
11	1,6	2	8	80
12	1,6	2	10	40

Tabela 3.2 – Características geométricas dos actuadores de plasma

Actuador 1

- Frequência: 500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,64	9,6	8,08	0,12	31,5
20	1	20	12,24	0,35	31,5
25	1,15	28,75	13,36	0,4	31,6
30	1,36	40,8	13,68	0,41	31,7

- Frequência: 1000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,43	6,45	6,8	0,13	31,6
20	0,58	11,6	8,5	0,3	31,6
25	0,68	17	9,6	0,35	31,6
30	0,8	24	10,7	0,43	31,7

- Frequência: 1500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,32	4,8	5,3	0	31,8
20	0,43	8,6	6,6	0,16	31,8
25	0,51	12,75	7,52	0,3	31,8
30	0,58	17,4	8,5	0,4	31,8

- Frequência: 2000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,25	3,75	4,5	0	31,9
20	0,34	6,8	5,4	0,15	31,9
25	0,41	10,25	6,4	0,3	31,9
30	0,5	15	7,7	0,38	31,9

- Frequência: 3000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,23	3,45	3,84	0	31,9
20	0,3	6	4,7	0,02	31,9
25	0,35	8,75	5,5	0,2	31,9
30	0,39	11,7	6	0,25	31,9

Actuador 2

- Frequência: 500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,67	10,05	8,64	0,3	32,2
20	1	20	12,4	0,46	32,1
25	1,17	29,25	13,2	0,5	32,2
30	1,39	41,7	13,5	0,5	34,4

- Frequência: 1000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,43	6,45	6,7	0,2	33,3
20	0,58	11,6	8,4	0,4	33,3
25	0,68	17	9,7	0,5	33,3
30	0,8	24	10,8	0,62	33,3

- Frequência: 1500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,33	4,95	5,3	0,12	33,5
20	0,43	8,6	6,6	0,28	33,4
25	0,51	12,75	7,6	0,42	33,3
30	0,59	17,7	8,56	0,58	33,2

- Frequência: 2000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,25	3,75	4,4	0	33,2
20	0,34	6,8	5,6	0,2	33,2
25	0,41	10,25	6,56	0,37	33,2
30	0,51	15,3	7,76	0,5	33,2

- Frequência: 3000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,22	3,3	3,84	0	33
20	0,3	6	4,8	0,12	33
25	0,34	8,5	5,36	0,22	33
30	0,38	11,4	6	0,33	33

Actuador 3

- Frequência: 500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,7	10,5	8,8	0	32
20	1,01	20,2	12,48	0,3	32
25	1,17	29,25	13,2	0,36	32
30	1,4	42	13,5	0,4	32,2

- Frequência: 1000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,43	6,45	6,88	0	31,9
20	0,57	11,4	8,6	0,18	31,9
25	0,68	17	9,84	0,38	31,9
30	0,8	24	10,96	0,44	31,9

- Frequência: 1500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,32	4,8	5,7	0	31,9
20	0,43	8,6	7,2	0,1	31,9
25	0,51	12,75	8,1	0,25	31,9
30	0,59	17,7	8,8	0,35	31,9

- Frequência: 2000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,25	3,75	5,2	0	31,9
20	0,34	6,8	6,1	0	31,9
25	0,41	10,25	7	0	31,9
30	0,49	14,7	7,84	0,3	31,9

- Frequência: 3000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,21	3,15	4,4	0	32
20	0,29	5,8	5,6	0	32
25	0,36	9	6,5	0	32
30	0,41	12,3	6,8	0,1	32

Actuador 4

- Frequência: 500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,66	9,9	8,72	0,23	31,7
20	1	20	12,56	0,48	31,8
25	1,16	29	13,04	0,51	32,1
30	1,38	41,4	13,36	0,58	32,3

- Frequência: 1000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,43	6,45	7,04	0,16	32,7
20	0,57	11,4	8,64	0,36	32,6
25	0,67	16,75	9,76	0,45	32,5
30	0,79	23,7	10,8	0,52	32,9

- Frequência: 1500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,32	4,8	5,76	0	32,8
20	0,42	8,4	6,88	0,23	32,7
25	0,51	12,75	8	0,4	32,6
30	0,59	17,7	8,8	0,5	32,6

- Frequência: 2000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,25	3,75	5,1	0	32,6
20	0,34	6,8	6,08	0,13	32,6
25	0,41	10,25	6,88	0,32	32,5
30	0,49	14,7	7,76	0,47	32,5

- Frequência: 3000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,21	3,15	4,4	0	32,3
20	0,29	5,8	5,5	0	32,2
25	0,36	9	6,1	0,22	32,1
30	0,42	12,6	6,7	0,34	32,1

Actuador 5

- Frequência: 500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,66	9,9	10,48	0,14	31,6
20	0,97	19,4	12,24	0,4	32,4
25	1,14	28,5	12,56	0,55	32,4
30	1,36	40,8	12,58	0,6	32,6

- Frequência: 1000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,42	6,3	7,7	0,17	31,4
20	0,56	11,2	10	0,32	31,4
25	0,66	16,5	11,92	0,46	31,3
30	0,77	23,1	12,4	0,63	31,4

- Frequência: 1500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,31	4,65	6	0	31,3
20	0,41	8,2	7,6	0,2	31,2
25	0,49	12,25	9,12	0,34	31,2
30	0,58	17,4	10,4	0,43	31,2

- Frequência: 2000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,25	3,75	4,96	0	31,1
20	0,33	6,6	6,32	0,11	31,2
25	0,39	9,75	7,6	0,29	31,2
30	0,46	13,8	8,8	0,38	31,1

- Frequência: 3000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,21	3,15	4	0	31,3
20	0,28	5,6	5,12	0	31,3
25	0,33	8,25	6,4	0,2	31,2
30	0,39	11,7	7,2	0,3	31,2

Actuador 6

- Frequência: 500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,68	10,2	10	0	32,1
20	0,98	19,6	12,16	0,36	32,1
25	1,14	28,5	12,56	0,4	32,1
30	1,35	40,5	12,88	0,4	32,1

- Frequência: 1000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,42	6,3	7,6	0,05	31,2
20	0,57	11,4	9,84	0,14	31,5
25	0,66	16,5	11,52	0,24	31,5
30	0,78	23,4	12,48	0,32	31,5

- Frequência: 1500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,31	4,65	5,76	0	31,3
20	0,41	8,2	7,48	0,06	31,3
25	0,49	12,25	8,72	0,13	31,3
30	0,57	17,1	10	0,25	31,3

- Frequência: 2000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,25	3,75	4,88	0	31,3
20	0,33	6,6	6,08	0	31,3
25	0,4	10	7,52	0,1	31,3
30	0,52	15,6	8,48	0,2	31,2

- Frequência: 3000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,21	3,15	4,16	0	31,3
20	0,23	4,6	5,2	0	31,3
25	0,35	8,75	6,24	0,05	31,3
30	0,4	12	7,12	0,2	31,3

Actuador 7

- Frequência: 500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,68	10,2	9,76	0,24	31,3
20	1	20	12,32	0,4	31,3
25	1,16	29	12,56	0,42	31,3
30	1,42	42,6	12,7	0,43	31,4

- Frequência: 1000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,43	6,45	7,2	0,13	31,6
20	0,56	11,2	8,92	0,26	31,6
25	0,69	17,25	10,8	0,4	31,6
30	0,79	23,7	12,2	0,5	31,6

- Frequência: 1500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,31	4,65	5,68	0	31,4
20	0,42	8,4	7,2	0,25	31,4
25	0,5	12,5	8,4	0,34	31,4
30	0,58	17,4	9,4	0,45	31,4

- Frequência: 2000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,25	3,75	4,7	0	31,3
20	0,33	6,6	5,92	0,1	31,4
25	0,39	9,75	7,1	0,3	31,4
30	0,48	14,4	8	0,4	31,4

- Frequência: 3000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,2	3	4	0	31,2
20	0,28	5,6	5	0,01	31,3
25	0,33	8,25	6	0,21	31,3
30	0,4	12	6,8	0,36	31,2

Actuador 8

- Frequência: 500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,74	11,1	10,88	0,36	31,3
20	1,05	21	12,08	0,48	31,3
25	1,2	30	12,56	0,48	31,4
30	1,42	42,6	12,88	0,5	31,5

- Frequência: 1000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,42	6,3	6,48	0,3	31,3
20	0,56	11,2	9	0,44	31,3
25	0,62	15,5	10	0,55	31,2
30	0,78	23,4	11,84	0,62	31,2

- Frequência: 1500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,31	4,65	5,6	0,18	31,3
20	0,42	8,4	7,12	0,39	31,3
25	0,5	12,5	8,3	0,53	31,3
30	0,58	17,4	9,36	0,69	31,3

- Frequência: 2000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,25	3,75	4,56	0,05	31,4
20	0,33	6,6	6	0,29	31,3
25	0,4	10	7,1	0,5	31,3
30	0,47	14,1	8	0,67	31,3

- Frequência: 3000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,21	3,15	4	0	31,2
20	0,28	5,6	5,04	0,18	31,2
25	0,34	8,5	6	0,37	31,2
30	0,39	11,7	6,7	0,5	31,2

Actuador 9

- Frequência: 500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,64	9,6	9,84	0,27	30,8
20	0,99	19,8	12,32	0,42	30,9
25	1,14	28,5	12,56	0,42	31,4
30	1,36	40,8	12,96	0,55	31,1

- Frequência: 1000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,64	9,6	9,84	0,27	30,8
20	0,99	19,8	12,32	0,42	30,9
25	1,14	28,5	12,56	0,42	31,4
30	1,36	40,8	12,96	0,55	31,1

- Frequência: 1500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,31	4,65	5,84	0,1	31,5
20	0,42	8,4	7,52	0,28	31,4
25	0,52	13	9	0,47	31,4
30	0,6	18	10,3	0,53	31,4

- Frequência: 2000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,24	3,6	4,7	0	31,3
20	0,33	6,6	6,08	0,26	31,2
25	0,38	9,5	7,2	0,4	31,1
30	0,46	13,8	8,4	0,52	31,1

- Frequência: 3000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,2	3	4	0	31,2
20	0,28	5,6	5,2	0	31,2
25	0,33	8,25	6,32	0,3	31,2
30	0,39	11,7	7,1	0,45	31,1

Actuador 10

- Frequência: 500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,75	11,25	12,4	0,2	31,4
20	1,02	20,4	12,5	0,34	31,4
25	1,22	30,5	12,56	0,34	31,4
30	1,46	43,8	12,9	0,34	31,4

- Frequência: 1000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,42	6,3	7,6	0,06	31,4
20	0,59	11,8	9,3	0,18	31,4
25	0,79	19,75	13	0,32	31,4
30	1,03	30,9	13,2	0,42	31,4

- Frequência: 1500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,31	4,65	6	0	31,4
20	0,42	8,4	7,44	0,22	31,4
25	0,5	12,5	8,7	0,32	31,4
30	0,59	17,7	9,92	0,39	31,3

- Frequência: 2000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,24	3,6	4,88	0	31,3
20	0,33	6,6	6,24	0,02	31,4
25	0,39	9,75	7,28	0,25	31,3
30	0,46	13,8	8,48	0,4	31,3

- Frequência: 3000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,21	3,15	4	0	31
20	0,28	5,6	5,44	0,01	31
25	0,34	8,5	6,4	0,02	31,1
30	0,4	12	7,12	0,33	31,1

Actuador 11

- Freqüência: 500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,65	9,75	9,28	0,03	31
20	1	20	12,16	0,4	31,3
25	1,16	29	12,32	0,45	31,5
30	1,38	41,4	12,8	0,53	31,7

- Freqüência: 1000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,42	6,3	7,5	0,12	31,2
20	0,57	11,4	9,44	0,31	31,3
25	0,67	16,75	10,96	0,41	31,5
30	0,8	24	12,32	0,5	31,6

- Freqüência: 1500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,31	4,65	6	0,05	30,9
20	0,42	8,4	7,3	0,05	30,9
25	0,5	12,5	8,7	0,33	31
30	0,59	17,7	9,9	0,42	31

- Freqüência: 2000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,25	3,75	4,96	0	30,8
20	0,35	7	6,616	0	30,8
25	0,4	10	7,28	0,05	30,8
30	0,47	14,1	8,32	0,3	30,8

- Freqüência: 3000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,21	3,15	4	0	30,6
20	0,28	5,6	5,36	0	30,6
25	0,33	8,25	7,04	0,01	30,6
30	0,4	12	7,12	0,25	30,6

Actuador 12

- Frequência: 500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,65	9,75	9,12	0,32	31,1
20	1,02	20,4	12,08	0,52	31,1
25	1,18	29,5	12,48	0,56	31,1
30	1,41	42,3	12,8	0,56	31,5

- Frequência: 1000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,43	6,45	7,6	0,2	30,7
20	0,57	11,4	9,36	0,4	30,7
25	0,68	17	10,88	0,55	30,8
30	0,81	24,3	12,32	0,69	30,9

- Frequência: 1500 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,31	4,65	5,84	0	30,5
20	0,41	8,2	7,36	0,25	30,5
25	0,49	12,25	8,56	0,37	30,5
30	0,58	17,4	9,6	0,63	30,4

- Frequência: 2000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,25	3,75	4,92	0	30,6
20	0,33	6,6	6	0,17	30,6
25	0,39	9,75	7,2	0,3	30,6
30	0,46	13,8	8,32	0,45	30,6

- Frequência: 3000 Hz

Tensão Primário (V)	Corrente (A)	Potência (W)	Tensão Secundário (KV)	Velocidade (m/s)	Temperatura (°C)
15	0,21	3,15	4	0	30,7
20	0,28	5,6	5,2	0,01	30,6
25	0,33	8,25	6,24	0,05	30,6
30	0,46	13,8	7,2	0,44	30,6

