



## EFEITO PIEZELÉTRICO REVERSO: APLICAÇÃO PARA DESENVOLVIMENTO DE UM DISJUNTOR

*Mairon Figueiredo Marques<sup>1</sup>; Michel Figueiredo Marques<sup>1</sup>; Luiz Henry Monken e Silva<sup>2</sup>*

**RESUMO:** Os disjuntores são dispositivos importantes para a segurança de uma instalação elétrica. Bem projetado o disjuntor evita que passe corrente que possam superaquecer condutores e/ou danificar aparelhos ligados na rede elétrica, chegando a colocar em risco de segurança a instalação (e consequentemente o local físico). Esse projeto apresenta uma proposta para o desenvolvimento de um disjuntor, usando o efeito piezoeletrico reverso, este efeito se baseia no aparecimento de tensão mecânica em materiais, quando submetidos a uma voltagem. Após levantamento bibliográfico a respeito dos materiais piezoeletricos e de disjuntores, foram estudados os diferentes tipos de atuadores piezoeletricos, bem como os diferentes coeficientes piezoeletricos para cada caso, e por melhor desempenho no projeto foi escolhido um bimorfo piezoeletrico. Em decorrência, foi projetado e modelado o engenho responsável pela variação de corrente de desarme. Posteriormente, analisou-se mecanismos de desarmes de diferentes tipos de disjuntores já existentes, e então foi projetado um mecanismo para desarme do dispositivo, por subsequente foi feita uma modelagem do mecanismo segundo as leis físicas e matemáticas envolvidas. Finalmente, com o desenvolvimento dessa pesquisa obteve um projeto para um disjuntor que sirva a uma faixa ampla de corrente de desarmamento.

**Palavras-Chaves:** Disjuntores; Piezeletricidade; Bimorfo; Proposta; Variedade.

**ABSTRACT:** Circuit breakers are important devices for the safety of an electrical installation. When well designed, the circuit breaker avoids conductors to be overheated and/or damages equipment connected to power. It can endanger security installation (and the physical location). This project presents a proposal for the development of a circuit breaker, using the reverse piezoelectric effect, this effect is based on the appearance of mechanical stress in materials, when submitted to a voltage. After researching about piezoelectric materials and circuit breakers, it was studied the different types of piezoelectric actuators specifically about different piezoelectric coefficients for each case, and the one that has the best performance on the project was a piezoelectric bimorph. After, it was designed and modeled the engine responsible for the variation of trip current. Subsequently, it was analyzed different types of mechanisms for tackling existing circuit breakers, and then designed a mechanism to disarm the device. Continuing, the mechanism was modeled according to the laws of physics and mathematics involved. Finally, with the development of this research, one is able to receive a design for a circuit breaker that serves a wide range of current disarmament.

**Keywords:** Circuit breakers; Piezoelectric; Bimorph; Proposal; Diversity.

## 1 INTRODUÇÃO

<sup>1 1</sup> Acadêmicos do Curso de Engenharia de Controle e Automação - Mecatrônica do Centro Universitário de Maringá – UniCesumar, Maringá – Paraná. Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI/CNPq). [mairon\\_marques@hotmail.com](mailto:mairon_marques@hotmail.com); [michelmarques\\_10@hotmail.com](mailto:michelmarques_10@hotmail.com)

<sup>2 2</sup> Orientador e docente do Curso de Engenharia de Controle e Automação - Mecatrônica do Centro Universitário de Maringá – UniCesumar, Maringá – Paraná. [luiz.silva@cesumar.br](mailto:luiz.silva@cesumar.br)

O efeito piezelétrico se baseia em materiais capazes de gerar uma determinada carga elétrica quando submetidos a uma pressão. Segundo Fraden “O efeito piezelétrico é um fenômeno físico reversível. Isso significa que aplicando uma voltagem através de um material piezelétrico, uma tensão mecânica é produzida”. A palavra piezo vem do grego (piezen) que significa pressão. Embora este efeito seja bem conhecido, a sua aplicação vem se ampliando dia – a – dia. Segundo Silva e Galisteu “O fenômeno conhecido como “piezeletricidade” foi descoberto há mais de cem anos pelos irmãos Pierre e Jaques Curie. O primeiro trabalho sobre esse assunto foi apresentado em 1880 e tratava apenas do efeito piezelétrico direto. Logo após, em 1881, o efeito piezelétrico inverso foi analisado”.

Em uma instalação elétrica (como de uma residência, por exemplo), é de extrema importância o uso de equipamentos para proteção, com a finalidade de desarmar a instalação (ou parte dela) quando detectar condições anormais. Um dispositivo muito utilizado é o disjuntor, como citado por Cotrim: “Disjuntor é um dispositivo de manobra (mecânico) e de proteção, capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes em condições normais do circuito, assim como estabelecer, conduzir por tempo especificado e interromper correntes em condições anormais especificadas do circuito, tais como as de curto-circuito”.

As duas explicações acima, embora distintas, podem ser relacionadas quando se deseja por meio de piezeletricidade construir um disjuntor.

A presente pesquisa apresenta um projeto para o desenvolvimento de um disjuntor usando o efeito piezelétrico reverso, baseando-se no seguinte: é fato que um elemento piezelétrico se deforma ao ser percorrido por uma carga elétrica (efeito reverso); quando uma carga elétrica acima da pré-definida percorrer um bimorfo piezelétrico, uma deformação (acima da estabelecida por análise de tensões) acionará um mecanismo (responsável pelo desarmamento e impossibilidade de rearme imediato da instalação); o rearmamento do disjuntor acontecerá de forma manual. O dispositivo projetado se diferencia dos demais por servir a uma faixa ampla de corrente de desarmamento.

## 2 EFEITO PIEZELÉTRICO

Uma condição primordial para que o material tenha propriedades piezelétricas é que esse não possua um centro de simetria de carga.

O Efeito Piezelétrico normalmente é dividido em duas diferentes partes, o efeito direto e o efeito reverso. O efeito direto se dá quando o material sofre uma tensão mecânica, que devido a sua não simetria de carga acarreta no surgimento de cargas elétricas nos eletrodos do material. O efeito reverso acontece quando o material é submetido a um campo elétrico, nesse caso os dipolos do material piezelétrico são alinhados de acordo com as linhas de campo elétrico, fazendo assim com que o material sofra uma deformação mecânica.

Os materiais são portadores de uma polarização (normalmente indicada por um vetor), que tem relação direta com as direções cuja os materiais se deformem. Se convencionarmos a direção de polarização como sendo o eixo Z, “a deformação se dá de maneira que quando o campo elétrico é aplicado em paralelo com a polarização do material, o elemento alonga no eixo Z, e se contrai nas duas direções perpendiculares à polarização, isso é, nos eixos X e Y” assim como relatado por Smits, ver figura 1. Conseqüentemente se o campo elétrico é aplicado no sentido antiparalelo com a direção de polarização, o elemento tende a contrair-se na direção de polarização, eixo Z, e tende a se alongar nas direções perpendiculares, eixos X e Y.

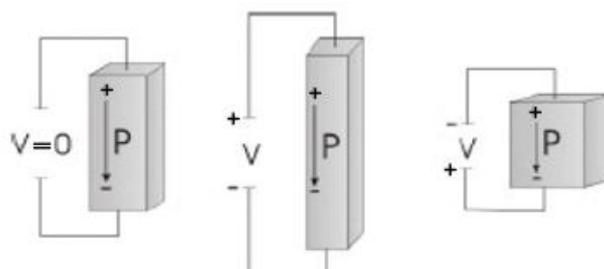


Figura 1: Deformação de um material piezelétrico - Retirada de "[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-17592006000300006&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-17592006000300006&script=sci_arttext)"

## 2.1 BIMORFOS PIEZELÉTRICOS

Segundo Silva "Bimorfos Piezelétricos ou atuadores bilaminares, são estruturas que podem ser formados por uma ou duas laminas de materiais piezelétricos. São também conhecidos pelo termo "cantilever piezelétrico" devido à sua configuração de viga engastada-livre. Um atuador bilaminar é um dispositivo com alto grau de flexão pois as lâminas são conectadas ao longo de uma superfície, de maneira que quando uma camada contrai a outra expande. Quando a estrutura é exposta a um campo elétrico, as deformações de cada lâmina geram forças e momentos resultando na curvatura do conjunto".

A figura 2 ilustra um bimorfo piezelétrico engastado em uma superfície, onde "p" simboliza as polarizações dos materiais e "E" o campo elétrico aplicado. É possível identificar a camada superior e inferior do bimorfo, a camada Superior em polarização antiparalela e a camada inferior em polarização paralela.

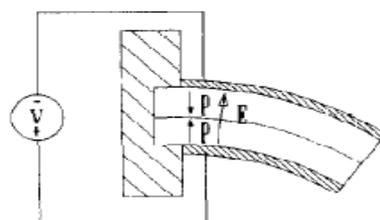


Figura 2: Bimorfo Piezelétrico - Retirado de [http://dx.doi.org/10.1016/0924-4247\(91\)80007-C](http://dx.doi.org/10.1016/0924-4247(91)80007-C)

De acordo com o exposto por Smits, o bimorfo apresentado na figura 2 exerce uma força  $F$  na extremidade livre, cuja é calculada por:

$$F = \frac{d_{31} E_3 w h}{4s_{11}^E} \quad (\text{força de um Bimorfo})$$

Onde,  $d_{31}$  é a constante piezelétrica do material,  $E_3$  é o campo elétrico aplicado,  $h$  a dimensão de secção transversal perpendicular à polarização,  $w$  a dimensão paralela à polarização e  $s_{11}^E$  o módulo de elasticidade do material.

## 3 DISJUTORES ULTRA RÁPIDOS

Um disjuntor pode ser considerado simultaneamente como dispositivo de manobra e proteção de um circuito. Objetivando utilizar o mesmo, para proteger uma instalação elétrica, deve-se em princípio calcular a corrente nominal do circuito, isto é, a corrente que circulará pelo circuito em condições normais de funcionamento. Posteriormente, deve-se verificar qual a corrente limite suportada pelos condutores, assim, para que o disjuntor possa efetuar uma proteção eficaz, é necessário que este tenha uma corrente de desarme superior a corrente nominal e inferior a corrente máxima admissível pelo condutor.

Quando um disjuntor é desarmado, este impede a passagem de corrente elétrica no circuito, e em conjunto um mecanismo é acionado, impedindo o rearmamento imediato do dispositivo. O rearmamento é feito manualmente, e somente após o rearme volta a circular corrente elétrica pelo circuito.

## 4 DESENVOLVIMENTO

Um bimorfo piezoelétrico ao se deformar, com auxílio de placas e molas, pode permitir ou impedir a passagem de corrente em uma instalação. Juntamente com um circuito de controle, a deformação do bimorfo pode ser coordenada. Se for adotada uma distância fixa de deformação, é possível encontrar uma relação direta entre corrente de circulação de projeto e dispositivo de controle.

Para um controle eficaz, foi necessário uma redução de corrente elétrica, uma vez que a corrente de circulação de projeto é da casa das dezenas de ampéres enquanto no controle deve ser da ordem de micro ampéres. Intencionando uma redução de corrente, foi projetado um transformador redutor para o dispositivo, e em seguida foi analisado uma maneira de controlar a deformação do bimorfo. Posteriormente foi projetado e modelado um sistema de desarme, para que se chegasse em uma relação direta entre corrente de circulação e dispositivo de controle.

### 4.1 TRANSFORMADORES

Uma partícula carregada em movimento produz um campo magnético, quando essa partícula descreve trajetórias solenoidais, aumenta a intensidade do campo magnético no centro da solenoide e assim, com o auxílio de materiais ferromagnéticos (núcleo), é possível concentrar ainda mais o fluxo magnético que percorre o centro da espira. Uma variação de corrente, acarreta em uma variação de campo magnético. Segundo a Lei de Ampere o campo magnético produzido por um solenoide (espira primária) sendo percorrido por uma corrente elétrica é dado por:

$$B = \mu_0 i n \text{ (solenóide Ideal)}$$

Onde B é o campo magnético produzido no centro da solenoide,  $\mu$  é a permeabilidade do vácuo, i é a intensidade da corrente elétrica e n é o número de espira por unidade de comprimento.

Contudo, quando uma espira é percorrida por uma variação de campo magnético (espira secundária), uma variação de tensão elétrica é induzida nos terminais da espira. Segundo a Lei de Faraday, a tensão induzida em uma espira é dada por:

$$V = -N \frac{d\Phi B}{dt} \text{ (tensão Induzida)}$$

Onde N é o numero de espiras, e  $\Phi B$  é o fluxo magnético através do núcleo ferrolétrico de área A, que é dado por:

$$\Phi B = B \cdot A \text{ (Fluxo magnetico)}$$

De acordo com a geração de energia elétrica, a corrente elétrica "i" é dada por:

$$i = I \cdot \text{Sen}(\omega t + \theta) \text{ (Corrente elétrica)}$$

Onde I é o valor de pico da corrente,  $\omega$  a frequência da rede elétrica, t o tempo e  $\theta$  o ângulo de defasagem.

Integrando os conhecimentos acima citados, e objetivando a criação de um transformador redutor de tensão( tensão induzida menor que tensão de entrada), que tenha um núcleo de elemento ferrolétrico de secção retangular( de dimensões b e l), conforme mostra figura 3, podemos descrever a tensão de saída como sendo:

$$V = -2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot f \cdot N \cdot n \cdot b \cdot l \cdot I \cdot \text{Cos}(2\pi f t + \theta) \text{ (Tensao de saida)}$$

Onde f é a frequência da corrente alternada.

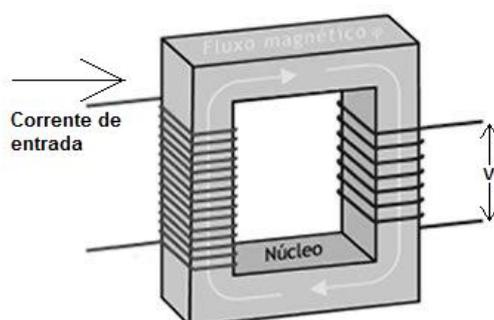


Figura 3: Transformador redutor de tensão

## 4.2 CONTROLE DE DEFORMAÇÃO

Em decorrência dos materiais piezelétricos terem as deformação proporcional ao campo elétrico incidente ( e conseqüentemente à tensão em que estão submetidos), um sistema que controle a variação de tensão elétrica também é capaz de controlar a deformação de um material piezelétrico.

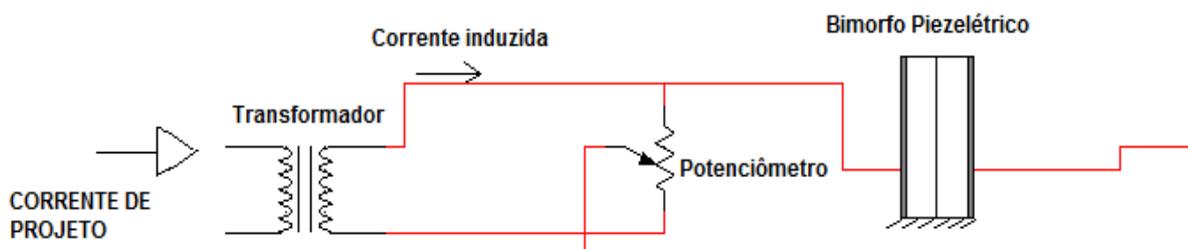


Figura 4 - Sistema controlador de deformação

A figura 4 exemplifica um sistema que controla a deformação em um bimorfo piezelétrico. O transformador tem a função de reduzir a tensão sobre o potenciômetro, para que este possa atuar dentro dos limites de potência aceitáveis.

De acordo com Fraden a resistência de elemento piezelétrico é muito alta ( da ordem de  $10^{12} - 10^{14} \Omega$ ), este pode ser analisado com sendo um circuito aberto. A tensão  $V$  induzida no transformador é similar a queda de tensão no potenciômetro, e é dada por " $V = -2. \pi. \mu. f. N. n. b. l. I \cos(2\pi ft + \theta)$ ". A queda de tensão no material, é função da porcentagem  $\zeta$  do potenciômetro, e tem valor " $V_b = -2. \zeta. \pi. \mu. f. N. n. b. l. I \cos(2\pi ft + \theta)$ ". Contudo a deformação é função do campo elétrico incidente no bimorfo, e para o caso de placas paralelas, este é dado por:

$$Eb = \frac{Vb}{h} \text{ (Campo elétrico incidente no bimorfo)}$$

$$\text{Portanto " } Eb = \frac{-2. \zeta. \pi. \mu. f. N. n. b. l. I \cos(2\pi ft + \theta)}{h} \text{ " (I).}$$

### 4.3 SISTEMA DE DESARME

O desarme de um disjuntor, deve ser projetado de maneira que uma vez efetuado, o rearme deve ser feito manual e enquanto desarmado o dispositivo deve impedir a circulação de corrente elétrica na instalação. A figura 5 mostra, em perspectiva, uma projeção do dispositivo.

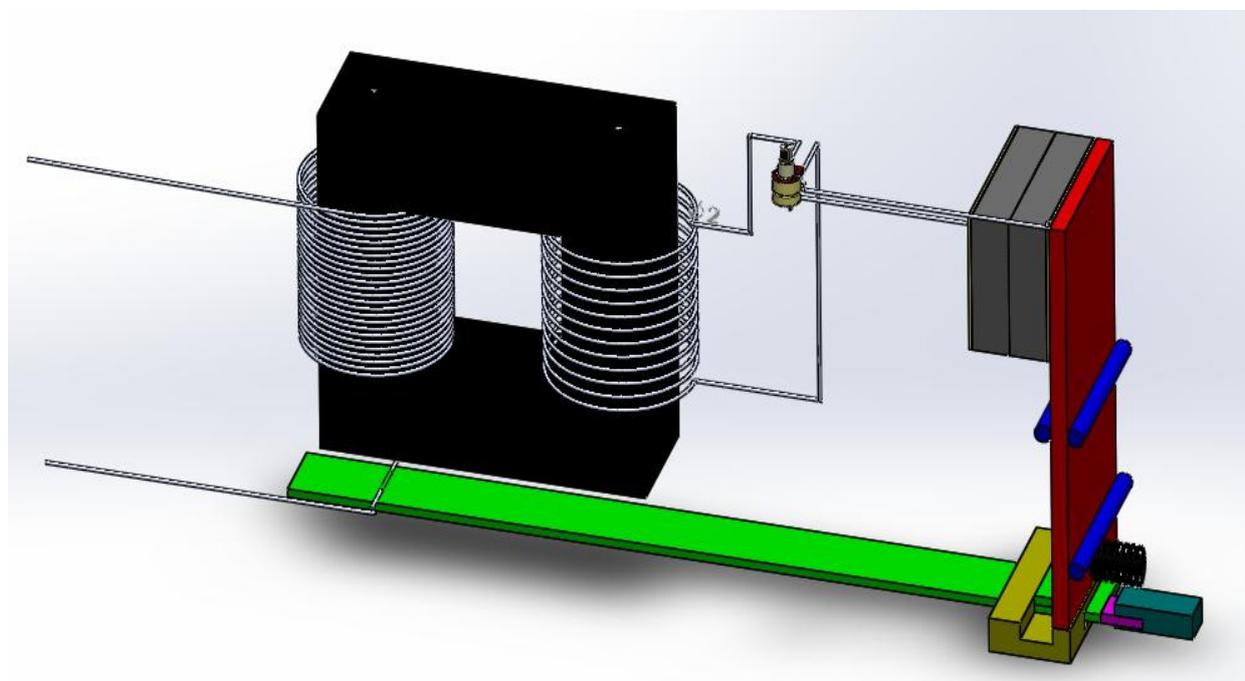


Figura 5 - Projeção de disjuntor

Os cilindros azul são fixos, e tem a função única de apoiar a placa auxiliar (vermelha). A mola em preto tem uma extremidade fixa na placa auxiliar e a outra extremidade fixa, portanto a mola amortecerá os movimentos causados na placa.

O dispositivo é acionado quando o momento causado pelo bimorfo superar o momento causado pela mola em preto. Quando acionado, a placa auxiliar se deslocará até entrar em contato com a placa de desarme (verde - que sofre ação da mola em vermelho, ver anexo 1). A placa auxiliar exercera uma força capaz de empurrar a placa de desarme para baixo (força peso da placa deve ser maior do que a força exercida pela mola em vermelho), o que impedira que a mola preta force a placa auxiliar voltar ao seu estado de repouso (encostado ao cilindro inferior). A placa de desarme simultaneamente impedirá o contato entre condutor e borne verde (localizado na sua extremidade da placa de desarme) e mudará a posição da chave em azul.

O rearmamento será efetuado manualmente ao elevar a chave para a posição superior. Ao rearmar o equipamento, a placa auxiliar ficará apoiada em uma superfície regular, e devido força exercida pela mola preta, voltara ao seu estado de repouso. Simultaneamente a placa de desarme irá comutar o borne, e então permitira a circulação de corrente elétrica na instalação.

#### 4.4 MODELAGEM DO SISTEMA

De acordo com a figura 5, é possível modelar as leis físicas que descrevem o sistema. Como visto anteriormente, a força  $F_b$  exercida pelo bimorfo tem valor  $Fb = \frac{d_{31} E_3 w h}{4 s_{11}^E}$ , para que o desarme ocorra, a força  $F_b$  deve ser maior que a força  $F_m$  exercida pela mola. Em geral, a força elástica é dada por:

$$F = kx \text{ (Força elástica)}$$

Onde  $k$  e  $x$  são constante de elasticidade e deslocamento da mola, respectivamente. O deslocamento do bimorfo deve ser igual  $x_d$  para que o desarme ocorra. Portanto  $x_d = \frac{f}{k}$ , e como a força sobre a mola é a força  $F_b$  o deslocamento da placa auxiliar fica sendo  $x_d = \frac{Fb}{k}$ .

Contudo  $F_b$  é função do campo elétrico, então a distancia  $x_d$  da placa auxiliar pode ser escrita como:

$$X_d = \frac{-2 \cdot \zeta \cdot d_{31} \cdot I \cdot \pi \cdot \mu \cdot f \cdot N \cdot n \cdot b \cdot l \cdot w \cdot \text{Cos}(2\pi f t + \theta)}{4 s_{11}^E k} \quad (II)$$

Embora apareça uma grande variedade de incógnitas, com a exceção de  $\zeta$  e  $I$ , todas as demais variáveis são fixadas ao efetuar o projeto. Desse modo é fácil identificar que:

$$X_d = c \cdot I \cdot \zeta \quad (III)$$

No entanto  $X_d$  também é um valor fixo definido no projeto, desse modo:

$$\frac{C}{\zeta} = I \quad (IV)$$

Onde C é constante do projeto.

É notável a relação inversa entre corrente nominal de projeto e porcentagem do potenciômetro, assim sendo, o potenciômetro tem a função de controlar a corrente de desarme do dispositivo. Caso seja desejado que o dispositivo se desarme sempre que percorrido por uma corrente igual ou superior a  $I_{lim}$ , tal que  $I_{lim}$  tenha módulo igual ou maior que C, o potenciômetro deve ser ajustado a uma porcentagem que satisfaça a igualdade da equação (IV).

Finalmente, é alcançado o projeto de um disjuntor baseado no efeito piezelétrico reverso, cujo sirva a uma ampla faixa de corrente nominal.

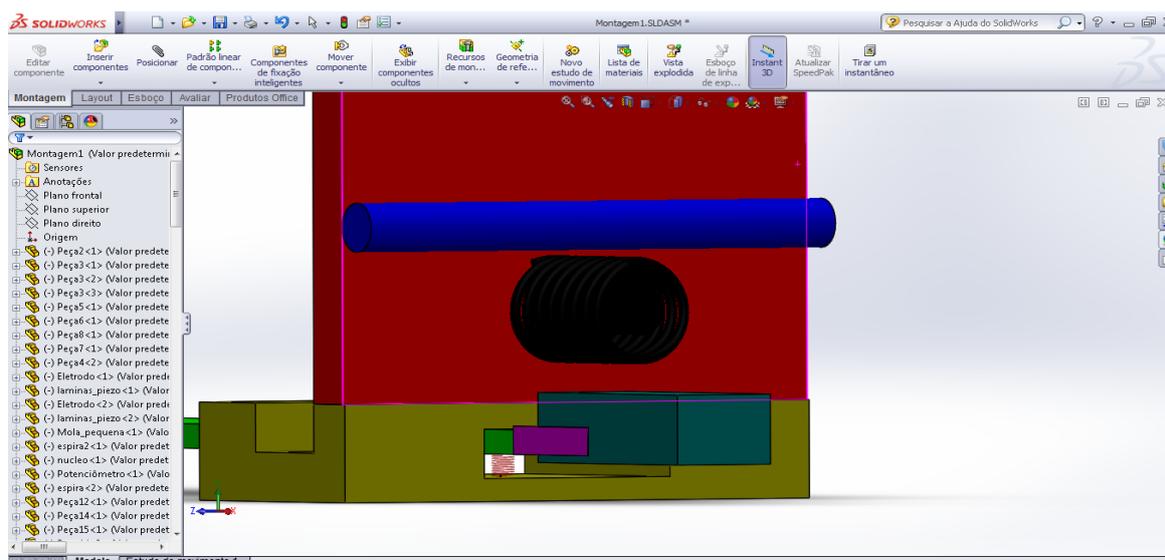
## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTAS FUTURAS

Embora o efeito piezelétrico foi descoberto a um muito tempo (mais de 130 anos), este ainda tem grande influência no desenvolvimento das inovações tecnológicas atuais. Devido a sua reversibilidade, o efeito pode ser preponderante para diversas aplicações como: Sensores mecânicos ( força, torque, deformação, pressão, acelerômetro, acústico ), sensores elétricos, atuadores, geradores de energia, emissor de ondas, entre outras.

Objetivando prosseguir com o projeto, é aconselhado: Definição de parâmetros de projeto; simulação do projeto em software; estudo e proposta de encapsulamento do dispositivo e a construção do dispositivo.

## 6 ANEXOS

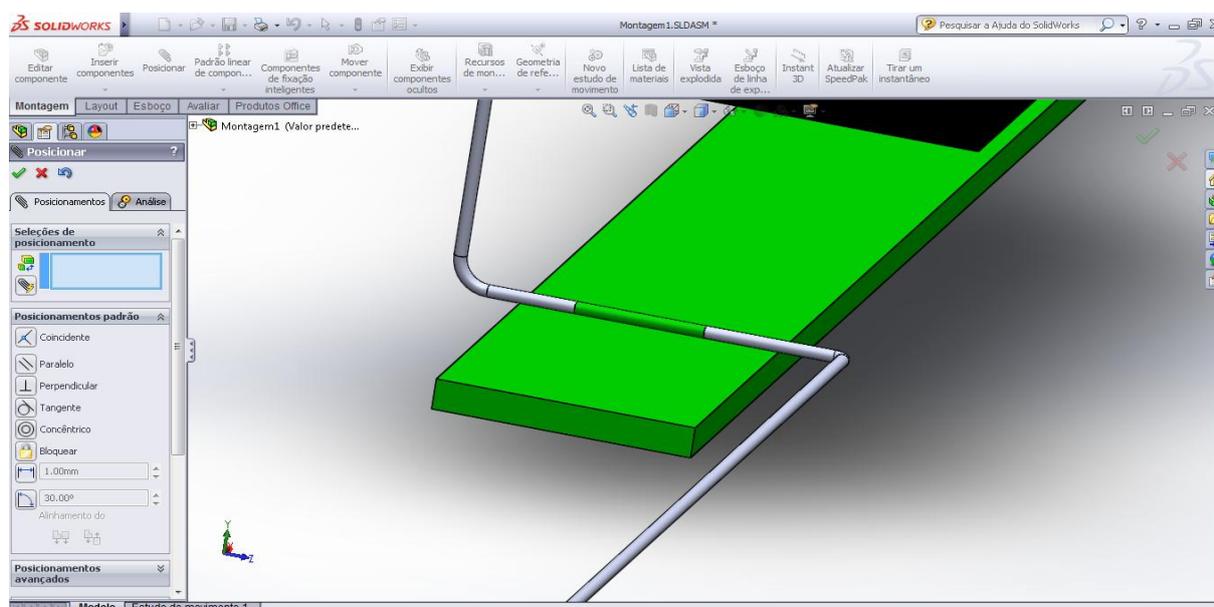
Segue em anexo algumas projeções do dispositivo, efetuado pelo software Solidworks.



Anexo 1 - Perspectiva da mola auxiliar da placa de desarme

### Anais Eletrônico

VIII EPCC – Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar  
UNICESUMAR – Centro Universitário Cesumar  
Editora CESUMAR  
Maringá – Paraná – Brasil



Anexo 2 - Borne de desarme

## 6 REFERENCIAS

Ademaro A. M. B. Cotrim. **Instalações elétricas**. 4ª edição; revisão e adaptação técnica em conformidade com a NBR 5410 : Geraldo kindermann – São Paulo : Prentice Hall, 2003;

FRADEN, Jacob. **Manual de sensores modernos: Física, Projetos, e aplicações**. 3ª edição - San Diego: Springer, 2004;

ABEL, Ana Maria da Silva; LUIZ, Sandro Galisteu. **Sensores e atuadores piezoelétricos**. Lorena, 2010

SILVA, Fernanda Colnago Gomes da, **Modelage de uma placa de materiais compósitos e piezelétricos pelo método dos elementos finitos. Aplicação de controle de vibração**. 2007. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2007

SMITS, J. G.; DALKE, S.I.; COONEY, T. K. The constituent equations of piezoelectric bimorphs, *Sensors and Actuators A: Physical*, v,28 n.1, p. 41-61, junho 1991. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0924-4247\(91\)80007-C](http://dx.doi.org/10.1016/0924-4247(91)80007-C)>;