

4

Estudo do Equipamento de Aquisição de Dados

Para realizar a reconstrução de traçados a partir da coleta de dados do veículo foi necessário primeiro escolher um equipamento de aquisição de dados veiculares que tivesse um preço acessível e que fizesse as medições necessárias dentro de uma margem aceitável de exatidão e que também pudesse ser testado em qualquer tipo de veículo popular.

Via de regra, quanto maior a exatidão de um equipamento de medição maior será o seu preço. Portanto, foi feita uma pesquisa de mercado com os tipos de equipamento disponíveis no mercado, levando em consideração a natureza do mensurando e o preço.

Devido ao seu melhor custo benefício, o equipamento escolhido foi o MQ200-PRO do fabricante MaxQData, que não chega a ser um equipamento profissional, mas pode ser considerado semi-profissional, pois já está sendo testado em carros de corrida de competições como a Nascar e vem obtendo excelentes resultados. Seu arquivo de calibração, bem como as características técnicas dadas pelo fabricante, estão no **Anexo 2**.

Resolvido o problema do equipamento, o trabalho concentrou-se no entendimento e estudo mais aprofundado do sistema como um todo. De acordo com os dados do fabricante, ele tem as seguintes características técnicas:

- Acelerômetros internos (sensor inercial) nos 3 eixos que medem as acelerações até 6G;
- Girômetros internos (sensor inercial) nos 3 eixos que calculam as taxas de *Roll*, *Pitch* e *Yaw*;
- Leitura de dados com entrada OBD-II;
- Calcula a Potência;
- Mede a Altitude;
- Módulo externo de GPS, medindo velocidade, latitude e longitude;
- Tempo de gravação limitado apenas pela memória de 32MB, correspondente a 20 horas de gravação;

- Software tanto para *Palm Top* quanto para *notebook*. Também exporta os arquivos para o Excel;
- Envia automaticamente os arquivos por e-mail e também para o celular (caso tenha conexão sem fio);
- Inicialização automática da gravação de dados baseada na velocidade do veículo;
- 12 canais analógicos e 6 entradas de pulso;
- 100 Hz de amostragem;
- Realiza os seguintes tipos de ensaios:
 - *Autocrossing*: traça mapas, tem sincronismo do segmento, mede aceleração, frenagem e velocidade, faz revisão imediata dos dados sem a necessidade de se parar o carro;
 - Corridas: visualizar as medições em tempo real, traçar mapas, plotar voltas e segmentos calculados pelo GPS, contar as voltas, realizar medição contínua das voltas, da aceleração, da frenagem e da velocidade;
 - Estradas convencionais: Plota Tempo X Velocidade (0-60, 5-60, 50-70, 0-100, ...) e Tempo X Distância (60', 330', 1/8 milha, 1000', ¼ milha).

O equipamento de aquisição de dados já vem equipado com sensores inerciais internos (girômetros e acelerômetros, que formam uma central inercial) e com um módulo GPS externo (*Global Position System* – Sistema de Posicionamento Global). Com isso, tem-se um sistema bastante compacto que contém todos os sensores necessários para fazer a aquisição dos dados.

O que se quer obter são os dados do veículo em funcionamento (velocidade longitudinal e aceleração lateral), portanto, pode-se dizer que a aquisição será feita durante a navegação do veículo. Para um melhor entendimento dos componentes utilizados para fazer as medições, os próximos tópicos ilustrarão uma breve explicação de cada um deles.

4.1. Princípio do funcionamento do GPS

O GPS (sigla em Inglês para *Global Position System*) - Sistema de Posicionamento Global, é um sistema de rádio navegação desenvolvido pelo

Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (DoD - *Department of Defense*), com o objetivo de ser seu principal sistema de navegação. O GPS é um sistema de abrangência global e sua concepção permite que um usuário, em qualquer local da superfície terrestre, ou próximo a ela, tenha a sua disposição no mínimo quatro satélites para serem rastreados, permitindo que se realize um posicionamento em tempo real. O princípio básico de navegação pelo GPS consiste na medida de distâncias entre o usuário (antena-satélite e receptor-usuário) e quatro satélites. Se as coordenadas dos satélites são conhecidas, num sistema de referência adequado, é possível calcular as coordenadas da antena do usuário no mesmo sistema de referência dos satélites. Essa operação é baseada em um princípio matemático chamado trilateração.

A trilateração é um método de determinação das posições relativas de objetos usando a geometria dos triângulos de modo similar a triangulação, só que a trilateração 2D utiliza as posições conhecidas de dois ou mais pontos de referência e a distância medida entre o objeto e cada ponto de referência. Já a triangulação usa medidas de ângulos junto com pelo menos uma distância conhecida, para calcular a posição do objeto.

A trilateração 3D pode parecer um pouco complicada, então fica mais fácil de entender explicando primeiro a trilateração 2D. Ela é a intersecção entre distâncias conhecidas (distâncias até os satélites) para achar o ponto desejado desconhecido. Só que para a trilateração 3D, ao invés de círculos de raios conhecidos, são formadas esferas com esses raios.

Para melhor entender, fazendo uma triangulação 2D, como ilustrada na **Figura 1**, pode-se analisar que os centros dos círculos A, B e C, formados pelos raios r_a , r_b e r_c são as posições de cada satélite, portanto, achando os pontos de intersecção desses círculos, acha-se o ponto P desejado onde está o usuário do GPS.

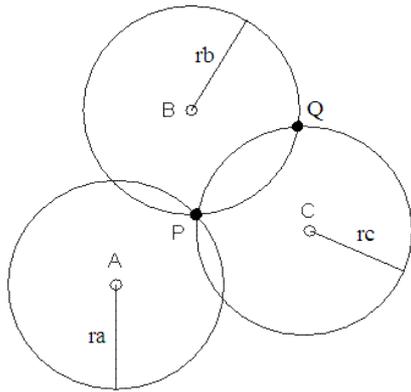


Figura 1 – Trilateração 2D (Bidimensional).

Porém, mesmo o GPS tem suas limitações e é preciso conhecer no mínimo duas informações: posição de pelo menos quatro satélites próximos do usuário e a distância entre o usuário e a cada um desses satélites.

4.2. Princípio do funcionamento do acelerômetro

Acelerômetros são transdutores que medem aceleração. No equipamento utilizado, são medidas as acelerações longitudinal, lateral e vertical do veículo através de acelerômetros eletrônicos, descritos adiante, mas cujo princípio básico de funcionamento é o de um sistema massa-mola-amortecedor, como mostrado na **Figura 2**.

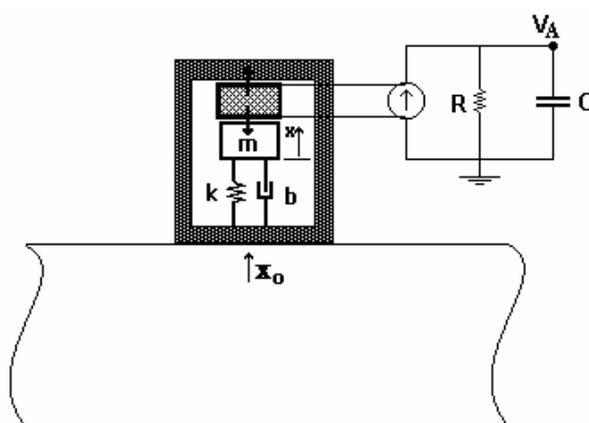


Figura 2 – Acelerômetro (ideal) com sensor piezoelétrico e circuito equivalente.

Devido à excitação de base (x_0) a massa interna do acelerômetro, fixada por uma mola de alta rigidez e com elementos que fornecem baixa dissipação, se

desloca em relação à sua carcaça, e este deslocamento relativo (X_{O-x}) sensibiliza um sensor (piezoelétrico, resistivo ou capacitivo). Quando, por exemplo, o sensor é um cristal piezoelétrico, o sinal de aceleração da base é transformado em uma tensão elétrica proporcional, como esquematizado na **Figura 6**, a partir de um circuito capacitivo-resistivo equivalente, de tal modo que $V_A \cong K_A \ddot{X}_O$, na qual K_A depende dos parâmetros eletro-mecânicos do acelerômetro.

4.3. Princípio do funcionamento do girômetro

O girômetro é um sensor que mede deslocamentos angulares. No equipamento utilizado existem três girômetros eletrônicos internos, descritos adiante. Para um melhor entendimento será explicado o funcionamento de um girômetro mecânico, que em sua forma mais simplificada, pode ser encarado como um rotor montado sob uma estrutura que permite uma liberdade de inclinação do eixo de rotação relativamente à base na qual é fixado, através de uma estrutura articulada, apoiada por molas e amortecedores, como ilustrado na **Figura 3**.

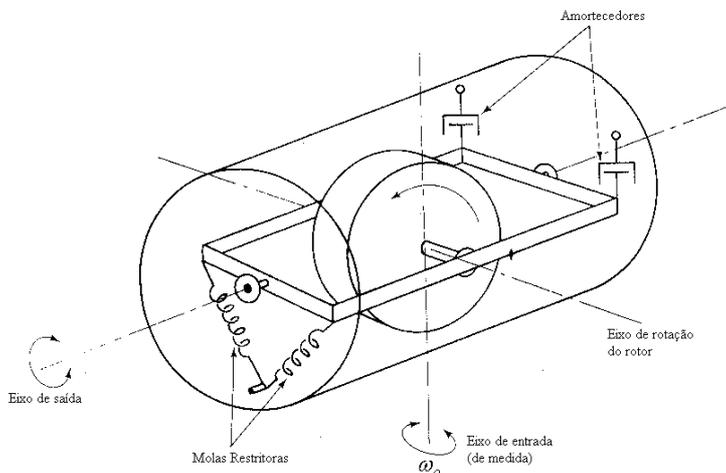


Figura 3 - Esquema de um girômetro mecânico.

O funcionamento de um girômetro está baseado no seguinte fato: um corpo com seu eixo de rotação apontando em determinada direção preserva tal direção em um grau bem maior se comparado com um corpo que não está em rotação. Quando imposta uma velocidade angular de entrada (ω_0), tal corpo apresenta tendência a gerar um movimento de rotação em um eixo perpendicular ao do seu eixo de giro, chamado de precessão.

Uma vez que a taxa de precessão é proporcional à força ou momento aplicado, pode-se relacioná-la à velocidade angular ω_o . Para poder medi-la é necessário restringir a precessão livre do giroscópio, o que se consegue através de elementos mola, como mostrado na **Figura 7**. Conforme ocorre a precessão do giroscópio, a força contra as molas é proporcional à quantidade de movimento angular do disco girante e à força ou momento aplicado no eixo de entrada. Um cursor conectado ao eixo de saída pode ser calibrado para medir as velocidades angulares de entrada. Quando um sensor eletro-mecânico é sensibilizado pelo deslocamento do cursor, tem-se uma tensão de saída proporcional à velocidade de rotação do veículo ao qual o girômetro está conectado, de tal modo que

$$V_G \cong K_G \omega_o$$

na qual K_G depende dos parâmetros eletro-mecânicos do girômetro.

4.4. Central inercial

O equipamento de aquisição de dados aqui descrito possui uma central inercial eletrônica que funciona utilizando os princípios básicos das Leis de Newton. Por isso pode-se chamar a Navegação Inercial de Navegação Newtoniana.

O preceito fundamental da Navegação Inercial reside no fato de que a segunda integral da aceleração é a posição. Ela se baseia em medições das acelerações e velocidades angulares do corpo em movimento em relação a um determinado sistema de referência. Ou seja, a Navegação Inercial é o processo pelo qual se estabelecem informações sobre posição, velocidade, atitude (posição de um corpo que é determinada pela inclinação dos seus eixos com relação a algum sistema de referência) e direção de um veículo com relação a um referencial, utilizando informações fornecidas por sensores inerciais, tais como acelerômetros e girômetros.

Girômetros e acelerômetros podem fornecer os sinais necessários que se deseja medir: enquanto os girômetros medem as rotações em torno dos eixos coordenados (ângulos), os acelerômetros medem as acelerações. Através de processos de integração, torna-se possível obter velocidade e posição, bem como determinar a orientação do corpo.

Já o GPS pode medir a posição, o deslocamento e a velocidade do veículo. Com isso pode-se comparar a velocidade medida pelo GPS com a velocidade integrada a partir dos dados coletados pela central inercial e ver se eles estão compatíveis, confirmando assim o funcionamento dos componentes.

A descrição do funcionamento do acelerômetro e do girômetro nos itens acima não relata o funcionamento de equipamentos eletrônicos, mas por ser de mais fácil entendimento e dos equipamentos eletrônicos utilizarem o mesmo princípio, eles serão exemplificados desta maneira. Em seguida será mostrado o funcionamento de um MEMS (*Microeletromechanical Systems*), que é o sistema utilizado no equipamento da MaxQData.

O equipamento de aquisição de dados aqui utilizado, realiza as medições através de uma central inercial que utiliza tecnologia MEMS (Sistema Micro-Eleto-Mecânico), que consiste num equipamento que contém acelerômetros e girômetros eletrônicos para os três eixos coordenados. A **Figura 4** ilustra um esquema geral do que é possível se obter utilizando uma Unidade de Medição Inercial – UMI (ou em Inglês IMU – *Inertial Measurement Unit*).

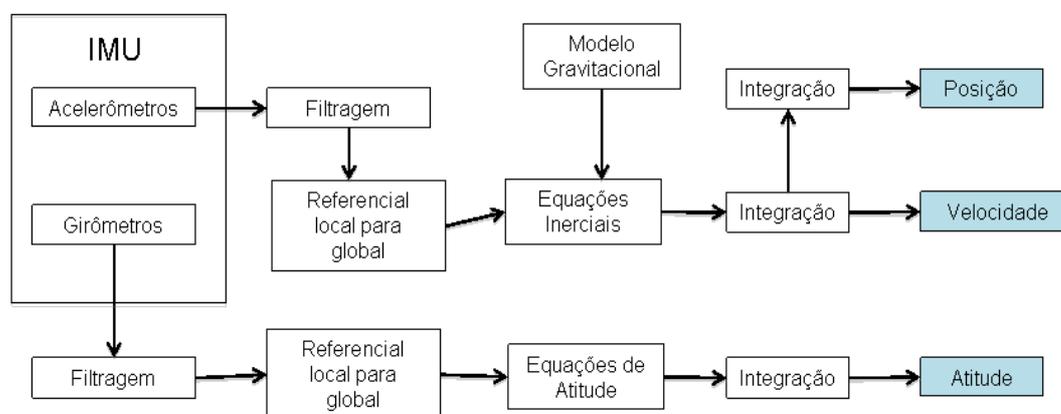


Figura 4 – Esquema Geral de utilização de uma UMI ou IMU.

Para um melhor entendimento dos componentes utilizados para fazer as medições, os próximos tópicos ilustrarão uma breve explicação de cada um deles.

4.5. MEMS - Sistemas Micro-Eleto-Mecânicos

Sistema Micro-Eleto-Mecânico (MEMS) é uma tecnologia que combina componentes computacionais com mecânica microscópica tais como, sensores, válvulas, rodas dentadas, espelhos e atuadores incorporados em chips semicondutores. Dispositivos MEMS são tipicamente construídos sobre um substrato (*chip*) e podem conter também a eletrônica para interagir com o dispositivo MEMS. Devido à pequena dimensão e massa, os componentes MEMS podem ser acionados eletrostaticamente (efeitos bi-metálicos e/ou piezelétricos).

Os sensores inerciais MEMS (girômetros e acelerômetros) apresentam vantagens em relação ao peso, resistência ao impacto, consumo de energia e custo, pois podem ser fabricados em grande escala.

Os componentes MEMS podem ser observados capacitivamente. Por esta razão eles são projetados com suprimento de energia, comparadores de carga capacitiva, e circuitos condicionadores de sinal. A conexão com o mundo exterior se dá via pacotes de circuitos integrados. O sistema utilizado no equipamento da MaxQData de central inercial é do tipo MEMS.

A tecnologia MEMS foi desenvolvida por volta de 1970, utilizando as novas ferramentas da época, capazes de fazer medições milimétricas. Com isso, foi possível se desenvolver sensores muito mais precisos e confiáveis, de acordo com Grewal & Weill & Andrews [11].

O esquema de aplicação de uma central inercial eletrônica neste trabalho pode ser visto na **Figura 5**. A idéia é de que com a IMU (ou UMI) é possível obter aceleração lateral e velocidade longitudinal, e com isso, utilizar as metodologias escolhidas (Método de Otimização e Método de *Stretching*), que serão mais a frente explicadas, para obter a reconstrução do traçado percorrido. Neste caso ainda tem-se o GPS acoplado para confirmar as medições de posição.

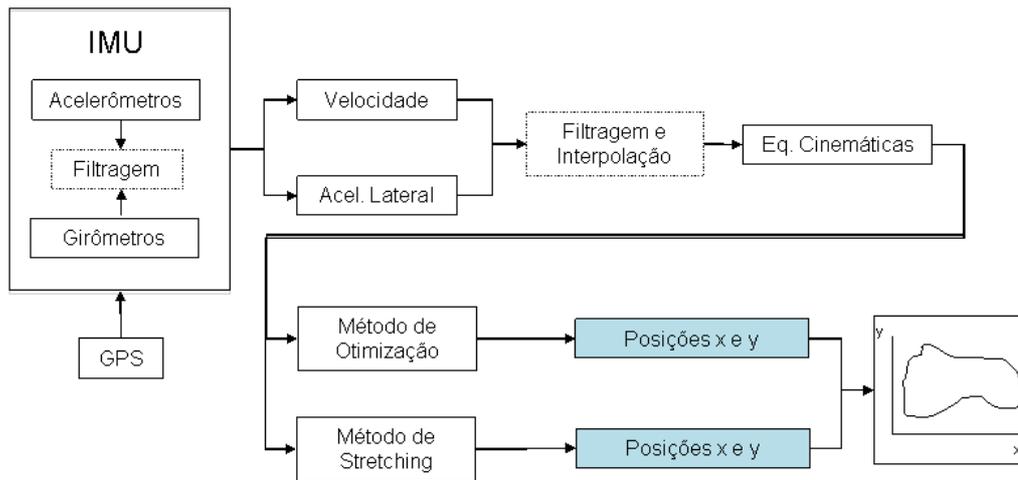


Figura 5 - Esquema de uma Central Inercial com tecnologia MEMS, com a aplicação desejada.

4.5.1. Acelerômetros - MEMS

O uso de milhões de acelerômetros pela indústria automotiva a cada ano é um indicativo do grande sucesso obtido pela tecnologia MEMS. Atualmente, esses dispositivos eletrônicos podem fornecer sinais analógicos (contínuos) ou digitais (discretos), com capacidade de auto-teste e com um custo bem abaixo do custo dos dispositivos criados há uma década atrás.

Dentre alguns dos princípios físicos empregados na transdução, os acelerômetros MEMS utilizam principalmente recursos de detecção capacitiva, piezorresistiva, piezelétrica, eletromagnética e óptica. Sendo que o princípio físico com melhor desempenho tem sido a detecção por meio de medição de variação capacitiva. As razões para isso são a simplicidade do projeto do sensor, não necessitando de materiais considerados exóticos (i.e. elementos raros na natureza), o baixo consumo de energia e a estabilidade aceitável quanto à variação de temperatura.

Embora alguns transdutores capacitivos tenham uma curva característica não linear para a relação capacitância versus deslocamento do corpo de prova, diversas técnicas são empregadas para produzir um sinal de saída com características lineares tais como sinais de realimentação. A saída do sensor pode ser analógica, digital ou modulada por pulso, sendo que os sensores com saída digital são convenientes quando as observações devem ser transmitidas sem a

adição de ruídos ao sinal que representa a medição. A **Figura 6** ilustra de forma simplificada o funcionamento de acelerômetros MEMS, com piezoresistores como sensores de deslocamento.

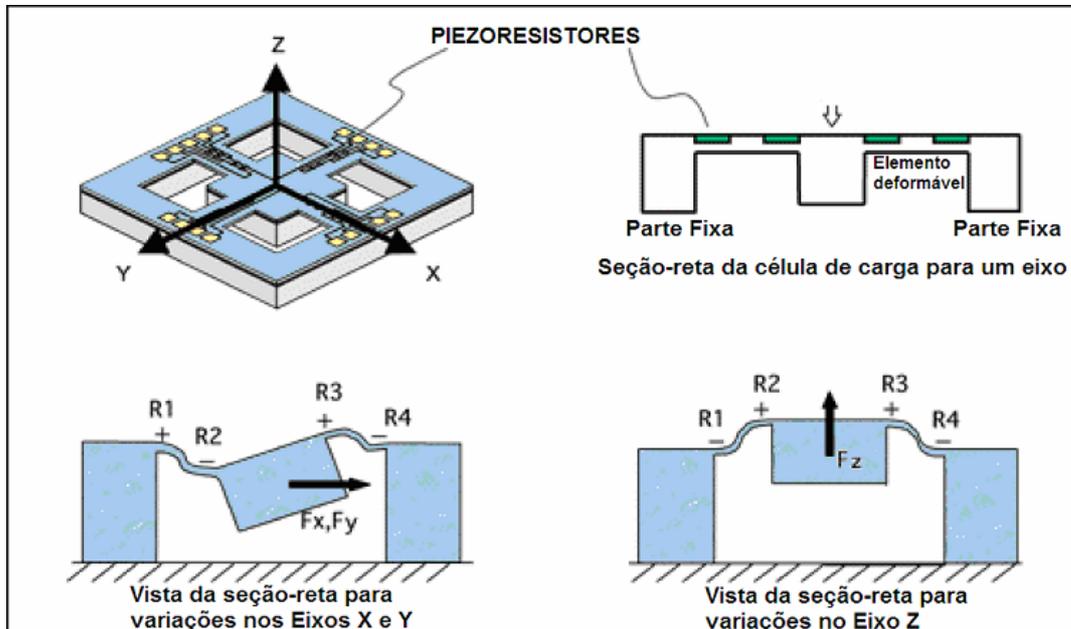


Figura 6 – Acelerômetros MEMS – Piezoresistivos.

Um exemplo de acelerômetro MEMS é a família ADXL (que já se encontra fora de produção, mas apresenta configuração de simples entendimento) da empresa *Analog Devices*. Esses acelerômetros são micro-usinados em superfície utilizando poli-silício para os elementos estruturais e para o corpo de prova. Uma camada de 2 μm de espessura é depositada sobre uma camada de sacrifício de dióxido de silício, que é removida numa etapa final com ácido fluorídrico. As dimensões destes componentes são muito pequenas, como pode ser observado na **Figura 7**.

A avaliação do deslocamento da massa é feita utilizando o sistema capacitivo. A **Figura 8** mostra de forma simplificada o princípio de detecção de movimento (força específica) por meio de variação capacitiva (variação da distância entre as placas que formam micro-capacitores). Este princípio é utilizado no sensor ADXL202. Quando ocorre o movimento do conjunto sensor ocorre a flexão das travessas de fixação do corpo de prova variando a distância entre as placas e, conseqüentemente, ocorre a variação das capacitâncias. Com a

movimentação da massa uma capacitância aumentará com a aproximação a uma das placas e diminuirá em relação à outra devido ao distanciamento simultâneo.

Para se ter uma noção das grandezas envolvidas nesta estrutura, as placas capacitivas dos acelerômetros MEMS podem ter comprimento em torno de 10^{-4} m, com as distâncias entre placas (*gap*) em torno de 10^{-6} m, sendo que as menores variações de capacitância detectáveis estão na ordem de 10^{-18} F. Um corpo de prova típico possui uma massa em torno de 10^{-9} kg.

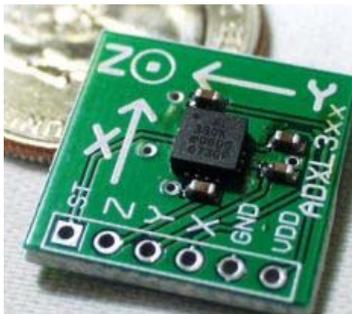


Figura 7 – Acelerômetro Capacitivo Modelo ADXL – 3 eixos.

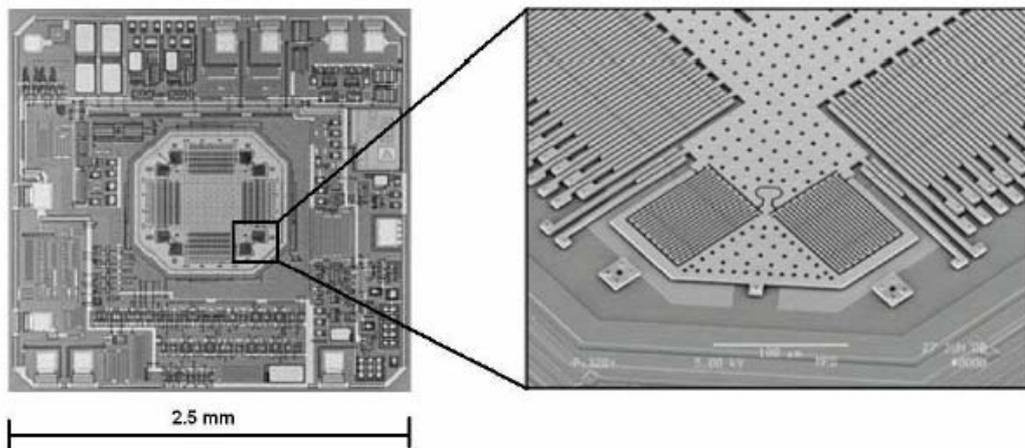


Figura 8 – Estrutura interna de um Acelerômetro da família ADXL.

4.5.2. Girômetros - MEMS

Existem diversos tipos de estruturas mecânicas para aproveitar o Efeito de Coriolis, onde os principais tipos de girômetros são os seguintes:

- *Tuning-fork* (sintonizados);
- *Vibrating-wheel* (com disco vibrante);
- Ressonador *wine glass*;
- Pêndulo de *Foucault*.

Os girômetros *tuning-fork* contêm um par de massas (corpo de prova) que podem ser levadas a oscilar com mesma amplitude, mas em direções opostas. Quando estas massas são rotacionadas a força de Coriolis cria uma vibração ortogonal que pode ser medida. Uma estrutura usual para detecção deste tipo de movimento é um mecanismo em forma de pente, similar à estrutura representada na **Figura 9**.

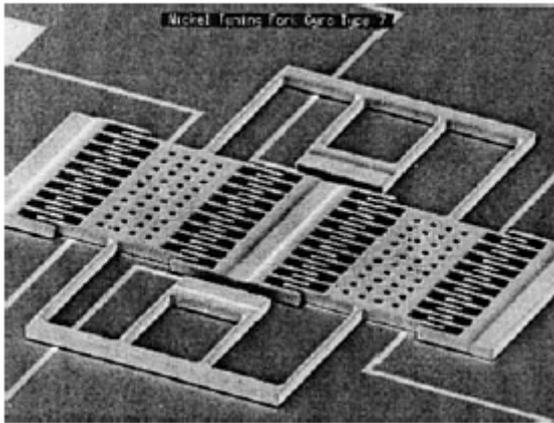


Figura 9 - Estrutura interna do giroscópio com estrutura em forma de pente.

Uma rotação desta estrutura faz com que as massas vibrem para fora do plano e este movimento é percebido devido à variação capacitiva dos elementos da estrutura. Pode-se considerar que a determinação dos modos de vibração de um sensor inercial MEMS é fundamental para a caracterização dos valores dos sinais de saída.

Em um girômetro existe normalmente um modo de vibração que estimula ou conduz a oscilação do sensor e um segundo modo que permite a determinação do movimento de rotação do sensor. Para que a detecção do movimento de rotação seja eficiente é importante que não existam outros modos próximos destes dois principais.

A empresa *Analog Devices* desenvolveu vários sensores baseados em estruturas *tuning-fork*. Ela fabrica a família de dispositivos denominada ADXRS composta por girômetros que fornecem a integração de velocidades angulares. A **Figura 10** mostra a estrutura interna de um giroscópio deste tipo.

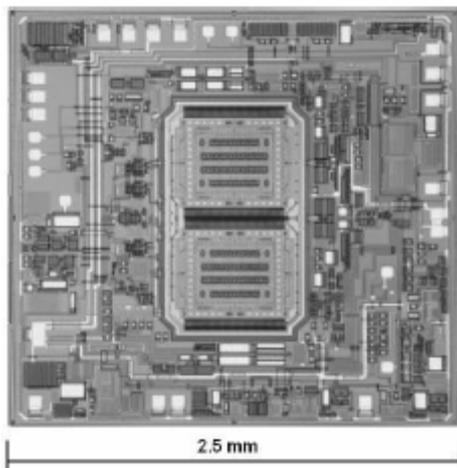


Figura 10 - Aspecto da estrutura interna de um giroscópio da família ADXRS.

Nos girômetros *vibrantig-wheel* um rotor (disco) é levado a oscilar em torno do seu eixo de simetria e uma rotação em torno dos eixos do plano de oscilação resulta numa inclinação do rotor. Esta mudança de posição pode ser detectada por eletrodos capacitivos colocados embaixo do rotor. É possível estabelecer dois eixos ortogonais de medição com um único rotor oscilante. Um girômetro MEMS com rotor oscilante e micro-usinado (usinagem em superfície cristalina) em polissilício é representado pela **Figura 11**.

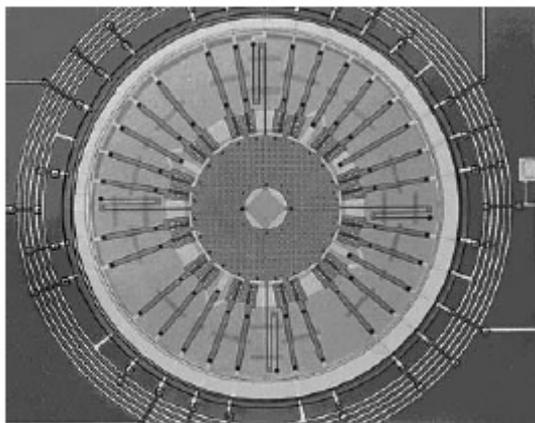


Figura 11 – Girômetro com rotor oscilante.

Os girômetros do tipo ressonador *wine glass*, ilustrado na **Figura 12**, possuem um anel onde pontos nodais indicam ângulo de rotação. Os modos de ressonância são bem separados, mas mesmo assim alguma sintonia fina pode ser necessária devido às imperfeições geradas durante o processo de fabricação. O sinal de saída deste sensor se comporta como um indicador de velocidade angular.

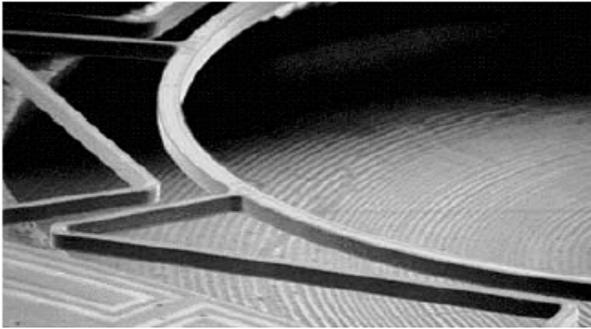


Figura 12 – Detalhes da estrutura de um Girômetro ressonador *wine glass*.

Os girômetros por pêndulo de *Foucault* são baseados em hastes oscilantes que são orientadas, em geral, no sentido ortogonal ao plano da base do substrato cristalino de usinagem. Tais dispositivos tornam-se difíceis de fabricar com tecnologia de usinagem de superfície, devido à espessura reduzida de tais substratos cristalinos.