

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

TLM04E

Telemetria

MotoStudent 2023

Escrito por:

Diogo Luís

4 de setembro de 2021



Índice

1	Velocidade da moto	2
2	Aceleração	10
3	GPS	13
4	Direção	15
5	Travel das Suspensões	17
6	Temperatura do Controlador e do Motor	19
7	Inclinação da Mota	20
8	Pitch	21
9	Rotação do Motor	22
10	Correntes de Alimentação do Motor	23
11	Percentagem de Acelerador e Travão	24
12	Extensómetros	26
13	Tubo de Pitot	29

1 Velocidade da mota

Existem diversos métodos que permitem determinar da velocidade linear da mota de forma relativamente precisa, com diferentes graus de complexidade e exatidão. E embora consigamos apenas guardar dados no tempo discreto (o que impossibilita um cálculo de velocidade instantânea 100% fiável) podemos obter boas aproximações.

Encoder

Um Encoder Rotativo é um dispositivo eletromecânico capaz de converter movimentos rotativos em impulsos elétricos de onda quadrada. Este dispositivo gera uma quantidade exata de impulsos por revolução com uma distribuição uniforme dos pulsos ao longo dos 360 graus em torno do eixo. O seu funcionamento consiste na incidência de um feixe de luz sobre um sensor fotossensível (ambos com posições fixas) e um disco rotativo entre eles (Figura 1). Esse disco, apresenta barras transparentes e barras opacas nas extremidades para permitir a passagem e o bloqueio do feixe de luz, respetivamente.

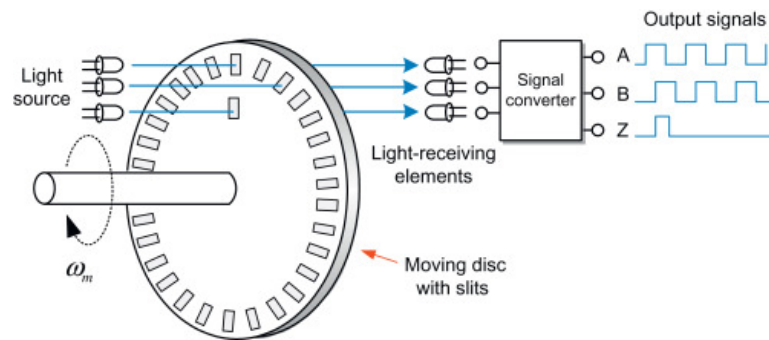


Figura 1: Esquema de funcionamento

Existem também encoders com mais que uma faixa de barras cujo padrão segue a codificação binária de Gray, pelo que cada uma dessas faixas corresponde a um bit cujo estado é definido pela luminosidade incidente no respetivo sensor. Esse tipo de encoder está mais direccionado para seguir a posição mais facilmente, associando um código binário a cada região do disco. No entanto, para a TLM04e, o interesse no encoder restringe-se apenas ao cálculo da velocidade (e possivelmente da aceleração), portanto é preferível o tipo mais simples.

Geralmente, produzem três sinais quadrados na saída, sendo que dois deles têm a mesma frequência mas desfasados de $\pm 90^\circ$ (normalmente denominados pelas letras A e B), e o outro apresenta um impulso por cada rotação (normalmente denominado por Z). Os sinais A e B dizem respeito à passagem/bloqueio dos feixes luminosos e a frequência dos impulsos depende da velocidade angular do disco. O motivo de se extrair dois sinais desfasados é detetar o sentido da rotação do veio, o que não tem grande interesse para uma mota, tanto que apenas precisaremos

de um deles. O sinal Z tem como objetivo registrar cada volta que o disco gira sobre o eixo ao longo do tempo.

Ao analisar as mudanças de estado do sinal de pulso A ou B em função do tempo, é possível estimar a velocidade angular da rotação do disco e, conseqüentemente, podemos determinar a velocidade linear da moto. Para isto, seria importante ter em conta a forma que o encoder é incorporado no protótipo e calcular a relação de proporcionalidade entre a velocidade de rotação do veio do encoder e a velocidade angular da roda. A precisão desta análise depende da quantidade de fendas no disco, mas está limitada pela frequência da amostragem permitida pelo microcontrolador.

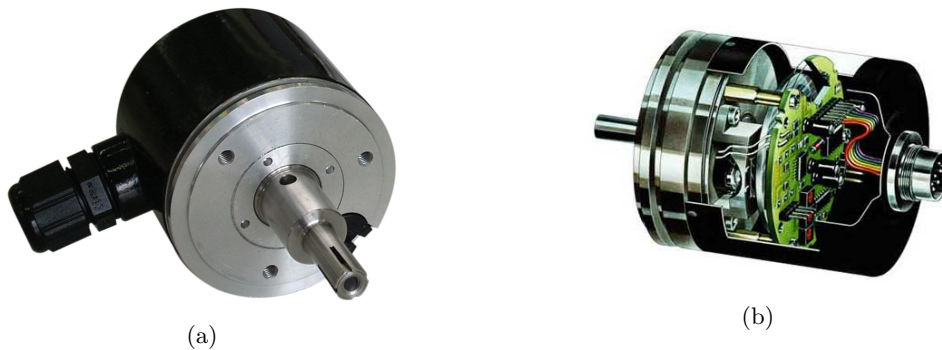


Figura 2: Encoder

É essencial que os impulsos sejam detetados assim que ocorre a mudança de estado de LOW para HIGH (*rising edge*) ou de HIGH para LOW (*falling edge*). Por essa razão, o sinal A do encoder deve ser definido no *software* como um sinal de interrupção (*interrupt-on-input-change*), o que significa que, assim que o impulso ascendente (ou descendente) for detetado, o MCU interrompe o que está a fazer nesse momento e executa a função que está associada a essa interrupção. Caso a deteção dos impulsos fosse feita ciclicamente com o resto do programa, os intervalos entre as medições dependeriam do tempo de execução do algoritmo, que está dependente de vários fatores como o número de acessos de memória, validações, operações aritméticas, alocações e outras instruções básicas feitas pelo processador em cada iteração do programa. Isto tornaria impossível detetar ao certo quando ocorreu o início do impulso e nem nos dá a garantia de que estamos a considerar todos os eventos sem saltar nenhum, o que iria corromper os resultados.

Com o STM32, basta ligar o sinal A e, se necessário, o sinal Z aos pins GPIO adequados do microcontrolador. Quanto ao *software*, penso que dê para utilizar a biblioteca "PinDetect.h" para lidar com as interrupções, já que é bastante prático para definir se pretendemos detetar o *rising edge* ou o *falling edge* e associar uma função *callback* para executar na ocorrência de cada impulso. É apenas preciso ter em conta o estado do sinal definindo o pin como *PullDown* (default) ou *PullUp* dependendo do tipo de encoder, e também definir os intervalos de tempo entre cada

amostra (*sampling period*). O *sampling period* deve ser um valor baixo, pois a frequência de amostragem do microcontrolador tem de ser muito superior ao ritmo de eventos do sinal de pulso observado no encoder. Na biblioteca "PinDetect.h", o valor default do *sampling period* é 20ms, mas neste caso tem de ser muito menor.

De modo a visualizar mais facilmente o problema, convém ter uma noção da ordem de grandeza que está associada aos valores com que vamos lidar. Para estabelecer uma margem de segurança, devemos considerar um cenário extremo que nos permita majorar o limite do *sampling period*. Imaginemos então que a moto viaja a uma velocidade $v = 300\text{km/h}$, que seria uma velocidade bastante elevada para uma moto elétrica (o toptspeed nas MotoE é 270). Se o diâmetro exterior do pneu for 17", a velocidade angular da roda é de aproximadamente $\omega = 386\text{rad/s}$, equivalente a 3686 rpm. Podemos calcular o intervalo de tempo entre cada pulso de encoder (t_e) através da expressão

$$t_e = \frac{2\pi}{\omega N} \quad (1)$$

em que N é o número de pulsos por rotação (ppr) do encoder utilizado (tem a ver com o número de fendas no disco). Se o encoder for de 100 ppr, por exemplo, o t_e será cerca de $160\mu\text{s}$. O microcontrolador que estamos a usar (STM32F446RE) permite-nos atingir frequências de amostragem na ordem dos Megahertz (MHz), o torna possível obter uma boa precisão. Contudo, há que entender que o tempo de amostragem (*sampling period*, t_s) tem de ser muito inferior a t_e , ou seja, $t_s \ll t_e$, portanto, para velocidades elevadas, o número de eventos por revolução (N) não deve ser muito elevado.

Encoders rotativos permitem-nos fazer uma medição indireta da velocidade linear da moto a partir da variação de um sinal de pulso digital em função do tempo, mas a interpretação dos dados pode ser feita de mais que uma maneira. Destacam-se dois métodos para interpretar a saída do encoder, designados *Pulse Timing* e *Pulse Counting*.

Pulse timing

A primeira abordagem consiste em contar o intervalo de tempo entre cada evento do sinal A do encoder. Um sinal de *clock* de alta frequência é contado durante um período do encoder e a partir daí determina-se o tempo que levou entre dois impulsos do sinal A. Por outras palavras, consiste em fixar uma distância constante, associada ao ângulo do setor circular formado por quaisquer duas fendas consecutivas do disco, e medir o tempo que demora a percorrer essa distância.

O número de ciclos do *clock* que são contados (c), dividido pela frequência do *clock* (f), fornece o tempo para o período do encoder (o tempo para girar um passo). Considerando novamente N como o número de pulsos por rotação (ppr) do dispositivo utilizado, a velocidade angular do

encoder é dada por

$$\omega_e = \frac{2\pi}{N} \cdot \frac{f}{c} \quad (2)$$

Em seguida, ter-se-ia de obter a velocidade angular da roda da moto e por fim a velocidade linear. Ou melhor, para poupar tempo de execução, encontrar a constante k tal que $v_{mota} = k \times \omega_e$

Para obter o gráfico da velocidade ao longo do tempo, acho que a melhor opção seria simplesmente guardar no cartão SD a sequência de valores obtidos para as contagens dos ciclos clock (c) e processá-los posteriormente no MATLAB.

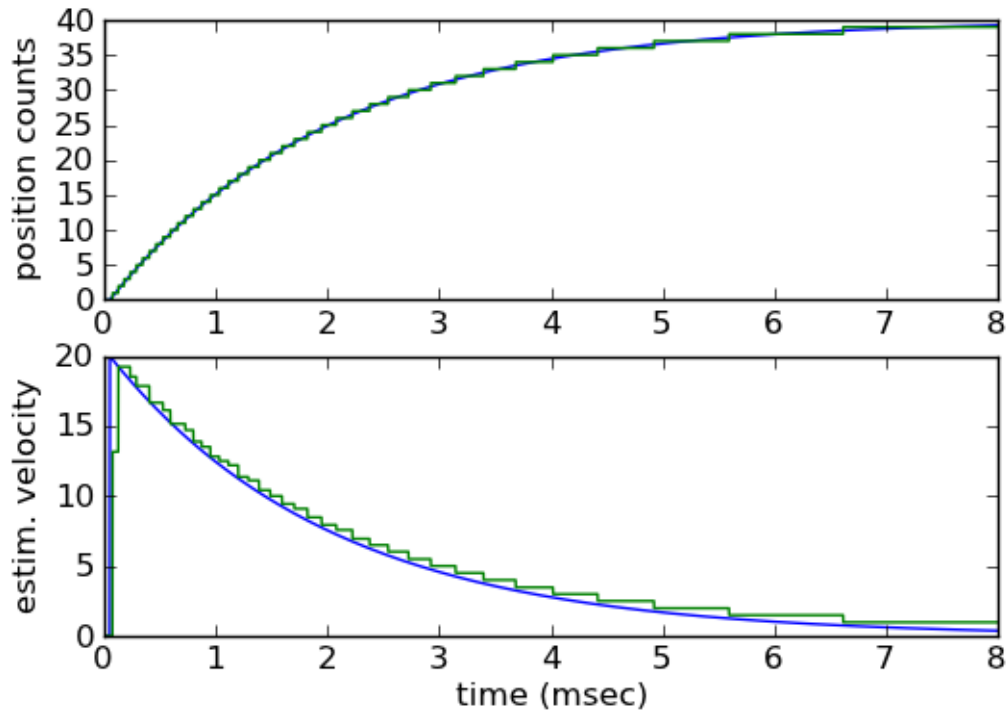


Figura 3: Obtenção do gráfico da Velocidade

Este método, no entanto, exige que o MCU faça constantemente uma contagem de tempo a alta frequência e guarde valores a cada poucos microsegundos. Isto, para altas velocidades, torna-se quase impossível especialmente tendo em conta que o MCU tem outras tarefas para fazer em simultâneo. Assim sendo, o *Pulse Timing* apenas oferece boa precisão para velocidades relativamente baixas.

Pulse counting

Uma outra alternativa é contar o número de eventos detetados num dado intervalo de tempo. A técnica do *Pulse Counting* usa um período de tempo fixo entre medições (Δt) e o número de pulsos (n) que são contados durante esse período para determinar o tempo médio para um pulso. Sabendo o número de pulsos por revolução (N) para o encoder, a sua velocidade angular pode ser dada por

$$\omega_e = \frac{2\pi}{N} \frac{n}{\Delta t} \quad (3)$$

e em seguida consegue-se determinar a velocidade linear da mesma forma anteriormente dita.

Assumindo que o intervalo de tempo escolhido é suficientemente pequeno e que a mota não tem alterações de velocidade repentinas devido à inércia, a expressão 3 (e a constante de conversão k) permite-nos obter uma aproximação bastante boa da velocidade instantânea.

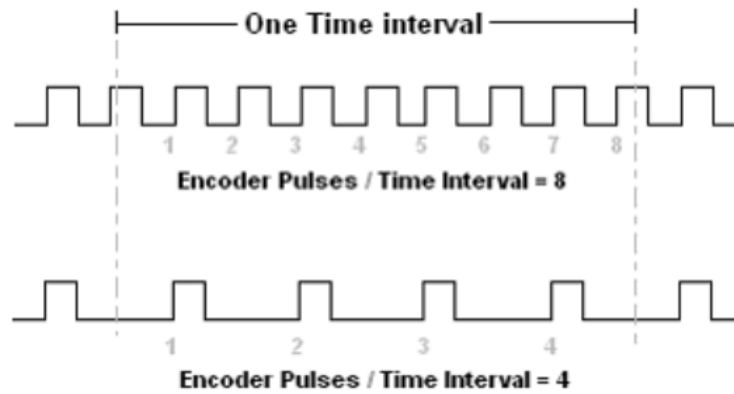


Figura 4: Pulse Counting

Este método permite-nos escolher o melhor intervalo de medições adequado para o micro-controlador, fornecendo ainda assim resultados fidedignos de velocidade. Concluindo, o *Pulse Counting* é o método preferencial para grandes velocidades.

Aqui estão algumas das opções mais acessíveis que encontrei:

- SEN0230 - 400ppr, max 5000rpm, ~ 20€
- CALT ES38 - 100-1000ppr (opção), ~ 30€
- 62AG-VG - 16ppr, ~ 15€

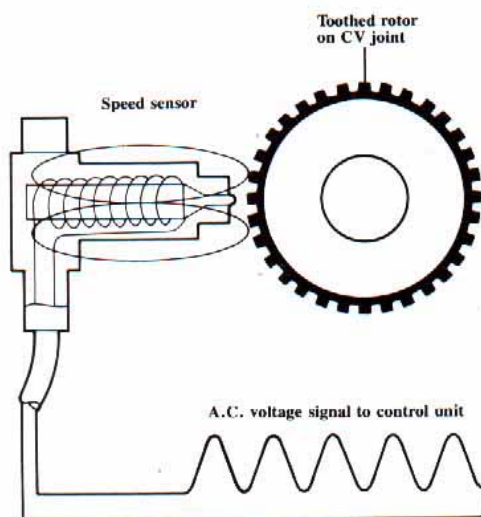
Wheel Speed Sensor

O wheel speed sensor (WSS) é um dispositivo eletromagnético usado na medição digital da velocidade na maior parte dos automóveis e motocicletas. As grandes vantagens deste sensor são o facto de ser um aparelho muito compacto e a simplicidade de utilização, que é em parte semelhante ao encoder.



Figura 5

O WSS consiste numa bobina enrolada em volta de um íman permanente que está apontado para uma roda dentada metálica. Essa roda (ou anel) dentada está ligada ao eixo cuja rotação se pretende medir, pode ser o próprio eixo de uma roda da moto. O sensor fica numa posição fixa, disposto na forma representada na Figura 6a.



(a)



(b)

Figura 6: Wheel Speed Sensor

Este sensor aproveita as propriedades indutivas da bobina para gerar um sinal sinusoidal cuja frequência de oscilação é diretamente proporcional à velocidade de rotação da roda dentada. A corrente gerada no fio da bobina é magneticamente induzido, não havendo nenhum sinal elétrico de entrada. O fenômeno que torna isto possível é princípio físico conhecido como a Lei de Faraday, segundo o qual uma bobina tende a gerar uma força eletromotriz perante variações no fluxo magnético de modo a mantê-lo constante. Por outras palavras, caso haja alguma perturbação no fluxo magnético dentro da bobina, cria-se corrente elétrica.

Como a superfície exterior do anel apresenta vários dentes e buracos alternadamente, a distância mínima entre o sensor e essa superfície altera-se à medida que o anel gira. Essa oscilação causa variações no campo magnético, que por sua vez altera o fluxo magnético e, finalmente, gera um sinal elétrico com a mesma frequência.

Em alternativa à bobina enrolada no ímã, alguns WSS usam um sensor de Hall para medir o campo magnético. Para esse tipo de sensor, já é necessário fornecer uma tensão.

Para ambos os tipos de sensor de velocidade, o *output* é uma onda sinusoidal cuja frequência está diretamente relacionada com a velocidade angular do anel. Depois desse sinal ser processado por um circuito digital, obtém-se uma onda quadrada em que cada impulso corresponde a um dente do anel. A partir daqui, o processo torna-se muito semelhante à análise do sinal do encoder. Usando o método de *Pulse Counting*, calcula-se a velocidade angular através a expressão 3, sendo que, neste caso, N corresponde ao número de dentes do anel/roda dentada.

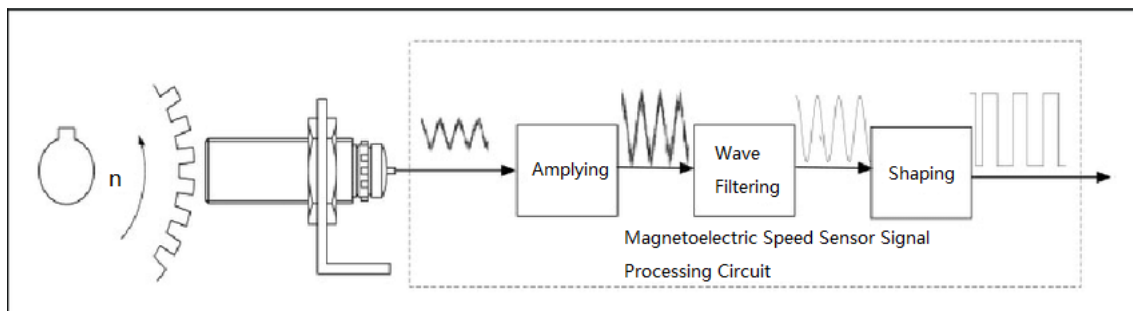


Figura 7

Alternativas

As próximas soluções estão resumidas na mesma subsecção porque, mais à frente neste documento, falarei sobre elas em diferentes secções. Ambas têm a vantagem comum de os dispositivos necessários já estarem implementados no protótipo, não sendo necessário aparelhos adicionais.

GPS - Velocidade

Determinar a velocidade a partir do GPS parece uma solução bastante interessante por várias razões. A primeira é que o GPS sabe a posição exata do veículo num dado instante de tempo, o que torna muito fácil associar a velocidade linear da moto com a localização na pista. Isto pode ser bastante útil na telemetria no sentido em que assim seria possível analisar a velocidade em cada parte da pista.

A segunda vantagem é que esta é a única das soluções aqui apresentadas que não depende da velocidade angular de uma roda para determinar a velocidade linear da moto. Assim evita-se que pequenos desajustes, como por exemplo o desgaste dos pneus cause algum erro que se vai acumulando por cada revolução da roda.

Outra vantagem é que, como já foi dito, o protótipo vai ter GPS de qualquer das maneiras, ou seja, caso se pretenda ou não usar este método, não implica nenhum aumento na ocupação de espaço.

Controlador

O controlador é o aparelho que regula a alimentação fornecida ao motor, controlando assim a velocidade de rotação do rotor. Como o rotor está ligado a um sistema de engrenagens, que por sua vez está ligado à corrente da moto, conclui-se que a velocidade angular da roda traseira varia linearmente com a velocidade do rotor do motor elétrico. A partir daí, calcula-se facilmente a velocidade linear da moto.

O número de rotações por minuto que o controlador impõe ao motor pode ser extraído por CAN.

2 Aceleração

Para além de medir a velocidade a que a moto viaja, também é importante obter os valores de aceleração a que esta está sujeita. A aceleração permite quantificar a variação da velocidade linear, determinar as forças G que atuam sobre o prototipo e, comparando com a aceleração gravítica, o ângulo de inclinação a que este se encontra.

Acelerómetros

O acelerómetro é um sensor bastante comum na tecnologia atual, estando presente em vários dos diversos dispositivos que nos rodeiam, desde drones a telemóveis, e sendo também um aparelho muito útil em desportos motorizados. A razão de este tipo de sensor ser tão utilizado em produtos tão diversos reflete-se nas vantagens que o acelerómetro apresenta sobre todas as outras soluções. Acelerómetros são geralmente muito compactos, acessíveis e podem obter resultados incrivelmente precisos. Normalmente, o acelerómetro anda muito de mãos dadas com o giroscópio, já que ambos têm funcionamentos muito semelhantes. Este facto também se torna bastante vantajoso, pois desta forma, o mesmo sensor permite-nos obter a aceleração linear instantânea associada ao trajeto da moto, bem como a sua inclinação em relação à pista.

Destacam-se dois tipos de acelerómetro com diferentes funcionamentos, os Piezoelétricos e os Sistemas Micro-Eletromecânicos (ou MEMS).

Piezoelétricos

Acelerómetros piezoelétricos usam um cristal com propriedades piezoelétricas, ou seja, quando aplicada uma força sobre esse cristal, o sensor devolve uma tensão elétrica proporcional à força. Este tipo de acelerómetros consiste numa massa (normalmente um disco cerâmico) em cima de um destes cristais. O peso aparente da massa muda consoante a aceleração a que ela está sujeita, sendo assim possível associar o sinal de saída à aceleração.

No entanto, este sensor não é ideal para a medição da aceleração de um veículo, apresentando grandes desvantagens em relação aos Sistemas Micro-Eletromecânicos. A primeira é o seu tamanho que, mesmo não sendo muito grande, é muito superior aos MEMS. Em segundo lugar, são mais difíceis de utilizar. Em terceiro, esta abordagem envolveria medir tensões, o que envolveria um ADC externo, não podendo ser do MCU porque essas tensões excedem os 5V. E uma das maiores desvantagens é que cada um destes sensores só consegue medir um eixo, significando que seria necessário mais que um acelerómetro, em diferentes configurações, para fazer o mesmo que um acelerómetro micro-eletromecânico. Assim sendo, descartamos esta opção.

MEMS

Os acelerómetros mais comuns na maior parte dos dispositivos à nossa volta são do tipo MEMS (*Microelectromechanical Systems*), e estão contidos num circuito integrado incrivelmente pequeno.

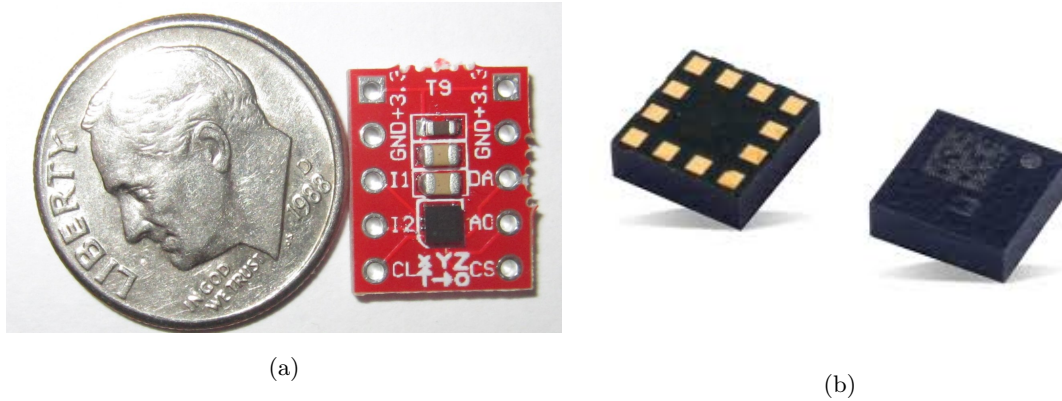


Figura 8: Acelerómetro Digital

Um sistema micro-eletromecânico integra elementos mecânicos e eletrónicos localizados num nível de substrato de silício. As dimensões físicas dos dispositivos MEMS podem variar entre a ordem dos micrómetros e dos milímetros, muitas vezes menores que o diâmetro de um fio de cabelo. Da mesma forma, este tipo de tecnologia podem variar em complexidade, desde um estrutura simples sem partes móveis até sistemas extremamente complexos com mecanismos articulados.

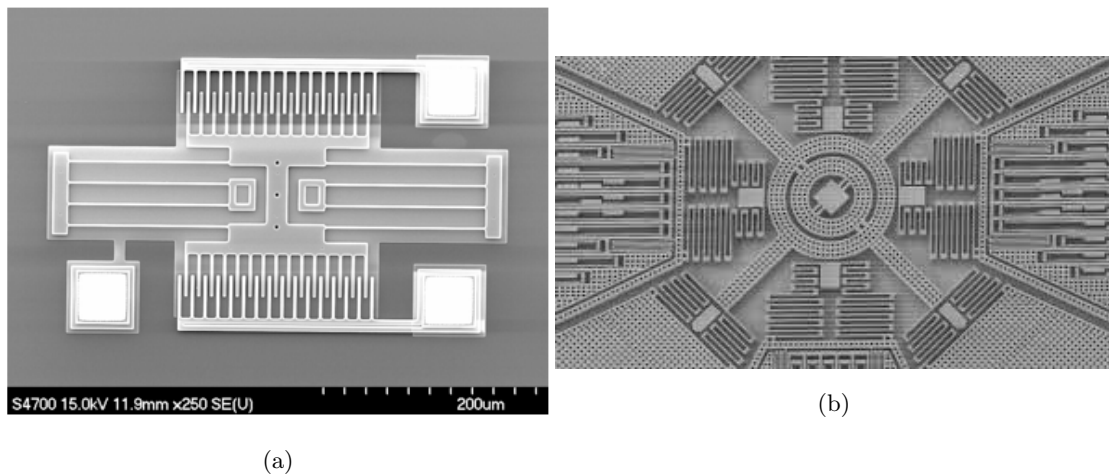


Figura 9: Microelectromechanical Systems

Os acelerómetros formados por MEMS usam um mecanismo contendo uma placa móvel com uma certa massa, que apresenta barras laterais, como demonstra esquema da figura 10. Para além disso, existem placas fixas entre as barras da placa móvel, que se encontram a um potencial elétrico diferente desta. A figura 9a apresenta uma imagem microscópica do mecanismo descrito.

O princípio usado num MEMS para determinar a aceleração é que, aplicada uma aceleração ao objeto, haverá uma força aplicada à placa móvel. No caso de essa aceleração for consequência de um movimento, a placa tenderá a desviar-se para o lado contrário do deslocamento devido à inércia. No caso de o sensor estar sujeito a alguma inclinação, entra em causa a influência da aceleração gravítica. Conforme a aceleração total imposta no sistema, esta placa afasta-se ou aproxima-se mais das barras fixas. O facto de as barras estarem a diferentes potenciais elétricos faz com que se comportem como condensadores e a variação da distância entre elas resulta na variação da capacidade. Medindo estas variações é possível determinar a aceleração que a causou.

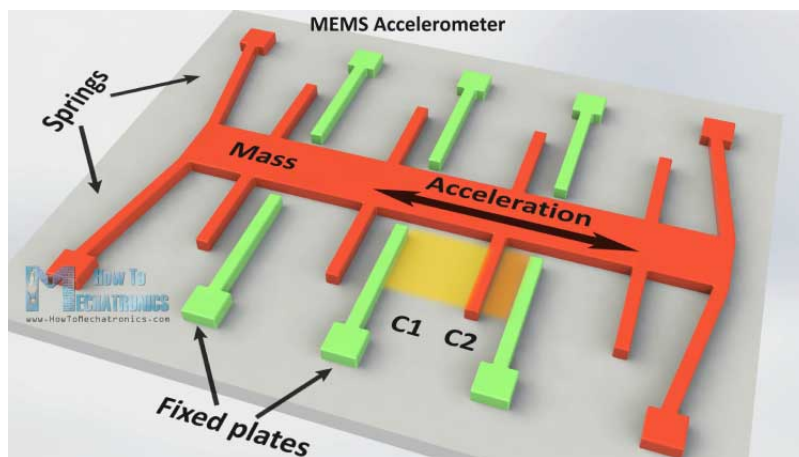


Figura 10

	ICM-20602	ADXL335	ICM-20948
Nº eixos	• 6	• 3	• 9
G-rate	• $\pm 2g / \pm 4g / \pm 8g / \pm 16g$	• $\pm 3g$	• $\pm 2g / \pm 4g / \pm 8g / \pm 16g$
ODR ¹	• 3.91-8000Hz	• 0.5-550Hz (eixo z), 0.5-1600Hz (eixos x e y)	• 4.4Hz-1.125kHz
Supply Voltage	• 1.71V-3.45V	• 1.8V-3.6V	• 1.71V-3.6V
Output	• 16 bits	• Sinais Analógicos	• 16 bits
Interfaces	• SPI, I^2C	• ————	• SPI, I^2C

¹ODR - Output Data Rate

3 GPS

Para determinar a posição exata da mota, bem como toda a sua trajetória ao longo da pista, usa-se o sistema GPS. Este sistema consiste numa rede de satélites que enviam continuamente sinais por radiofrequências que podem ser detetadas por recetor GPS. A partir daí, é possível calcular a distância entre o recetor e o satélite. Calculando quatro dessas distâncias, pode-se determinar por triangulação da posição em que o recetor se encontra com um certo grau de precisão.

Com um módulo GPS, obtém-se a cada intervalo de tempo (pode variar de produto para produto) as coordenadas que descrevem a sua localização, sob os valores de longitude, latitude e altitude, bem como o instante de tempo associado.

Depois de serem calculadas as coordenadas da posição da mota, o módulo GPS deve enviar esses dados para a placa da telemetria. A maior parte dos recetores de GPS devolvem mensagens em série que seguem o formato NMEA, contendo sequências de caracteres de ASCII (no máximo 82 por linha) nas quais se encontram os dados de tempo e coordenadas separados por vírgulas. Geralmente, a maioria dos recetores tem um *update rate* 1Hz, significando que recolhe as informações uma vez a cada segundo, e para esse tipo de dispositivo é muito comum a comunicação de dados do pino de transmissão (TX) a uma taxa de 9600 bps ou de 57600 bps.

Outra vantagem do formato NMEA é que este é compatível com vários softwares de mapeamento e navegação, tais como DeLorme Street Atlas, Google Maps, Microsoft MapPoint, entre outros.

Há também que ter em conta o efeito de blindagem (*shielding*) de radiação eletromagnética causados por certos tipos de compósitos, nomeadamente de carbono. Como a TLM04e terá uma carenagem feita de fibra de carbono, ocorre o risco da radiofrequência dos satélites ser bloqueada, pondo em causa os resultados obtidos. Uma solução para este problema seria implementar o recetor por fora da carenagem.

Os módulos do tipo *mouse* parecem ser os mais apropriados. Estes dispositivos permitem ter o recetor separado do resto dos componentes, não necessitando de estar inserido numa PCB, o que se torna vantajoso pois assim este pode ser colocado algures na mota onde haja melhor sinal. Possivelmente, terá de ser colocado fora do protótipo para evitar o *shielding* da carenagem. O módulo é ligado por cabos de ligação série sendo capaz de comunicar diretamente com um computador, no caso, com o microcontrolador da placa de telemetria. Os módulos *GPS Mouse* também têm a vantagem de ser bastante compactos e, como são ligados à PBC por conectores, é bastante fácil inserir/remover, ao contrário dos módulos que são soldados à placa.



(a)



(b)

Figura 11: GPS Mouse

Aqui são apresentados alguns exemplos de recetores que oferecem uma boa solução para a implementação do GPS:

GP-808G	BS-708	GP-20U7
<ul style="list-style-type: none"> • Update rate: 1Hz • Comunicação UART/I^2C • 40mA @ 3.3V-5.0V • Preço: 35 – 40€ • 52mm * 52mm * 20.5mm • Precisão 2.5m • 72 Canais 	<ul style="list-style-type: none"> • Update rate: 1Hz-10Hz • Comunicação USB 2.0 • 65mA @ 5.0V • Preço: \approx 20€ • 56mm diametro * 18mm • Precisão 2.0m • 56 Canais 	<ul style="list-style-type: none"> • Update rate: 1Hz • Comunicação UART • 40mA @ 3.3V • Preço: 15 – 20€ • 18.4mm * 18.4mm * 4mm • Precisão 2.5m • 56 Canais

Para além do GPS, que pertence aos EUA, existe um sistema de navegação global chamado GNSS que combina constelações de satélites americanas, russas, europeias e chinesas. A principal vantagem do GNSS é que os recetores deste tipo são capazes de receber e interpretar sinais de um maior conjunto de satélites, o que melhora a qualidade dos resultados.

Os módulos acima apresentados são relativamente acessíveis, no entanto oferecem pouca precisão nos dados, sendo que retornam a posição num raio de 2.5m da localização real do objeto. Estas imprecisões podem mostrar-se desfavoráveis, já que não permitem determinar com exatidão o trajeto da mota e, conseqüentemente, tornar-se-ia impossível caracterizar a performance ao longo da pista (por exemplo a posição da mota numa curva). Além disso, resultados imprecisos na posição põem em causa a alternativa anteriormente considerada de medir a velocidade através do GPS.

Para resolver este problema, podemos optar por considerar os seguintes módulos GNSS de

alta-precisão, que oferecem melhores resultados mas a um custo bem mais elevado:

ZED-Z9P RTK	ZED-Z9H	NEO-M8P
<ul style="list-style-type: none"> • Update rate: até 20Hz • UART/SPI/I²C/USB • 68mA @ 3.0V • Preço: ≈ 190€ • 22mm*17mm*2.4mm • Precisão 0.01m • 184 Canais 	<ul style="list-style-type: none"> • Update rate: até 10Hz • UART/SPI/I²C/USB • 68mA @ 3.0V • Preço: ≈ 180€ • 22mm*17mm*2.4mm • Precisão 0.01m • 184 Canais 	<ul style="list-style-type: none"> • Update rate: até 8Hz • UART/SPI/I²C/DDC • 25 mA @ 3.0 V • Preço: ≈ 150€ • 12.2mm*16mm*2.4mm • Precisão 0.025m • 72 Canais

4 Direção

Esta secção tem como objetivo medir o ângulo que o guiador faz com o quadro da mota. Isto permite monitorizar o manuseamento do guiador perante curvas de diferentes intensidades e, eventualmente, observar os efeitos que esse parâmetro possa ter na estrutura da mota.

Para exercer esta tarefa, destacam-se dois tipos de sensores electromecânicos bastante simples, o potenciómetro analógico e o encoder rotativo incremental. Os potenciómetros são bastante conhecidos, pois são bem comuns em vários aparelhos eletrónicos. Consiste num arco feito de um material resistivo que liga os terminais de alimentação e um cursor (*Wiper*) que está em contacto com esse arco em posições variáveis. Dependendo da posição do cursor, a resistência entre o terminal do *Wiper* e o ground varia e, conseqüentemente, a queda de tensão também varia. Por outras palavras, determina-se o ângulo do potenciómetro através do valor de tensão que ele retorna.

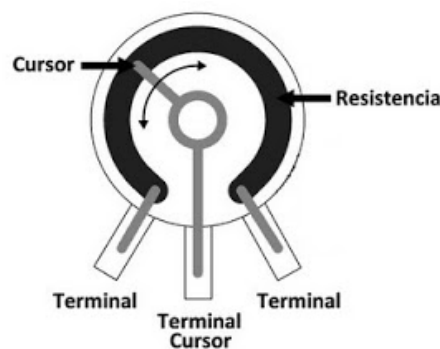


Figura 12: Potenciómetro Analógico Rotativo

Já o encoder incremental, tem um funcionamento semelhante ao descrito na secção 1 mas enquanto que o anterior tinha como objetivo medir velocidade, este pretende caracterizar o movimento e o ângulo de rotação de forma bem mais precisa.

No potenciómetro, o ângulo é dado por uma tensão elétrica e portanto, a precisão dos resultados está maioritariamente dependente da precisão do ADC do microcontrolador. Tendo em conta que os ADCs presentes nos núcleos STM32 usados são de 12 bits (0 a 4095), o que é mais que suficiente. A precisão do encoder depende do número de fendas no disco e é geralmente expressa em pulsos por rotação (PPR). Podem-se adquirir encoders desde 100ppr, o que daria erros relativamente grandes, até precisões na ordem dos 10000ppr, que se traduz em cerca de 0.036° por cada pulso (talvez seja demasiado). Portanto é uma questão de ver qual será o tipo de encoder que mais se adequa para esta finalidade.

Geralmente, os potenciómetros analógicos têm uma liberdade de rotação limitada, não podendo dar uma volta completa. Em contraste, o encoder pode girar indefinidamente. No entanto, como o objetivo é apenas determinar o ângulo do guiador, não será um problema, já que esse ângulo tem uma amplitude relativamente reduzida.

Enquanto que no potenciómetro o valor correspondente à direção pode ser extraído através da medição do ADC e posteriormente convertido para um ângulo, o encoder precisaria de recorrer a interrupções e determinar um incremento/decremento da posição. Para além disso, o encoder necessitaria analisar dois sinais de saída (sinais A e B) de modo a poder identificar o sentido do movimento do guiador. Ou seja, o potenciómetro permite recolher o ângulo de forma quase direta, enquanto que com o encoder é preciso determinar a variação do ângulo em relação ao instante anterior. Assim, conclui-se que, quanto à complexidade das implementações dos sensores, o potenciómetro seria a solução mais fácil, embora sejam ambas relativamente simples.

Algo que se deve ter em conta, é que como o encoder apenas consegue detetar a variação do ângulo de rotação, significa que para conhecer a direção do guiador é necessário saber o valor inicial desse ângulo. Isto exigiria que fosse feita uma calibração da direção cada vez o *Low Voltage System* fosse ligado para determinar a origem (0°). O mesmo não aconteceria com um potenciómetro porque cada valor de saída corresponde sempre à mesma posição do cursor. Posto isto, o potenciómetro parece ser a escolha indicada para medir a direção.

Embora este seja um sensor pequeno, seria necessário arranjar uma forma não invasiva de o introduzir no protótipo. Cabe a outras áreas decidir se vale a pena e, se sim, construir uma pequena estrutura para o implementar.

5 Travel das Suspensões

Para ter uma noção da performance do amortecimento da moto durante os treinos e corridas, há que medir o travel das suspensões de modo a poder analisar como este varia. Para além disso, como a suspensão é ajustável, poderá ser útil conhecer o seu comportamento perante os vários parâmetros de modo obter o amortecimento ideal de acordo com a pista e o piloto.

Como o travel se traduz num deslocamento causado pela compressão/alongamento de molas, sugere-se o uso de um potenciômetro linear. Este, em contraste com o potenciômetro rotativo, permite-nos medir a posição do cursor segundo uma única direção. Algumas empresas fabricam potenciômetros lineares com foco nos desportos motorizados, feitos propositadamente para medir este parâmetro. Este tipo de potenciômetro é também chamado potenciômetro de suspensão ou *damper potentiometer*, já que é desenhado para o efeito. É ainda necessário ter em conta o tipo de encaixe que se pretende, que está dependente da estrutura dos amortecedores que serão usados na TLM04e.



Figura 13

Mais uma vez, a precisão das medições obtidas depende da capacidade de leitura de tensões elétricas por parte das portas analógicas do MCU que, no caso, retorna um valor digital de 12 bits após a conversão no ADC.

Para escolher o produto a adquirir, há que ter em conta o comprimento da distensão máxima prevista nas suspensões. Geralmente, a maioria das motos usa potenciômetros de 150mm na suspensão dianteira e de 75mm na traseira. Não deixa também de ser bastante importante conhecer a distância entre os encaixes das suspensões.

Quanto às ligações elétricas, o potenciômetro linear apresenta 3 pins, sendo dois deles os potenciais de referência e o terceiro é o wiper, que contém o potencial variante e que nos permite obter o valor do travel. Os conectores usados são geralmente do tipo *4 way Binder 719*, que usam 4 pins, um dos quais está desconectado. É preciso um conector fêmea e um conector macho, que ficariam respetivamente na placa de telemetria e no cabo do potenciômetro, por exemplo.



(a) Potenciômetro na suspensão dianteira



(b) Potenciômetro na suspensão traseira

Figura 14

Para os potenciômetros dianteiros, apresentam-se as seguintes sugestões:

	CLP-150	SUS-POT-150-RJ	MoTeC 57155
Travel	• 150mm	• 150mm	• 150mm
Comp. fechado	• 298mm	• 229mm	• 297mm
Resistência ($\pm 20\%$)	• $10k\Omega$	• $10k\Omega$	• $10k\Omega$
Preço	• $\approx 400\text{€}$	• $\approx 225\text{€}$	• $\approx 290\text{€}$

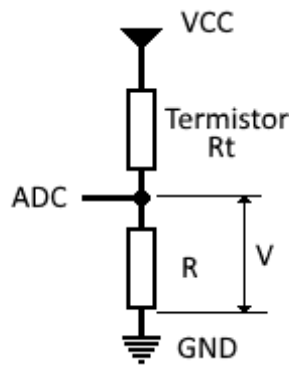
E para os potenciômetros das suspensões traseiras:

	CLP-75	SUS-POT-75-RJ	MoTeC 57154
Travel	• 75mm	• 75mm	• 75mm
Comp. fechado	• 222mm	• 148mm	• 222mm
Resistência ($\pm 20\%$)	• $5k\Omega$	• $5k\Omega$	• $5k\Omega$
Preço	• $\approx 400\text{€}$	• $\approx 225\text{€}$	• $\approx 290\text{€}$

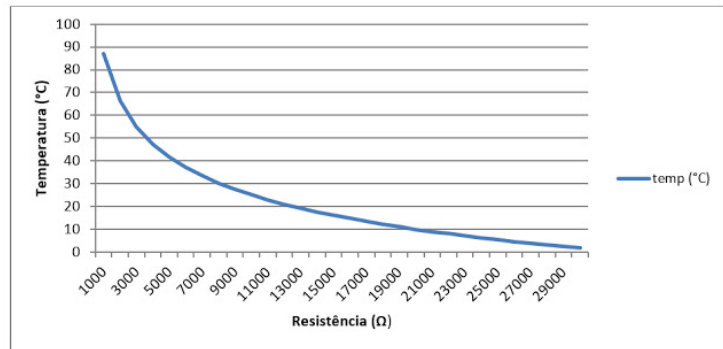
6 Temperatura do Controlador e do Motor

Por motivos de segurança e para salvaguardar a integridade do controlador e do motor, é necessário monitorizar a temperatura neles observada. Caso a temperatura exceda valores demasiado elevados, pode ocorrer o risco de causar danos nestes equipamentos e, portanto, devem ser implementadas medidas para o evitar. Algumas dessas medidas passam por diminuir a potência elétrica fornecida ao motor, reduzir o torque exigido ou, caso necessário, desligar a alimentação do próprio controlador, quer seja internamente quer pelo contactor do *High Voltage System*. Esta última é análoga ao BMS, mas muitos controladores já vêm com esta proteção.

O mais comum no que toca a medir temperaturas é o uso de termistores, que não são mais que semicondutores cuja resistência varia de certa com o aumento da temperatura. As principais vantagens dos termistores são o facto de serem pequenos, baratos e oferecerem boas estimativas para o valor da temperatura. Uma outra vantagem é a simplicidade da montagem, já que apenas é preciso uma outra resistência em série.



(a) Montagem de um termistor



(b) Temperatura em função da resistência (NTC)

Figura 15

Há também a possibilidade de medir temperatura através de infravermelhos sem precisar de contacto mas, para além de que a sua instalação na mota se tornasse mais desafiante, apenas se conseguiria medir a temperatura da superfície exterior do equipamento. Logo, podemos descartar esta opção.

Sendo a temperatura um fator importante, na maioria dos casos, tanto o motor como o controlador já contém termistores internos para este efeito. O próprio motor indica a temperatura do seu interior a através dos dados de feedback. Esse valor é obtido com um termistor, geralmente do género KTY 84 ou KTY 83 e do tipo PTC, significando que a sua resistência aumenta com o aumento da temperatura. O terminal associado à temperatura do motor é de seguida usado como *input* no controlador para que o seu valor seja monitorizado.

Em termos de telemetria, caso se pretenda registar a temperatura do motor, seria possível

obter o seu valor digitalmente através do protocolo de comunicação CAN pelo qual o controlador se rege. Por exemplo, para o controlador *Sevcon Gen4* usado na TLM02e, o valor estimado a partir do termistor do motor pode ser encontrado no endereço 0x4621. Quanto à temperatura do próprio controlador, este geralmente faz a leitura térmica no heatsink, cujo valor pode também ser extraído a partir do CAN (endereço 0x5100, pelo exemplo anterior).

7 Inclinação da Mota

Para determinar a inclinação da mota será necessário um giroscópio, que reage à rotação angular devido à força Coriolis resultante da aceleração rotativa. A força de Coriolis é uma força fictícia que atua sobre uma massa em movimento quando fica sujeita a uma rotação. Medindo a ação desta, é possível determinar a variação do ângulo segundo um referencial de inércia.

Existem diversos tipos de giroscópio, como por exemplo os giroscópios óticos, de fibra ótica, de rotor giratório e os giroscópios MEMS. Este último apresenta vantagens em relação aos anteriores por ser extremamente compacto, preciso e, principalmente, porque funciona de forma semelhante ao acelerómetro anteriormente considerado. Como já mencionado na secção 2, os módulos IMU (*Inertial Measurement Unit*) incluem geralmente tanto acelerómetro como giroscópio, e por vezes magnetómetro. Posto isto, os produtos sugeridos para a medição da aceleração linear servem também para medir a inclinação da mota.

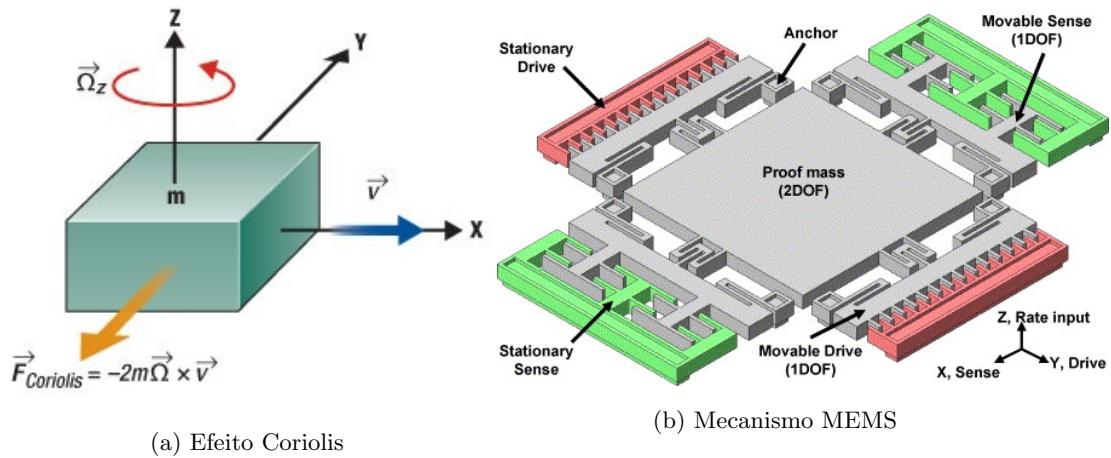


Figura 16

8 Pitch

O *pitch* é um dos três graus de liberdade de rotação tridimensional de um corpo, juntamente com os movimentos de *yaw* e *roll*. Embora estes termos sejam maioritariamente usados na aviação e aeronáutica, também têm grande utilidade no motociclismo. A diferença mais significativa é que, enquanto que aviões e foguetões rodam sobre o seu centro de massa, uma moto roda em torno dos pontos de contacto entre os pneus e o chão, descrevendo movimento completamente diferentes. O pitch traduz-se na rotação em volta do eixo horizontal transversal, correspondendo a uma inclinação para trás ("*wheelie*") ou para a frente ("*stoppie*") apoiando-se numa das rodas.

Como o pitch caracteriza uma inclinação, o seu valor pode também ser obtido através de um IMU. De facto, tal como mencionado na secção anterior, o módulo seleccionado para o IMU será responsável por parametrizar tanto a inclinação da moto nos 3 eixos, como as acelerações a que esta está sujeita.

Esta rotação pode no entanto estar associada a movimentos mais repentinos, fazendo com que a aceleração tangencial interfira com a obtenção do ângulo de inclinação. Outro aspeto a ter em consideração na recolha dos dados é a contribuição das vibrações que atuam sobre a moto. Para lidar estes problemas há que tratar cuidadosamente os dados e combinar os acelerómetros e os giroscópios presentes no IMU. Existem algoritmos que podem ajudar no tratamento e interpretação das medições. Isto também se aplica à inclinação lateral da moto (*roll*).

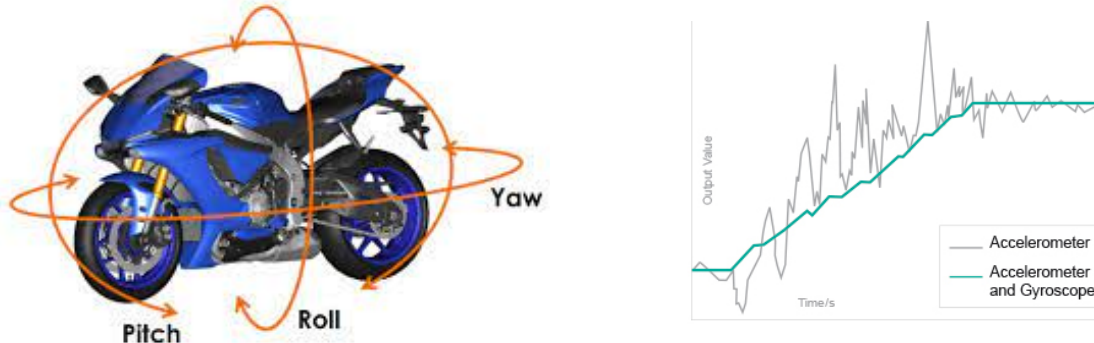


Figura 17

9 Rotação do Motor

Um outro parâmetro importante a ter em consideração é a velocidade de rotação do veio do motor. A monitorização do número de rotações por minuto (RPM) observadas no motor pode ajudar a melhor compreender o desempenho do protótipo durante o funcionamento, bem como o seu comportamento perante certas partes da pista.

A primeira abordagem para obter o valor de RPM seria medir essa grandeza diretamente a partir do próprio motor. Certos motores elétricos incluem sensores internos capazes de medir a velocidade do veio, enquanto que outros podem incluir conexões que permitem ao utilizador adicionar sensores como um encoder ou um tacómetro para o efeito. O motor utilizado na TLM04e será selecionado e fornecido pela competição, logo esta solução dependerá do produto escolhido.

A segunda abordagem seria determinar a velocidade rotação através do barramento de comunicação CAN, a partir do controlador. Como o controlador é responsável pela gestão do motor, este define a velocidade mecânica que daí resulta. A potência mecânica que um motor de indução trifásico oferece depende dos parâmetros da alimentação AC, mas é fortemente influenciada pela carga mecânica e por perdas eletromagnéticas no estator e no rotor. Com a frequência da corrente fornecida pelo controlador, pode-se calcular a velocidade do campo girante (chamada velocidade de sincronismo) e, dividindo pelo número de pares de polos (característica do motor), obtém-se a velocidade do rotor no vazio. No entanto, essa velocidade corresponde apenas à situação de não haver carga no veio, não havendo escorregamento. No caso real, é necessário estudar o binário exigido pela mota, tendo em conta fatores como a força motriz, peso da mota e do piloto e inclinações da pista, de modo a determinar uma aproximação geral do escorregamento no motor. Esta abordagem mostra-se portanto bastante mais complicada que a anterior.

Uma terceira alternativa é calcular o número de RPM usando o valor da velocidade linear da mota. Ao contrário das motas a combustão que têm uma caixa de velocidades, a roda traseira da TLM04e está diretamente ligada ao motor através da corrente, já que a velocidade do motor é regulada pelo controlador. Isto significa que a rotação do motor e a velocidade angular da roda são diretamente proporcionais, não dependendo da "mudança". É de notar que, para obter resultados de confiança usando este método, convém realmente medir a velocidade com base na rotação de algum elemento na mota (por exemplo com um encoder ou um Wheel Speed Sensor, como descrito na secção 1). Isto porque obter o RPM do motor a partir do GPS seria pouco coerente.

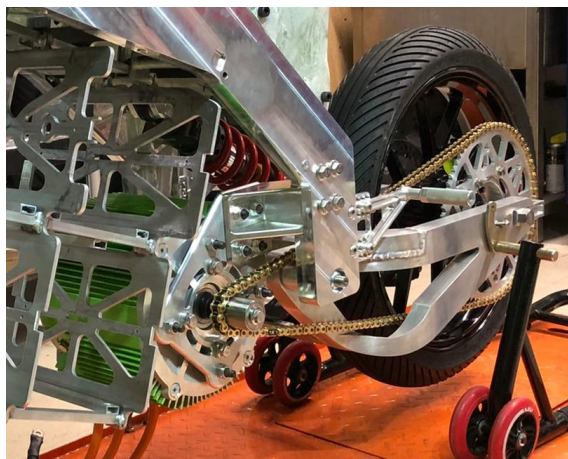


Figura 18: TLM03e

10 Correntes de Alimentação do Motor

O motor usado no protótipo é uma máquina síncrona trifásica, cujo rotor é constituído por ímanes permanentes, enquanto que o estator cria um campo magnético girante. Neste tipo de motor, o estator é formado por vários enrolamentos ligados a uma rede trifásica. Na verdade, os enrolamentos são feitos a partir de três cabos, sendo cada um deles alimentado por uma fase diferente, e devidamente configurados para que a soma de todas as contribuições vetoriais do campo magnético em cada enrolamento dê origem a um campo girante.

Apesar de o motor consumir energia na forma de corrente alternada trifásica, este e todos os outros sistemas elétricos são alimentados pelo acumulador que é uma fonte de corrente contínua. É o controlador que faz a conversão de DC para AC através de inversores trifásicos e utilizando PWM (*Pulse Width Modulation*). Ou seja, com um sinal digital é possível descrever aproximadamente uma sinusóide alterando o *duty cycle* e invertendo o sentido da tensão. Por sua vez, cada fase do motor recebe uma tensão alternada, formando um sistema de tensões equilibradas, isto é, as três ondas têm a mesma amplitude e estão desfasadas de 120° . E atendendo a que as impedâncias são iguais nas três fases do motor (cargas equilibradas), as correntes serão também equilibradas.

O controlador é responsável por determinar a corrente necessária de acordo com o torque exigido ao motor e, por sua vez, fornecer essa corrente a cada fase.

Em termos de telemetria, interessa-nos apenas saber o valor RMS da corrente, isto é, o valor eficaz da onda. Geralmente, o próprio controlador inclui a medição interna da corrente de saída, sendo o seu valor acessível através do CAN. Caso isso não aconteça, é ainda possível calcular a corrente com base no valor RMS da tensão na linha e da impedância dos enrolamentos do estator.

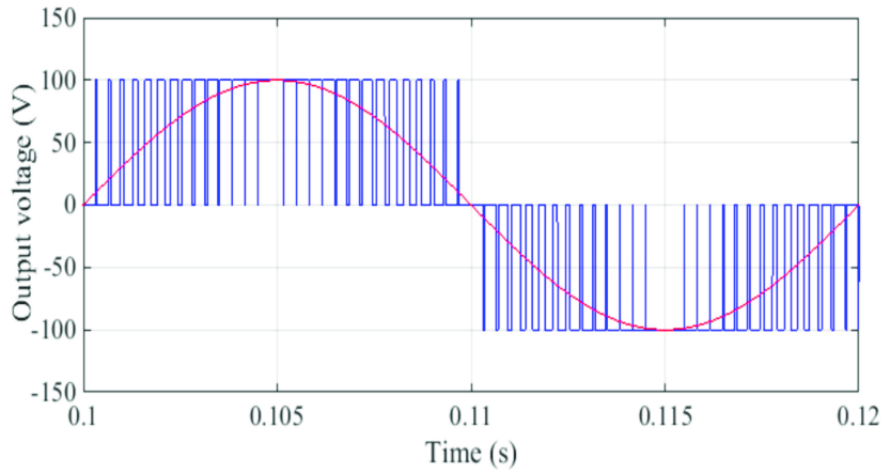


Figura 19: PWM

11 Percentagem de Acelerador e Travão

De modo a melhor compreender o comportamento da mota em resposta aos comandos do piloto, é preciso monitorizar aspetos como a aceleração e travagem, bem como a intensidade que lhes é imposta. Assim, convém determinar a razão ou percentagem associada aos controlos do travão e do acelerador.

Quanto à aceleração, a solução torna-se bastante simples, visto que o próprio manípulo do acelerador que será usado no protótipo já consiste num potenciómetro. A maior ou menor aceleração exigida ao motor é dada pela percentagem do acelerador, cujo valor se obtém através desse potenciómetro de acordo com a amplitude de rotação imposta ao manípulo. Isto resulta num sinal analógico recebido pelo controlador, com o propósito de regular a velocidade do motor conforme a tensão desse sinal.



Figura 20: Manípulo do Acelerador

Para obter os valores referentes ao acelerador não é necessário, portanto, recorrer a dispositivos/sensores adicionais para além do que já foi implementado nos protótipos anteriores. Como os três fios do potenciômetro são ligados diretamente ao controlador, uma abordagem simples seria fazer um *bypass* do wiper para a placa de telemetria e ler diretamente o sinal analógico com um ADC do microcontrolador. Há que ter em atenção que o potenciômetro do manípulo deve usar o mesmo *Ground* que o *Low Voltage System*, caso contrário existiria uma voltagem de *offset* a interferir com as medições. Um problema que poderia surgir é caso de a gama de tensões esperada no sensor não coincidir entre os instrumentos de medição. Por exemplo, enquanto o MCU espera receber valores entre os 0V e os 3.3V, alguns controladores usam voltagens dos 0V aos 10V. Neste caso, não se pode ligar diretamente os nós e, embora seja possível solucionar este problema, torna-se desnecessariamente mais complexo.

Uma outra alternativa mais elegante é utilizar os valores medidos pelo controlador, extraindo-os através do CAN. Desta forma não será necessário fazer qualquer alteração nos cabos ou no hardware para medir este parâmetro. O controlador, após interpretar o sinal analógico do wiper, converte-o para um valor digital, de por exemplo 1 byte, e de seguida envia-o para a placa de telemetria sob a forma de um inteiro de 0 a 255, a partir do qual se obtém a percentagem.

No que toca à percentagem de travagem, este parâmetro também pode ser determinado com recurso a um potenciômetro, medindo a posição da alavanca. Esse sensor pode vir também incluído no próprio travão, ou pode ter de ser incorporado à parte. O valor da percentagem pode ser obtido da mesma forma descrita no parágrafo anterior, visto que a maior parte dos controladores inclui terminais para o potenciômetro do travão. Em alternativa, poder-se-ia usar um transdutor de pressão, que é um sensor capaz de medir a pressão do óleo do travão, retornando um sinal analógico. No entanto, um potenciômetro parece ser a opção mais fiável.

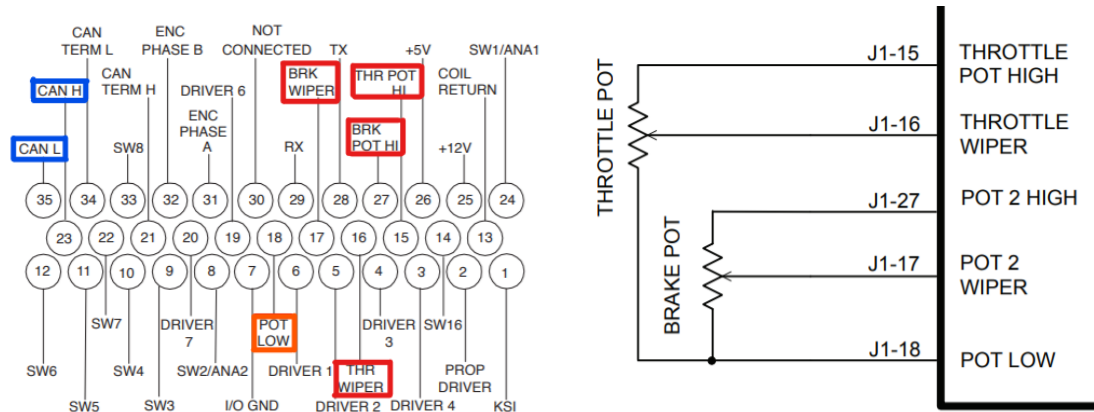


Figura 21: Terminais dos pot. no controlador

12 Extensómetros

Um extensómetro é um dispositivo utilizado para medir a deformação de uma estrutura a partir da variação da resistência elétrica de um condutor. Este aparelho goza da segunda lei de Ohm, $R = \rho \frac{L}{A}$, desprezando o alargamento da secção transversal A e considerando que a resistividade ρ do material é insensível à deformação. Assim verifica-se uma relação praticamente linear entre a variação da resistência e a variação do comprimento do condutor.

Com o objetivo de minimizar o efeito da extensão lateral vista pelo extensómetro, este dispositivo é construído com a forma mostrada na figura 22, tornando-o quase indiferente às forças transversais que atuarem na estrutura, mas sensível a deformações longitudinais. Isto é importante pois permite-nos focar em cada componente direcional das forças a que o objeto está sujeito. Este sensor vem geralmente incorporado numa película adesiva para assegurar que o condutor sofre as mesmas tensões que a estrutura.

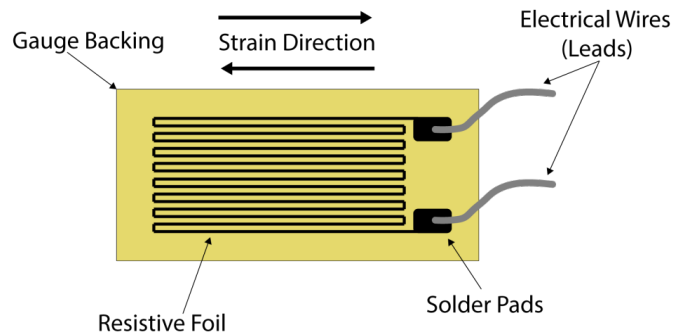


Figura 22: Extensómetro Elétrico

A variação da resistência sentida por um extensómetro é bastante pequena, tomando valores de ordem de grandeza entre 10^{-4} e $10^{-2}\Omega$. Por este motivo, é necessário um método bastante preciso para medir a resistência, sendo que geralmente se usa uma Ponte de Wheatstone.

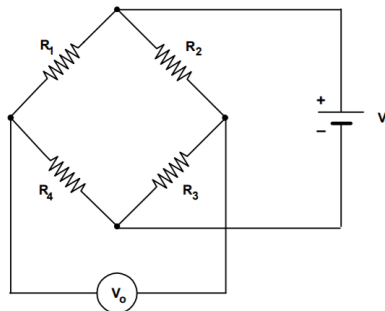


Figura 23: Circuito Ponte de Wheatstone

A seguinte tabela mostra as diferentes configurações possíveis para a implementação de extensómetros, recorrendo à ponte de Wheatstone, bem como as expressões físicas que descrevem o respetivo sinal de saída. K_G é o fator de sensibilidade do extensómetro e ϵ diz respeito à deformação da estrutura.


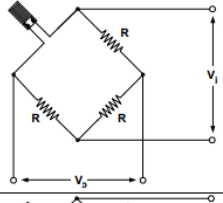

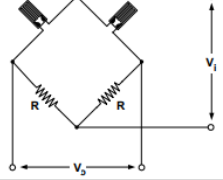

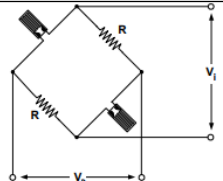
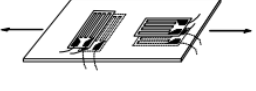
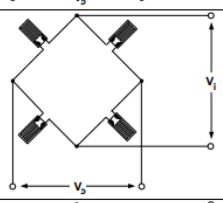
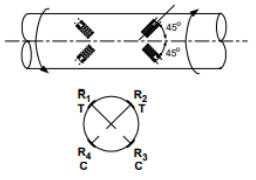
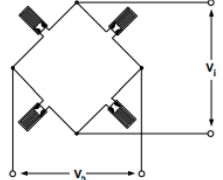
Nº	Configuração	S.G. ativos	Configuração da ponte	Sinal de saída
1		1		$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K_G \epsilon}{4}$
2		2		$\frac{V_o}{V_i} = \frac{(1+\nu)K_G \epsilon}{4}$
3		2		$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K_G \epsilon}{2}$
4		4		$\frac{V_o}{V_i} = \frac{2 \cdot (1+\nu)K_G \epsilon}{4}$
5		4		$\frac{V_o}{V_i} = K_G \cdot \epsilon$

Figura 24: Configurações

A configuração deve ser escolhida de acordo com o respetivo propósito e tipo de medição desejada. A tensão de entrada V_i é fixa e fornecida pela placa e a tensão de saída V_o varia perante a deformação e deve ser medida de modo a determinar essa grandeza. No entanto, visto que se trata de uma diferença de potencial relativamente baixa, o microcontrolador pode não ser capaz de fazer uma medição suficientemente precisa. Por este motivo, é necessário recorrer a outro aparelho de medida, como por exemplo um módulo Nanoshield LoadCell, que consiste num

shield que inclui um amplificador, filtro e um ADC de 20 bits para obter uma alta resolução.

Quanto ao preço de um extensômetro, os valores podem variar bastante com o fabricante, precisão, compensação de temperatura, entre outros, mas é geralmente um produto bastante caro, rondando entre 100€ e 200€. Por exemplo, os modelos da série LY4x que funcionam apenas numa direção (idênticos ao da figura 22) custam à volta de 105€. Já modelos da série VY4x que apresentam 4 extensómetros formando uma ponte Wheatstone completa têm custos acima de 250€.

Para concluir, este sensor tem relativamente pouca importância para o projeto, exige hardware extra e é dispendioso, não sendo uma prioridade no protótipo.

13 Tubo de Pitot

O tubo de Pitot é um instrumento de medição capaz de medir simultaneamente a pressão estática e a pressão de estagnação num fluido de forma a poder determinar a velocidade do fluxo do mesmo. Este dispositivo é, geralmente, utilizado em modelos físicos em laboratório, em redes de abastecimento de água, na medição de caudais e, principalmente, na medição da velocidade de aviões. Relativamente à TLM04e, serviria o propósito de estimar a velocidade do vento de modo a ter uma ideia do seu impacto na performance da moto.

Como foi dito anteriormente, um tubo de Pitot funciona através de medições de dois tipos de pressão. O aparelho consiste num tubo instalado paralelamente ao vento relativo e com um orifício voltado diretamente para o fluxo de ar, o que lhe permite aferir a pressão total (também chamada de pressão de estagnação). Em seguida, compara esse valor com a pressão estática, que não é afetada pela velocidade da moto. No uso deste dispositivo em aeronaves, a pressão estática é um parâmetro que varia muito consoante a altitude, no entanto, no nosso caso, a pressão à superfície terrestre é bastante uniforme (estando apenas sujeita a condições climáticas, que têm pouco peso nesse valor). Segundo a equação de Bernoulli da Mecânica dos fluidos, a pressão total é igual à soma da pressão estática com a pressão dinâmica, estando essa última dependente da velocidade do fluxo.

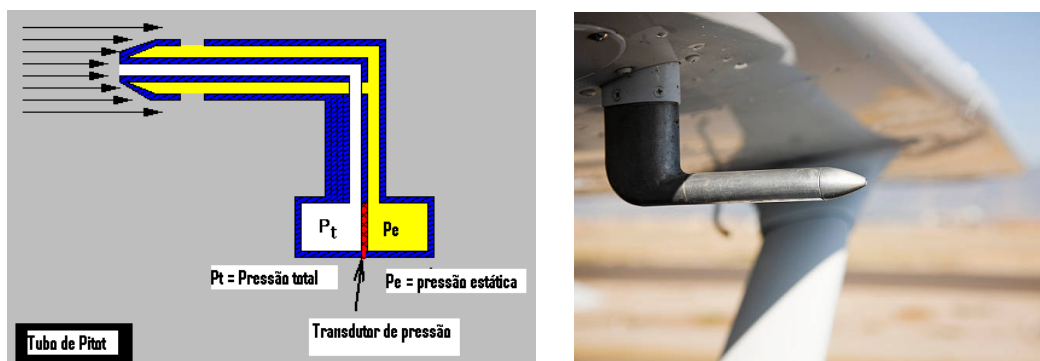


Figura 25: Tubo de Pitot

A implementação de um tubo de Pitot numa moto pode, no entanto, gerar medições pouco precisas ou até enganadoras dependendo do lugar onde é instalado. O dispositivo deve ser colocado numa zona onde o ar não sofra grandes perturbações causadas pelo deslocamento da moto. Um exemplo análogo é visto em alguns carros de Formula 1 que usam tubos de Pitot pelos mesmos motivos e os mesmos são colocados no topo de uma viga para que a medição não seja afetada pelo próprio movimento do carro no ar. Contudo, no caso de um motociclo, as opções são bastante mais escassas.



Figura 26: Tubo de Pitot num Formula 1

A forma mais simples e compacta de implementar este sensor é comprar um conjunto que inclui um tubo de Pitot e um *digital airspeed sensor*, que estão ligados através de duas intubações. O airspeed sensor é responsável por determinar a diferença de pressão e, de seguida, retorna um sinal analógico proporcional à pressão dinâmica do fluxo de ar. Existem opções que usam I2C (CUAV, Holybro, Matek 4525DO, mRobotics, Qiotek 5033, Matek DLVR), enquanto outras utilizam o protocolo UAVCAN (Matek UAVCAN DLVR, Qiotek UAVCAN 5033). O conjunto com sensor e tubo pode custar à volta de 70€.

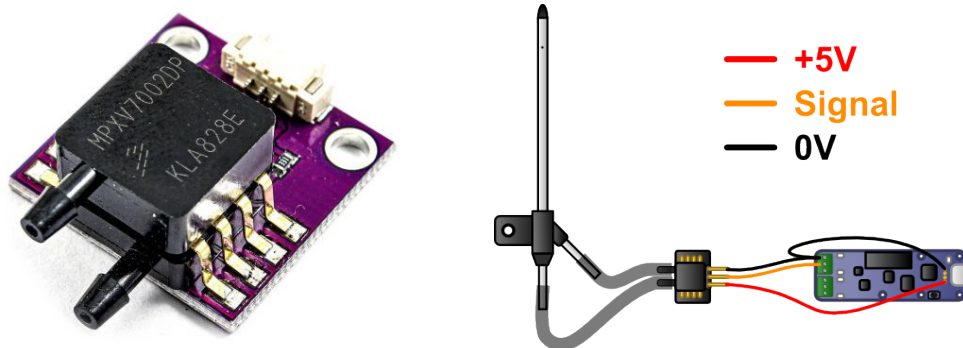


Photo by ElectroPeak

Figura 27: Tubo de Pitot e AirSpeed Sensor

Fontes

Velocidade

[MDPI](#); [Motion Control Tips](#); [Apogee Web](#); [Embedded Related](#); [Arduino](#)

Aceleração

[McLaren](#); [American Piezo](#); [MEMS Exchange](#); [Sparkfun](#); [Science Direct](#); [ST](#); [BoxRepsol](#)

GPS

[Engineers Garage](#); [Sparkfun GPS Basics](#); [Sparkfun Fundamentals](#); [Sparkfun GPS Mouse](#); [Wikipedia NMEA](#); [Artigo sobre EMI](#); [Sparkfun GNSS](#); [GPS World](#); [GNSS OEM](#)

Direção

[Squids Arduino](#); [Thomson Linear Motion](#); [Bóson Treinamentos](#); [HI Tecnologia](#); [Dynapar](#)

Travel das Suspensões

[dataMC](#); [FSAE](#); [KA Sensors](#); [AiM Shop](#)

Inclinação da Mota

[Unicentro](#); [Artigo "Roll Angle Estimation for Motorcycles"](#); [Artigo "Real-Time Roll Angle Estimation for Two-Wheeled Vehicles"](#)

Pitch

[Motorcyclist](#); [Artigo "Derivation of a pitch angle value for the motorcycle"](#); [Springer Link](#)

Informações sobre Controladores

[Manual Sevcon Gen 4](#); [Documentação CURTIS 1239](#); [Spec. Sheet CURTIS 1239](#); [EV West](#)

Informações sobre Motores

[Datasheet Engiro 205A-04010-ABC](#)

Extensómetros

[Artigo "Extensômetros Elétricos"](#); [HBM](#)

Tubos de Pitot

Projeto "Tubo de Pitot" (UNESP); Cultura Aeronáutica; Slides Universidade de Coimbra;
Auto123

