



República Federativa do Brasil  
Ministério da Indústria, Comércio Exterior  
e Serviços  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

**(11) PI 0412973-3 B1**



**(22) Data do Depósito: 13/08/2004**

**(45) Data de Concessão: 27/03/2018**

**(54) Título:** CABEÇA DE TACO DE GOLFE E MÉTODO PARA REDUZIR O COEFICIENTE EFETIVO DE ATRITO ENTRE A FACE DE UMA CABEÇA DE TACO DE GOLFE E UMA BOLA DE GOLFE

**(51) Int.Cl.: A63B 53/04**

**(30) Prioridade Unionista:** 09/08/2004 US 10/915,804, 14/08/2003 US 60/494,739

**(73) Titular(es):** HEAD TECHNOLOGY GMBH, LTD.

**(72) Inventor(es):** JASON HORODEZKY; NESBITT W. HAGOOD

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "**CABEÇA DE TACO DE GOLFE E MÉTODO PARA REDUZIR O COEFICIENTE EFETIVO DE ATRITO ENTRE A FACE DE UMA CABEÇA DE TACO DE GOLFE E UMA BOLA DE GOLFE**".

CAMPO DA INVENÇÃO

[001] A presente invenção se refere ao campo do projeto avançado de equipamentos esportivos, e em particular ao projeto e operação de um sistema de cabeça de taco de golfe para o controle do impacto entre a cabeça do taco e a bola de golfe.

TÉCNICA ANTERIOR

[002] Referências Cruzadas com os Pedidos Relacionados. O presente pedido reivindica prioridade do Pedido de Patente Provisória Norte-Americana Série N<sup>5</sup> 60/494.739 depositado em 14 de agosto de 2003 e do Pedido de Patente de Utilidade Norte-Americana Série N-10/915.804 depositado em 9 de agosto de 2004.

[003] A presente invenção pretende alcançar um aumento da precisão e da distância de um taco de golfe (ex., um *driver* [taco de madeira]) pela aplicação de técnicas de controle e tecnologia de atuação para o projeto do taco. Têm havido muitos aperfeiçoamentos durante os anos e que tiveram impacto mensurável sobre a precisão e a distância que um jogador de golfe pode alcançar. Esses aperfeiçoamentos focalizaram tipicamente o projeto de sistemas passivos; aqueles que não têm a capacidade de alterar quaisquer de seus parâmetros físicos sob controle ativo durante o *swing* [movimento de tacada] e em particular, durante o evento de impacto com a bola de golfe. Aperfeiçoamentos de desempenho tipicamente passivos, como a cabeça e o volume da cabeça, o peso e a distribuição e os componentes resultantes do tensor de inércia, espessura da face e perfil da espessura, curvaturas de face e localização do CG [centro de gravidade], pertencem todos à seleção dos parâmetros físicos e materiais ideais cons-

tantes para o taco de golfe. A presente invenção se refere ao desenvolvimento de um sistema ativo onde os parâmetros críticos do taco de golfe e da cabeça (por exemplo, a posição/forma/curvatura superficial ou o coeficiente efetivo de atrito ou rigidez de face) podem ser controlados seletivamente em resposta ao presente estado do sistema físico cabeça-bola. Esses estados podem ser a velocidade da cabeça, força de impacto, intensidade, duração do impacto e *timing*, localização absoluta da cabeça ou localização relativa da bola na face, orientação da cabeça com relação à bola e trajetória do *swing* ou parâmetros, como a deformação física da face ou quaisquer das numerosas condições físicas ou eletricamente mensuráveis.

[004] A presente invenção se refere ao campo da tecnologia de controles e, em particular, às tecnologias de atuação de sistemas estruturais ou elásticos e aos algoritmos para esses sistemas. Ver por exemplo: Fuller, C. R. et. al. , Active Control of Vibration Academic Press, San Diego, CA 1996. Uma configuração particular de um sistema controlado se refere a um controle de atrito usando vibração ultrassônica (Katoh). Uma configuração alternativa de um sistema controlado se refere à mudança de rigidez efetiva da face para o controle de impacto com a bola. A presente invenção também se refere ao conceito da coleta da energia piezelétrica e/ou a coleta da energia simultânea dos sistemas mecânicos e de suas atuações. A coleta da energia piezelétrica é descrita nas seguintes Patentes Norte-Americanas: 4.504.761; 4.442.372; 5.512.795; 4.595.856; 4.387.318; 4.091.302; 3.819.963; 4.467.236; 5.552.657 e 5.703.474.

[005] O impacto entre a bola e a cabeça pode ser interpretado em termos do impacto idealizado entre dois corpos elásticos, cada um tendo a liberdade de transladar e girar no espaço, isto é, corpos com 6 graus completos de liberdade (DOF), cada qual tendo a capacidade de deformar com o impacto, e cada qual tendo massa totalmente integral e

tensores de inércia. A condição inicial típica desse evento é uma bola estacionária e uma cabeça de alta velocidade que impacta a bola em talvez um ponto excêntrico, substancialmente na face ou substancialmente fora da face da cabeça do taco. O impacto resulta em altas forças, tanto normais como tangenciais às superfícies de contato entre a cabeça e a bola. Essas forças integram-se no tempo para determinar a velocidade e a direção, formando o vetor velocidade e os vetores de giro da bola, depois que esta abandona a face, doravante denominadas de resultantes de impacto. Essas forças de interface são determinadas por muitas propriedades, incluindo a elasticidade dos dois corpos, as propriedades dos materiais e a dissipação, os coeficientes de atrito superficiais, as massas dos corpos e os tensores de inércia.

[006] Algumas dessas propriedades e condições da face podem ser ativamente controladas durante o impacto, resultando na medição de controle nas resultantes de impacto. Por exemplo, em uma configuração específica, a superfície pode ser vibrada de forma ultrassônica sob condições predeterminadas de maneira a ser criado um coeficiente de atrito efetivamente baixo entre a bola e a face, resultando em reduzidos índices de giro e um maior vôo da bola quando existir uma condição de disparo. Uma dessas condições de disparo pode ser as altas forças de impacto bola-cabeça (e a grande deformação da face), indicando um impacto de alta velocidade, quando um giro muito alto possa criar um excesso de elevação aerodinâmica, produzindo uma reduzida distância de vôo.

[007] Em outra configuração, a posição e/ou a orientação da face podem ser ativamente controladas com relação à bola e ao corpo do taco sob condições predeterminadas, de maneira a criar uma melhor apresentação da face à bola, para haver um vôo mais preciso da bola ou para reduzir o giro lateral pela contraposição da rotação da cabeça do taco durante eventos de impactos excêntricos. Uma dessas condições

de disparo pode ser eventos de impacto altamente excêntricos (choques fora de centro) que podem ser detectados pelos sensores de deformação na face ou pelos sensores de aceleração angular no corpo. Esses sinais de sensores podem ser processados de maneira a determinar o movimento necessário da face para compensar e corrigir o vôo resultante da bola.

[008] Em outra configuração, a rigidez efetiva da face durante o impacto pode ser controlada de maneira a produzir um evento de impacto mais desejável. Por exemplo, o sistema pode ser projetado para tornar a face mais rígida durante um impacto duro e torná-la mais macia durante um impacto menos intenso, de maneira a determinar o comportamento da face sob as cargas de impacto do evento em particular. Isso pode ser feito, por exemplo, curto-circuitando ou abrindo os contatos de um transdutor piezelétrico que tenha sido ligado à superfície ou acoplada mecanicamente de outra maneira à face. O piezelétrico é mais macio (baixo módulo) quando é eletricamente curto-circuitado e mais rígido (alto módulo de efetividade) quando tem o circuito aberto. Um sensor ligado à face pode medir uma quantidade proporcional à intensidade do impacto (ex., deflexão da face, alongamento da face, desaceleração da cabeça, etc). No caso de um impacto "duro", o piezelétrico normalmente em curto pode ter o circuito aberto para tornar a face mais rígida, enquanto golpes mais macios resultam quando o circuito coloca o piezelétrico na condição de curto-circuito, tornando-a, portanto, menos rígida.

[009] O disparo pode ser provido por um sensor externo ou pelos transdutores piezelétricos existentes ligados à própria face, disparando o nível de corrente ou de tensão alcançado no transdutor antes do evento de disparo. Como exemplo, os circuitos para a utilização do elemento piezelétrico como sensor de carga podem ser ligados aos contatos do transdutor. Quando a carga atingir um nível crítico, o circuito

pode ser disparado, o que desliga os contatos do circuito, realizando efetivamente a condição de circuito aberto.

[0010] Um elemento crítico para a capacidade de controlar o impacto bola-cabeça é a capacidade de acionar o sistema de maneira vantajosa. Como a cabeça e a bola são um sistema mecânico, esse fato impõe a aplicação de alguma força ou energia térmica ao sistema, de maneira a criar uma alteração em algum atributo físico mecânico. A presente invenção se refere principalmente às técnicas de atuação mecânica.

[0011] A Patente Norte-Americana N- 6.102.426 de Lazarus et. al. , revela o uso de uma placa piezocerâmica em um esqui de maneira a afetar seu desempenho dinâmico, como a limitação de vibrações indesejadas em altas velocidades ou sobre superfícies irregulares. A revelação menciona a aplicação em tacos de golfe para amortecer as vibrações ou para alterar a rigidez da vara ou "para afetar sua cabeça".

[0012] As Patentes Norte-Americanas N— 6.196.935; 6.086.490 e 6.485.380 de Spangler et. al., revelam o uso de placas piezocerâmicas em tacos de golfe de maneira a alterar a rigidez e amortecer as vibrações. A FIG. 9G ilustra a colocação de piezo-elementos em uma cabeça de taco de golfe para capturarem a energia de deformação a ser dissipada em um circuito para realizar o amortecimento.

[0013] A Patente Norte-Americana N<sup>2</sup> 6.048.276 de Vandergrift, revela o uso de dispositivos piezelétricos para dar rigidez à vara de um taco de golfe depois de haver capturado a energia do giro e da flexão da vara.

[0014] O problema da redução do atrito usando vibração ultrassônica é discutido por Katoh no artigo intitulado: "Active Control of Friction Using Ultrasonic Vibration" do *Japanese Journal of Tribology* Vol. 38 N<sup>5</sup> 8 (1993) pp 1019-1025. Ver também K. Adachi et. al "The Micromechanism of Friction Drive with Ultrasonic Wave", *Wear* 194 (1996) pp

137-142.

## SUMÁRIO DA INVENÇÃO

[0015] A presente invenção se refere a um sistema para o controle do evento de impacto entre a bola e a face do taco, usando a atuação e o controle da posição da face ou de propriedades para influenciar a progressão do evento de impacto entre a bola e a face. Em particular, se refere à reutilização da energia gerada e convertida em energia elétrica a partir da energia mecânica do evento de impacto. Essa reutilização controla com vantagem o evento de impacto. Em uma configuração particular, a energia convertida do impacto por um elemento piezelétrico é convertida em deformações/oscilações ultrassônicas da face, que têm a capacidade de reduzir efetivamente os coeficientes de atrito entre a bola e a face. Em uma configuração alternativa, a rigidez da face piezo acoplada sob o impacto é controlada para determinado comportamento quando da ocorrência de parâmetros predeterminados de impacto. Por exemplo, a face é tornada rígida quando existirem choques duros, e macia quando existirem choques de menor intensidade. Todos esses casos se referem igualmente ao *putter* [o embocador], aos *drivers* e *irons* [tacos de aço] , e a cabeça do taco se referirá a todos estes sem exceções.

[0016] O atuador de face pode ser qualquer um dos vários atuadores capazes de converter energia elétrica em energia mecânica. Esses incluem os tipos eletromagnéticos como solenóides, assim como uma família de tecnologias de atuação que usa campos elétricos e magnéticos induzidos para realizarem alterações de dimensões de materiais; eletrostrictivo, piezelétrico, magnetostriktivo, ligas com memória de formato ferromagnético, materiais magnéticos com memória de formato e materiais cerâmicos com memória de formato, ou composto dos materiais acima. Incluídos nos possíveis esquemas de atuação estão os atuadores térmicos que usam aquecimento resistivo ou

ligas de memória de formato que utilizam energia térmica aplicada para induzir uma mudança de fase dentro do material, de maneira a induzir uma resultante mudança ou esforço de dimensões. Todos podem ser usados para converter energia elétrica na deformação de face ou no posicionamento da face de forma controlada.

[0017] Em um determinado sistema que utiliza um atuador puro, deve haver uma fonte de energia elétrica, bateria ou outro gerador elétrico que converta energia de movimento ou de impacto em energia elétrica que é utilizada pelo atuador de face. O sistema pode incluir uma fonte de energia, parte eletrônica e um atuador mecanicamente acoplado à cabeça.

[0018] Em uma outra definição, existe a alternativa de uma classe de sistema no qual um transdutor é acoplado à face. Um transdutor é capaz de gerar energia elétrica a partir da energia mecânica e vice-versa. Exemplos de materiais transdutores incluem o sistema de bobina eletromagnética, materiais piezelétricos e electrostrítivos que operam sob campo elétrico com viés e materiais magnetostrítivos com viés de campo magnético e materiais de ligas com memória de formato ferromagnética e/ou compostos dos materiais acima ou com outros constituintes. Estes serão doravante denominados, em geral, materiais piezelétricos e o uso da palavra piezelétrico não será, de forma alguma, tomado como limitador. Nos sistemas que empregam esses transdutores, o elemento transdutor pode ser acoplado à face, de maneira que a deformação ou o movimento do taco gera energia elétrica que pode ser usada pela função de atuação oposta para controlar os aspectos do impacto cabeça-bola.

[0019] Os atuadores piezelétricos são a classe mais comum de materiais transdutores. De modo geral, mudam o tamanho em resposta ao campo elétrico aplicado e contrariamente geram carga em resposta às cargas e aos esforços aplicados. Podem ser usados tanto como

atuadores acionados eletricamente como geradores elétricos.

[0020] O controle do impacto envolve a colocação de forças na cabeça e/ou na face, de maneira a mudar de maneira vantajosa uma propriedade do sistema que influencia o evento de impacto. Por exemplo, se a força aplicada for proporcional à aceleração de face, então o controle atua para aparentemente aumentar a massa ou a inércia do sistema. Faz isso colocando a mesma força na cabeça que uma massa nesse local colocaria nesse movimento particular de face. A força aplicada pode efetivamente criar forças que simulam as forças elásticas e dissipativas, assim como iniciais do sistema. Por exemplo, se as forças aplicadas no centro da face fossem proporcionais à velocidade e se opusessem à velocidade no centro da face, então atuariam efetivamente como um amortecedor no centro da face e criariam um amortecimento viscoso no centro da face. De maneira similar, se fosse possível aplicar uma força essencialmente proporcional e oposta à deflexão do centro da face, pareceria como uma mola aplicada no centro da face proporcionando efetivamente rigidez à esta. Da mesma forma, se a força fosse proporcional e na direção da deflexão, pareceria então com uma mola negativa aplicada ao centro dessa face - efetivamente amaciando-a. O sistemaativamente controlado (se for possível o controle da força) pode simular vários efeitos dinâmicos diferentes no sistema. O desafio é desenvolver um dispositivo e um sistema que possa colocar aqueles tipos de forças no sistema, mesmo que outras restrições as impeçam. A idéia de aplicar algumas forças que imitem outros tipos de forças e que resultassem de inércias ou de massas é uma manifestação das forças que podem ser aplicadas. Em sistemas de controle desse tipo, pode haver uma relação arbitrária de fases entre a força aplicada e o acionamento e este relacionamento pode depender da frequência. Essencialmente, a função de controle pode ser um sistema dinâmico linear ou não linear entre algum sensor e a força de

saída aplicada pelo atuador. Em um sistema controlado clássico, existe um sistema de controle que coleta a produção do sensor e coloca forças no corpo para alcançar algum efeito desejado. Essa é a área geral do controle dos sistemas dinâmicos e, mais especificamente, do controle estrutural dos sistemas elásticos, sendo bem definida na técnica.

[0021] As oscilações ultrassônicas ou de alta frequência das superfícies em contato podem resultar em coeficientes de atrito menos efetivos entre as duas superfícies. As oscilações devem ter amplitudes e frequências suficientes de forma que as superfícies percam o contato brevemente durante pelo menos uma parte da oscilação. Esse rompimento de contato reduz o coeficiente efetivo de atrito.

[0022] Um atuador acoplado à face do taco pode ser configurado para excitar a oscilação de alta frequência da face quando abastecido com uma entrada elétrica de alta frequência. Se a excitação ocorrer em uma frequência de ressonância ou perto da frequência de ressonância do corpo da face/taco, então a amplitude poderá ser maximizada.

[0023] Em cenários como o do impacto de uma bola de golfe onde as forças normais são altas durante o impacto, a principal exigência é que a aceleração da face longe da bola durante o movimento oscilatório deve ser suficientemente alta de maneira que a bola não possa "se encontrar" e o contato superficial seja rompido. A aceleração é proporcional à amplitude do movimento oscilatório multiplicado pelo quadrado da frequência de excitação. Isso pode ser considerado uma figura de mérito do projeto do sistema de atuação. Como a amplitude de oscilação de um sistema atuado tende a cair devido aos efeitos iniciais do sistema, existe uma troca entre atuar em uma frequência mais alta e atingir a maior amplitude oscilatória possível. A figura de mérito ajuda a balanceá-los de maneira a maximizar o efeito do controle de atrito. Por exemplo, na configuração preferida da presente invenção, foi constatado ser vantajoso excitar um modo superficial de face em 120.000 Hz,

que é acoplado ao acionador de atuação descrito a seguir.

[0024] Nos sistemas em que não existe uma fonte externa de energia, uma parte da energia de impacto (convertida de mecânica para elétrica por um transdutor acoplado à face) pode ser armazenada e devolvida à face sob a forma de excitação ultrassônica de um modo de face de ordem superior, oscilações de alta frequência da face que está bem acoplada ao transdutor. A energia pode ser armazenada no próprio material transdutor, por exemplo, na carga armazenada na capacitância de um material piezelétrico ou pode ser armazenada primariamente em elementos de circuitos auxiliares como capacitores ou indutores de armazenagem, circuitos tanque, etc, que sejam acoplados eletricamente ao transdutor. Depois que o efeito disparador liberar a energia, pode ser configurado um circuito de acionamento elétrico de maneira que, quando conectado ao transdutor, induz uma oscilação de face de alta amplitude que reduz efetivamente o coeficiente de atrito de impacto entre a bola e a face em um ponto crítico no tempo durante o evento de impacto, de forma que o ponto crítico no tempo seja selecionado por um algoritmo de controle. A oscilação da face e o atrito controlado resultam em um controle do giro da bola, que pode ser seletivamente disparado sob determinadas condições de impacto (tais como altos níveis de forças de impacto).

[0025] A velocidade de partida da bola também pode ser controlada pela aplicação de forças à face proporcionais à deflexão da face. Com o sinal adequado, essas forças podem efetivamente amolecer a face aumentando a duração do impacto e, assim, reduzindo a carga de impacto e na deflexão resultante da bola. Essa menor deflexão da bola resulta em uma dissipação reduzida pela deformação inelástica da bola e pela energia recuperável aumentada do evento de impacto, atingindo assim maiores coeficientes de restituição (COR) e maiores velocidades da bola. Em oposição, a energia de impacto convertida em energia

elétrica pode ser dissipada de maneira a reduzir o COR efetivo em cenários selecionados de impacto.

[0026] Pela aplicação eletricamente seletiva de forças para simular os efeitos de conformidade programada, partes da face podem ser feitas para seletivamente deformarem mais do que outras durante o evento de impacto, controlando assim a direção de saída da bola. A direção de saída é controlada uma vez que a velocidade final da bola (velocidade e direção) é determinada pelas forças geradas pelo impacto elástico. A deformação desigual da face (devida à conformidade desbalanceada) altera a direção da reação normal da bola e, portanto, a direção final que a bola tomará. Além desse controle direto da direção da bola, pode ser feito o controle indireto da direção da bola, reduzindo o giro e incluindo o giro lateral e, assim, reduzindo o percurso do alcance de cruzamento. Podem ser obtidas características similares de controle pelo posicionamento ativo de uma face de taco atuada durante o impacto em resposta a uma determinada variável de impacto medida, como a localização do impacto ou a aceleração angular da cabeça (causada pelo impacto excêntrico).

[0027] As forças também podem ser aplicadas à cabeça de maneira a simular os efeitos de um maior momento de inércia. Em outras palavras, as forças seriam similares àquelas que uma outra massa em um determinado local exerceriam na cabeça durante o impacto. Essas forças podem ser disparadas em cenários de tacadas perdidas que resultassem em disparos mais diretos. Por exemplo, uma maneira de fazer isso seria criar uma força na cabeça pela ação com uma massa de reação. O atuador reage entre a cabeça e a massa de reação. Reage de maneira que minimiza a rotação da cabeça sob impacto. Atua para efetivamente aumentar o momento de inércia do corpo e, portanto, manter a face mais direcionada e, dessa forma, o vôo da bola mais direcionado durante o evento de impacto. Como o evento de impacto

tem uma duração finita, pode-se colocar esse tipo de força no corpo dentro da duração finita. Uma coluna central e um anel *bimorph* anular seriam segmentados, de maneira que se pudesse realmente detectar e sentir para que direção a cabeça está se movimentando com relação à massa de reação. Se está para cima, para baixo, para a esquerda ou para a direita, basicamente como a face está girando poderia ser usado como um dado de sensor para que um compensador/controlador permitisse que a força aplicada compensasse o movimento resultante da face. Múltiplos piezo-elementos ou configurações com múltiplos eletrodos em um único elemento piezelétrico permitiria a detecção de uma maior faixa de impactos. Pode-se realmente determinar onde a bola sofre impacto na face e usar os circuitos de controle para assim compensar, por exemplo, girando um pouco a face para compensar a rotação da cabeça durante os impactos excêntricos. Na configuração preferida, existe uma tensão proveniente de um piezo que torna difícil determinar o local do impacto a partir de uma variedade de possíveis locais de impacto. Porém, esta não é necessariamente uma limitação da presente invenção. É possível incluir um piezo uniforme ligado à face onde os eletrodos estão segmentados, para permitir a detecção do local de impacto. Nesse cenário, haveria essencialmente múltiplos elementos piezelétricos ligados à face. Haveria múltiplos eletrodos, por exemplo, em uma disposição quadrada. Por exemplo, poderia haver na realidade nove padrões de eletrodos em disposição quadrada 3 x 3 na parte traseira da face. Aquelas tensões seriam aplicadas em um circuito de controle que determinaria onde a bola impactou e a resultante resposta adequada ao impacto. Alternando a tensão em alguns dos eletrodos dos transdutores em oposição a outros em resposta, poderia determinar a resposta, dependendo do local de impacto.

#### BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

[0028] As várias configurações, características e vantagens da

presente invenção serão doravante mais completamente compreendidas, como resultado de uma descrição detalhada da mesma, na qual serão feitas referências aos seguintes desenhos:

[0029] As FIGs. 1-5 ilustram as várias configurações conceituais da invenção, onde são mostradas diferentes formas de acoplamentos elásticos de um atuador piezelétrico em uma face da cabeça de um taco de golfe;

[0030] As FIGs. 6-8 ilustram as várias configurações conceituais da invenção, onde são mostradas diferentes formas de acoplamentos inerciais de um atuador piezelétrico em uma face da cabeça de um taco de golfe;

[0031] A FIG. 9 ilustra uma configuração conceitual da invenção, onde os transdutores piezelétricos estão dispostos entre a face e o corpo do taco, posicionando a face com relação ao corpo;

[0032] As FIGs. 10a e 10b são diagramas de bloco de um piezo atuador com interruptor e indutor controlados e um circuito de controle;

[0033] A FIG. 11 é um diagrama esquemático do circuito da FIG. 10 mostrando o circuito de controle em maiores detalhes;

[0034] A FIG. 12 é uma apresentação gráfica de um sinal de tensão de saída de atuador sob o impacto da bola, mostrando os históricos de tempo de tensão não disparada e disparada;

[0035] A FIG. 13 é uma apresentação gráfica dos históricos dos parâmetros principais do impacto entre a bola e o taco, mostrando A) a força normal de impacto, B) a força (de atrito) tangencial de impacto, C) os históricos de tempo de tensão do transdutor, D) os históricos de tempo atual do transdutor e E) os históricos do tempo de giro resultante da bola;

[0036] As FIGs. 14-15 são ilustrações em corte de uma cabeça de taco de golfe que emprega a configuração conceitual de piezo-acoplamento da FIG. 2 para reduzir o índice de giro de uma bola de

golfe pela conversão da energia de impacto da bola em uma vibração de face da cabeça de maneira a reduzir o atrito entre a cabeça e a bola de golfe;

[0037] As FIGs. 16a e 16b compreendem em conjunto uma ilustração de uma cabeça de taco de golfe que emprega a configuração conceitual de piezo-acoplamento da FIG. 2, detalhando a placa única removível com a parte eletrônica do sistema;

[0038] As FIGs 17-19 são ilustrações detalhadas do conjunto da face, mostrando o transdutor piezelétrico do hardware de acoplamento da face da configuração conceitual do acoplamento piezelétrico da FIG. 2;

[0039] A FIG. 20 é uma representação gráfica do modelo de atrito para a interação entre a face e a bola;

[0040] A Fig. 21 é uma função de resposta de frequência, mostrando a resposta de tensão de um transdutor piezelétrico de circuito aberto passando por carregamento periódico na face do taco;

[0041] A FIG. 22 é uma função de resposta de frequência, mostrando a aceleração superficial da face como uma função da excitação de tensão que varia com a amplitude de tempo do transdutor piezelétrico; e

[0042] A FIG. 23 é um diagrama de bloco de circuito de um sistema elétrico para a consecução de uma rigidez variável, que enriquece com a excitação mecânica piezelétrica de intensidade suficiente.

#### DESCRÍÇÃO DETALHADA DAS CONFIGURAÇÕES PREFERIDAS

[0043] A seguinte descrição supõe que exista uma compreensão sobre os fundamentos dos materiais, das operações e modos piezelétricos, tal como descrito em "Piezoelectric Ceramics" por Jaffe, Cook e Jaffe, Academia Press, 1971 e suas referências ora citadas. O teor dessa publicação está incorporado ao presente, sendo totalmente de referência. Outra referência útil que descreve o campo da mecânica

piezelétrica é "Piezoelectric Shells" por H. S. Tzou, Kluwer, Academic Publishers, MASS., 1993 e está também incorporada no presente como referência.

#### ACOPLAMENTO DO ATUADOR COM A FACE

[0044] Existem vários métodos para o acoplamento dos elementos de atuação e dos transdutores à face do taco, a superfície de interação entre a bola e a cabeça. O transdutor pode ser acoplado diretamente 1) à deformação relativa da face (elástica), 2) ao movimento absoluto (inercial) usando uma variedade de técnicas ou 3) ao movimento relativo entre a face e o corpo da cabeça. São descritos oito no presente, que acoplam alternativamente o atuador ou o transdutor à deformação elástica da face ou ao movimento inercial da cabeça. Para a função de atuação, o objetivo é permitir o máximo controle sobre a deflexão da face na frequência desejada de atuação. Para o transdutor, o objetivo é acoplar maximamente no movimento absoluto (desaceleração) da cabeça (ou da face) ou no padrão de deformação induzido na cabeça e na face pelo impacto da bola. As duas técnicas se situam no conjunto da energia cinética ou elástica disponível durante o impacto. Essa energia é então convertida pelo transdutor em energia elétrica, que é utilizável para a atuação da face e da interface. Segue uma descrição dos oito sistemas alternativos para o acoplamento de um elemento transdutor à face do taco de golfe.

[0045] Existem três classes de acoplamento atuador de face. A primeira classe se refere à atuação de face piezo-elástica, onde o tamanho do transdutor muda e as deformações são mecanicamente acopladas direto na deformação relativa juntamente ou entre dois pontos estruturais da face. Esse tipo de atuação elástica é geralmente conhecida na técnica de controle estrutural em que os elementos piezelétricos (predominantemente) são montados ou integrados nas estruturas para realizarem deformações estruturais vantajosas. As quatro

configurações de atuadores elasticamente acoplados são as seguintes:

[0046] Conceito 1 - *Wafer* piezelétrico diretamente ligado à face para realizar flexão, conforme mostrado na FIG. 1.

[0047] Conceito 2 - Piezo de empilhamento e/ou tubo montado na face com alojamento conforme mostrado nas FIGs. 2a, 2b e 3 .

[0048] Conceito 3 - Piezo disposto entre a face e uma cobertura rígida conforme mostrado na FIG. 4.

[0049] Conceito 4 - Piezo operado em modo cortante e disposto entre a face e uma camada resistente rígida, conforme mostrado na FIG. 5a e 5b.

[0050] A segunda classe de acoplamento atuador de face é o acoplamento atuador do movimento absoluto da face ou aqueles que dependem de forças iniciais geradas pelo movimento da face e da cabeça no impacto com a bola. Estes transmitem tipicamente uma massa de reação e um atuador ou elemento transdutor que age entre a massa de reação e a face. Esses tipos de acoplamentos de face referem-se geralmente aos atuadores de massa de prova ou de massa de reação.

Os conceitos nessa categoria estão descritos abaixo:

[0051] Conceito 5 - Piezo direto acoplado entre a face e uma massa inercial como mostrado na FIG. 6.

[0052] Conceito 6 - Piezo de movimento amplificado entre a face e uma massa inercial conforme mostrado na FIG. 7.

[0053] Conceito 7 - Piezo tipo *Bimorph* com massa de ponta e montado na face como mostrado na FIG. 8.

[0054] A terceira classe de acoplamento atuador de face é o acoplamento atuador entre a face e o corpo do taco. O atuador pode ser único ou um dentre um número de caminhos de carga paralela entre a face e o corpo. Este é similar ao Conceito 3, mas a face é tratada mais como um corpo rígido que pode ser posicionado ao invés de deformado como no Conceito 3. O transdutor posicionado entre a face e o corpo

suporta a maioria das cargas entre a face e o corpo e pode, portanto, participar em grande parte do evento de impacto. Além disso, o posicionamento da face induzido pela atuação com relação ao corpo, usa em essência o próprio corpo como uma grande massa de reação para realizar mudanças de localização ou de orientação da face durante o impacto.

[0055] Conceito 8 - transdutor piezelétrico posicionado entre a face e o corpo do taco conforme mostrado na FIG. 9.

[0056] Para as aplicações de transdutor produzirem a potência de atuação disponível máxima e o acoplamento disponível máximo (por exemplo, a atuação de oscilações de face de alta amplitude e alta frequência para o controle de giro), é desejável obter um bom acoplamento tanto para 1) o padrão de deformação de impacto, assim como 2) um modo de alta frequência. Para aplicações de posicionamento de face (ao invés de aplicações de redução do atrito), é desejável obter um bom acoplamento tanto para 1) padrões de carregamento de impacto assim como 2) movimento impacto-escala de tempo entre a face e o corpo.

[0057] De modo geral, para conceitos acoplados elasticamente (1-4) o movimento/carregamento da face gera o carregamento no material transdutor e a correspondente geração de energia elétrica. Em oposição, a energia elétrica liga o movimento de face dos controles do transdutor. É desejável ter um alto acoplamento eletromecânico entre o carregamento/movimento da face e as tensões e correntes elétricas. Este acoplamento pode ser medido em termos da fração da entrada de energia mecânica do impacto que é convertida em energia elétrica armazenada (por exemplo, no elemento piezelétrico ou em um circuito de shunt), ou em oposição, pela fração da entrada de energia elétrica que é convertida em energia de deformação na deformação induzida pela atuação da face.

## **Conceito 1**

[0058] Nessa configuração de acoplamento de face, um atuador 21 capaz de mudanças de dimensões planares, (também denominado um atuador 3-1, apesar de uma variedade de *wafers* piezelétricos interdigitados ou atuadores compostos serem capazes de mudanças de dimensões planares) é acoplado ao plano da face, 10, sobre ou enterrado na própria face. O atuador também pode ser embalado usando técnicas conhecidas no ramo. Como o atuador não se localiza exatamente na linha de centro, acopla-se à deformação de flexão da face e atua para impactar um momento fletor na face, 105, quando excitado eletricamente. De forma alternativa, em atuadores planos perto da linha de centro acoplados preferivelmente na deformação plana ao invés da flexão, o acoplamento no movimento fora do plano pode ser obtido em cenários de grandes deformações usando forças paramétricas. O carregamento de atuação pode ser imaginado como uma combinação de forças no plano e um binário de momento de curvatura, 105, que atua na face dos limites do atuador, conforme mostrado na FIG. 1. Alguns parâmetros críticos são a dimensão espacial (comprimento) do elemento de atuação, assim como sua espessura. A dimensão espacial x-y é determinada pela maximização do acoplamento em uma dada forma de deformação facial. Pode ser equacionado um bom acoplamento na integração dos tempos dos campos transversos de deformação vezes as constantes piezelétricas no domínio do atuador. O acoplamento em alguns formatos e, portanto, em alguns modos estruturais é maximizado nas formas e proporções do atuador correspondente.

[0059] Por exemplo, para uma placa axialmente simétrica com um caminho de atuação circular cobrindo um dado raio, o acoplamento no segundo modo axissimétrico de placa (um círculo nodal) é maximizado quando a proporção do disco de atuação se estende até o raio nodal, mas não além. Se o disco tiver um raio maior do que o do círculo nodal, então o material fora do círculo poderia ver a deformação de sinal o-

posto à do material dentro do círculo, e haveria então um cancelamento parcial da resposta piezelétrica quando integrada no disco inteiro.

[0060] No caso particular em que um transdutor é acoplado e do qual se deseja que colete energia de impacto, assim como excite potencialmente um modo de alta frequência (para controlar o atrito), o atuador deve ser projetado em extensão e espessura para alcançar tanto: 1) o acoplamento da forma produzida pela bola impactante (aproximadamente a forma de deformação do primeiro modo em tacadas no centro); e 2) o acoplamento na forma de deformação associada com um modo de alta frequência.

[0061] Como as faces são elementos estruturais relativamente espessos, a modelação sugere elementos piezelétricos relativamente espessos, na ordem de 1 mm, sendo necessários para a produção de uma atuação significativa da face de 2-3 mm. Os projetos típicos de face mostraram que um piezo-elemento de alguns centímetros de diâmetro (1-5) pode atingir o objetivo duplo desejado de acoplamento tanto da forma do primeiro impacto gerador de energia como um modo de alta frequência a ser excitado pelo controle de atrito. Uma implementação típica desse tipo de acoplamento de face é um disco piezelétrico modo 3-1 com o campo elétrico aplicado em sua espessura e o disco diretamente ligado à face 10 (normalmente interno).

[0062] É importante notar que o elemento piezelétrico 21 pode ser pré-embalado com encapsulação polimérica e potenciais padrões de eletrodo nesse polímero ou circuito flexível. Os padrões podem definir várias regiões ativas e produzir padrões segmentados, uniformes ou interdigitados em conjuntos potencialmente curvilíneos. O principal fator é maximizar o acoplamento eletromecânico (como acima definido) entre o piezelétrico e a deformação da face.

## **Conceito 2**

[0063] Serão agora descritos o método e o sistema preferidos para

o acoplamento de um atuador ou transdutor à face. Nesse método, o elemento de atuação 21 (preferivelmente piezelétrico, mas possivelmente eletrostritivo ou magnetostritivo, ou qualquer uma das tecnologias de atuação ou transdutoras descritas anteriormente) é ligado à face por meio da utilização de um alojamento 12 ou estrutura suporte ligada à face. Uma vista particular é mostrada na FIG. 2a e em conjunto em corte na FIG. 2b.

[0064] Nesse caso, o elemento de atuação 21 está configurado para alongar ou mudar axialmente de tamanho em resposta à energia elétrica de entrada (tensão ou corrente). Para um sistema piezelétrico, isso pode ser feito de várias formas. Em particular, pode ser usado um empilhamento piezelétrico para acoplar a tensão aplicada a mudanças de comprimento. Isso é conhecido como acoplamento 3-3, sendo um alto modo de resposta de materiais piezelétricos. Um empilhamento 3-3 é um arranjo de múltiplas camadas de piezomateriais, com eletrodos entre as camadas, de maneira que o campo elétrico fica alinhado com um eixo central para produzir um efeito piezelétrico longitudinal. Isso é mostrado em detalhes como um subconjunto 15 na FIG. 18. O atuador pode também ser configurado como transverso alongado ou atuador do tipo 3-1, no qual o campo é aplicado perpendicularmente à direção axial. Isso pode ser feito por uma haste com eletrodos ao longo de seu comprimento em lados opostos, ou um atuador tubular com a carga sendo aplicada ao longo de seu comprimento e o campo sendo aplicado através da espessura da parede por eletrodos nas paredes internas e externas do tubo. Existem várias outras configurações atuador/transdutor de alongamento axial conhecidas na técnica.

[0065] O segundo elemento é um alojamento 12, que serve para ligar mecanicamente a extremidade traseira do elemento de atuação à face. Serve como um alongamento do acoplamento do caminho de retorno da carga rígida da atuação para a deformação da face. A de-

formação da face provoca um movimento relativo entre o ponto (potencialmente no centro da face), onde o atuador faz contato e o ponto onde o alojamento está ligado à face é mostrado na FIG. 2a pelas forças aplicadas nesses pontos 106. O alojamento rígido então transforma aquele movimento relativo em movimento relativo entre duas extremidades do atuador. O alojamento 12 age assim como uma ligação mecânica, que acopla as mudanças de comprimento do atuador em movimento diferencial de face (deformação). Está, portanto, na classe elástica de acoplamentos de face.

[0066] É importante que o alojamento seja rígido (idealmente rígido, mas pelo menos na ordem de rigidez do elemento piezelétrico), já que qualquer alongamento do alojamento sob as cargas de atuação reduzirá a carga transferida para a face e a deformação de face resultante. Para ver isso, deve-se considerar o caso limite de um alojamento muito flexível. Depois, como o elemento de atuação começa a alongar, o alojamento se estica em conjunto com uma pequena carga e, portanto, é induzida uma pequena deformação na face. Na realidade, a condição é que geralmente o alojamento deve ser mais rígido, pelo menos entre 1 a 20 vezes mais do que a face sob carga igual, mas oposta, na ligação do alojamento e a ligação do atuador, para garantir que a carga esteja efetivamente acoplada à deformação da face ao invés de ao alongamento do alojamento. O alojamento também deve ser o mais leve possível para evitar somar uma grande massa e, assim, alterar significativamente o centro de gravidade da cabeça ou seu tensor de inércia.

[0067] O alojamento 12 consiste de uma parede cónica ou cilíndrica 52, com uma placa traseira 13 que faz contato com o atuador e uma extremidade circular, que estabelece contato com a face no anel 56. Ver os desenhos detalhados das configurações preferidas do Conceito 2 nas FIGs. 17-19. O alojamento 12 pode ser ligado por parafusos 29, solda de latão ou soldado à face, ou usar qualquer outra técnica. A placa

de extremidade pode ser ligada permanentemente, usinada como uma peça com a parede ou configurada como peça parafusada 13 para facilidade do conjunto do sistema atuador, sendo removível para reparos. É importante que todas as conformidades do alojamento, incluindo a flexão da face traseira e outras deformações do alojamento sejam levadas em conta ao considerar sua rigidez sob as cargas atuantes. É devido a isso que a estrutura cónica é muito eficiente, reduz a flexão da placa traseira e dá um caminho de carga mais direto para a face. As dimensões típicas são ~1 mm para a parede do alojamento 52 e ~3 mm para a traseira do alojamento 13. O conjunto transdutor 15, que consiste de um atuador em camadas piezelétricas 21 e as peças de extremidade 23, têm comprimento (total) de ~16 mm, conforme mostrado nas FIGs. 18 (dos quais 10 mm são de material ativo 21). A seção transversal é um empilhamento quadrado de 7 mm x 7 mm ou, de preferência, um empilhamento circular com diâmetro de 9 mm.

[0068] Um detalhe em particular de importância no projeto é a seleção dos locais dos pontos de contato entre o alojamento, o atuador e a face. Se o atuador for disposto para fazer contato com o centro da face, o alojamento pode ser configurado para se ligar à face em uma distância selecionada longe do centro, tanto em pontos discretos como em um anel contínuo (circular) em um raio fixo. A seleção desse raio de ligação é muito importante para maximizar as exigências de desempenho para uma dada aplicação de controle. As peças de extremidade 23 são preferivelmente feitas em aço ou alumínio, ou ainda qualquer outro material muito rígido e que tenha alguma curvatura 26 para proporcionar um ponto de contato centrado com a face 33 e com a parte traseira do alojamento 26, em uma curvatura quase combinada (indentações).

[0069] No caso particular de controle de atrito, um objetivo é excitar as oscilações de alta frequência como acima descrito. O diâmetro deve ser escolhido para satisfazer a necessidade de: 1) um bom acoplamento

para que a forma de deformação do impacto gere energia elétrica; e 2) um bom acoplamento para um modo de alta frequência. Isso pode ser obtido fazendo com que o raio de anexação corresponda aproximadamente ao raio de um antinodo do modo face de interesse. O antinodo deve ter preferencialmente a direção de deformação oposta ao centro para maximizar o movimento relativo.

[0070] As considerações de projeto para a otimização são as seguintes: se o raio for muito pequeno, a força piezo-central e a força de reação são impostas na face, muito proximamente. A face é muito rígida entre esses pontos espaçados, podendo ser introduzido um movimento muito pequeno. Em contraposição, é muito pequena a deformação diferencial entre esses pontos de ligação sob a forma da deformação do impacto, já que é determinada pela curvatura sob o carregamento do impacto e, portanto, é gerada uma tensão muito pequena no impacto. Se o raio é muito grande, então existe um bom acoplamento para o impacto, mas torna-se difícil construir uma estrutura de alojamento rígida e torna-se difícil gerar altas amplitudes em um modo de alta frequência, uma vez que os modos do alojamento começam a participar, efetivamente reduzindo a rigidez dinâmica do alojamento. Na configuração preferida, o diâmetro da ligação de aproximadamente 35 mm foi escolhido para o anel de face 56 como ideal para maximizar o duplo objetivo de acoplamento da deformação da face de impacto com a bola e o acoplamento em modo de face de alta frequência em ~ 120 kHz.

[0071] Ao avaliar os projetos particulares, é necessário levar em consideração os esforços de face, no alojamento e no atuador durante o impacto. Um nível muito elevado de esforços pode levar ao encurtamento da vida útil por fadiga do alojamento. Além disso, os altos esforços de compressão impostos sobre o atuador durante o impacto com a bola podem causar uma "despolarização" permanente do material, uma redução permanente nas propriedades do atuador. O sistema

mecânico deve ser analisado quanto às suas cargas durante os vários eventos de impacto com a bola, para determinar se esses níveis críticos de carregamento continuados do alojamento ou a despolarização induzida pelos esforços do elemento piezelétrico não foram ultrapassados.

[0072] É possível ter um piezo no centro ou usar um parafuso soldado no centro da face e usar um piezo-cilindro ou múltiplos piezo-elementos (por exemplo, empilhamentos) espaçados radialmente a partir do parafuso, conforme mostrado na FIG. 3. Nessa configuração, é possível acoplar ao formato de deformação de menor impacto, assim como a um formato de modo de alta frequência. Devido aos arranjos axiais relativos à face normal, é fácil pré-carregar os elementos transdutores 21 com relação à robustez, usando uma fixação de face localizada no centro 205, rosqueada para aceitar um parafuso pré-carregado 206 e uma placa de apoio 212, sendo fácil o projeto da desejada amplitude de excitação superficial.

### **Conceito 3**

[0073] É mostrada na FIG. 4 uma terceira configuração. Nessa configuração, o piezo 21 age entre o centro da face 10 e uma estrutura de apoio/suporte rígida 207. A estrutura suporte deve ser rígida para uma grande força de reação - na ordem de 1-10 x a rigidez da face, de forma que a atuação induz a deformação da face ao invés da estrutura de apoio. Existe potencial para o uso de um contato intermitente entre o piezo e a face. Devido às exigências de rigidez muito alta, a estrutura de apoio também tende a ser pesada.

[0074] No Conceito 3 mostrado na FIG. 4, existe um piezo-elemento 21 configurado entre a face 10 e a estrutura de apoio 207, que então passa a carga da interface da face para outra peça da cabeça do taco, isto é, a traseira, o corpo 11 ou o perímetro em volta da face. Quando a face se move cerca de um milímetro durante o impacto da bola e, por-

tanto, comprime o piezo, gera uma carga e energia elétrica que pode ser usada para acionar o sistema e, por exemplo, excitar um dispositivo ultrassônico. Como gera energia elétrica por intermédio de movimento relativo e carga entre a face e a estrutura de apoio, o projeto deve possuir uma estrutura rígida de apoio para resistir ao movimento da face e prover um alto piezo-carregamento. Se a estrutura de apoio for macia, deformaria com a face sob pequena carga e não comprimiria na realidade ou aplicaria carga ao piezo. Isso implicaria em um mau acoplamento eletromecânico piezelétrico ao impacto.

[0075] Esse conceito se acopla ao movimento axial (ou movimento normal) da deformação da face. Isso pode ser feito por um único elemento de empilhamento ou um único elemento monolítico piezelétrico com direção de polarização e o carregamento fica basicamente alinhado com a superfície normal à face. Nessa configuração, o atuador usaria um modo de atuação 3-3. Poderia ser um atuador modo 1-3 ou poderia ser um tubo com os eletrodos nas paredes interna e externa do tubo como descrito no Conceito 2. O esforço é, portanto, na direção perpendicular à direção de polarização. A força de reação básica está tentando inibir o movimento da face. A estrutura de apoio precisa, portanto, ser rígida para realizar esse efeito. Essa exigência de rigidez pode conduzir a elementos estruturais relativamente pesados que podem, por projeto, se localizar relativamente perto do CG. A massa adicional, entretanto, reduziria o momento de inércia da cabeça para uma massa fixa, já que existiria menos massa disponível na periferia.

[0076] Em outra configuração do Conceito 3, o elemento piezelétrico não está inicialmente em contato com a estrutura de apoio. No impacto com a bola, a face de deformação traria o piezelétrico em contato com a estrutura de apoio e carregaria o elemento piezelétrico. O elemento piezelétrico, por exemplo, se liga com a face que está talvez meio milímetro fora da estrutura de apoio. Não é feito nenhum contato

até o choque da bola. Assim, o sistema pode ser projetado de maneira que somente impactos de alta amplitude carreguem o elemento piezelétrico e disparem a função de controle. Esse impacto tem sido utilizado para amortecimento em sistemas estruturais. Também pode ser usado para mudar a rigidez efetiva e a reação de face efetiva em diferentes cenários de carregamento da bola e, portanto, para diferentes velocidades da cabeça. Por exemplo, se existir uma pequena folga entre a face e a estrutura de apoio, (mesmo que aí não exista nenhum transdutor), os impactos de baixa intensidade podem deixar a face sem suporte, não forçando o contato. Para impactos de alta intensidade, o contato entre a face e o apoio será estabelecido durante o impacto; e a estrutura de apoio suportará a face e reduzirá sua deflexão.

#### **Conceito 4 - Piezo em Modo Cortante**

[0077] Nos conceitos anteriores, o carregamento no elemento piezelétrico foi primariamente sob a forma de um esforço normal aplicado. No Conceito 4, o piezelétrico é carregado em corte e acoplado no campo elétrico usando o modo cortante da operação piezelétrica. Mais informações sobre o modo cortante e os principais modos de operação dos transdutores piezelétricos podem ser encontradas na literatura do produto da Piezo Systems Inc. de Cambridge, Mass. O elemento piezelétrico em modo cortante envolve esforços cortantes no eixo de polarização do material conforme mostrado na FIG. 5a. Por exemplo, se a polarização estiver na direção x no material, os esforços cortantes estariam no plano x-z sobre o eixo y, conforme mostrado na FIG. 5a. Nesse modo de operação piezelétrica, o campo elétrico E é aplicado perpendicularmente ao eixo de polarização x. Esse modo de resposta piezelétrica é, às vezes, denominado modo 1-5 de operação.

[0078] No Conceito 4, o mecanismo usando um piezo de modo cortante funciona de forma realmente muito parecida com um tratamento de amortecimento restritivo em camadas usado normalmente

para o amortecimento de resposta vibratória de estruturas fletidas. O elemento piezelétrico 21 que deve ser carregado em corte, está localizado entre a face e uma camada de apoio rígida denominada camada restritiva 208. Quando a face flete sob o carregamento do impacto, conforme mostrado na FIG. 5b, a camada restritiva resiste a essa deformação fletora colocando os elementos piezelétricos intermediários em corte. No Conceito 4, um ou mais piezo-elementos em modo de corte estão localizados entre a estrutura de apoio 208 e a face 10, conforme mostrado na FIG. 5b, de maneira que a face flete, induz um esforço cortante no piezo, que então pode ser acoplado no campo elétrico pelo transdutor piezelétrico. Na configuração típica, o campo elétrico está alinhado com a superfície normal e os piezo-elementos em modo 1-5 estão polarizados no plano da face. Por exemplo, um dos elementos pode ser colocado em cada lado da placa em pontos de grande curvatura, e então uma barra ou placa que atua como camada restritiva é ligada entre esses elementos piezelétricos. Quando a face se deforma, a barra tenta fazer com que ela não se deformar e isso coloca uma grande carga cortante nos piezos usando o modo 1-5 de atuação.

[0079] Em outra configuração, o elemento piezelétrico em modo cortante é um anel, polarizado radialmente, para fora e para dentro. O anel pode ser ligado ao centro da face. O campo elétrico atuaria na espessura do anel, entre a face e a camada restritiva. Nessa configuração, a camada restritiva seria um disco com o mesmo diâmetro externo que o do anel, ligado ao anel em sua circunferência. Esta é uma versão axissimétrica dos conceitos apresentados acima e atua para acoplar o movimento de face tipo tímpano no elemento piezelétrico.

[0080] O modo cortante de operação é um modo de operação muito efetivo e de coeficiente de acoplamento muito alto para piezo-transdutores. Os coeficientes de acoplamento para modo 3-3 de atuação e modo 1-5 de atuação são muito similares. O coeficiente de

acoplamento é definido livremente como a fração da entrada de energia mecânica que é convertida em energia elétrica sob um ciclo predefinido de carregamento.

[0081] Os Conceitos 1, 2, 3 e 4 são sistemas elasticamente acoplados. O piezo é comprimido devido à deformação relativa entre duas partes de um corpo elástico. Como o sistema face-piezo faz parte do corpo elástico, a deformação da face induz a deformação do piezelétrico. Para o Conceito 1, como a face (um corpo elástico) deforma, esta deforma o piezo, pois este é ligado à face. O Conceito 2 usa um alojamento da estrutura suporte que liga-se à face em um local diferente do elemento piezelétrico (ex., o elemento piezelétrico tem contato com a face no centro e o alojamento tem contato com a face em um anel em um raio definido fora do centro). Como são estabelecidos pontos distintos de contato, o movimento relativo efetivamente comprime o piezo. Dessa maneira, o piezelétrico é acoplado no movimento da face. No Conceito 3, o movimento de deformação da face comprime o piezo ligado entre a face e a estrutura de apoio. No Conceito 4, a deformação da face induz um esforço cortante no elemento piezelétrico. Todos esses conceitos se baseiam no acoplamento da deformação elástica da estrutura face-corpo, que representa a cabeça do taco de golfe. Por essa razão, esses conceitos são denominados coletivamente como tendo transdutores acoplados elasticamente.

### **Conceitos 5, 6 e 7 - Conceitos de Acoplamento Inercial**

[0082] A próxima classe, que consiste dos Conceitos 5, 6 e 7, representa uma maneira diferente de colocar a carga no transdutor que utiliza forças iniciais durante o impacto. Esses conceitos utilizam a carga necessária para acelerar uma massa para carregar um elemento piezelétrico. O piezo-carregamento é, portanto, uma função da aceleração, ao invés da deformação relativa da face. Na configuração mais simples, existe uma massa de reação 209 (por vezes denominada

massa de prova) e um piezo 21 está ligado entre aquela massa de reação e a face 10, conforme mostrado na FIG. 6. O sistema é análogo a um sistema massa-mola com o piezelétrico sendo a mola carregada. A face móvel é análoga à base móvel no sistema massa-mola. Quando a face se move sob o impacto da bola, as forças iniciais inibem o movimento da massa de reação e a "mola" piezelétrica é carregada pelo deslocamento diferencial entre a face e a massa. Quando é carregada, gera a carga e a tensão que podem então ser usadas para controlar a face, como será doravante descrito.

[0083] Nesses conceitos, é importante ajustar a massa e a "mola" piezo para um bom acoplamento com o movimento da face durante o impacto. No cenário em que a face se move lentamente em comparação com o período da primeira frequência natural do sistema mola-massa, existe um pequeno movimento relativo entre a face e a massa e, portanto, um pequeno piezo-carregamento. Nesse cenário, a massa segue bem a face, já que as forças elásticas da mola são muito maiores do que a resistência inercial. Em um cenário alternativo, se a face se mover muito rapidamente, a massa não pode responder e a "mola" piezelétrica é comprimida proporcionalmente ao movimento da parede. Assim, a carga que o piezo vê e, portanto, a quantidade de acoplamento ao movimento da face depende da massa relativa e da constante da mola do sistema e da escala de tempo das forças.

[0084] Para ilustrar o comportamento do sistema, considerar o caso quando a face se move com uma 1/2 onda senoidal similar a um movimento de impacto, o centro da face se move de uma distância interna (cerca de 1 mm) sob o carregamento da bola e retorna à posição normal em um determinado período de tempo, conhecido como duração do impacto. Se o evento de impacto durar 1/2 milissegundo, corresponderia a uma forma de onda de entrada que corresponde a metade do ciclo de uma entrada de um kHz. Se o piezo 21, a massa 209 e a mola (face

10) possuírem uma frequência natural que seja significativamente maior que aquele um kHz, aquele sistema parecerá um corpo rígido sob aquele movimento (face) base. Nesse cenário, não existe muita deformação relativa no piezo. O movimento relativo corresponde à quantidade de deformação que o piezo vê e, assim, a tensão que o piezo vê no circuito aberto. Com essa métrica, a tensão obtida no circuito aberto sob impacto, cai para zero em entradas muito baixas de frequência (impactos de longa duração e sistemas piezo-massa rígidos). Cresce até um pico ressonante quando a entrada é proporcional à constante de tempo do sistema mola-massa com a face mantida rígida. Se o primeiro modo fundamental do sistema mola-massa estiver abaixo da frequência de forças, então, quando a face move o piezo, comprime por uma quantidade da deformação relativa entre a face móvel e a massa inercial. Isso acontece pois a massa é incapaz de mover-se tão rapidamente para responder ao movimento de face de frequência relativamente alta.

[0085] Um típico piezo cúbico de 1 cm x 1 cm x 1 cm com uma massa típica de 10 gramas na extremidade, pode ter uma frequência na faixa de 20 - 40 kHz. Isso seria muito rígido para acoplar bem naquele movimento de face de ~ 1 kHz, a menos que seja usada uma grande massa de reação. Portanto, o quê isso induz, é que o projetista deve tentar criar um sistema onde exista uma massa menor e uma rigidez efetiva muito menor do piezo-elemento que suporta a massa. Se bem projetada, a frequência natural massa-piezo é proporcional e, assim, bem acoplada para aquele impacto da bola.

[0086] Para atingir essa sintonia de frequência, o projetista deve amaciar o piezo-elemento, tornando-o mais fino ou usando algum mecanismo para fazê-lo ter efetivamente uma menor constante de mola. Os Conceitos 6 e 7 mostrados nas Figuras 7 e 8, demonstram, respectivamente, algumas manifestações disto usando configurações de

transdutores piezelétricos mecanicamente amplificados. Esses conceitos atuam reduzindo a constante efetiva de mola do piezo-elemento, inferior à do elemento empilhado. Os elementos empilhados podem ser muito rígidos. A amplificação mecânica aumenta o curso do transdutor piezelétrico enquanto reduz sua força bloqueada, reduzindo essencialmente a rigidez efetiva do transdutor, reduzindo a rigidez da mola entre a massa de prova ou a massa de reação e a parede da face.

[0087] Se a superfície da face mover-se lentamente em relação à vibração natural da efetiva mola piezo e o sistema de massa, então existe uma relativamente pequena deformação do piezo e um pequeno acúmulo de carga. Ao mover-se rapidamente com relação à constante de tempo, então o piezo-elemento é comprimido em cerca da deflexão da face. Para obter energia no transdutor piezelétrico, a pergunta é como projetar a mola e qual deve ser a massa? Se a mola e a massa tiverem uma frequência natural sintonizada com a constante de tempo do movimento da face, por exemplo, uma constante de tempo de 1/2 ms, então deseja-se que a frequência natural daquele sistema mola-massa seja cerca de 1 kHz e que então o carregamento no elemento piezelétrico seja maximizado. Em alta frequência, a massa parece ser mais uma massa de reação inercial. O elemento piezelétrico deriva daquela massa de reação. Isso permite a excitação do movimento superficial direto na face pela força entre a massa de reação 209 e a face 10.

[0088] O Conceito 5 apresenta o problema óbvio do piezo ser diretamente ligado à massa, que termina sendo um sistema muito rígido, exigindo que uma grande massa reduza a frequência natural até um nível que melhor se adapte ao acoplamento do impacto da bola. Existem várias técnicas para a redução da rigidez do piezelétrico por projeto mecânico. Por exemplo, piezo-hastes consistindo de pilares de diâmetro muito pequeno podem ser integrados em epóxi para reduzir a rigidez

efetiva, mas manter os coeficientes de carga do piezo intactos. Isso se denomina composto piezo 1-3. Um composto também funciona bem com um composto particulado usando um particulado piezelétrico em epóxi. Pela seleção da fração de volume de particulado adequado, pode ser projetado um transdutor para reduzir a rigidez efetiva do material. Outras maneiras de reduzir a constante do piezo mola sem sacrificar o coeficiente do acoplamento são outras configurações do piezo sistema, como ter o piezo-elemento mecanicamente amplificado. O Conceito 6 mostrado na FIG. 7, mostra a idéia geral de um amplificador mecânico 210 para a redução da rigidez efetiva do piezelétrico amplificado. Existem milhares de diferentes tipos de amplificadores mecânicos que coletam forças muito grandes e movimentos de curso piezo muito pequenos, transformando-os em um curso muito maior, mas com menor força de saída. Basicamente, o coeficiente de acoplamento efetivo do piezo amplificado mecanicamente é sempre menor do que o coeficiente de acoplamento efetivo do próprio piezo. O Conceito 6 representa uma abordagem que usa um conceito denominado piezo aflex-tensional. Nesse cenário, a deformação axial do amplificador de movimento (na direção perpendicular à face) cria um movimento horizontal e a deformação do piezo. Quando o piezo muda de tamanho lado a lado, (isto é, quando o piezo fica maior ou menor) , comprime ou tensiona entre a massa de reação e a face. Os índices de amplificação podem se situar em qualquer ponto entre um fator de 2 a 100. Movimentos muito pequenos criam um movimento muito grande do sistema. Um atuador piezo mecanicamente amplificado produz um maior curso e uma menor produção de força. Portanto, uma mola mais macia pode ser usada entre a face e a massa de ação para reduzir a massa necessária de reação, menor do que a necessária caso houvesse um piezo sem a amplificação mecânica.

[0089] O Conceito 7 mostrado na FIG. 8 é uma configuração fletora.

Uma possível manifestação do bimetálico *bimorph* 211, é uma fita retangular com uma camada central de cunha e 2 camadas de piezo em cada lado. Algumas vezes não existe a cunha, mas somente 2 camadas de piezo. Os piezos são atuados de maneira que suas partes superiores se expandem e as partes inferiores contraem. Isso provoca a flexão do elemento de maneira muito similar à flexão de uma fita bimetálica devido aos diferentes coeficientes de expansão térmica das camadas superior e inferior. A produção desse dispositivo 211 é a força e a deflexão das pontas. É um atuador em modo fletor que essencialmente transforma um pequeno piezo movimento no plano do *bimorph* em uma grande deflexão de ponta fora do plano. Funciona de maneira similar ao amplificador mecânico. Tipicamente, os *bimorphs* têm deflexões de ponta muito maiores do que o piezo de curso axial. Basicamente, a deflexão de ponta da viga que representa o fletor *bimorph* se transforma em compressão ou tensão axial no elemento piezelétrico. Estes são comumente os elementos modo 1-3, onde existe um *wafer* piezelétrico com eletrodos e carregando no plano do elemento fletor. Já foram usados os atuadores de piezo fibra composto (PFC) para as camadas piezelétricas *bimorph*. Esses PFCs podem ser configurados para colocar os campos elétricos no plano do sistema usando eletrodos interdigitados e as fibras no plano do sistema para acoplar aos campos planares. Dois piezo fibra compostos podem ser ligados (unidos ou laminados) um sobre o outro e serem configurados como um fletor *bimorph*. É um elemento com alto coeficiente de acoplamento, mas possui características muito melhores de deflexão de força. Nesse conceito, o *bimorph* está tipicamente situado entre a massa de prova 209 e a estrutura de face 10.

[0090] A FIG. 8 mostra o *bimorph* simples em uma massa de prova deslocada para o lado. Pode-se ter duas em lados opostos. Os transdutores *bimorph* têm propriedades que os tornam eficientes como

transdutores eletromecânicos. Ao invés de ter uma forma plana retangular de feixe puro, de forma que o feixe tenha largura constante, a largura e/ou espessura do *bimorph* podem ser alteradas como uma função do comprimento ao longo do feixe. É realmente vantajoso dar a forma cónica ao *bimorph*, de maneira que seja mais largo na base e se reduza a uma plataforma bem mais estreita no ponto em que a carga é aplicada. Isso funciona como um sistema acoplado mais eficiente para o movimento de pontas. Também é vantajoso alterar a espessura do feixe como função de sua posição ao longo do comprimento do *bimorph*. É melhor ter um feixe mais grosso na raiz e um feixe mais fino no exterior. Isso maximiza a tensão no dispositivo e minimiza a massa do dispositivo necessária para obter o nível indicado de acoplamento de energia. O nível de tensão do piezo é equalizado e, portanto, não tem uma seção altamente carregada do piezo e uma seção com carga muito pequena. O carregamento relativamente uniforme aumenta seu coeficiente de acoplamento efetivo.

[0091] Os *bimorphs* não precisam ser elementos retangulares. Podem ser cónicos ou redondos. Podem ter espessuras variáveis. Também foram fabricados como estruturas curvadas. Existem muitas diferentes configurações para os piezo *bimorphs*. De particular nota é a possibilidade de uma configuração *bimorph* (redonda) em forma de disco. O disco *bimorph* piezelétrico é ligado ao centro do disco com a face com um separador. A massa de prova é um anel ligado ao raio externo do *bimorph* piezelétrico. Os eletrodos no *bimorph* podem ser axissimétricos e uniformes ou circunferencialmente setorizados (setores com formato de pizza cortada), de maneira que uma inclinação diferencial pode ser atuada/respondida pelo elemento piezelétrico.

[0092] A configuração do Conceito 5 é mostrada na FIG.6. O piezo 21 age entre o centro da face 10 e uma massa de reação 209 dimensionada de maneira que uma primeira frequência natural da massa no

piezo seja proporcional ao dobro da duração de impacto (sintonizada). Isso induz a necessidade de um piezo amplificado ou menos rígido caso seja usada uma pequena massa de reação. É um desafio tornar o piezo suficientemente macio para aceitar energia de alto impacto, mas suficientemente rígido para impactar uma grande força em alta frequência. Pode ser necessária uma pesada massa de reação.

[0093] A configuração do Conceito 6 é mostrada na FIG.7 é semelhante ao Conceito 5, exceto por substituir um atuador piezelétrico 210 mecanicamente amplificado. Um amplificador de movimento 210 converte um pequeno piezo movimento em um maior movimento relativo entre o centro da face e a massa de reação. O problema da descombinação de impedância pode ser solucionado, mas existe um mecanismo potencialmente mais pesado e mais complexo.

[0094] A configuração do Conceito 7 é mostrada na FIG.8. Um bimétrico *bimorph* 211 atua entre uma massa 209 e o centro da face 10. É como os Conceitos 5 e 6, mas usa um piezo *bimorph* entre a face e uma massa. Pode usar um disco *bimorph* axissimétrico e uma massa de anel. Pode usar múltiplos *bimorphs* e massas com formatos retangulares ou triangulares. Pode-se sintonizar a primeira frequência natural de massa no evento de impacto e depois eletrodos segmentados para ajudarem a localizar o impacto da bola na face. Existe uma produção indeterminada de força de alta frequência.

#### **Conceito 8 - Atuador Acoplado entre a Face e o Corpo.**

[0095] A configuração do Conceito 8 é mostrada na FIG.9. Nessa configuração, o atuador ou transdutor 21 com contatos elétricos 22 está disposto entre o corpo do taco 11 e a face 10. Assim, as cargas entre a face e o corpo no impacto podem ser convertidas em energia elétrica pelo transdutor durante o impacto e a face pode ser posicionada relativamente ao corpo durante o impacto pela atuação seletiva controlada do(s) elemento(s) do transdutor. Essas atuações podem ser usadas

para alterar a posição, como a rotação da face relativamente ao corpo de maneira a contrapor a rotação induzida no sistema pelos impactos excêntricos.

[0096] Existem múltiplos modos de operações possíveis com esta configuração do sistema. O primeiro é o posicionamento quase estático. Nesse modo de operação, a face é reposicionada a partir de sua orientação inicial para uma posição alternativa com relação ao corpo e à bola. Por exemplo, o ângulo da face é levemente ajustado nos eventos de impactos fora de centro. Os ajustes de ângulo são pré-calibrados para alcançarem uma redução na distância perdida - por exemplo, compensando um *hook* (desvio exagerado da bola para a esquerda) ou um *slice* (desvio exagerado da bola para a direita) pelo redirecionamento da face. A vantagem é obtida pela alteração do posicionamento estático (em relação ao evento de impacto) da face.

[0097] Em um modo alternativo de operação, a face é reposicionada durante o evento de impacto, de maneira que o próprio movimento induzido causa o efeito desejado no resultado do impacto. Por exemplo, a face pode ser movida tangencialmente (perpendicular à normal da face) de maneira que a velocidade tangencial da face durante o impacto realize vantajosamente o giro da bola por meio da interface de atrito entre a bola e a agora superfície de movimentação tangencial. A face pode ser forçada a ter uma velocidade tangencial, que tem o efeito de reduzir ou de aumentar o giro da bola que resulta do evento de impacto. O controle do giro pode ter os efeitos desejados no vôo subsequente da bola ou no comportamento de salto e rolagem depois que tiver se chocado com o solo.

[0098] Em um exemplo particular, a face pode movimentar-se para cima tangencialmente ao eixo normal da face durante o evento de impacto. Isso pode ser controlado para somente ocorrer em eventos de alto impacto que produziriam um giro muito alto durante o impacto. Esse

giro muito alto pode resultar em um soerguimento excessivo e em uma distância de vôo reduzida, como é conhecido na técnica. A velocidade do movimento para cima pode ser uma fração da velocidade tangencial da bola nesse mesmo quadro de coordenadas. Nesse caso, haverá menos movimento relativo entre a superfície da bola e a superfície da face, resultando em menos giro para cima da bola durante o impacto e, portanto, maior distância durante o vôo.

### **Configuração Atualmente Preferida (Conceito 2)**

#### **Princípio de Operação**

[0099] Como objetivo final do projeto, a cabeça é projetada para converter a energia de impacto em vibrações de alta frequência e alta amplitude na face do taco. A excitação de alta frequência da face reduz o coeficiente efetivo de atrito face-bola, usando as técnicas reveladas nas referências de Katoh e Adachi conhecidas na técnica. A redução do coeficiente efetivo de atrito face-bola durante a oscilação da face, atua para reduzir o giro da bola induzido pelo contato friccional com a face no impacto. Simulações do vôo da bola mostraram que o giro reduzido da bola resultante do impacto tende a aumentar o percurso da bola em um cenário de velocidade da bola altamente efetiva. Esses cenários estão associados a velocidades altamente efetivas da bola, isto é, alta velocidade da cabeça e/ou ou muito vento contrário. Nessas condições, o soerguimento excessivo causado pelo alto giro da bola resulta em uma trajetória de balão, o que provoca uma considerável redução do alcance da trajetória. Estudos mostram que uma redução de 25% no giro da bola pode aumentar a distância do percurso da trajetória em 10-20 jardas em determinados cenários de alta velocidade relativa.

[00100] O atrito reduzido entre a bola e a face pode também resultar em giro lateral reduzido da bola resultante do impacto. O giro lateral reduzido da bola tende a reduzir a dispersão em direção cruzada e aumentar a precisão do *drive* (tiro de longo alcance). É, portanto, o

objetivo da invenção prover um sistema que possa induzir as oscilações superficiais necessárias na face do taco, de maneira a atingir as conhecidas vantagens desejáveis da redução controlada do giro. O sistema é controlado no senso em que somente os impactos de alta velocidade (aqueles que demonstram um indesejável excesso de giro) dispararão as oscilações de redução de giro. É ainda o objetivo da invenção, energizar este sistema controlado de redução de atrito totalmente, a partir da energia disponível no impacto entre a cabeça do taco de golfe e a bola, não exigindo assim fornecimento externo de energia, como de uma bateria.

[00101] As simulações indicam que a capacidade de uma face de taco acionada por alta frequência oscilando com amplitude de 5-10 microns, perto ou acima de 120 kHz, reduz dramaticamente o índice de giro da bola. As simulações de um impacto bola-taco são mostradas nas Figuras 12 e 13. A FIG. 12 mostra o histórico tempo-tensão de um transdutor piezelétrico acoplado à face durante o impacto. A tensão cresce até atingir um nível crítico de disparo (estabelecido na parte eletrônica), quando é excitada uma oscilação que é sintonizada com o modo de face de interesse (120 Kz). Essas oscilações de alta frequência são mostradas na FIG. 13 para reduzir o coeficiente de atrito e a força tangencial entre a bola e a face - reduzindo assim o índice de giro para cima no impacto e no giro resultante da bola. A Curva C da FIG. 13 mostra o histórico tensão tempo análogo ao do mostrado na FIG. 12. A FIG. 13B mostra a força tangencial (atraito) entre a bola e a face, indicando a redução permitida pela oscilação de alta frequência em C. O índice de giro da bola é mostrado em 13E, onde o giro da bola não aumenta durante o tempo em que a força tangencial é reduzida, devido às oscilações da face. O efeito se baseia na superfície de choque, que alcança uma aceleração crítica de pico durante o ciclo de oscilação. O parâmetro crítico para a redução do atrito é que a superfície de impacto

(face do taco) tem que romper intermitentemente o contato com a bola de impacto. Para isso acontecer em um cenário de impacto bola-face, a aceleração da face a partir da bola deve ser grande o suficiente para romper esse contato. Com efeito, a face deve se movimentar a partir de debaixo da bola. Isso só precisa acontecer por uma curta fração do evento de impacto, de maneira a realizar o atrito bola-face como indicado na FIG. 13. Como durante o impacto bola-face existe uma alta pré-carga, existe uma alta carga de compressão entre a bola e a cabeça, mostrado na FIG. 13A. Essa carga normal bola-face faz a bola acelerar na direção de um eventual vôo. A bola está inicialmente em repouso e depois deve passar por uma taxa de alta aceleração para atingir sua velocidade de pico após o evento de impacto. Para romper o contato, a face deve acelerar em um nível na ordem desta aceleração da bola, por pelo menos uma parte do ciclo.

[00102] A face deve atingir uma aceleração suficiente para trás e para longe da bola para romper o contato. A amplitude do movimento oscilatório da face vezes a frequência desse movimento oscilatório ao quadrado é proporcional à aceleração superficial de pico. Foi constatado que os movimentos oscilatórios superficiais na faixa de 5-20 microns de amplitude em frequências na faixa de 50-120+ kHz possuem aceleração superficial suficiente para romper o contato entre a face e a bola em uma ampla gama de condições de impacto. As menores amplitudes de movimento superficial são necessárias se a oscilação ocorrer em maiores frequências (sendo todas iguais).

[00103] Quando isso ocorre, a face se move para trás e para longe da bola em altos índices de aceleração por pequenos períodos de tempo. O princípio da operação é que o movimento superficial induzido tem uma amplitude e uma frequência suficientemente grandes e a aceleração superficial será alta o suficiente para superar o carregamento compressivo devido ao impacto da bola e realmente romper o contato

entre a bola e a face. Na realidade, a face se move para longe da superfície da bola mais rapidamente do que a bola pode responder à redução da força de interface. Move-se a partir da parte inferior da bola.

[00104] O rompimento do contato restabelece a região de micro-deslizamento usada em um modelo comum de atrito interfacial. Nesse modelo de atrito (Katoh) mostrado na FIG. 20 há uma pequena quantidade de movimento tangencial relativo,  $u$ , existente entre os corpos (superfícies) antes que as forças de atrito se acumulem nos níveis associados com o atrito (deslizamento) de Coulomb. A FIG. 20, é uma plotagem do coeficiente efetivo de atrito (coeficiente tangencial) ( $|t|_t$ ), como uma função do deslocamento relativo entre os corpos  $u$ . Esta região de redução do coeficiente de atrito é devida à elasticidade tangencial na interface. Quando as superfícies deslizam entre si, o atrito cresce rapidamente (no curso de um percurso de poucos mícrons, notado por  $u_x$  na FIG. 20) até o nível assintótico associado ao atrito de Coulomb entre as duas superfícies deslizantes. Esse modelo de atrito representa a micro-deformação que ocorre para acomodar o movimento relativo entre as superfícies antes que as superfícies comecem a deslizar. Esse modelo de interface é apresentado na referência de Adachi.

[00105] Pelo rompimento do contato entre a bola e a face repetitivamente antes que os objetos tenham tido o movimento relativo suficiente para se situarem na região assintótica, o deslizamento entre as superfícies ocorre somente na região de micro-deslizamento, que tem um coeficiente efetivo de atrito muito baixo. Nos múltiplos ciclos de rompimento de contato, o movimento deslizante é, portanto, integrado em um coeficiente de atrito médio menor entre a bola e a face.

[00106] Existem várias interações dinâmicas que ocorrem durante o impacto da bola com a face. As forças podem ser imaginadas como normais ativas à face e tangenciais à face. As forças normais atuam pelo centro de massa da bola e, assim, para primeiro acelerar a bola e

não diretamente induzir o giro. As forças tangenciais que aparecem devido ao atrito entre a bola e a face agem tanto para afetar a componente tangencial de velocidade como o giro da bola.

[00107] Na direção tangencial durante o curso do evento de impacto, a bola inicia um deslizamento para cima na face assim que começa a rolar. Quando deixa a face, está geralmente rolando para cima na face com uma pequena componente de deslizamento, isto é, a bola está rolando (girando) a uma taxa tal que o ponto de contato na superfície da bola e a face não está se movendo com relação ao ponto de contato da face. Pelo controle do coeficiente de atrito efetivo entre a bola e a face, o grau com que a bola gira durante o impacto, é controlado conforme mostrado na FIG. 13 traço E. Se o atrito for suficientemente reduzido, as forças tangenciais não serão suficientes para girar a bola até o ponto de rolagem pura. Portanto, como as forças tangenciais (de atrito) realizam diretamente o giro da bola, o controle dessas forças pode levar ao controle do giro da bola.

#### Implementação do Sistema

[00108] O sistema é projetado para capturar a energia da colisão da cabeça do taco com a bola e usá-la para excitar as vibrações de alta frequência (ultrassônicas) da face, usando-as para controlar o atrito entre a face e a bola como acima descrito. Isso é implementado usando elementos piezelétricos acoplados elasticamente às deformações da face. Na configuração preferida, o mesmo piezo transdutor (no senso mais amplo, como definido para piezo acima) é usado tanto para extrair a energia do impacto para energizar o sistema, assim como usar a energia extraída para excitar as vibrações ultrassônicas da face do taco. Em operação, o impacto deforma a face do taco sobre a qual o transdutor piezelétrico está elasticamente acoplado, de maneira que as deformações da face são convertidas em energia elétrica (carga e tensão no elemento piezelétrico), por exemplo, os elementos PIO ou PII na FIG.

10. A parte eletrônica que está acoplada ao transdutor piezelétrico está configurada de maneira que o piezo está inicialmente na condição de circuito aberto enquanto estiver carregando durante o impacto. Em algum ponto, a tensão piezelétrica atinge um nível crítico (nível de disparo) pré-definido no sistema, e nesse ponto um comutador Q10 ou QII na FIG. 10 é fechado, assim conectando um indutor L10 ou LII entre os eletrodos piezelétricos. O indutor está configurado de maneira que o circuito LRC resultante (o C sendo a capacitância do elemento piezelétrico, e o L sendo o indutor shunt) responde em uma oscilação (*ring down*) que começa na conexão do circuito indutor entre os eletrodos piezo. Os valores componentes são selecionados de maneira que a frequência do *ring down* é aproximadamente sintonizada (como descrito abaixo) em um modo estrutural dinâmico de alta frequência do sistema face-piezo, tal como o modo ressaltado na função de resposta de frequência na FIG. 22 fazendo assim o movimento/oscilação de face de alta frequência em virtude do acoplamento piezo eletromecânico. O sistema é projetado de maneira que o movimento de face de alta frequência é suficiente para controlar o atrito entre a bola e a face como acima descrito.

[00109] O sistema tem vários problemas de projeto que serão agora discutidos. O sistema é projetado para carregar de forma máxima o piezo para obter a máxima energia elétrica armazenada na piezo capacidade, antes do início da oscilação/*ring-down*. Isso maximiza a amplitude de oscilação. Além disso, o sistema é projetado estrutural e eletricamente para maximizar o acoplamento do piezelétrico em movimento de face de alta frequência, como será descrito abaixo.

[00110] O elemento piezelétrico (21) mostrado nas Figuras 2a e 2b é elasticamente acoplado ao modo de face de alta frequência, de forma a excitar as vibrações de alta frequência. O circuito elétrico é projetado para coletar a energia elétrica do impacto e usá-la para acionar um

oscilador aproximadamente sintonizado na frequência modal de face selecionada. A parte eletrônica converte uma pequena parte da energia de impacto em oscilações de alta frequência da face do taco. Com o carregamento do piezo, ao atingir um limite (nível de disparo), o comutador de controle (Q10 e QII na FIG. 10 e Q3 na FIG. 11) é sintonizado para fazer um *shunt* em um indutor no piezelétrico anterior de circuito aberto e iniciar uma oscilação de alta frequência na frequência determinada pelo indutor e a capacitância piezelétrica como ilustrado na FIG. 12.

[00111] A frequência é determinada por uma constante de tempo LC. O indutor é dimensionado para ressonância de alta frequência e deve ter resistência muito baixa para reduzir a perda de energia, e núcleo magnético adequado ou núcleo de ar para reduzir a perda de histerese magnética e os efeitos de saturação de campo magnético. O comutador pode ser mais facilmente implementado com transistores MOSFET, apesar de existirem outros comutadores com as características de tempo de ligação potencialmente rápido (menos de 1 microsegundo) e baixa resistência quando fechados. Existem muitas outras características desejáveis do comutador que serão doravante discutidas.

#### Projeto da Face e do Piezelétrico

[00112] O transdutor piezelétrico é acoplado ao movimento da face, de maneira que a deformação da face resulta em tensões e cargas piezelétricas. O objetivo do projeto é maximizar o acoplamento do transdutor piezelétrico, atingindo simultaneamente dois efeitos: 1) acoplamento máximo (e tensões resultantes) nas deformações de face resultantes do impacto da bola na face - tanto os impactos no centro da face como impactos fora de centro, e 2) acoplamento máximo em um modo de alta frequência de oscilação do sistema estrutural piezo-face acoplado. O acoplamento do carregamento da face para a tensão do circuito piezelétrico aberto (OC) está representado na FIG. 21, que

mostra a função de transferência de um carregamento distribuído representando um impacto de bola na tensão do circuito piezelétrico aberto. A curva representa a resposta nos impactos de centro, existindo uma diferente curva para cada local de impacto localizado a 0,5 polegadas a partir do local central em cada uma das direções esquadrejadas (acima = norte, abaixo = sul, para frente = oeste, para trás = leste). A tensão do circuito aberto quase estático para um carregamento de 10.000 N proporcional a um *head swing* de 95 MPH está representada pela assíntota de menor frequência da função de transferência notada na FIG. 21. Esta figura de mérito (FOM) pode ser mediada em uma série de locais de impacto para produzir uma FOM de projeto que busque maximizar a tensão piezelétrica que é gerada por uma gama de impactos no centro e fora do centro.

[00113] O acoplamento com oscilações mecânicas de face de alta frequência é representado pela função de transferência na FIG. 22. Essa figura representa a função de transferência a partir da tensão piezelétrica senoidal aplicada para aceleração superficial de face no centro da face (e em pontos a 0,5 polegadas distantes em cada uma das direções anteriormente notadas). De maneira semelhante à função de transferência de resposta de tensão acima mencionada na FIG. 22, o movimento/aceleração em uma faixa de localizações podem ser usados como figura de mérito para o projeto - ponderado ou pesado. Como visto, a resposta de aceleração de alta frequência é maximizada em um modo de vibração da face e do sistema piezelétrico acoplado ("Modo excitado" na FIG. 22). Na configuração preferida, isso ocorre a 127 kHz. Acionar a face nessa frequência maximizará a aceleração superficial. De maneira semelhante, um *ring down* do piezelétrico oscilando na faixa de frequências associadas com a resposta de alta aceleração conduzirá à aceleração superficial máxima.

[00114] O objetivo do projeto é maximizar tanto a tensão de circuito

aberto obtida devido aos impactos no centro e fora de centro, como maximizar a aceleração superficial durante a resposta de *ring down* subsequente dessa tensão depois que o circuito tiver sido disparado. A geometria do sistema é selecionada para maximizar essas duas figuras de mérito que resultam em resposta máxima de alta frequência da superfície devido à ativação do sistema.

[00115] O elemento piezelétrico, a face do taco e os elementos de alojamento cônico descritos abaixo são todos configurados de maneira que o sistema acoplado resultante demonstre essas qualidades. Trata-se de um projeto de sistema acoplado, já que a resposta superficial aos impactos e as tensões resultantes são funções do alojamento, do transdutor piezelétrico, assim como da geometria e do material da face. Além disso, as formas e as frequências do modo de alta frequência são uma função de todos os três elementos do projeto. Nas seções seguintes, o transdutor piezelétrico será descrito seguido pelo alojamento e as estruturas de face.

#### Projeto Empilhado (*Stack*) e Tampa (*Endcap*)

[00116] O elemento piezelétrico é mostrado em vista explodida do subconjunto da face na FIG. 18 e em vista de corte do subconjunto da face na FIG. 19. O próprio empilhamento piezelétrico é indicado como elemento 21, enquanto o conjunto do atuador que consiste dos bornes de empilhamento 21, das tampas de empilhamento 23 e do alívio de tensões 25 é tomado como subconjunto 15 na FIG. 18. O atuador piezelétrico 21 é preferivelmente configurado como um empilhamento multicamadas, um atuador tipo 3-3. Pode ser alternativamente uma haste, tubo ou barra monolítica, de maneira que a entrada elétrica gere uma atuação axial (movimento e tensão), predominantemente e opostamente cargas axiais gerando tensão e carga no elemento. Notar que o tubo ou sistema acoplado 1-3 (transversal) também possui esse efeito, mas usando um empilhamento 3-3 minimiza as tensões, pois as ca-

madas podem ser feitas finas e o empilhamento multicamadas modo 3-3 utiliza os altos coeficientes piezelétricos de acoplamento associados com o modo 3-3 de operação. Um empilhamento piezelétrico centralmente posicionado entre a face 10 e uma placa de apoio (tampa 13) que é estruturalmente acoplada à face em locais cuidadosamente determinados. O empilhamento piezo tem tampas convexas 23 que provêem um ponto de contato com a face, minimizando assim os momentos fletores induzidos no empilhamento devido à colocação excêntrica no sistema. Isso é importante nesse sistema altamente tensionado, já que é desejável operar o piezelétrico perto de sua tensão máxima admissível para minimizar o peso do sistema, maximizando o acoplamento eletromecânico. Além disso, as tampas convexas 26 são projetadas de maneira a distribuir as tensões mais uniformemente no empilhamento, resultando em uma operação de empilhamento mais ideal e minimizando a não homogeneidade de tensões no empilhamento que pode causar fraturas ou induzir defeitos no empilhamento sob impacto. A espessura da tampa é determinada para garantir a homogeneidade suficiente. Na configuração principal, as tampas têm um raio de curvatura de 12,5 mm na extremidade arredondada e medem 3 mm da parte superior da interface com o empilhamento piezelétrico. São formadas de um material rígido como alumina ou aço para distribuir mais eficientemente as tensões para o empilhamento em uma parte mínima de espessura/massa. Alternativamente, podem ser compostas de laminationes desses materiais para facilidade de fabricação.

[00117] Os empilhamentos 21 consistem de elementos piezelétricos multicamadas disparados em conjunto, com espessura de camada na faixa de 15 a 150+ mícrons. Os sistemas com camadas mais finas possuem muito mais capacidade e, assim, têm uma indutância necessária menor para a sintonia em uma dada frequência do que o sistema que usa camadas mais espessas. Por exemplo, para um empi-

lhamento circular de 9 mm de diâmetro e 1 cm de comprimento total, caso seja montado a partir de camadas de 90 mícrons, então a capacidade de empilhagem = 550 nF, enquanto que se for montado a partir de camadas de 35 mícrons, a capacidade de empilhagem = 3442 nF.

[00118] Opostamente, os empilhamentos com camadas mais finas possuem correntes muito mais altas durante o disparo. As altas correntes podem levar a perdas excessivas. As camadas mais finas também conduzem a sistemas de menor tensão sob tensões comparáveis que podem simplificar e aliviar o projeto eletrônico. A configuração preferida usa camadas de 90-100 mícrons de espessura. O material piezelétrico é uma composição "dura", similar ao PZT-4 comum. É selecionado para minimizar as perdas histeréticas piezelétricas, como também para maximizar a resistência do empilhamento e a tolerância a altos esforços axiais durante o impacto. Os bornes são ligados de maneira que todas as camadas piezelétricas atuem em paralelo. Os bornes são ligados ao lado do empilhamento conforme mostrado na FIG. 18. O elemento piezelétrico tem ~ 1 cm de comprimento e 9 mm de diâmetro. E ligado com epóxi forte nas tampas curvadas em camada muito fina (de modo a maximizar o acoplamento) para que o conjunto total 15 piezo/tampa tenha ~ 16 mm de comprimento.

#### Projeto Face e Cone

[00119] O objetivo é acoplar à deformação da face durante o impacto para maximizar a tensão e a carga geradas durante o impacto (energia elétrica gerada) e também acoplar a um modo de alta frequência do sistema da face que pode ser excitado pelas oscilações de alta frequência do atuador. O sistema converte a energia de impacto em oscilações de alta frequência da face. As oscilações de face de alta frequência podem ser usadas para controlar a interface de atrito entre a bola e a face, usando os conceitos de redução do atrito da interface pela vibração de superfície.

[00120] A estrutura da face é de titânio com espessura cuidadosamente controlada, de maneira a criar a estrutura modal desejável que tenha um modo de alta frequência facilmente excitado pelo elemento piezelétrico. A configuração geral da face, do alojamento e do piezelétrico (juntamente com o conjunto de face 14) é mostrada na vista montada na FIG. 17, na vista explodida da FIG. 18 e na vista em corte da FIG. 19. Consiste de um elemento piezelétrico 21 com tampas 23 (descritas acima) ligadas à face 10 e carregado contra esta por uma estrutura de alojamento cônico 12. O elemento piezelétrico interfaceia a face no ponto central para impactos 33. A face é feita com uma pequena ranhura 33 com um raio de curvatura um pouco maior que o da tampa, cerca de 13 mm, de maneira a prover uma localização positiva para o empilhamento na face.

[00121] É configurado um alojamento cônico 12 com uma peça de extremidade independente rosqueada opcional 13 para fazer interface com a extremidade distal do conjunto do atuador piezelétrico 15 (oposto à extremidade da face). Também tem uma interface curvada para prover um local positivo da tampa piezelétrica. A tampa cônica tem uma base rosqueada 29 que rosqueia no anel 37 na face do taco 10 (superfície interna), conforme mostrado. Com o rosqueamento do cone na face, o elemento piezelétrico se acopla mecanicamente à face e as alterações de tamanho axial piezelétrico são acopladas à curvatura da face. O raio do anel 56, assim como a espessura e a geometria do alojamento cônico são determinadas cuidadosamente, de maneira a minimizar as perdas elásticas e a deformação entre a face e a extremidade distal do elemento piezelétrico. A rigidez axial do alojamento deve ser a mais alta possível para maximizar o acoplamento piezelétrico à deformação da face.

[00122] O alojamento cônico pode ser configurado com furos de acesso em seus lados conforme mostrado na FIG. 18 elemento 32.

Permitem o posicionamento do empilhamento e orientam a saída da parte eletrônica localizada em outro local dentro da cabeça do taco. Deve ser tomado cuidado no projeto estrutural da face, do alojamento cônico e do elemento piezelétrico de maneira a evitar níveis de esforços críticos nesses componentes sob repetidas cargas de alto impacto. O sistema é projetado de forma que o alojamento possa ser rosqueado na face para reter seguramente o empilhamento piezelétrico na face e prover uma pré-carga de compressão suficientemente alta no elemento piezelétrico. O objetivo é manter o elemento de atuação em compressão durante o impacto e operação, já que os elementos piezelétricos não possuem altas resistências à tração.

[00123] A espessura da face é de 2,4 mm dentro do anel do cone 39 e 2,7 mm fora do anel em uma etapa 35 com conicidade gradual 36 até 2,2 mm de espessura mínima 34 movendo radialmente para fora do anel. As maiores espessuras fora do anel se devem ao esforço aumentado devido ao alojamento cônico rígido, que precisa de paredes mais grossas nessas áreas. O anel rosqueado pode ser soldado na face ou formado na mesma. Tem aproximadamente espessura de 2 mm e 3,5 mm de altura em 38. A espessura da parede do alojamento cônico 12 tem aproximadamente 1 mm.

[00124] Uma dimensão crítica é o diâmetro do alojamento no anel de ligação à face 38. Esse diâmetro é escolhido o maior possível, permitindo que o sistema tenha um modo de vibração axissimétrico em uma frequência suficientemente alta para permitir a excitação de altas acelerações na estrutura da face. Na configuração preferida, o anel 38 tem um diâmetro de aproximadamente 35 mm e altura de 4 mm. A espessura da face dentro do anel 39 é de 2,4 mm, sendo escolhida para combinar com um de seus modos componentes (como se fosse uma placa circular vibrando desligada do piezelétrico) com o primeiro modo de extensão axial do elemento piezelétrico. Essa combinação de modo

face-piezo cria um sistema acoplado (quando o piezo estiver ligado à face) que tem uma alta amplitude modal naquela frequência de projeto.

[00125] O alojamento cônico pode ter uma tampa rosqueada 13 em sua extremidade distal, a superfície rosqueada do alojamento 30 combinando com a superfície rosqueada da tampa 27. A abertura no alojamento permite um processo de montagem simplificado. Com o projeto de tampa removível, o alojamento cônico é primeiro ligado à face. Depois, o elemento piezelétrico é inserido e a tampa rosqueada no alojamento cônico, pré-carregando o piezelétrico contra a face. A tampa pode ter uma superfície curva côncava para combinar com a tampa convexa piezelétrica. A tampa 13 pode ter uma ligação rosqueada 27 com o alojamento cônico 12.

### Circuitos Elétricos

[00126] O sistema geral converte a energia elétrica - que foi gerada "quase-estaticamente" durante o impacto, por um elemento piezelétrico elasticamente acoplado, que é carregado durante o impacto. Quando o esforço/carga são aplicados ao elemento piezelétrico, a tensão e a energia elétrica armazenadas se acumulam no elemento piezelétrico. A parte eletrônica mostrada na FIG. 10 e na FIG. 11 converte essa energia elétrica armazenada no elemento piezelétrico em um movimento oscilatório de alta frequência do elemento piezelétrico. Para obter essa conversão, existe um "evento de comutação" que comuta um indutor LI na FIG. 11 e LIO ou LII na FIG. 10 pelos eletrodos do elemento piezelétrico carregado em um limite predeterminado de tensão. O nível de tensão pode ser predeterminado para corresponder a um impacto de determinada magnitude ou intensidade e, assim, somente disparar o sistema na eventualidade de um impacto suficientemente intenso, de maneira a garantir a ação corretiva no giro da bola.

[00127] O comutador também pode ser disparado por outros eventos que não o nível de tensão crítica. Por exemplo, o disparo pode ocorrer

no pico do carregamento durante o impacto usando um circuito de detecção de pico, que começa quando a tensão piezelétrica começa a recuar de seu valor anterior (círculo de detecção de pico).

[00128] O indutor é dimensionado de maneira que o capacitor e o indutor oscilem a uma frequência predeterminada (ou da ordem de 120 kHz) . A capacidade do elemento piezelétrico é aproximadamente 480 nF - 600 nF para uma espessura de camada de 100 micrões e 9 mm de diâmetro e 1 cm de comprimento total do empilhamento. Nesse sistema, o valor do indutor ideal LIO, LII, LI é de ~ 1-10 microHenries.

[00129] Em resumo, o projeto do circuito, a partir de uma funcionalidade de alto nível, é tal que sentirá o nível de tensão no piezo quando os eletrodos do piezo forem de circuito aberto e fechando um comutador em uma determinada tensão ligando um indutor àquele circuito, fazendo assim que o piezo (que tem uma tensão anterior ao disparo) oscile em altas frequências quando a tensão e a carga do piezo descarregarem pelo indutor, o que provoca um toque (*ringing*) conforme mostrado na FIG. 12.

[00130] O circuito mostrado nas FIGs. 10 e 11 têm essa simples funcionalidade de um comutador de disparo. Como o transdutor (piezelétrico) é tensionado durante o impacto, acumulam-se em seus eletrodos carga e tensão, armazenando essencialmente a energia mecânica de impacto que foi convertida pelo transdutor em energia elétrica. O circuito particular opera de maneira que quando a tensão atinge um limite crítico, é fechado um comutador que liga o elemento piezelétrico capacitivo a um indutor. O indutor é dimensionado de maneira que a constante de tempo LC do circuito elétrico fechado (a frequência de ressonância elétrica) está muito próxima da frequência natural de um modo estrutural - nesse caso, o modo de flexão de face selecionado.

[00131] O toque de alta frequência deve ser o mais eficiente possível na conversão da energia "quase-estática" no capacitor piezo na energia

de oscilação. Isso exige uma oscilação de perda muito baixa, de maneira que o *ringdown* tenha um índice de amortecimento muito baixo, um fator de qualidade muito alto, tipicamente inferior a 10% do crítico, e preferivelmente menos que 5% do crítico. Isso, por sua vez, exige comutadores de ligação de resistência muito baixa e elementos com baixa ou nenhuma perda como os indutores de baixa perda e não resistores no caminho de conexão primária.

[00132] O alto desempenho no sistema implica em evitar quaisquer perdas parasitas. Uma típica perda parasita é devida à carga necessária para acionar o circuito de controle do comutador ou quaisquer elementos do sistema elétrico, tais como capacitores que atuam para reduzir a tensão de circuito aberto que o piezo estaria normalmente gerando no impacto.

[00133] A tensão típica que se espera ver no piezo antes do disparo é da ordem de 400v (o sistema pode ver 100v a 600v) . Vários desses componentes serão componentes de alta tensão e, portanto, devem ter altas tensões de rompimento, mas ao mesmo tempo muito baixas nas resistências para perdas muito pequenas.

[00134] Portanto, de modo geral, o sistema consiste de quatro componentes: 1) um transdutor piezelétrico 21 com alguma capacitância, 2) um comutador Q3 na FIG. 11 controlado pelo 3) circuito de controle e que liga um 3) indutor LI na FIG. 11 nos eletrodos piezelétricos.

[00135] É muito importante que este comutador principal ligue muito rápido quando a tensão nos eletrodos do elemento piezelétrico atingir um nível crítico (nível limite predeterminado). Ter o comutador ligando rápido é importante para reduzir as perdas, pois a 120 kHz, se ligar relativamente lento e se levar alguns microssegundos para ligar, a perda na tensão piezo antes que possa ocorrer um verdadeiro *ringdown* pode ser bastante grande. Em essência, se a carga do piezo for drenada antes de conectar totalmente o indutor. Isso limita muito as ten-

sões iniciais e subsequentes de oscilação. Um circuito ideal liga o indutor no piezo com pequena ou nenhuma queda na tensão do piezo a partir de seu original estado de circuito aberto (antes do início da comutação). Em resumo, em operação o sistema atinge um nível limite de disparo e então rapidamente fecha um comutador de alta tensão, de maneira que tem perda muito pequena e o *ringdown* inicia no nível de tensão de circuito aberto determinado pelo evento de disparo.

[00136] O diagrama de bloco do circuito é mostrado na FIG. 10a e b, mostrando o circuito de controle acionando o comutador para conectar o elemento indutor aos terminais do elemento piezelétrico. A FIG. 10a mostra uma configuração na qual o comutador está entre o piezelétrico e o indutor (lado alto), enquanto 10b é uma configuração na qual o dreno do comutador está nominalmente aterrado (lado baixo). O circuito detalhado da configuração em 10b é mostrado na FIG. 11. Na seção a seguir, sua operação será descrita fazendo referência aos números dos elementos encontrados nessa figura. A operação dos componentes principais do circuito é a seguinte:

#### Piezo (P1):

[00137] O circuito está conectado a um dispositivo piezelétrico P1, com o alto eletrodo do dispositivo piezelétrico (tensão positiva sob compressão de empilhamento) sendo conectado ao indutor LI (FIG. 11). Na FIG. 11, o elemento piezelétrico pode ser representado por uma fonte de tensão em série com uma capacitância C representativa. Na atualidade, esses elementos não são parte do circuito e servem somente para representar o elemento piezelétrico em propósitos de sintonização. Essa representação negligencia o acoplamento da energia elétrica à energia mecânica e realmente somente reflete os efeitos das forças mecânicas no elemento piezelétrico (do acoplamento mecânico para o elétrico). O capacitor C é dimensionado para refletir a capacidade de circuito aberto do piezelétrico; enquanto a fonte de tensão é

dimensionada para representar a oscilação de tensão de circuito aberto que o piezelétrico poderia ver sob as forças mecânicas na condição de circuito aberto (nada ligado). Um modelo mais completo do piezelétrico incluiria análogos elétricos das propriedades mecânicas como rigidez e inércia do dispositivo piezelétrico, assim como um transformador ou girador acoplando os domínios mecânico e elétrico.

Indutor (L1):

[00138] O indutor L1 está conectado ao elemento piezelétrico P1. Está inicialmente flutuando (não conectado à terra) já que o comutador Q3 está aberto e, portanto, não flui corrente nele. No evento de disparo e no subsequente fechamento do comutador principal (Q3), o lado flutuante de L1 está ligado à terra, sendo criado um circuito fechado entre o elemento piezelétrico e o indutor - agora ligado em paralelo à capacidade piezelétrica. Isso cria um circuito LRC fechado, com o piezo atuando como capacidade, L1 atuando como indutância e a resistência em série de L1, assim como qualquer resistência do comutador principal Q3 (e qualquer resistência de condução) atuando como R. O objetivo fundamental do projeto é criar um circuito elétrico altamente ressonante (baixo R e baixo amortecimento) para permitir o acoplamento das oscilações elétricas nas oscilações mecânicas do piezo e da face. Por essa razão, o indutor deve ter uma resistência em série muito baixa na frequência de oscilação do circuito LRC. isso está tipicamente na faixa de 50 - 200 kHz. É essencial usar indutores de alta qualidade e baixa perda dimensionados para operação de alta frequência como em fontes chaveadas. Para nossos sistemas, a capacidade piezelétrica é da ordem de 200-600 nF (com ~400 nF sendo mais comum) e valores de indutância na faixa de 1-12 aE sendo tipicamente usados para estabelecer a frequência de oscilação (com ~6 uH mais comum) como dado pela fórmula =  $1/\sqrt{LC}$ , onde f é a frequência de ressonância elétrica desejada (a fórmula funciona para sistemas levemente amortecidos).

Em nosso sistema escolhemos *choke coils* [elementos de circuito usados para suprimir ou limitar o fluxo de corrente alternada sem alterar o fluxo de corrente contínua] de 3,3 uH da Vishay IHLP5050FDRZ3R3M1 ou então bobinas da Panasonic PCC-F126F (N6) para as quais um valor de 8,2 uH tem uma resistência CC de -11 mQ (e um pacote muito compacto) . A troca a ser considerada é baixa resistência versus tamanho do pacote. Ambas pesam cerca de 3 gramas cada. Como o valor da indutância é tipicamente uma função da frequência, é importante selecionar um indutor que tenha o valor correto na frequência do circuito ressonante.

[00139] Como os efeitos de saturação podem ser importantes na comutação (já que as correntes podem ser grandes), deve ser tomado cuidado ao escolher um indutor que não sature o núcleo. A saturação altera a sintonização efetiva e o valor da indutância e complica muito o processo de sintonia. Em altos níveis de corrente, os campos magnéticos da bobina se saturam, reduzindo efetivamente a indutância da bobina. Isso pode levar a dificuldades na sintonia da ressonância, que agora é dependente da amplitude e leva a perdas excessivas na comutação, já que a menor indutância do indutor saturado não age como um *choke* efetivo para limitar as altas correntes de comutação. É desejável escolher um indutor que minimize os efeitos não lineares que complicam a sintonia, tais como a saturação e perdas histeréticas no núcleo.

#### Comutador Principal Q3) :

[00140] O comutador principal é um dos elementos mais críticos do circuito. Quando é atingida uma tensão limite predeterminada, o circuito de controle liga o mosfet Q3, elevando a tensão de gate desse mosfet de N canais. Acima da tensão crítica de gate, (~5-10 volts) a resistência "on" do mosfet cai dramaticamente. O mosfet muda de um circuito aberto para uma conexão de baixa resistência "on" para aterrkar o indutor.

O resistor R4 é dimensionado de maneira que o gate esteja nominalmente aterrado, mesmo na presença de uma corrente de carregamento de fuga do mosfet Q2. Quando o circuito de controle dispara, o gate de R3 é rapidamente carregado até a tensão limite e a resistência "on" de Q3 cai rapidamente, fechando essencialmente o comutador. Como a carga necessária para disparar o comutador é derivada do próprio piezo, essa carga de disparo é completamente parasítica e deve ser minimizada para maximizar os níveis de tensão inicial do piezo. Para tanto, uma exigência primária desse mosfet é uma baixa carga de acionamento de gate e uma baixa capacitância total de gate. O mosfet também precisa operar em altas tensões *source-to-drain*, isto é, suportar a tensão do piezo sem rompimento antes de atingir a condição de disparo e acionamento. Portanto, a alta tensão de rompimento é fundamental. A baixa resistência, tipicamente inferior a 0,1 Ohms é também importante, já que isso contribui para o amortecimento da oscilação elétrica, sendo talvez o mecanismo de perda primária de energia elétrica do sistema. É também importante notar que os mosfets possuem um diodo intrínseco do *source to drain*. Isso provê um caminho de corrente reversa durante os *upswing*s (zona de subida) nas oscilações elétricas após a comutação. No presente circuito, o comutador Q3 é mantido ligado durante as oscilações elétricas pelo diodo D3, que permite que a carga flua no gate quando este dispara, mas não flua para fora do gate durante as subsequentes oscilações de tensão durante a oscilação. A constante de tempo de quanto Q3 permanece ligado após o disparo é determinada pela combinação da capacitância de *gate* e o resistor R4. Após disparar, a carga iniciará a vaziar lentamente do gate, até que o limite de tensão seja ultrapassado, aumentando dramaticamente a resistência *drain source* e abrindo efetivamente o comutador.

[00141] Vários mosfets de alta tensão foram cotados e avaliados, existindo atualmente dois valores de base, o APT3 0M75 da Advanced

Power Technologies e o SI4490 da Vishay Siliconex. Suas propriedades comparativas estão relacionadas abaixo:

Dispositivo	Vds Max	Carga Gate source	Ron em Vg= 10 V	Tensão para frente do Diodo
APT3 0M75	300V	57 nC	0,075	1,3
SI4490	200V	34 nC	0,070 Ohm	0,75

[00142] Estas foram selecionadas com base em suas baixas cargas de gate e baixa resistência "on", ainda mantendo alta capacidade de tensão. Entretanto, para sistemas de tensões muito altas, o comutador preferido é o STY60NM50 da ST Microelectronics, projetado para 500 volts e 60 amps.

#### Circuito de controle:

[00143] O circuito de controle é projetado para aumentar a tensão no gate de Q3 rapidamente, quando um nível limite de tensão crítico é alcançado no piezelétrico. É necessário ligar rápido (e alto ganho no circuito de controle) para evitar alta perda de energia durante a transição para o estado ligado - uma transição muito lenta limita a oscilação de tensão de pico negativo do circuito e o subsequente toque.

[00144] Outra característica do circuito de controle é ser *latching*, significando que quando Q3 é ligado, permanece ligado independente das oscilações de tensão do piezo. Permanece ligado por um período determinado pela fuga da carga de acionamento de gate Q3 por R4. R4 é tipicamente 3 megaOhms.

[00145] A operação do circuito de controle é a seguinte: Q3 está inicialmente aberto, de maneira que a tensão no terminal fonte (superior) de Q3 é essencialmente a tensão do circuito aberto do piezo. Na tensão crítica, determinada pelos diodos Zener, D4, D5 e D6, que coletivamente iniciarão a conduzir a soma das tensões nominais (mais a queda do diodo associada a DI), a corrente começará a conduzir por D4-D6, carregando o capacitor C3 e ligando o transistor Q1. É impor-

tante que D4-D6 sejam de baixa fuga, já que uma pequena fuga prematura por D4-D6 pode fazer com que o capacitor C3 carregue e ligue Q1 parcial ou prematuramente. R2 é dimensionado (tipicamente 100 kOhm) para limitar o aumento de tensão associado à corrente de fuga dos Zeners, D4-D6, e permitir um caminho de descarga para o capacitor C3 (entre tacadas). O transistor Q1 somente precisa ser projetado para baixa tensão, já que sua fonte é conectada para controlar o capacitor de suprimento C4, que é mantido em não mais que 28 volts pelo Zener D2.

[00146] O capacitor de suprimento de controle C4 é carregado durante a oscilação inicial de alta tensão do piezo. Este carrega com um índice determinado pelo resistor R3 (tipicamente 5 kQs). No presente sistema, isso fica estabelecido em cerca de 5 kQs, permitindo um tempo de carga de aproximadamente 100-200 jxsec para o valor C4 na faixa de cerca de 47 nF. No projeto, o resistor R3 é dimensionado para carga rápida depois que o capacitor C4 é dimensionado. O capacitor C4 é dimensionado de tal forma que, quando é conectado ao gate do comutador principal Q3 (quando Q2 liga), descarrega sua carga no gate ainda não carregado Q3, reduzindo a tensão em C4 e elevando a tensão de gate no Q3 até condição total. Portanto, C4 é dimensionado para ser suficientemente grande para abastecer a carga de gate de Q3 até o nível ON necessário. Como a carga em C4 é parasítica para a carga do piezo, e efetivamente reduz a tensão do piezo, é desejável ter C4 o menor possível, permitindo ainda assim a elevação de tensão de gate necessária em Q3. Nos Mis selecionados, esse valor pode ser tão baixo quanto 3.3 nF, mas para alguns dos maiores mosfets principais, foi necessário 47 nF. Na prática, a tensão de pico do capacitor C4, que é limitada pelo Zener D2, é estabelecida a mais alta possível, enquanto mantêm os mosfets e transistores de controle com baixo custo e baixa perda. Em nosso circuito, escolhemos 28 volts para o capacitor de suprimento C4. Os testes mostraram que nesses valores componentes, os

circuitos de controle reduziram a tensão do piezo em somente uma pequena fração da tensão total do piezo de circuito aberto.

[00147] Quando é alcançada a tensão crítica e o comutador Q1 é ligado, isso por sua vez reduz o gate do mosfet Q2 do canal P, ligando-o rapidamente e conectando o capacitor C4 carregado ao gate do mosfet principal Q3. Isso, por sua vez, carrega o gate Q3 e o liga rapidamente. Foi usado um Fairchild BSS110 para o mosfet Q2 do canal p. A versão mosfet do circuito tem muito menos fuga de C4 para o gate Q3. Essa fuga ocorre quando C4 é carregado, mas os comutadores Q2 e Q3 estão nominalmente abertos. Essa fuga de carga no gate de Q3 provocou uma comutação parcial prematura ON de Q3. Usando o mosfet em Q2 elimina essa fuga e induz uma comutação limpa. Quando o gate de Q3 estiver carregado, permanece carregado, já que carrega pelo diodo D3 e somente comuta para aberto novamente depois que a carga do gate tiver escoado por R4.

[00148] Conclusão Elétrica Geral: O elemento piezelétrico, essencial e inicialmente um circuito aberto, é carregado. Quando as baixas perdas parasíticas que reduzem a tensão do piezo alcançam o nível limite controlável pelo usuário, um comutador elétrico conecta um indutor no piezo e inicia sua oscilação em frequências muito altas. Esse comutador deve comutar muito rapidamente para evitar perdas durante a transição de circuito aberto para circuito fechado. Tem que ter resistência "on" muito baixa, sendo necessário um circuito que dispare e acione aquele comutador e não tenha fuga capacitiva muito grande, pois isso reduziria a tensão no piezo. A energia usada para ligar o comutador é energia não disponível para a oscilação.

[00149] É desejável ter a capacidade de poder sintonizar, desligar ou, sob controle elétrico, ligar e alterar os indutores para prover frequência variável de sintonia.

[00150] Alguns circuitos possuem oscilação auto-travante. Caem

automaticamente em uma frequência de oscilação determinada de pelo ganho de feedback ou ganho de retardo no circuito. É possível que isso permitisse o travamento da vibração piezo.

[00151] Seria útil que o sistema tivesse algumas interfaces externas que permitissem a sondagem de tensões e sinais no sistema durante a operação. Vários pontos de terminais/sensores/sonda (interfaces externas do quadro) permitem a sintonia e o exame dos estados e condições do sistema durante os testes e operações. Os sinais podem ser enviados por cabos externos, etc, sem perturbar o sistema ou podem ser enviados sem fio. As interfaces com a parte eletrônica externa (com ou sem fio) podem ser usadas para monitoramento/telemetria e para a reprogramação do desempenho do sistema ou o *download* de diagnósticos e dados.

[00152] Esses elementos de circuitos elétricos (externos ao elemento piezelétrico acoplado à face) são configurados em quadros simples ou múltiplos e lados simples ou lados múltiplos. O quadro é preferivelmente configurado dentro da cabeça do taco de golfe ou externamente ao taco, ligados por terminais de transdutor que se estendem por fora da cabeça até o quadro, conforme mostrado nas figuras 13 e 14. Alguns ou todos os componentes podem se localizar no quadro externo para permitir um fácil acesso aos circuitos, para alterar os níveis de disparo ou sintonizar o circuito. De maneira alternativa, o quadro 18 pode ser configurado em placa simples 54 (ou outra peça removível) como parte de um conjunto de placa simples 16, conforme mostrado nas figuras 14 e 15, ligada à cabeça e nas Figuras 16a e 15b separada da cabeça do taco. O conjunto de placa simples 16 pode ser configurado com terminais 22 ou conectores de tomada 20, de maneira que a conexão elétrica seja feita no conjunto da peça removível para o corpo principal do taco. Esse arranjo é mostrado nas FIGs. 14 e 15 em vista em corte e nas FIGs. 16a e 16b com o conjunto de placa simples se-

parado. Essas figuras ilustram um quadro de circuito elétrico 18 montado em uma placa simples removível 54 pelos separadores 45, de maneira que quando a placa simples é inserida e conectada ao corpo do taco 11 pelos retentores 47, é feita uma conexão elétrica entre um conector no quadro primário 49 e um conector 20 no quadro do "conector" secundário 19, que está permanentemente montado na cabeça 11 pelos separadores 44 e conectado eletricamente ao transdutor 21 e ao conjunto de face 14.

[00153] Esse arranjo permite a remoção simples e a sintonia/manutenção/reparos do circuito e do quadro elétrico. O conector e o quadro do conector, montados permanentemente na cabeça permitem a remoção simples do quadro primário. Outros conectores podem ser configurados no quadro primário para permitir o monitoramento/diagnóstico externo durante os *swings* e impactos do taco. De maneira alternativa, essas informações podem ser transmitidas sem fio para um receptor e armazenadas para exame posterior. Alternativamente, os dados tomados durante o evento de impacto podem ser armazenados na memória do quadro ou no quadro para posterior descarga/*downloading* a partir de um *prompt* de comando. A transmissão de telemetria pode ocorrer em canais com ou sem fio.

[00154] Essas informações que podem ser armazenadas e monitoradas, incluem a velocidade do *swing*, força de impacto, local e intensidade do impacto bola-face, desaceleração da cabeça do taco e a aceleração resultante da bola ou de qualquer número de estados do sistema que estejam associados com a dinâmica e as condições do *swing* e do impacto (ou vibração resultante da resposta do sistema bola-cabeça).

#### Procedimento de Montagem

[00155] Na montagem, a sequência dos eventos pode ser feita de várias maneiras, entre as quais uma é apresentada abaixo.

[00156] Formar a face 10 com o anel adequadamente configurado. Realizar as operações de usinagem pós-forjamento para estabelecer o diâmetro interno e a rosca 37 no diâmetro interno do anel. Também formar e polir a ranhura 33 no local que a empilhagem fará interface quando em contato com a face.

[00157] Colocar a peça falsa rosqueada na rosca do anel da face para manter sua forma e soldar a face no corpo 11. Depois, retirar a peça rosqueada falsa de suporte.

[00158] Rosquear no cone 12 até o aperto.

[00159] Inserir o conjunto piezo-empilhamento/piezo-tampa 15 no cone para fazer contato com a face. Pode haver um elemento suporte feito de plástico ou de outro material flexível, projetado para manter o piezo no lugar/em posição até que a tampa do cone possa ser rosqueada e o piezo possa assim ser pré-carregado contra a face e travado em posição. Os terminais do piezelétrico 22 devem ser guiados nos furos das paredes do alojamento 32. Devem ter um isolante adequado ou alívio de tensões para evitar a abrasão durante o movimento induzido de impacto.

[00160] A tampa 13 é então rosqueada no cone (curvada dentro, fazendo interface com o conjunto de empilhamento piezelétrico), até que o piezo esteja assentado com segurança e pré-carregado contra a face, suficientemente para valer-se do rompimento de contato entre a face e as tampas do piezo durante o impacto (cerca de 1000N de pré-carga de compressão). Uma fina camada de óleo de máquina pode ser usada entre as tampas do conjunto do piezo, a face e a tampa do cone para ajudar no assentamento.

[00161] A rosca na tampa do cone 13 é então travada no lugar com um parafuso de regulagem, com epóxi ou outro método de fixação.

[00162] Os terminais do piezo são então soldados no pequeno quadro conector 19 que fixa o conector 20 para interfacear com o

quadro primário (removível) 18. O quadro conector é permanentemente fixo à cabeça com epóxi ou parafusos em um separador 44. O quadro conector está posicionado de maneira a fazer interface com o quadro primário sem interferência.

[00163] A coroa da cabeça do taco 43 é então ligada ao corpo da cabeça 11 em uma operação de fixação com epóxi a 160°C.

[00164] O quadro primário 18 e o conector 49 são ligados à placa simples removível 54. E todo o conjunto removível 17 é então inserido na cabeça do taco e aí rosqueado. O sistema está agora operacional.

#### Configuração Alternativa: Controle de Rigidez de Face

[00165] Nas seções anteriores, foram apresentados um método e um sistema para obter o controle do atrito face-bola usando vibrações ultrassônicas. Nesta seção, será apresentada uma configuração alternativa usando um piezo transdutor (ou outro) acoplado à face de um taco de golfe (*putter, driver, iron*) para realizar o controle de rigidez. Pela variação da rigidez efetiva de face, o curso e o resultado do impacto bola-face é realizado/controlado, sendo este geralmente um exemplo de um sistema de controle de impacto usando materiais transdutores de estado sólido. Os conceitos apresentados nesta seção são descritos em termos de um transdutor piezelétrico acoplado a uma face, mas aplica-se mais geralmente a um sistema com qualquer transdutor acoplado ao movimento da face - enquanto o transdutor é capaz de converter energia mecânica em energia elétrica e vice-versa, isto é, exibe acoplamento eletromecânico.

#### Princípio Geral

[00166] O conceito geral é utilizar o mencionado acoplamento eletromecânico de um transdutor acoplado na face para mudar a rigidez efetiva da face sob condições indicadas. Em essência, a rigidez da face é controlada para produzir um efeito desejado a partir do impacto bola-face (com a rigidez controlada). A rigidez pode ser controlada pois,

em um sistema com acoplamento eletromecânico, a alteração das condições limite no lado elétrico (portas) do sistema altera a rigidez efetiva do lado mecânico do sistema. Por exemplo, é bem conhecido na técnica que a rigidez de um elemento piezelétrico em curto é menor do que a correspondente rigidez de um elemento piezelétrico equivalente com os eletrodos abertos. Este efeito pode ser usado para mudar a rigidez efetiva (longitudinal, isto é, na direção de polarização ou modo cortante, isto é, transversal à direção de polarização) do material piezelétrico e do elemento piezelétrico. Como o elemento piezelétrico está mecanicamente acoplado à face, essa alteração na rigidez do elemento piezelétrico resulta em uma alteração da rigidez da face.

[00167] Em quaisquer das configurações de acoplamento mecânico transdutor-face acima apresentados (Conceitos 1-8), o transdutor está mecanicamente acoplado à face, de maneira que uma mudança na rigidez do transdutor muda o comportamento da face. No caso de configurações de acoplamento elástico (Conceitos 1-4) , pode-se dizer que uma mudança na rigidez do transdutor muda diretamente a rigidez da face ao impacto da bola. Isso altera de forma equivalente a deflexão da face sob o impacto. Nos casos de acoplamentos inerciais (Conceitos 5-8), as mudanças de rigidez no transdutor resultam em mudanças no acoplamento entre o movimento da face e a massa inercial (para o Conceito 8, este é o restante da cabeça do taco) - mudando a rigidez dinâmica da face, senão a rigidez quase-estática (CC) . Isso se deve a esses conceitos de acoplamentos inerciais não estarem acoplados em CC. Não há efeito sobre o sistema em frequências muito baixas, já que existe pouca força inercial da massa de prova em baixas frequências. Entretanto, são projetados para ter efeito no sistema nas escalas de tempo do impacto e, assim, uma mudança na rigidez do transdutor na faixa de frequências associadas com o impacto da bola (cerca de 0,5 milissegundos e 1kHz). Assim, quaisquer dos Conceitos 1-8 podem ser

usados para mudar a rigidez efetiva da face sob impacto, variando a rigidez do transdutor.

#### Configurações do Transdutor

[00168] Como acima mencionado, podem ser usadas quaisquer das configurações descritas do transdutor como base para este conceito de controle de impacto. Por exemplo, uma configuração usa um empilhamento piezelétrico acoplado à face, como no Conceito 2. No projeto mecânico apresentado anteriormente para o Conceito 2, e mostrado esquematicamente nas FIGs. 2a e 2b, e em detalhes nas FIGs. 13-19, a rigidez da face CC (para forças centrais da bola, normais à face) aumenta aproximadamente 25% a partir do caso de curto-circuito para os cenários de circuito aberto. Uma configuração alternativa ao uso do transdutor de empilhamento é o uso de um transdutor piezelétrico planar (potencialmente embalado ou outro material de transdutor de estado sólido) ligado à face e, assim, acoplado ao movimento da face pelo acoplamento à extensão e flexão da face. A rigidez da face à flexão e, portanto, a rigidez geral às forças da bola podem ser mudadas alterando as condições limite do circuito elétrico (circuito aberto ou curto-circuito).

#### Operação dos Circuitos do Sistema

[00169] Para permitir o controle, devem ser determinadas as condições limite elétricas do transdutor (controlado), com base em alguma resposta ou comportamento do sistema. Isso pode ser determinado com base no próprio transdutor (isto é, tensão ou carga sob carregamento) ou pode ser determinado por um sensor independente, por exemplo, um sensor de alongamento de face ou de deflexão de face. Também pode ser usado um acelerômetro para determinar a desaceleração da cabeça do taco sob impacto e disparar o sistema adequadamente.

[00170] Em operação, o transdutor é colocado em condição de circuito aberto ou em curto-circuito, dependendo do sensor. Por exemplo,

as conexões elétricas podem ser controladas com base na intensidade de impacto - tornando o sistema mais rígido sob impactos de bola mais intensos e menos rígido sob impactos menores da bola. Isso pode ser especialmente importante em condições que exijam sentidos mais aguçados, maior tempo de residência da bola e um aumento do giro superior (*topspin*) ou do ângulo de lançamento, tal como nos embocamentos ou embocadores (putters) ou lançamentos com *wedges* e *short irons*.

[00171] Para a embocadura, é conhecido na técnica que a chave para a redução do deslizamento é induzir na bola o máximo *topspin* possível antes que deixe a face do putter, sendo vantajoso minimizar a distância que a bola patina antes de começar a rolar.

[00172] O impacto de um putter comprime a bola de golfe da frente para trás enquanto amplia seu perímetro por um instante. A bola então retorna à sua forma inicial, fazendo com que seja propelida para frente a partir da face do taco. Um cenário perfeito teria a bola de golfe retornando em uma direção somente determinada pela direção que o putter estiver percorrendo e do ângulo da face do putter com relação àquela direção. Como as bolas de golfe não são perfeitamente balanceadas, as imperfeições da bola podem desviá-la da direção de rebote denominada deflexão de compressão. Uma redução na quantidade com que a bola é comprimida no impacto reduz a deflexão de compressão. Uma face mais macia reduz o carregamento da interface e reduz a compressão da bola. Portanto, quando adequadamente sintonizado, o efeito desejado do sistema reduz a deflexão de compressão da bola e otimiza as condições de lançamento e de rolagem. Por exemplo, em *putters*, a combinação de se ter uma face de taco relativamente macia com uma alta resiliência de rebote, aumenta o controle tanto na distância como na direção.

[00173] A deformação elástica dos materiais da bola e da face tem

uma enorme influência na direção, velocidade e na maneira que uma bola de golfe é propelida, lançada ou ejetada de uma face de taco após ser comprimida durante o evento de impacto. A resiliência efetiva de uma face de taco que golpeia uma bola é uma combinação da resiliência da bola e da face do taco. Para maximizar o controle, em putters e wedges é melhor que uma substancial parte da resiliência efetiva venha da face do taco, e não da compressão da bola, para reduzir a deflexão de compressão.

[00174] Em contraposição com esse desejo de maior conformidade na face para aumentar o controle, em lance de embocamento e de menores lances de golfe, quando a velocidade de impacto aumenta, a quantidade de controle poderia potencialmente diminuir com uma face mais conforme, devido à intensidade do impacto e da força do golpe com relação ao ponto de percussão. As deformações induzidas pelo impacto podem contribuir com os erros na trajetória da bola e a inconsistência do golpe especialmente em impactos não ideais de alta intensidade. Essencialmente, o aumento de conformidade pode levar a uma perda de controle nos cenários de impacto de maior intensidade.

[00175] Para aumentar o controle do lance e reduzir a dispersão é, portanto, desejável ter uma face de taco que tenha uma menor rigidez nos eventos de intensidades de menores impactos, porém maior rigidez em eventos de intensidades de maiores impactos.

[00176] Na configuração principal, quando o piezo é armazenado em condição de curto e de um aumento na quantidade de tempo em que a bola permanece em contato com a face do taco, o "Tempo de Residência" é acoplado à face do taco com alto coeficiente de atrito, resultando em um aumento apreciável no controle e otimização das condições de lançamento da bola.

[00177] Um maior tempo de residência permite que a face do taco tenha uma maior oportunidade de reter a bola com o propósito de in-

duzir um *topspin*. É também sabido que um maior tempo de residência melhora a sensibilidade.

[00178] Por exemplo, em impactos de baixa velocidade com um putter, o Piezo em curto permite à face do taco aninhar a bola durante o contato, resultando em maior tempo de residência e menor deslizamento no campo. Além disso, essa característica de desempenho traduz maior sensibilidade e controle, que também são conhecidos na técnica como melhora da precisão, consistência e confiança.

[00179] Em contraste, enrijecer a face em impactos de maiores velocidades pode aumentar a precisão e a consistência, reduzindo os erros induzidos pela deformação elástica. Além disso, o efeito de enrijecimento variável apresenta uma faixa significativa de características de desempenho de um taco de golfe que utiliza somente simples variações de circuitos elétricos. Considerando a mesma faixa de características de desempenho, um projeto de taco de golfe passivo exigiria vários tacos de golfe projetados de maneira idêntica, com a variação das condições limites de materiais da face do taco para essa faixa. Assim, é possível a idéia de um sistema de taco eletricamente sintonizado ou adaptável. Considerando que a troca de um resistor ou de nível de disparo pode ser usada para alterar o comportamento do taco de maneira a se adaptar a um determinado jogador ou condição de jogo.

[00180] Tornando o sistema mais rígido sob determinadas condições durante o curso do impacto, o resultado do impacto está sendo controlado. De maneira alternativa, uma mudança de rigidez pode ser configurada e fixada pelo usuário antes do lance, permitindo assim um tipo de adaptação do taco ao usuário. O usuário pode selecionar a regulagem de rigidez mais desejada e fazer essa regulagem na fábrica ou em um sistema controlável pelo usuário, a rigidez pode ser estabelecida pelo usuário antes do jogo - dependendo dos desejos do usuário ou das condições do jogo (condições do tempo, vento, etc). O comutador ou

outro dispositivo de ajuste elétrico pode ser configurado para o fácil acesso do usuário, por exemplo, no final do *grip* (segurar o cabo com força).

[00181] Um esquema de uma configuração preferida que usa o próprio piezelétrico como sensor de impacto é mostrado na FIG. 23 .

[00182] Em operação, o circuito atua para abrir os eletrodos piezelétricos em cenários de impactos mais fortes e os deixa em curto nos cenários de impactos mais suaves. O transdutor (acoplado à face) está eletricamente conectado para circuitos sensores de carga ou tensão. Em essência, é configurado como um sensor. O circuito sensor mantém o terminal alto piezelétrico aterrado, essencialmente curto-circuitando o piezelétrico. Nessa condição, o transdutor piezelétrico exibe propriedades mecânicas de curto-circuito. Se a tensão de saída do sensor atingir um nível crítico, então o circuito é acionado e o comutador (normalmente fechado) que liga o piezo ao circuito está aberto, abrindo essencialmente os eletrodos do transdutor piezelétrico. Ao disparar a parte eletrônica, o transdutor piezelétrico tem então rigidez de circuito aberto e a face à qual está mecanicamente acoplado terá agora maior rigidez para o restante do impacto.

[00183] Um circuito que implementa isso é muito similar ao circuito descrito acima para a aplicação do controle de atrito. O circuito é modificado pela reposição do indutor LI, com um resistor R12 na FIG. 23, e o comutador MI, que é um mosfet de modo ampliado de n canais no circuito de controle de atrito, é substituído por um novo mosfet que é um mosfet de modo de depleção de n canais Q12. Com um mosfet de modo de depleção de n canais Q12, o circuito está inicialmente em condição de curto, isto é, o comutador Q12 está fechado. Com a redução de tensão no gate do mosfet (quando este dispara) o mosfet de modo de depleção abre o circuito, desconectando assim o resistor e, portanto, os eletrodos piezelétricos. O circuito é agora um circuito aberto. O circuito

de controle opera para reduzir, ao invés de aumentar a tensão de gate como no circuito de controle de atrito. Tais circuitos de acionamento por mosfet acionado por tensão são comuns na técnica.

[00184] O evento de disparo é ajustado quando a tensão do piezoeétrico atinge uma tensão limite enviada pelo diodo Zener. A tensão aumenta pois o piezo é forçado a descarregar pelo resistor R12 e, portanto, não perfeitamente em curto. Isso dá a oportunidade de disparar o aumento de tensão que ocorre quando o piezo é forçado. Se o piezo estivesse realmente em curto, a tensão não aumentaria e o disparo não ocorreria. Como o piezo está inicialmente em *shunt* pelo resistor R12 (o comutador Q12 estando inicialmente fechado), a tensão aumentará enquanto ocorrerem os esforços, em uma taxa proporcional ou maior do que a constante de tempo RC do sistema. Com as forças em frequências abaixo das associadas com a constante de tempo RC, a tensão não subirá muito, já que o resistor aparece como um curto. Acima da constante de tempo, (isto é, para forças relativamente rápidas) o resistor aparece como um circuito aberto, e a tensão sobe. O piezo essencialmente não tem tempo para descarregar pelo resistor durante o curso do evento.

[00185] Assim, o circuito tem o efeito que impacta com suficiente proporção ou intensidade, que aumenta a tensão no piezo em *shunt* pelo resistor, dispara o circuito e abre o mosfet de modo de depleção, efetivamente abrindo o circuito e colocando o piezo em uma situação de circuito elétrico aberto. O sistema assim enriquece o sistema após impactos suficientemente intensos ou rápidos. O sistema pode ser sintonizado por seleção ou por um resistor adequadamente em shunt ou (primariamente) pela seleção da adequada tensão de rompimento de disparo do Zener.

[00186] O sistema acima mencionado é auto-sensor e auto-acionado, no que não obtém energia de fonte externa, mas do próprio

transdutor acoplado à face. Deve-se notar, que o sinal de disparo pode ser derivado de um sensor alternativo. Além disso, a lógica de feedback poderia ser mais complicada, talvez mesmo determinada por um microprocessador programável. Esse microprocessador poderia ser energizado a partir da energia retirada pelo circuito do evento de impacto. O microprocessador poderia ser programado externamente como resultado de um sistema de adaptação para responder sob condições predeterminadas às características e capacidades de golfistas individuais. Este é o conceito de um taco programável "smart", projetado para maximizar a vantagem do impacto derivado de um determinado *swing* de um golfista. A programação essencialmente permite que o comportamento do taco seja sintonizado e individualizado para o golfista, suas características e capacidades. Por exemplo, corrigindo *hooks* ou *slices*.

[00187] Tendo assim revelado várias configurações da invenção, será agora aparente que muitas variações sejam possíveis, sendo as variações ora descritas somente ilustrativas dos conceitos inventivos. Assim, seu escopo não deve se limitar à revelação acima, mas somente pelas reivindicações anexadas e seus equivalentes.

## REIVINDICAÇÕES

1. Cabeça de taco de golfe, dotada de uma superfície de impacto (10) para o lançamento de uma bola de golfe;

a cabeça compreendendo um transdutor (21) para a conversão da energia mecânica da referida superfície de impacto (10) de uma bola de golfe em energia elétrica;

um circuito (18) para guiar e aplicar seletivamente a referida energia elétrica; e

um atuador mecanicamente acoplado à referida superfície de impacto (10) e responsivo à referida energia elétrica para afetar a referida superfície de impacto (10) e alterar o impacto da bola de golfe de resposta na referida energia elétrica,

caracterizado pelo fato de que o atuador é configurado para levar a superfície de impacto (10) a uma vibração em frequência ultrasônica.

2. Cabeça de taco de golfe, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o referido transdutor (21) compreende um elemento piezelétrico.

3. Cabeça de taco de golfe, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o referido atuador compreende um elemento piezelétrico.

4. Cabeça de taco de golfe, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o referido transdutor (21) e o referido atuador compreendem um elemento piezelétrico comum.

5. Cabeça de taco de golfe, de acordo com a reivindicação 4, caracterizada pelo fato de que o referido elemento piezelétrico está fixado à referida superfície de impacto (10).

6. Cabeça de taco de golfe, de acordo com a reivindicação 4, caracterizada pelo fato de que o referido elemento piezelétrico está acoplado à referida superfície de impacto (10).

7. Cabeça de taco de golfe, de acordo com a reivindicação 4, caracterizada pelo fato de que o referido elemento piezelétrico está interconectado à referida superfície de impacto (10) por um membro intermediário.

8. Cabeça de taco de golfe, de acordo com a reivindicação 4, caracterizada pelo fato de que o referido elemento piezelétrico está suportado contra a referida superfície de impacto (10).

9. Cabeça de taco de golfe, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que compreende ainda um membro estrutural dentro da referida cabeça, o referido membro estrutural mantendo firme contato entre a referida superfície de impacto (10) e o referido atuador.

10. Cabeça de taco de golfe, de acordo com a reivindicação 4, caracterizada pelo fato de que compreende ainda um membro estrutural dentro da referida cabeça, o referido membro estrutural mantendo firme contato entre a referida superfície de impacto (10) e o referido elemento piezelétrico.

11. Cabeça de taco de golfe, de acordo com a reivindicação 9, caracterizada pelo fato de que o referido membro estrutural compreende um alojamento de formato cônico.

12. Cabeça de taco de golfe, de acordo com a reivindicação 10, caracterizada pelo fato de que o referido membro estrutural compreende um alojamento de formato cônico.

13. Cabeça de taco de golfe, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o referido atuador é configurado para fazer com que a referida superfície de impacto (10) vibre em uma frequência selecionada, enquanto a referida bola de golfe está se chocando contra a referida superfície de impacto (10).

14. Cabeça de taco de golfe, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o referido atuador é configurado para fazer com que a referida superfície de impacto (10) vibre em uma fre-

quência e com amplitude suficiente para interromper o contato entre a referida superfície de impacto (10) e a referida bola de golfe.

15. Cabeça de taco de golfe, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o referido circuito (18) compreende uma impedância reativa para o armazenamento da referida energia elétrica.

16. Cabeça de taco de golfe, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o referido circuito (18) compreende uma reatância para o armazenamento da referida energia elétrica.

17. Cabeça de taco de golfe, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o referido circuito (18) compreende um indutor para o armazenamento da referida energia elétrica.

18. Cabeça de taco de golfe, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o referido circuito (18) compreende um indutor e um capacitor para o armazenamento da referida energia elétrica.

19. Cabeça de taco de golfe, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que o referido circuito (18) compreende um comutador para a aplicação seletiva da referida energia elétrica em resposta ao parâmetro limite da referida superfície de impacto (10) que se choca com a referida bola de golfe.

20. Cabeça de taco de golfe, de acordo com a reivindicação 20, caracterizada pelo fato de que o referido parâmetro é a magnitude de uma tensão elétrica produzida pelo referido transdutor (21) em resposta ao referido choque.

21. Método para reduzir o coeficiente efetivo de atrito entre a face de uma cabeça de taco de golfe e uma bola de golfe; o método caracterizado pelo fato de que compreende a etapa de,

converter a energia do impacto da bola com a referida face em uma vibração ultrassônica da referida face para afetar a interação da

referida face e a referida bola durante o referido impacto.

converter a referida energia de impacto da bola em energia elétrica; e converter a referida energia elétrica em vibração ultrassônica.

22. Método, de acordo com a reivindicação 21, caracterizado pelo fato de que as referidas etapas de conversão são realizadas utilizando um elemento piezelétrico acoplado mecanicamente à referida face.

Momento efetivo induzido  
pelo piezo na face, 105

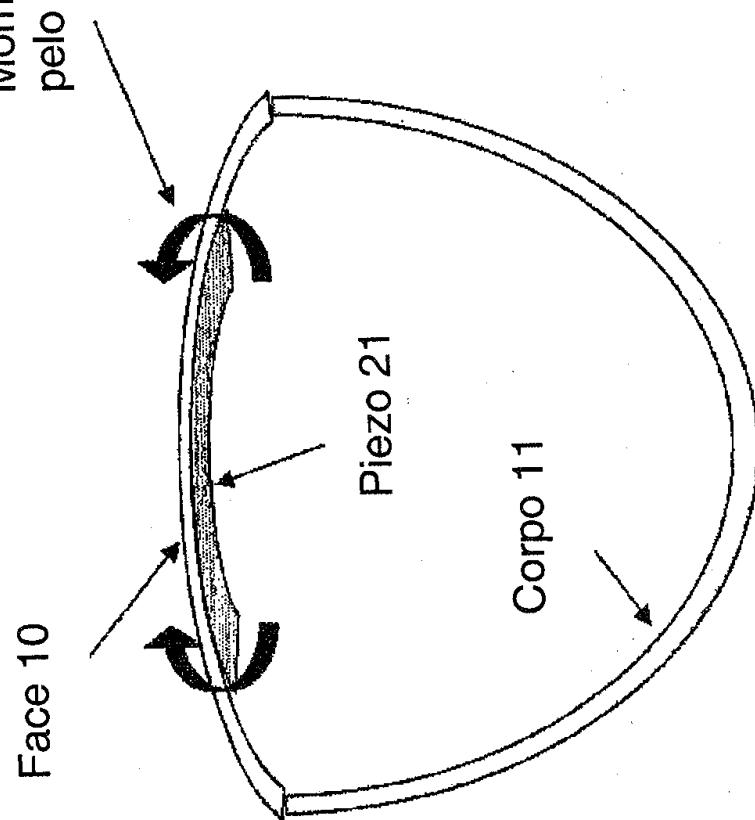


FIG. 1

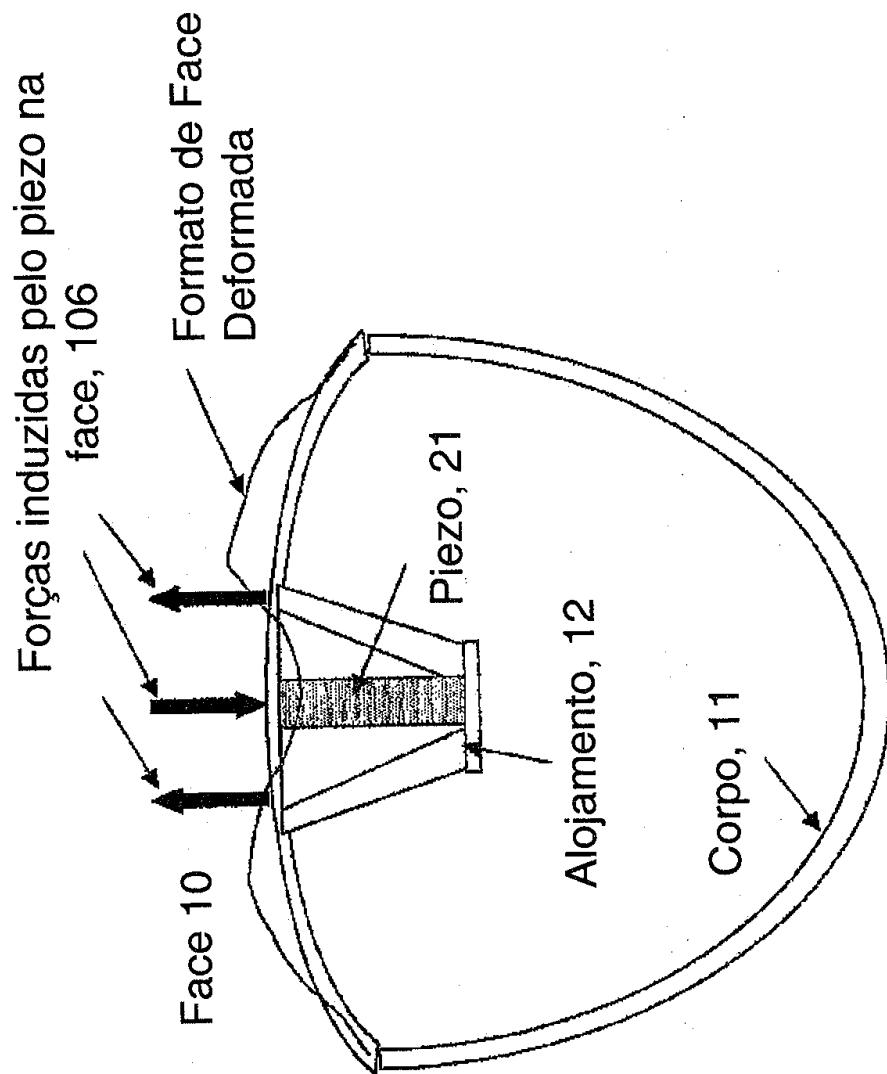


FIG. 2a

3/26

## Anel de Fixação Face/Alojamento, 56

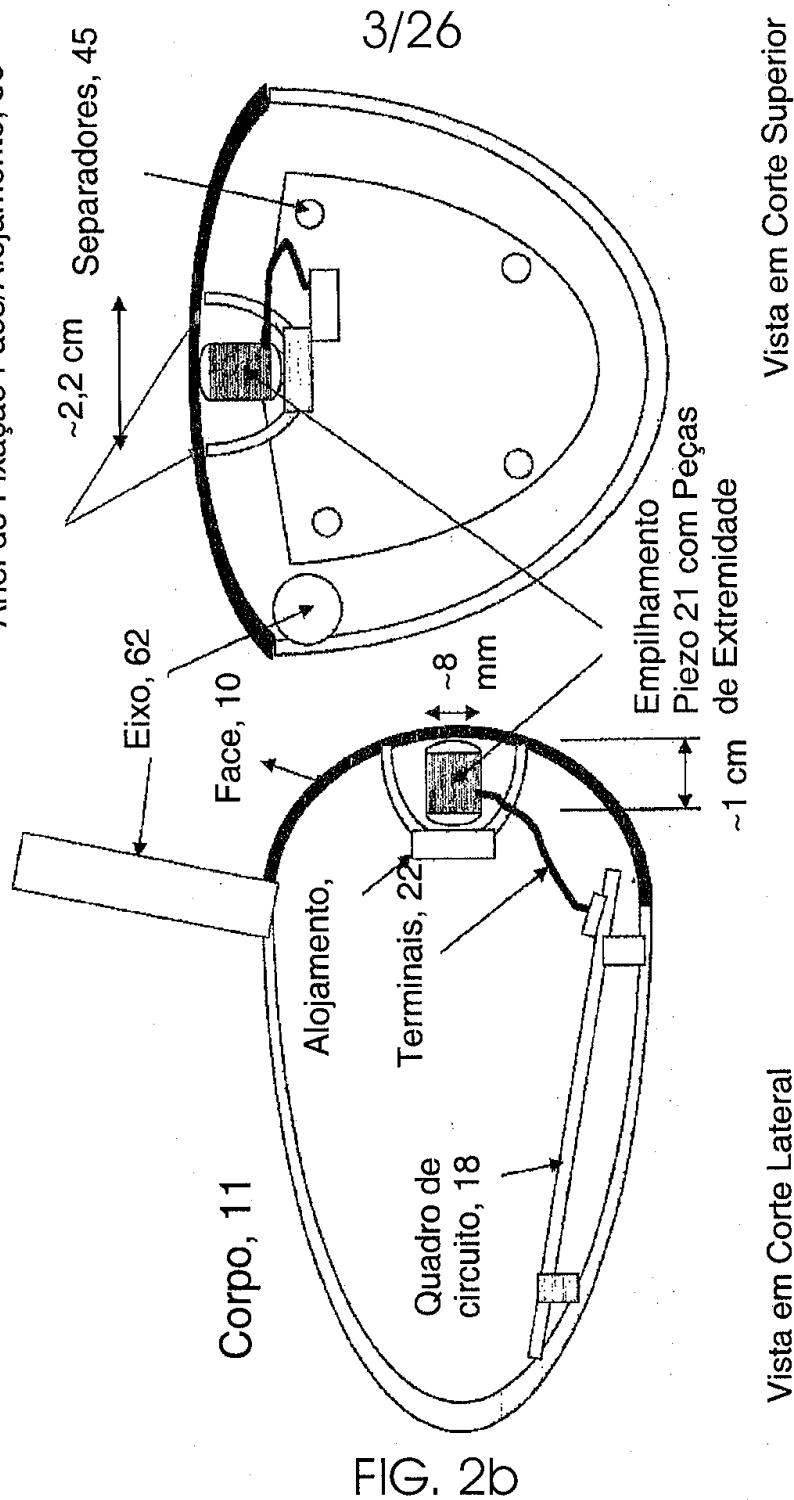


FIG. 2b

4/26

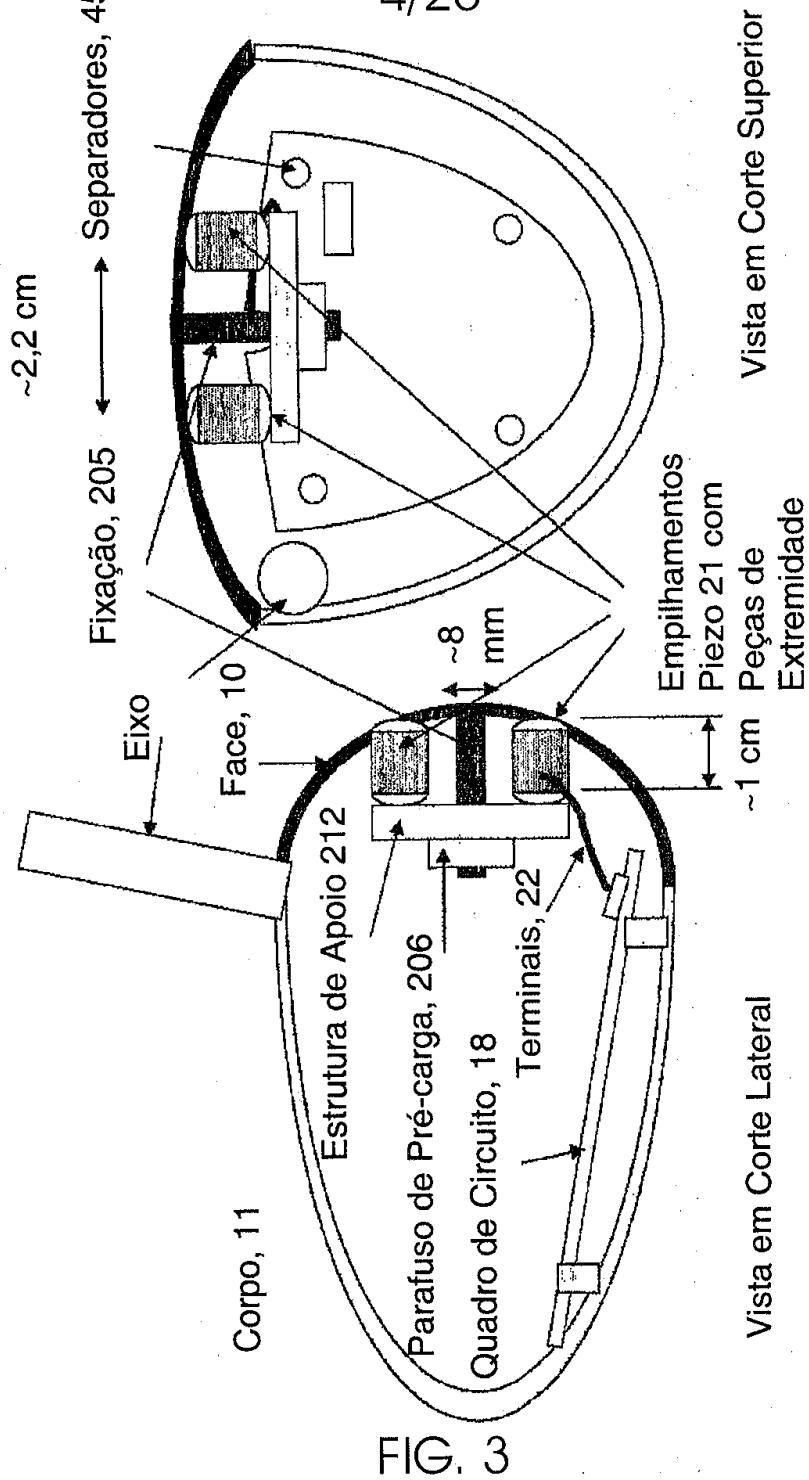


FIG. 3

Forças piezo-induzidas na face, 106

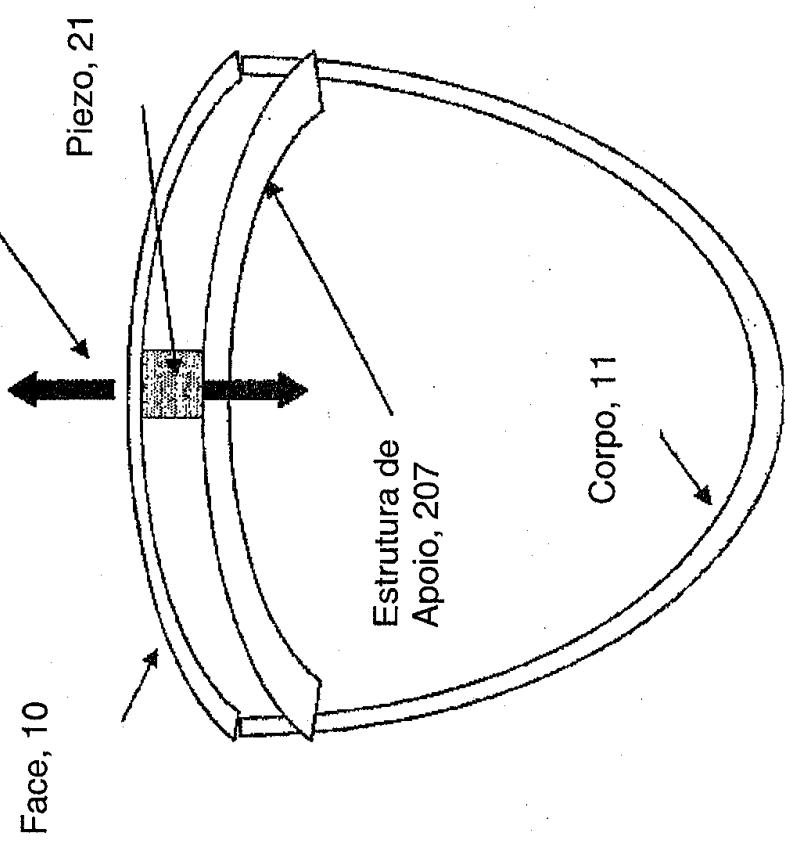
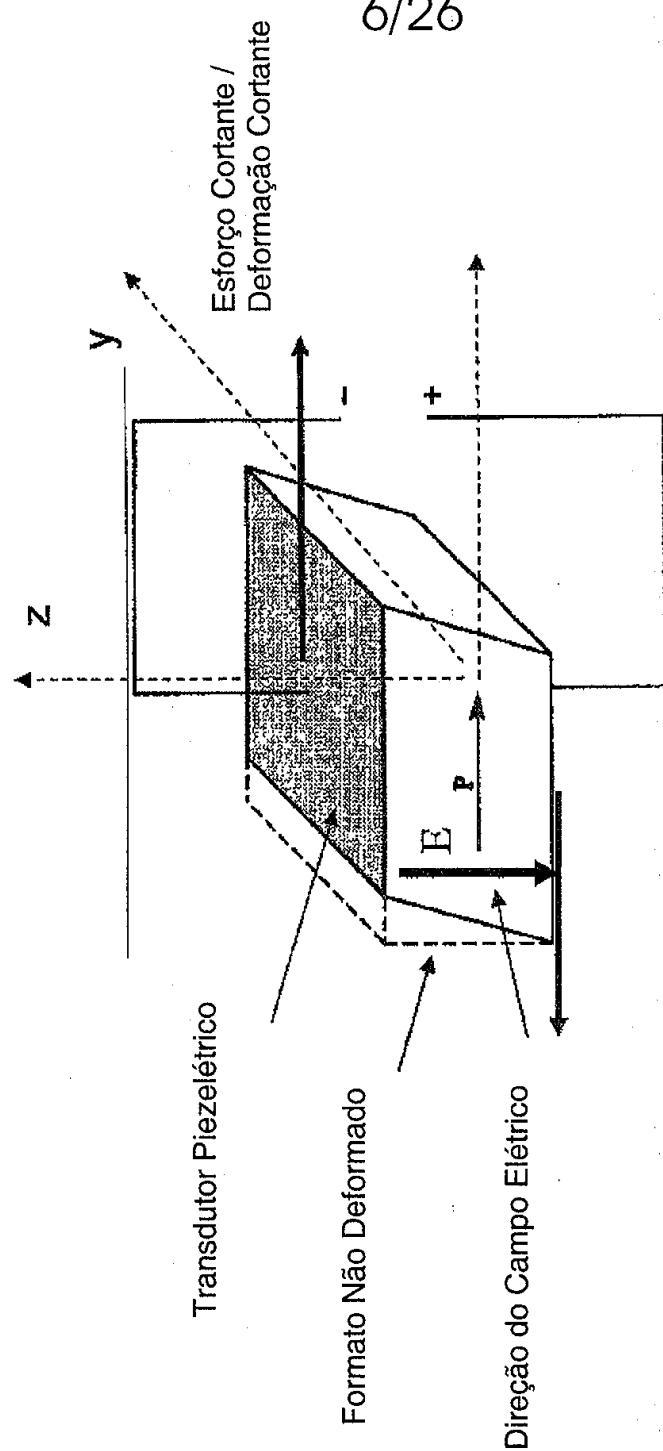


FIG.4

6/26



Modo de Operação Piezelétrico Cortante

FIG. 5a

7/26

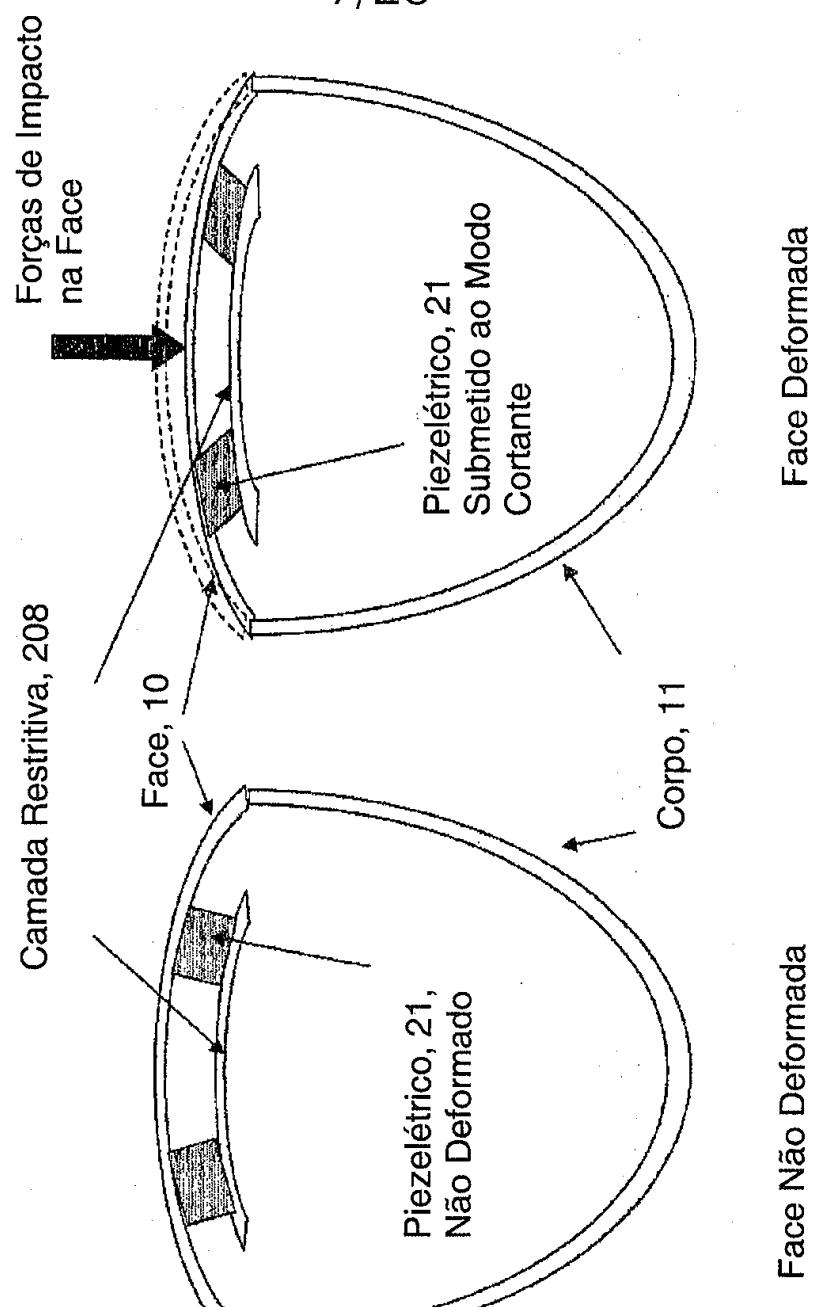


FIG. 5b

8/26

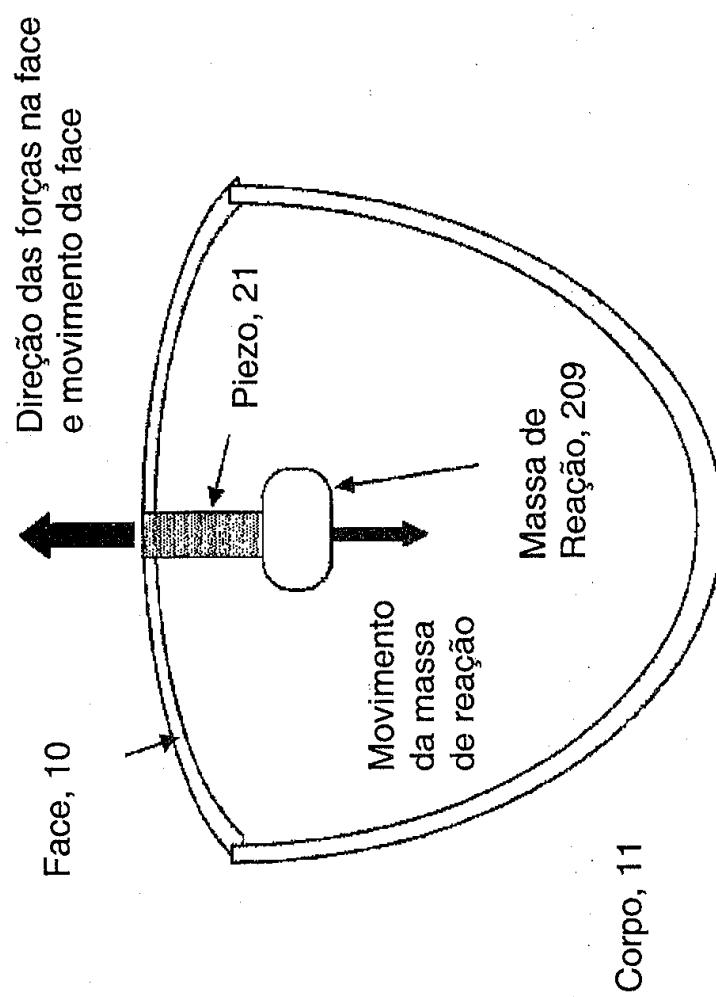


FIG. 6

9/26

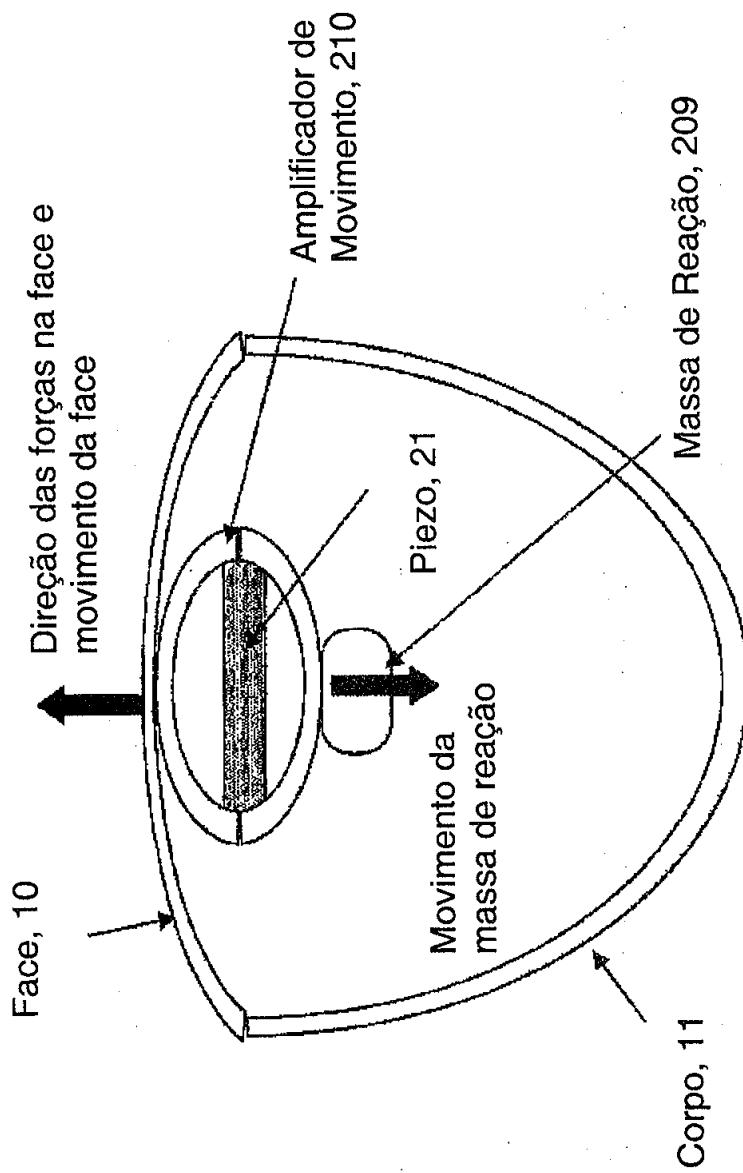


FIG. 7

P 104 12973

104

10/26

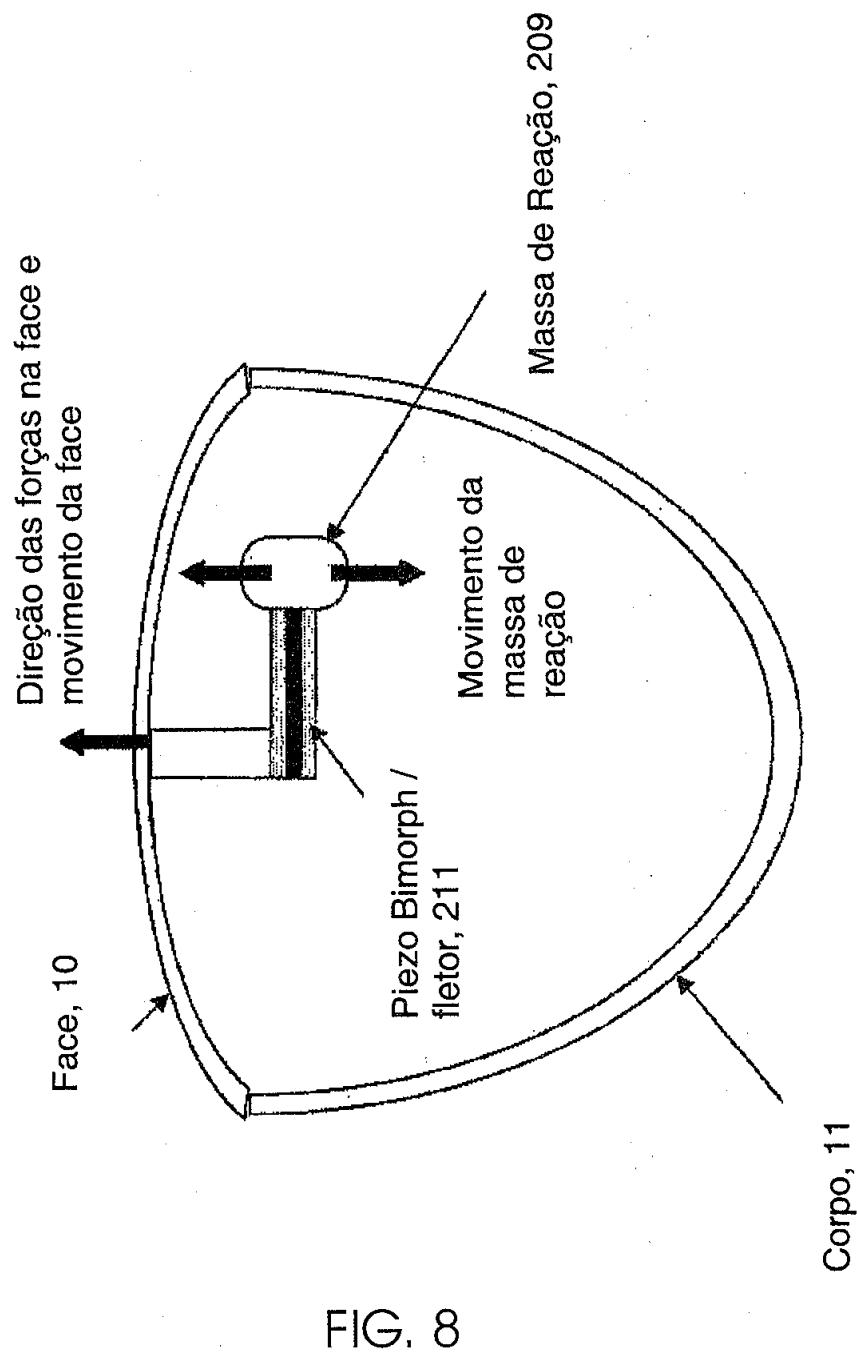


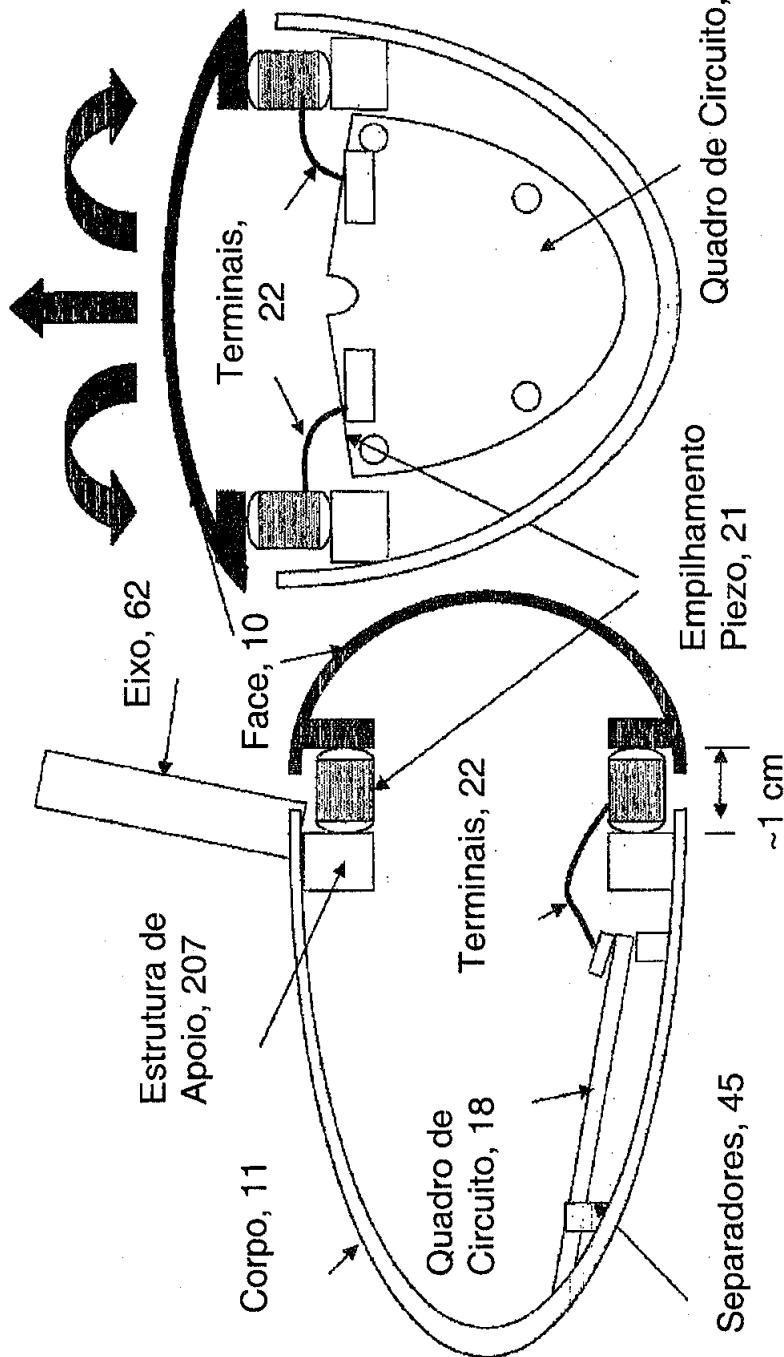
FIG. 8

P 104.12973

105

11/26

Inclinação da Ponta da Face e  
Movimento do Pistão



Vista em Corte Lateral

Vista em Corte Superior

P10A 12973

106

12/26

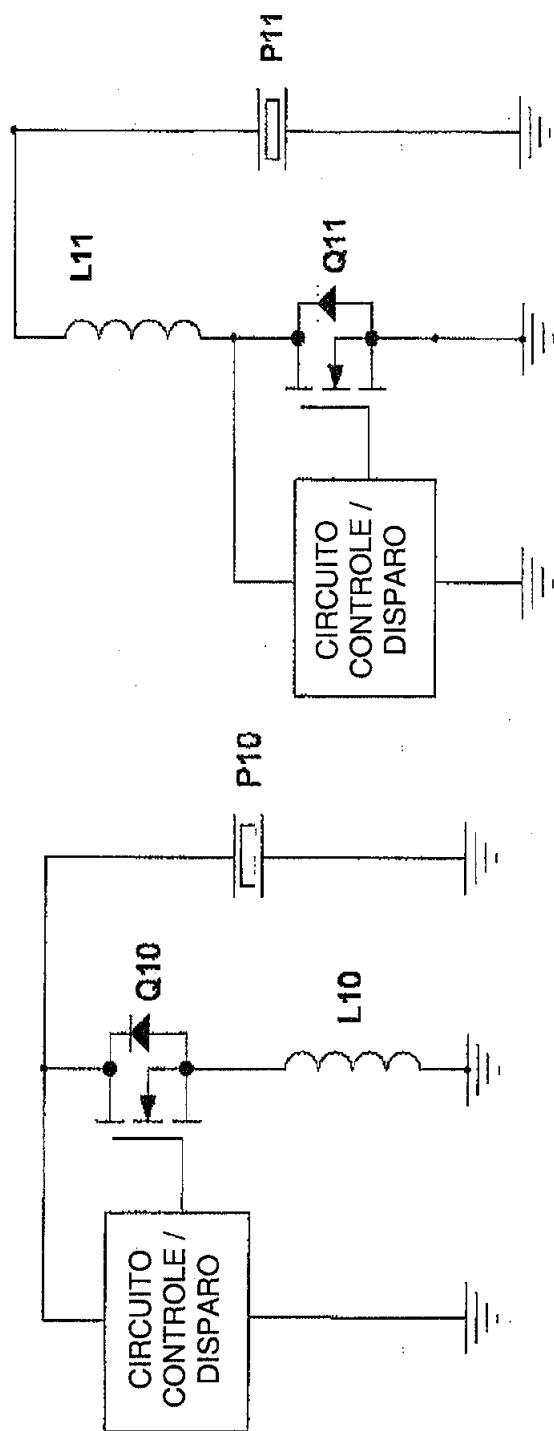


FIG. 10

P10412973

107

13/26

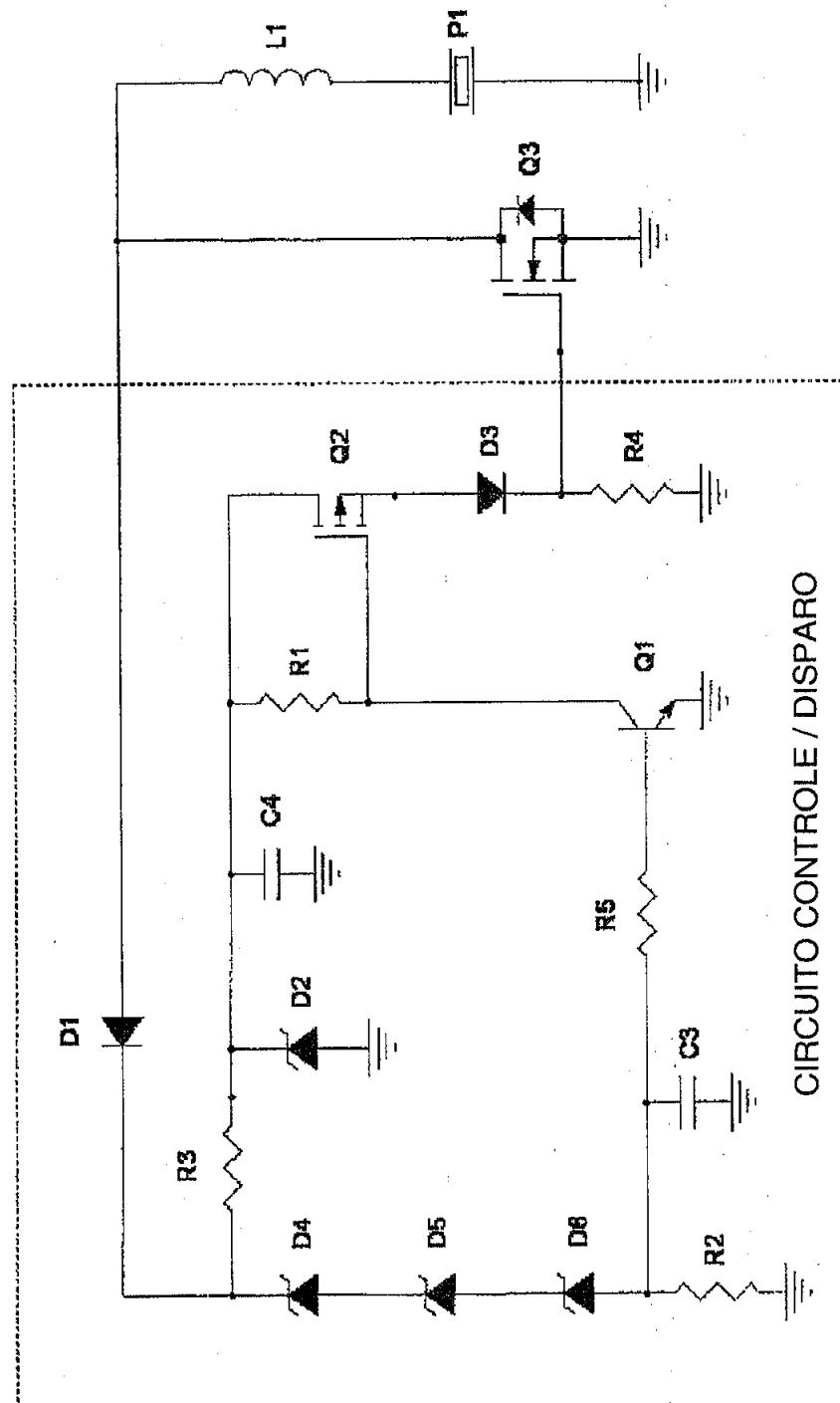


FIG. 11

14/26

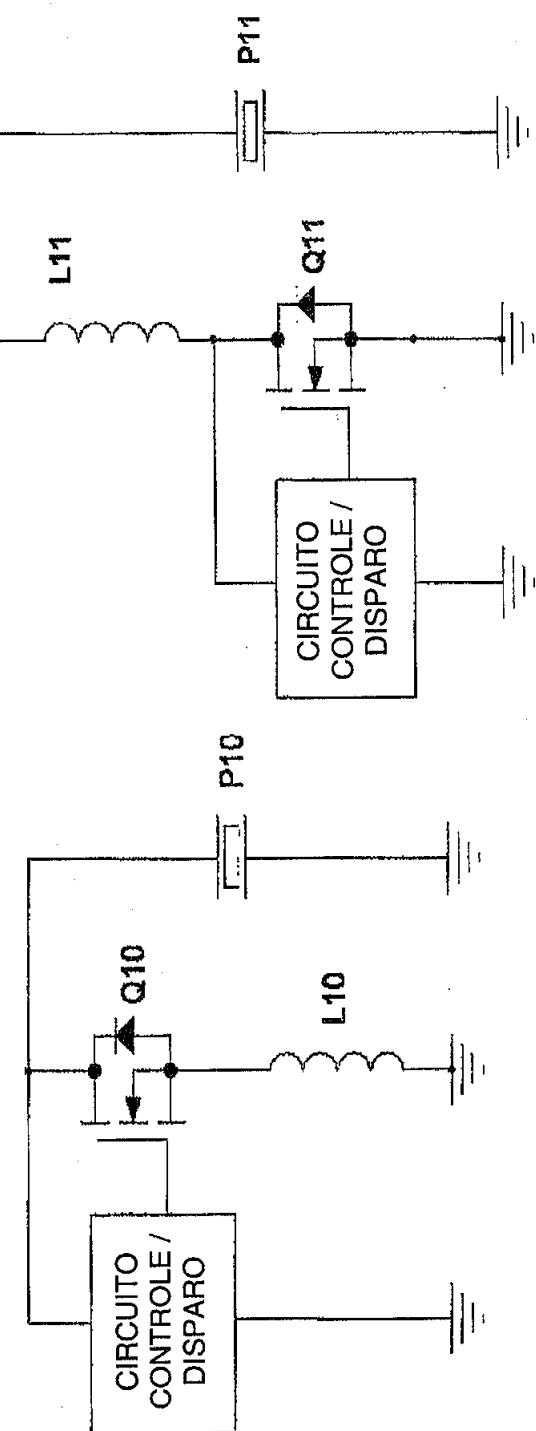


FIG. 12

15/26

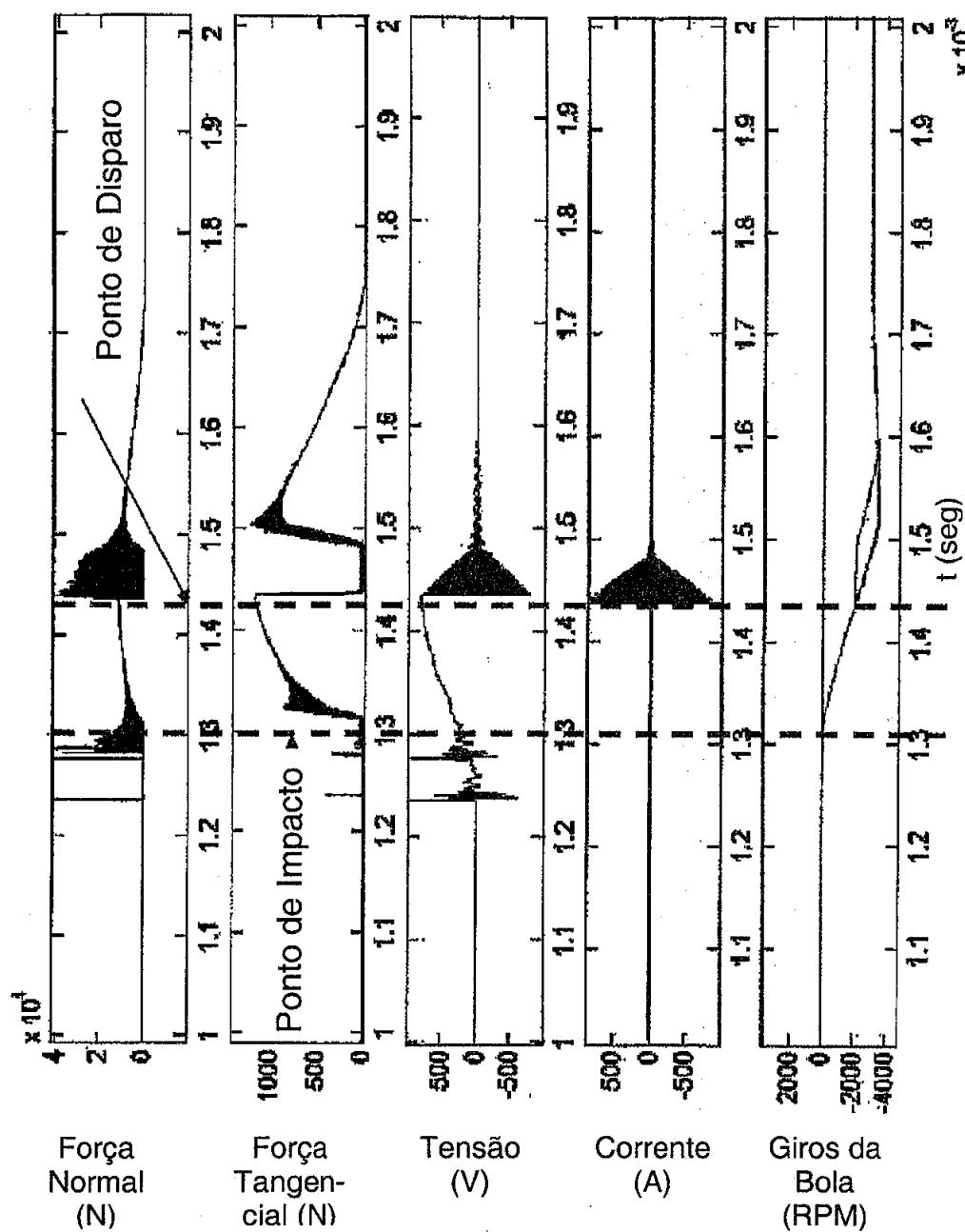
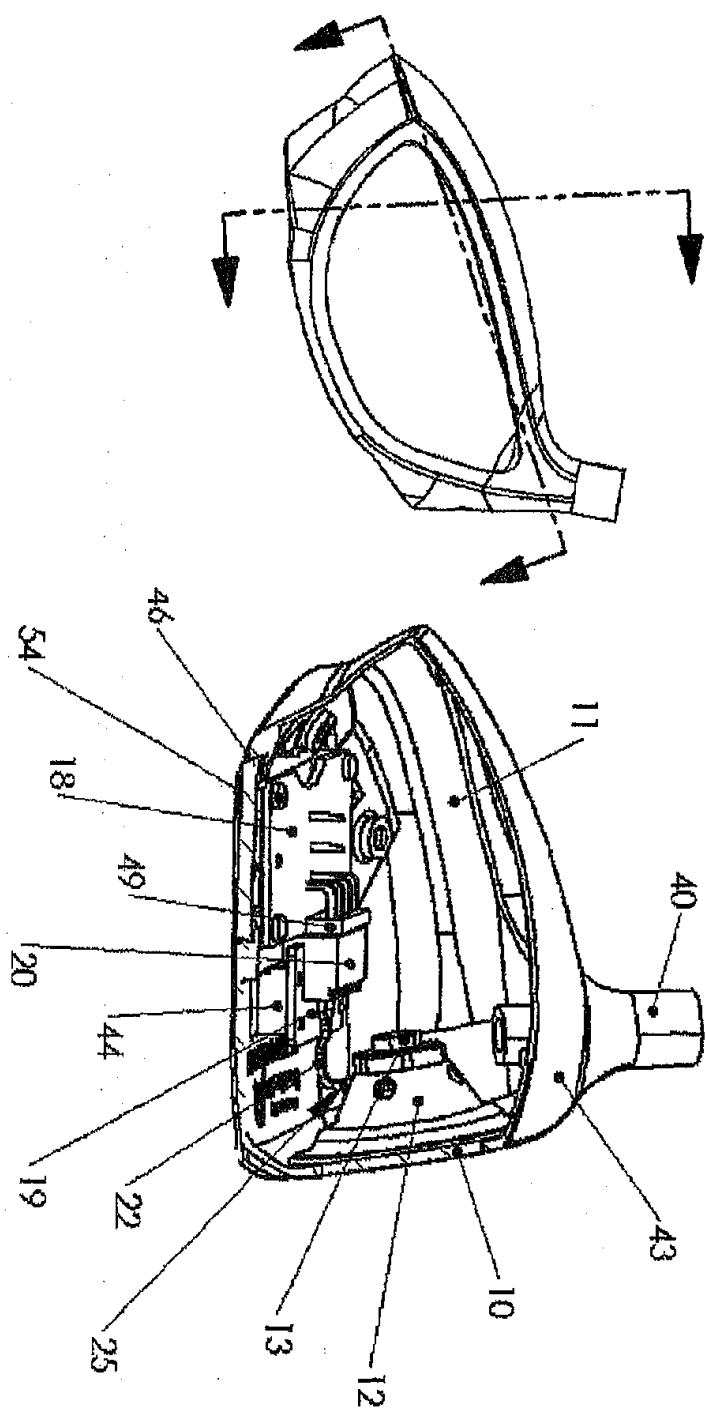
**A****B****C****D****E**

FIG. 13

FIG. 14



16/26

110

P10412973

111

17/26

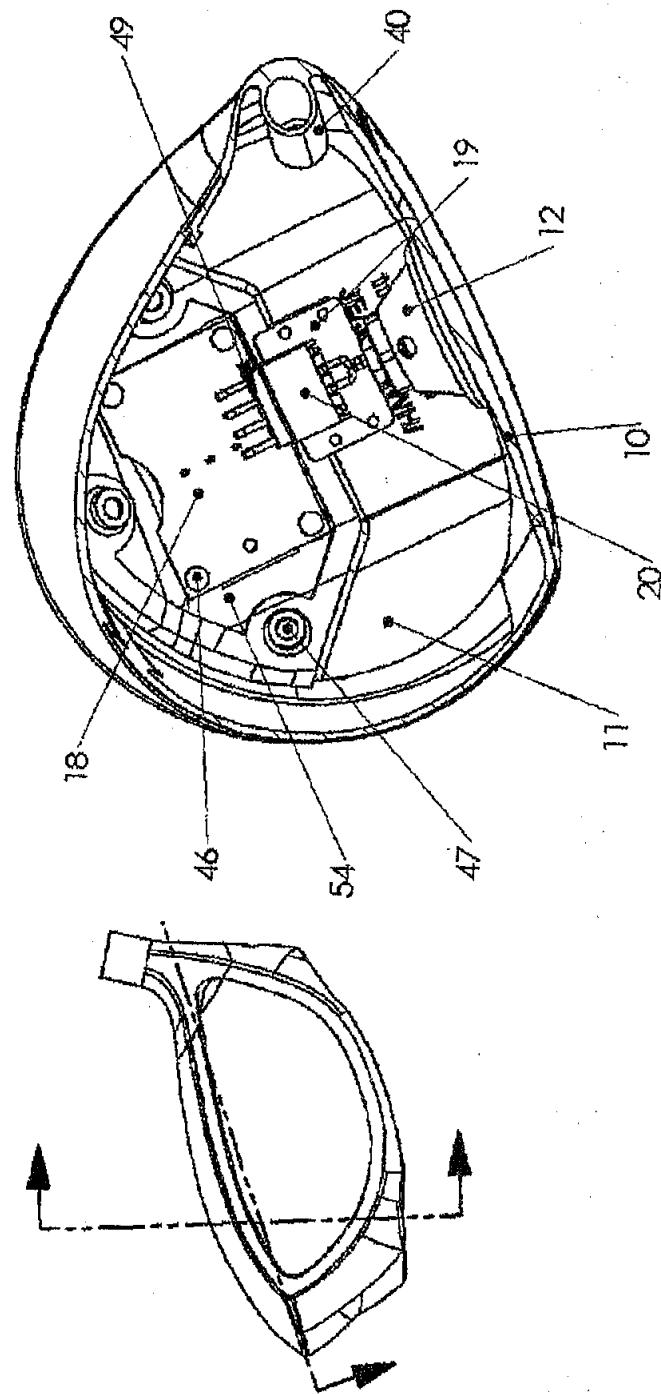


FIG. 15

18/26

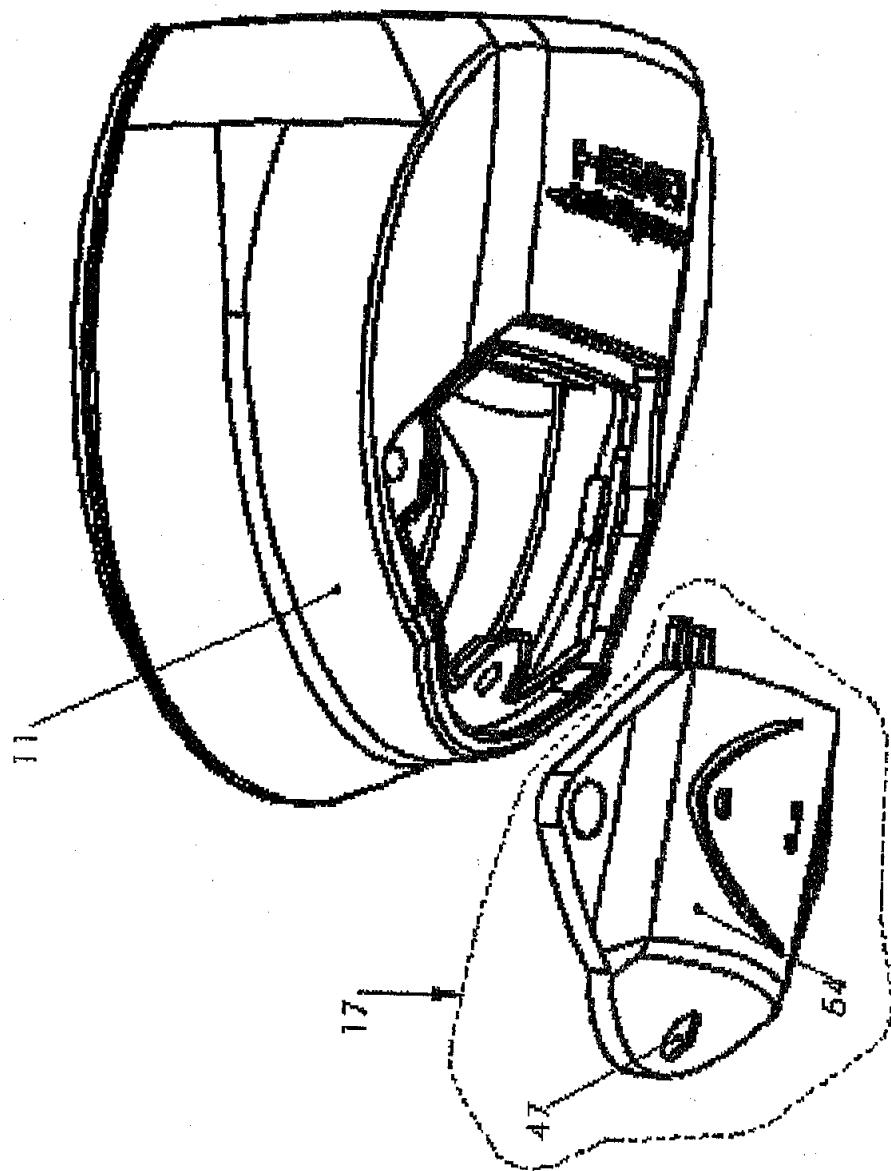


FIG. 16a

19/26

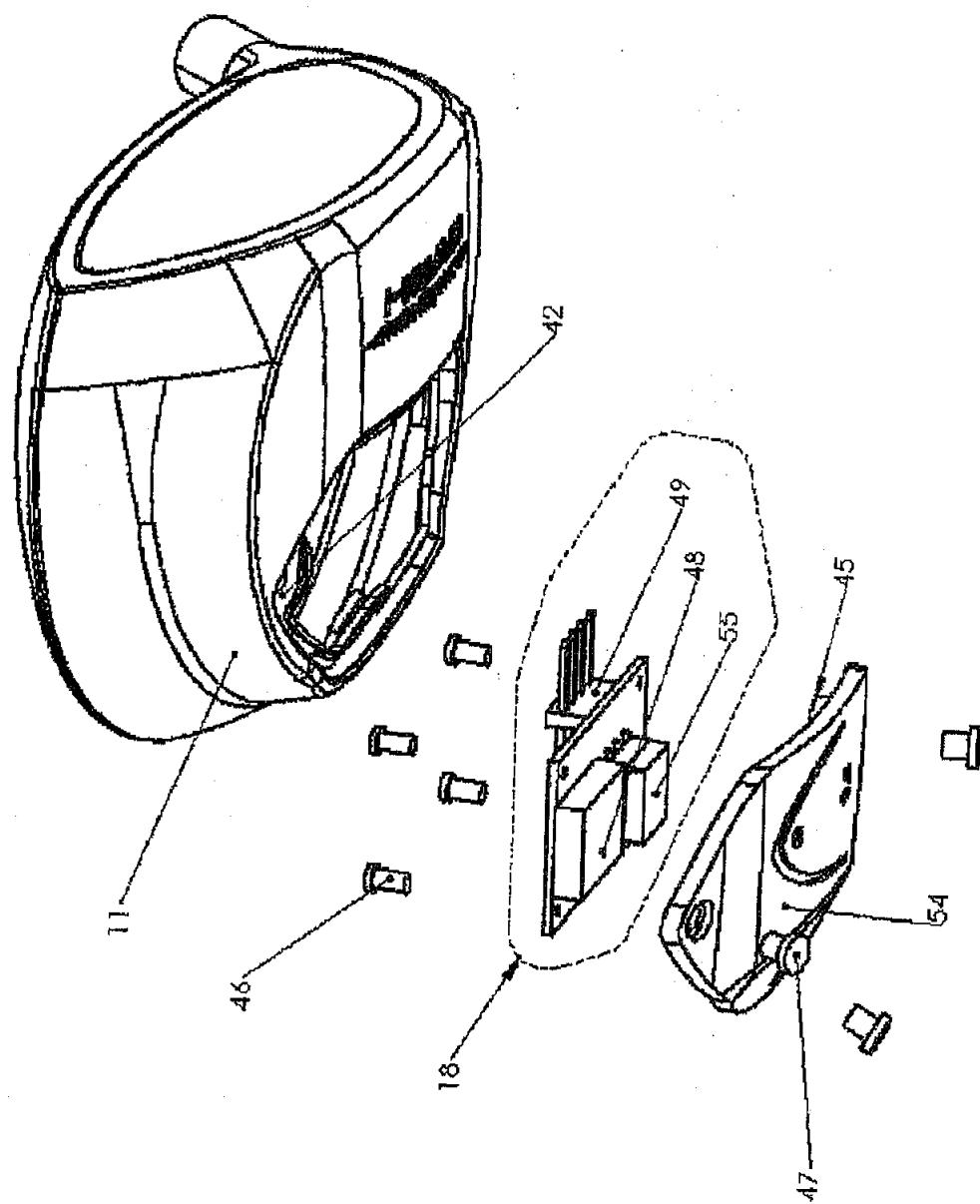


FIG. 16b

P10412973

114

20/26

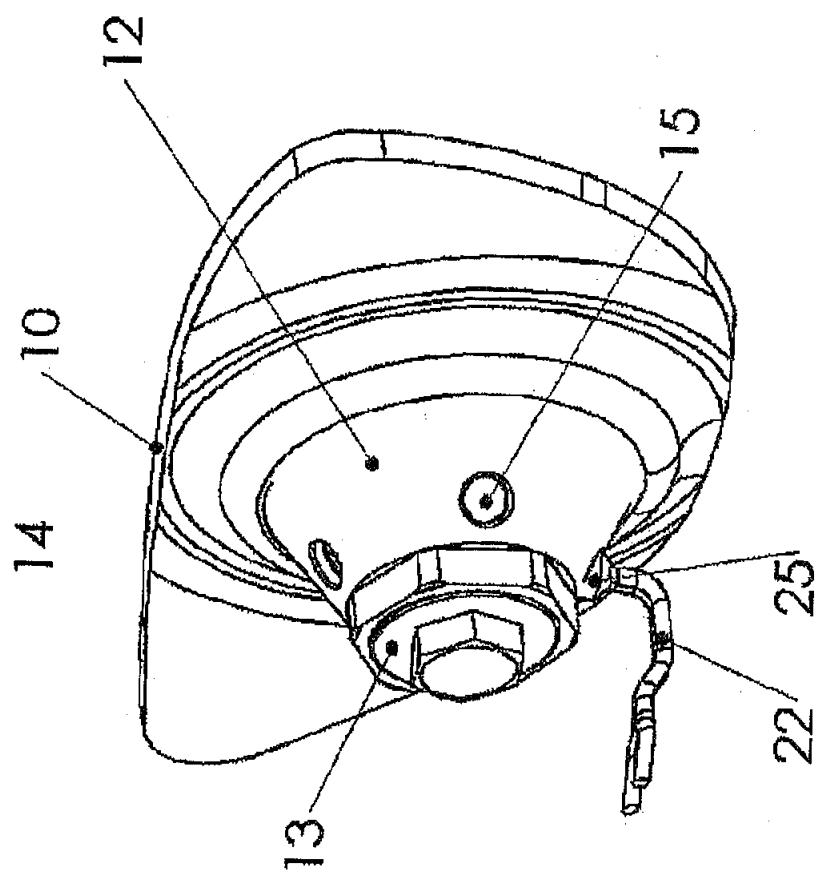


FIG. 17

21/26

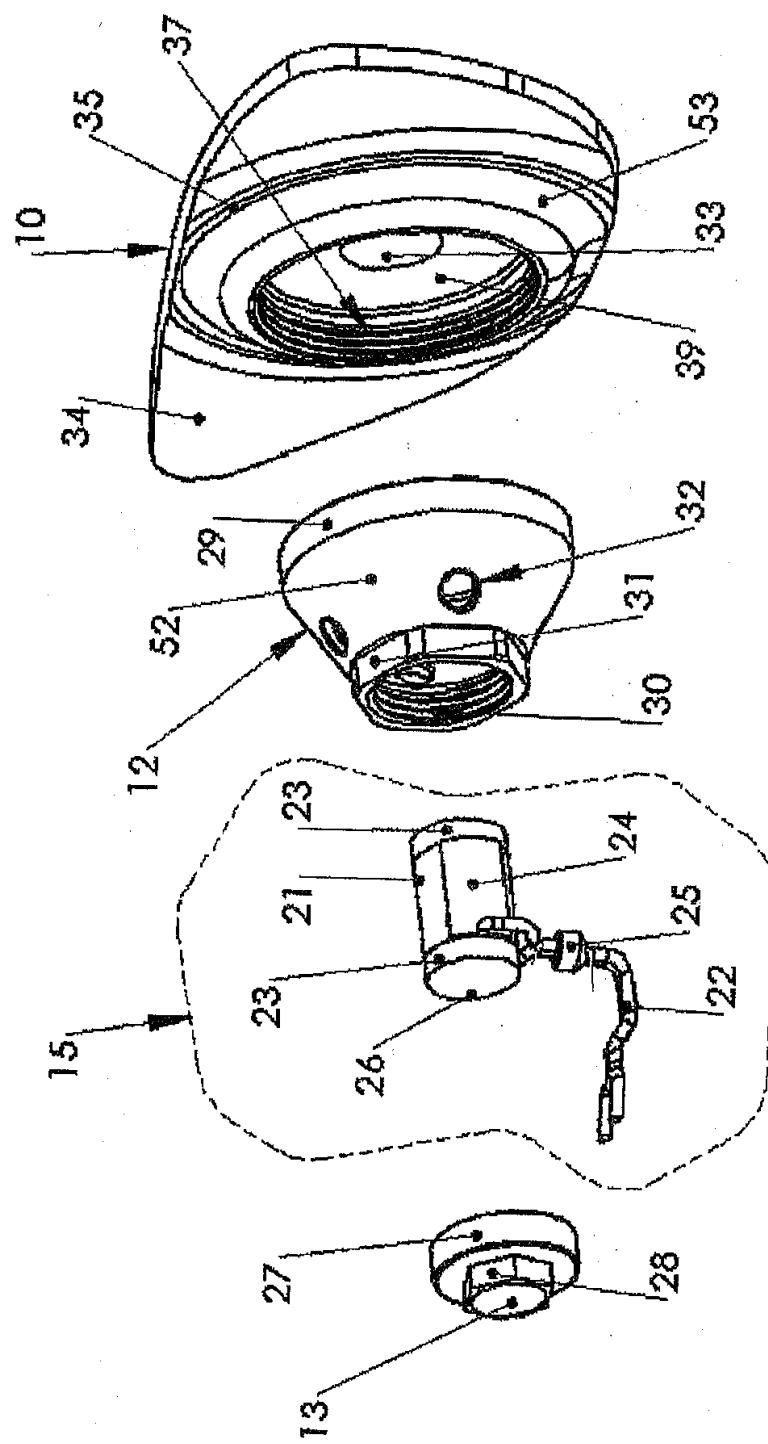


FIG. 18

P10412973

116

22/26

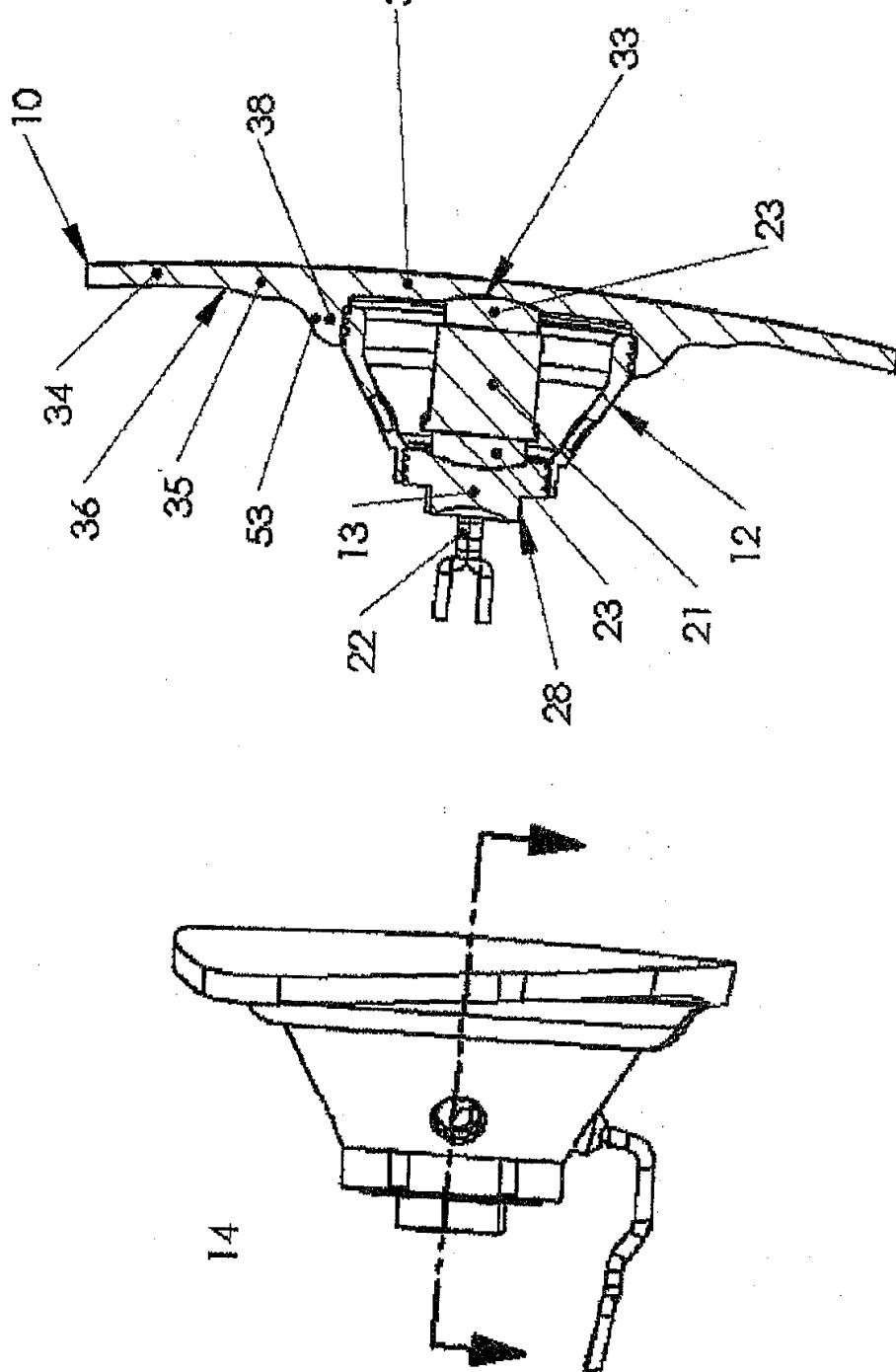


FIG. 19

23/26

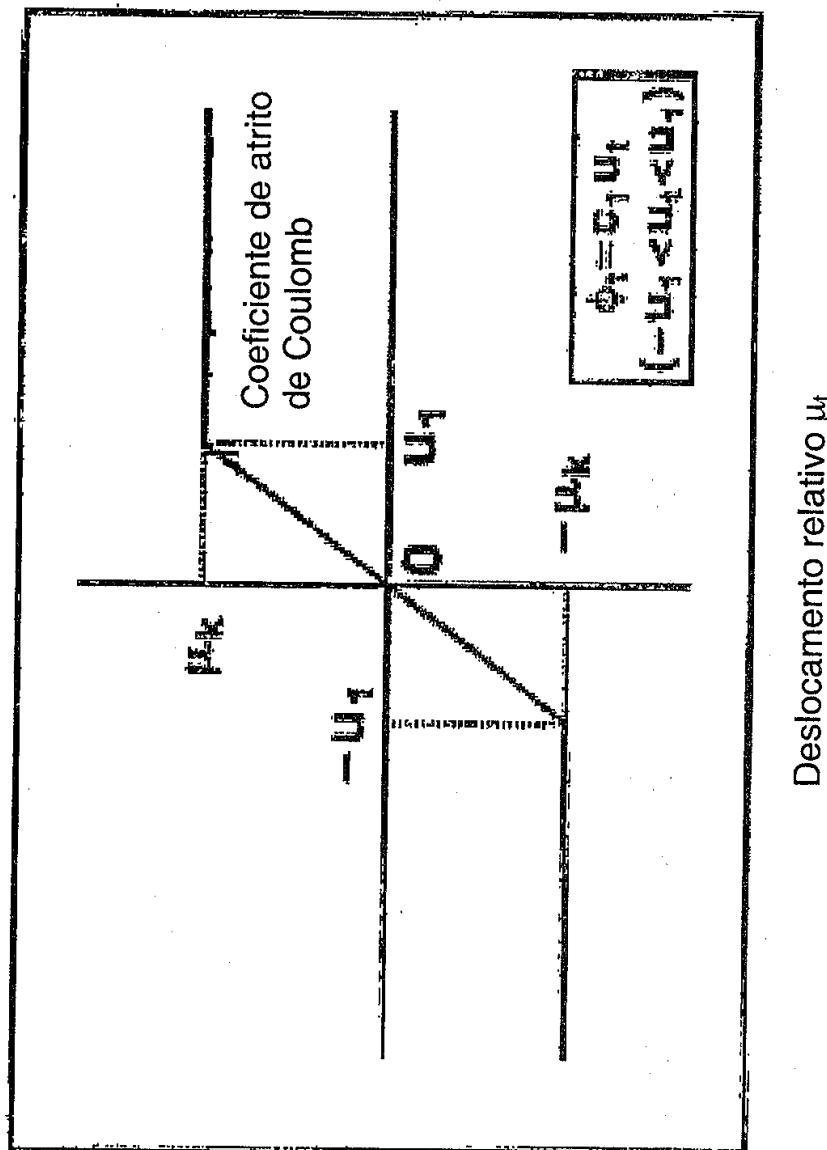
Coeficiente Tangencial  $\phi_t$ 

FIG. 20

P104-12973

118

24/26

FRF de impacto da bola para tensão do piezo

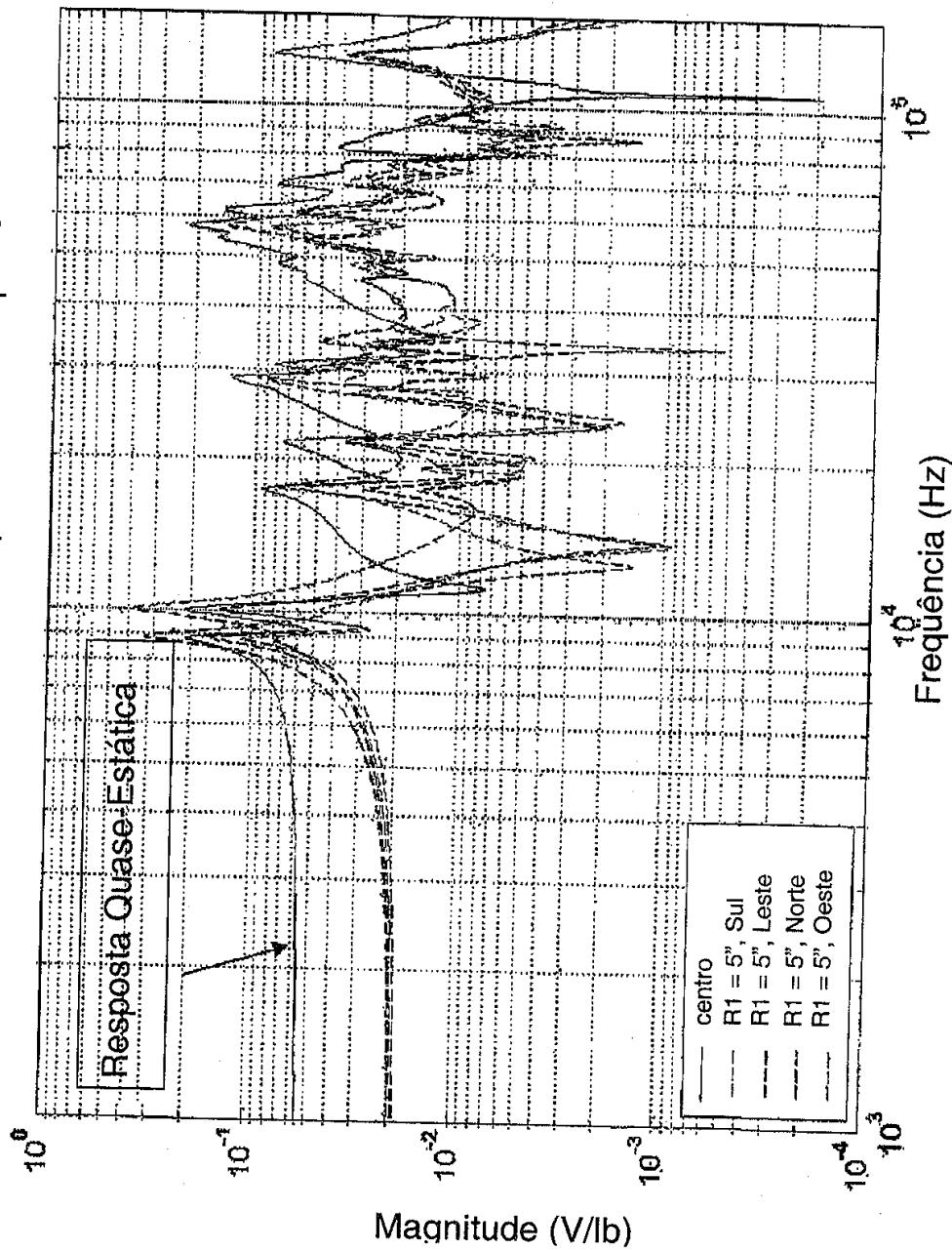


FIG. 21

25/26

FRF de acionamento piezo para a aceleração da face

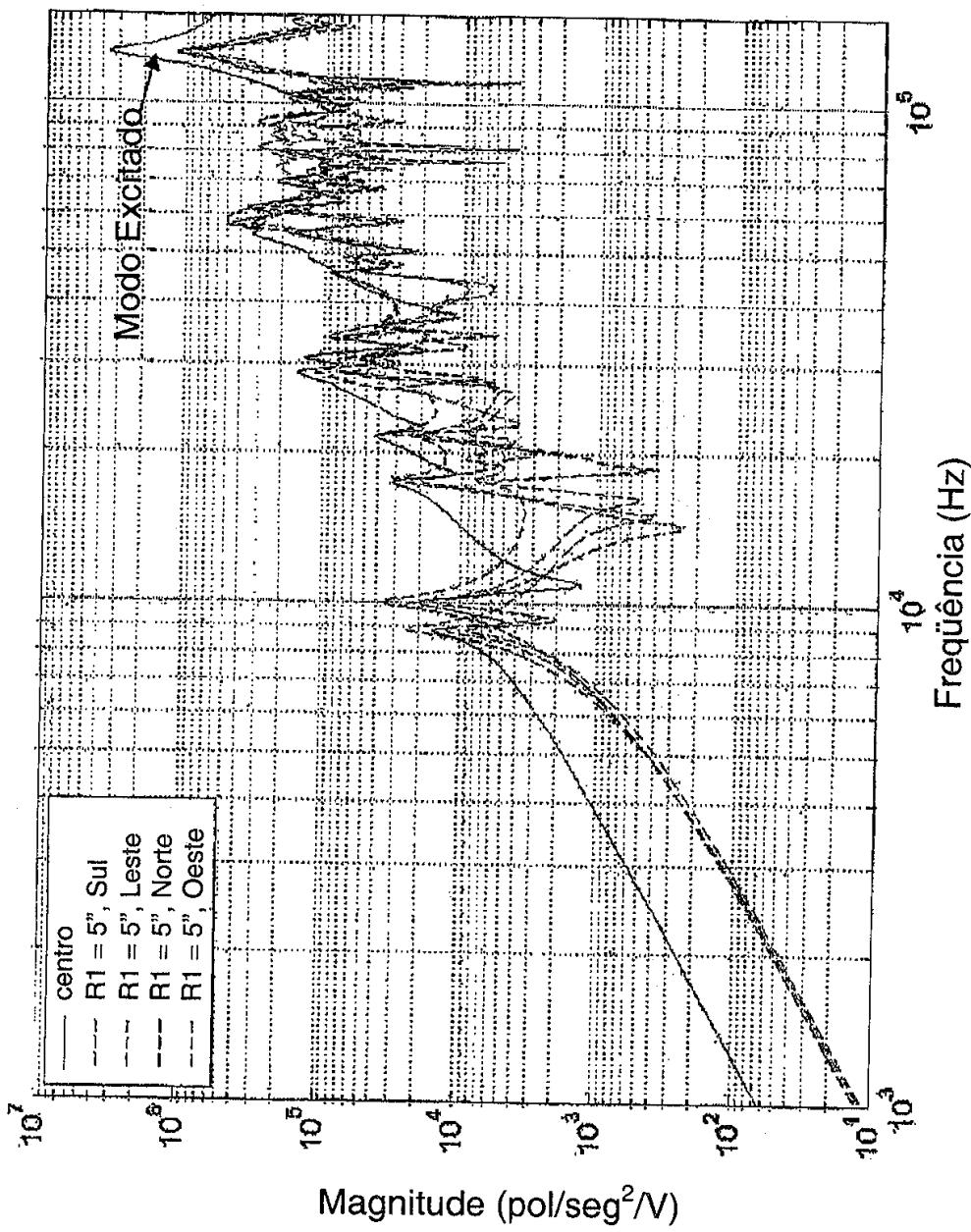


FIG. 22

F104-12973

26/26

120

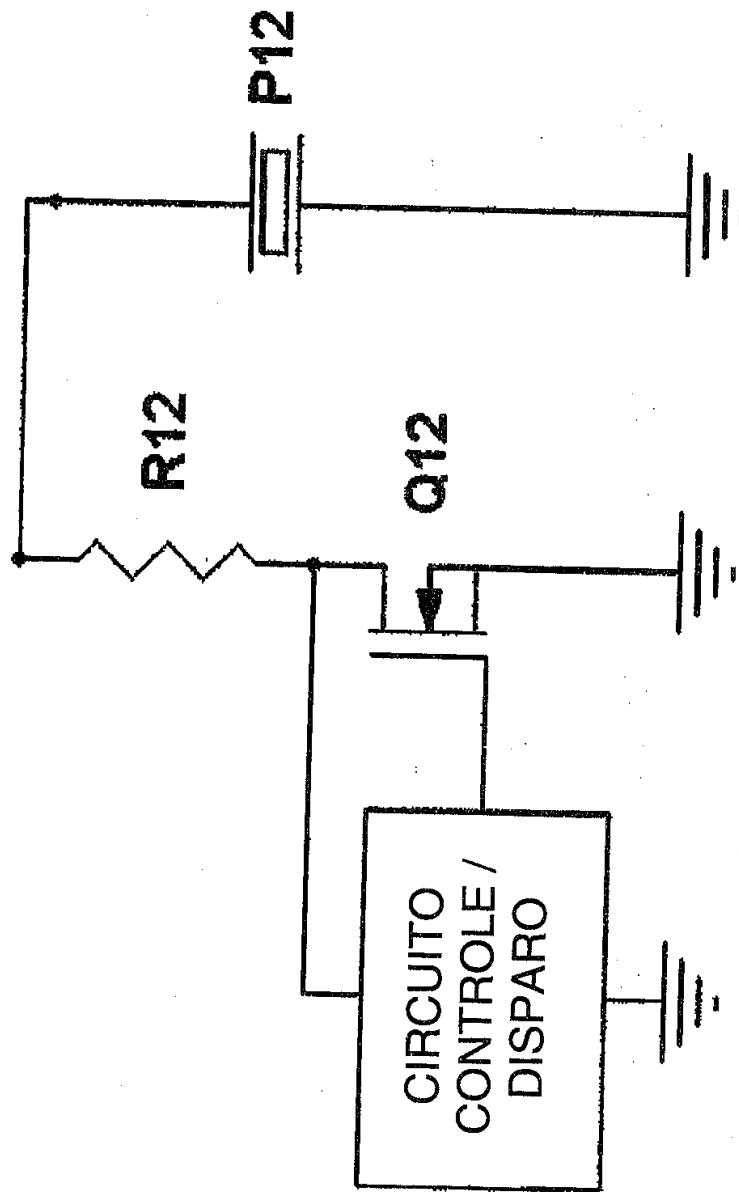


FIG. 23