

GABRIEL GUTIERRES BEGAS

**SENSOR DE MEDIÇÃO DE SURTOS
DE TENSÃO EM DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS COM TECNOLOGIA
BASEADA EM ELETRETOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de
São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e
Automação

Área de Concentração: Sistemas
Elétricos de Potência

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim

São Carlos

2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

B416s

Begas, Gabriel Gutierrez

Sensor de medição de surtos de tensão em descargas
atmosféricas com tecnologia baseada em eletretos /
Gabriel Gutierrez Begas; orientador Ruy Alberto Corrêa
Altafim. São Carlos, 2012.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2012.

1. Eletreto. 2. Surto de tensão. 3. Tensões
impulsivas. 4. Descargas atmosféricas. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Gabriel Gutierrez Begas

Título: "Sensor de Medição de Surtos de Tensão em Descargas Atmosféricas com Tecnologia Baseada em Eletretos"

*Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 28/11/2012*

com NOTA 8,0 (oitavo), pela Comissão Julgadora:

Prof. Titular Ruy Alberto Corrêa Altafim (Orientador)
SEL/EESC/USP

Prof. Dr. Manoel Luís de Aguiar
SEL/EESC/USP

Prof. Associado Luiz Gonçalves Neto
SEL/EESC/USP

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Manoel Antonio Gutierrez Begas e Luciane Sabbadin Begas, por me proporcionarem a oportunidade de estudar na Escola de Engenharia de São Carlos.

Ao Prof. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim, pela orientação oferecida ao longo deste ano e por sua preocupação em ir além dos assuntos técnicos e compartilhar suas experiências profissionais conosco, alunos, buscando abrir nossas mentes para o mundo fora dos limites da universidade.

Aos Prof. Dr., Manoel Luís de Aguiar e Luiz Gonçalves Neto, por aceitarem o convite para participar da banca examinadora.

Às secretárias de graduação, Shirley de Cássia Monte Gandini e Jussara Ramos Zoia, por estarem sempre dispostas a atender e auxiliar todos os alunos de graduação.

Aos meus amigos, Fernando Procópio de Arruda, Bruno Milaré Granzoto, Vitor Fressatti Mangueira, Paulo Cesar Pavão Migliorini e Daniel Augusto Pagi Ferreira, por estarem sempre comigo durante o período de graduação e por me ajudarem quando foi necessário.

Muito obrigado a todos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Software escolhido para a modelagem 3D do sensor	11
Figura 2: Vista externa (1)	12
Figura 3: Vista externa (2)	12
Figura 4: Vista do sensor aberto (1)	13
Figura 5: Vista do sensor aberto (2)	13
Figura 6: Vista do sensor com o isolador oculto (1)	14
Figura 7: Vista do sensor com o isolador oculto (2)	14
Figura 8: Vista da tampa do sensor montada	15
Figura 9: Vista do mecanismo interno da mola	15
Figura 10: Vítimas fatais por descargas atmosféricas no Brasil. Fonte: Grupo de Eletricidade Atmosférica (Elat) do Inpe	17
Figura 11: Prejuízos materiais causados pelas descargas atmosféricas do ponto de vista das concessionárias e do consumidor final	18
Figura 12: Típicas sobretensões induzidas por descargas atmosféricas próximas às redes de baixa tensão [1]	20
Figura 13: Dielétrico com ótima capacidade de armazenamento de cargas ...	21
Figura 14: Aplicação de um campo elétrico no material	21
Figura 15: As cargas armazenadas criam um campo elétrico permanente que pode ser mensurado	21
Figura 16: Processo de formação de um eletreto através da aplicação de um campo elétrico	22
Figura 17: Esquema do gerador de tensão impulsiva utilizado no carregamento das amostras	23
Figura 18: Esquema de montagem dos eletrodos. δ é a dimensão lateral da área carregada e hc é a distância crítica onde a descarga não ocorre [2].	23
Figura 19: Processo de determinação da tensão de pico através do eletreto. .	24
Figura 20: Relação entre a área carregada (diâmetro δ) e o valor de pico da tensão aplicada [2]	25
Figura 21: (a) Dependência do potencial de superfície com a tensão de pico. (b) Detalhe de (a) mostrando onde estas grandezas são linearmente proporcionais [2]... .	26
Figura 22: Configuração do sistema instalado em campo	27

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
LISTA DE FIGURAS.....	5
RESUMO	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUÇÃO	9
1.1. OBJETIVOS	10
1.2. MOTIVAÇÃO.....	10
1.3. MODIFICAÇÕES E DESAFIOS ENFRENTADOS	10
2. TENSÕES INDUZIDAS	17
3. SENSOR DE PICO DE SOBRETENSÃO	21
3.1. FUNCIONAMENTO	27
4. CONCLUSÃO.....	28
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29
ANEXO 1: Projeto do sensor de pico de sobretensão.....	30
ANEXO 2: Projeto do suporte do sensor.....	43

RESUMO

Tendo em vista que as descargas atmosféricas são responsáveis por danos em equipamentos utilizados em linhas de distribuição de energia elétrica, torna-se importante que informações sobre os surtos de tensão gerados nestas redes sejam coletados. Com estas informações torna-se possível um melhor dimensionamento dos dispositivos empregados na proteção destas redes melhorando seu desempenho e diminuindo o seu custo de manutenção.

Partindo desta necessidade foi desenvolvido o protótipo de um sensor para a medição do pico de sobretensão resultante de uma descarga atmosférica. Este sensor deverá utilizar uma nova tecnologia que se baseia no uso de um eletreto como elemento transdutor, o que irá diferenciá-lo de outros dispositivos já existentes e destinados a mesma finalidade, porém, de detecção restrita e instalação complexa, que utilizam para isso transdutores magnéticos.

Palavras-chave: Eletreto, surto de tensão, tensões impulsivas, descargas atmosféricas.

ABSTRACT

Considering that the lightning is responsible for damages to equipment used in the electrical power distribution lines, it is important to collect information about the voltage surges generated on those networks. With this information it is possible a better dimensioning of the devices used to protect these networks improving their performance and reducing their cost of maintenance.

From this need a prototype of a sensor for measuring the voltage peak resulting from lightning was developed. This sensor will use a new technology based on an electret as the transducer element, what will differentiate it from all other existing devices designed for the same purposes, however, of restricted detection and complex installation, that uses magnetic transducers to do it.

Keywords: Electret, voltage surge, impulsive voltage, lightning.

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento de equipamentos eletroeletrônicos conectados ao sistema de distribuição de energia elétrica que são sensíveis à interferência, aos prejuízos provocados pelas sobretensões e surtos de tensão devido às descargas atmosféricas, principalmente em regiões de moderada e alta incidência destas descargas e devido à adoção de novos critérios na avaliação da qualidade de energia fornecida pelas concessionárias, tem-se observado um aumento no número de pesquisas a respeito das características destas sobretensões e surtos de tensão nas redes de distribuição no intuito de melhorar os sistemas de proteção contra estes fenômenos [1].

No passado, as pesquisas acerca da proteção de sistemas e equipamentos elétricos contra descargas atmosféricas eram concentradas, principalmente, em sistemas elétricos blindados, no entanto, a blindagem de redes de distribuição e dos equipamentos nela utilizados não é uma prática comum, além de que estes estão expostos à incidência direta destas descargas. Desta maneira, um maior número de informações de campo sobre as características destes fenômenos, descargas diretas e indiretas, se faz necessário.

Usualmente, acoplamentos magnéticos e fitas magnéticas são empregados na medição das descargas impulsivas anteriormente mencionadas, onde os acoplamentos magnéticos são baseados na quantidade de magnetização produzida pelo campo magnético gerado por uma corrente elétrica impulsiva que percorre uma linha e as fitas magnéticas baseiam-se no apagamento de um sinal pré-gravado nestas fitas devido a tais correntes. Portanto, estes sensores são aplicados no registro de correntes impulsivas e a sua aplicação na medição de tensões impulsivas é restrita em decorrência de sua complexidade de instalação.

Uma vez que as tensões impulsivas não podem ser facilmente monitoradas pelos sensores magnéticos, torna-se muito interessante a criação de um sensor baseado num novo princípio de transdução e armazenamento da informação. É justamente neste ponto que entra o sensor desenvolvido, que se baseia numa nova tecnologia utilizando os eletretos como elemento de transdução na detecção e medida de tensões impulsivas [2] [3].

1.1. OBJETIVOS

Este trabalho deverá apresentar um primeiro protótipo do sensor de medição de pico de sobretensões em linhas de distribuição de energia elétrica, seus detalhes construtivos, que abrange a especificação de todas as peças a serem empregadas e sua montagem, além do detalhamento da tecnologia empregada e a descrição de seu funcionamento.

Também será apresentado o suporte do sensor a ser instalado na cruzeta que deverá conter um compartimento para a instalação de um divisor capacitivo, a fim de baixar a tensão aplicada no sensor, e um compartimento destinado à instalação do sensor através de um engate rápido, de modo que a substituição do sensor possa ser feita sem a necessidade de se subir no poste. Do mesmo modo que o sensor, todas as especificações de peças e montagem são contempladas no projeto.

1.2. MOTIVAÇÃO

A maior motivação deste trabalho é levar para o campo todo o trabalho desenvolvido em laboratório acerca das tensões impulsivas, dos eletretos e a sua aplicação como transdutor na medição destas tensões.

Estes estudos, conduzidos pelo Prof. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim desde seu mestrado, tratam de uma nova tecnologia na medição de tensões impulsivas que, ao longo destes anos de trabalho, atingiu maturidade suficiente para ir a um último estágio, que é a transformação de todo conhecimento acumulado num produto final.

Deste modo, este trabalho se traduz em mais um passo na direção deste objetivo.

1.3. MODIFICAÇÕES E DESAFIOS ENFRENTADOS

Partindo de uma ideia geral de como deveria ser o sensor o primeiro desafio enfrentado foi escolher um software de modelagem 3D para a confecção de sua primeira versão. Os softwares atuais mais utilizados para a modelagem 3D são o Inventor e o Solidworks. Dentre estes dois, o software escolhido foi o Autodesk Inventor Professional 2013. Este software foi escolhido por ser um software de grande funcionalidade e qualidade, por ser de uma empresa com tradição neste tipo de aplicação, a Autodesk, e por oferecer uma versão gratuita para estudantes.



Figura 1: Software escolhido para a modelagem 3D do sensor.

Feita a escolha, houve um período de familiarização com o software, que possui muitos recursos e trabalha com a modelagem através de referências, assim, ele exige um bom domínio de seu modo de funcionamento para que se possa chegar ao resultado desejado.

A partir daí foi feita a modelagem individual de cada um dos componentes da primeira versão do sensor e a sua montagem através da chamada de cada um deles num arquivo de montagem para ser apresentada ao professor orientador.

Como era de se esperar, esta primeira versão precisou ser modificada a fim de se melhorar algumas características funcionais e de fabricação que não serão abordados por se tratar de um processo inicial.

Após isso, foi feita uma remodelagem do sensor com a eliminação de alguns componentes e a criação de novos para serem introduzidos no projeto. As dimensões foram ajustadas e o sensor modelado em três dimensões foi plotado em 2D juntamente com seus componentes principais, especificados individualmente.

Em seguida são mostradas algumas vistas e detalhes do resultado obtido para este protótipo, que ainda não é o definitivo, mas acreditava-se ser até o momento.

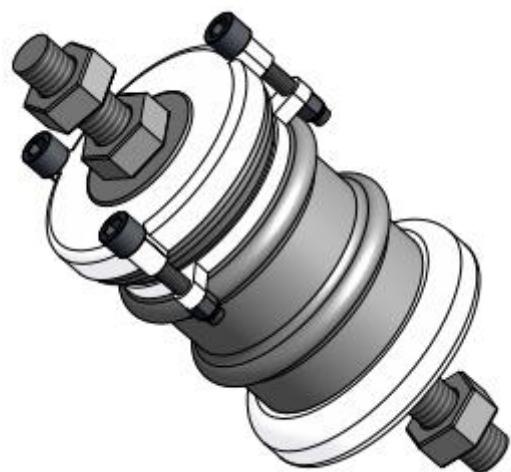


Figura 2: Vista externa (1).

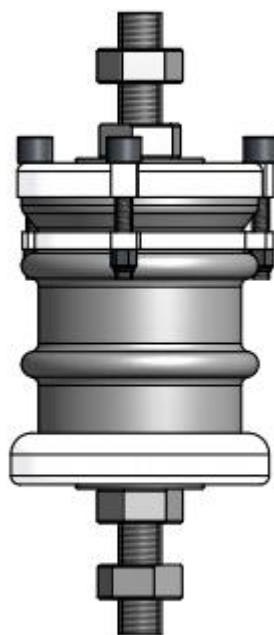


Figura 3: Vista externa (2).

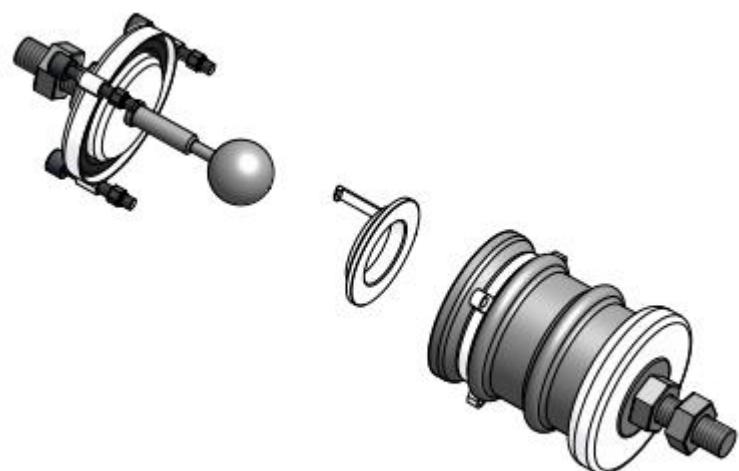


Figura 4: Vista do sensor aberto (1).



Figura 5: Vista do sensor aberto (2).

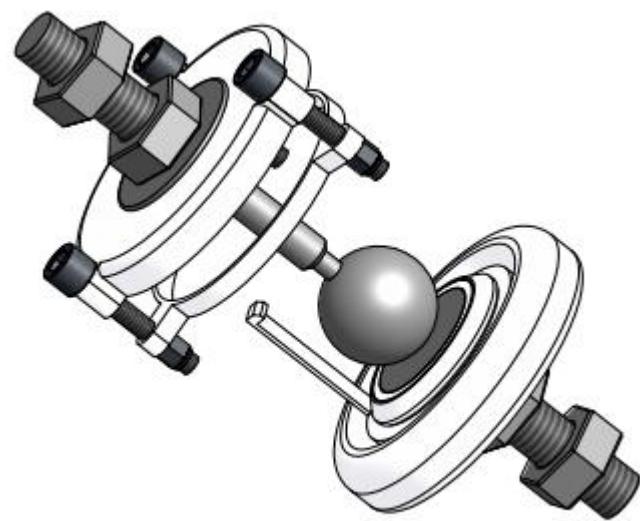


Figura 6: Vista do sensor com o isolador oculto (1).

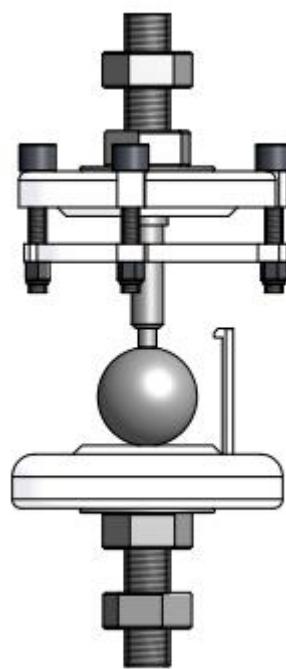


Figura 7: Vista do sensor com o isolador oculto (2).

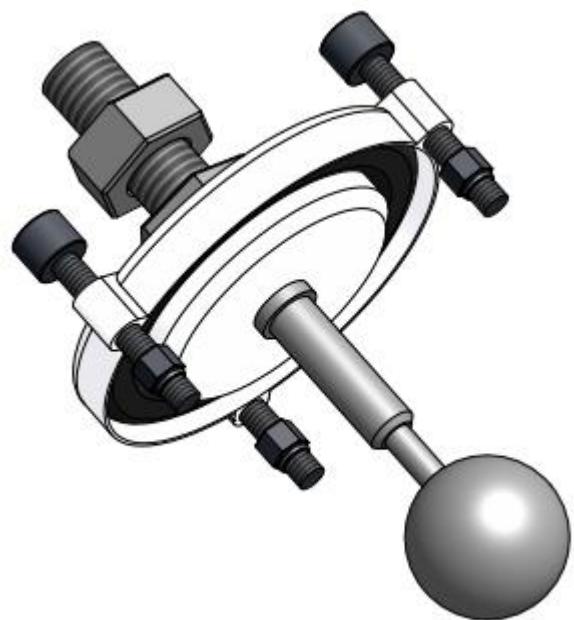


Figura 8: Vista da tampa do sensor montada.

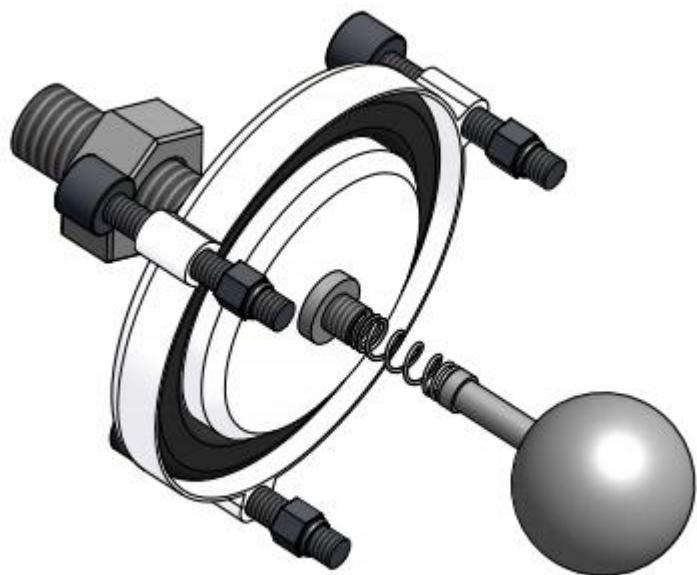


Figura 9: Vista do mecanismo interno da mola.

Durante a confecção deste protótipo, houve uma modificação estrutural significativa neste projeto, proposta pelo professor orientador, visando uma melhora no projeto como um todo, que agora deveria incluir o suporte do sensor, para a sua instalação na rede de distribuição, ele deveria comportar um divisor capacitivo para diminuir a tensão incidente sobre o sensor e um sistema de engate rápido para que não fosse necessário subir no poste quando o sensor precisasse ser substituído, bastando utilizar uma vara de alta tensão.

Além disso, o interior do sensor também precisou ser modificado, pois precisava abrigar uma parte do divisor capacitivo de modo a tornar o projeto, como um todo, mais funcional.

Com isso, o projeto do sensor passou por uma nova remodelagem e, durante este processo, algumas peças foram simplificadas ainda mais para tornar a sua fabricação mais simples e menos onerosa e foi incluída uma peça para seu encaixe no suporte.

Quanto ao suporte, este também passou por todas as etapas de projeto e modelagem e, devido à experiência adquirida ao longo do projeto do sensor, foi feito de maneira mais acertada, respeitando os critérios de funcionalidade e simplicidade, não sendo necessário que passasse por modificações.

Assim, chegamos ao projeto final dos protótipos que são apresentados detalhadamente ao final deste trabalho, como anexos.

2. TENSÕES INDUZIDAS

O estudo das descargas atmosféricas, devido aos seus efeitos e consequências, como, acidentes fatais, danos aos equipamentos instalados na rede de distribuição e ao sistema em si, além dos desligamentos das linhas, provocando prejuízos à toda a sociedade, é de grande importância para que seja possível, ao longo do tempo, a implementação de melhorias na sua proteção visando minimizar estes prejuízos. A figura 10 mostra um quadro dos acidentes fatais por descargas atmosféricas, onde 2% das fatalidades foram ao telefone e 12% dentro de casa, ou seja, devido às tensões induzidas.



Figura 10: Vítimas fatais por descargas atmosféricas no Brasil. Fonte: Grupo de Eletricidade Atmosférica (Elat) do Inpe.

A figura 11 mostra os prejuízos causados pelas descargas atmosféricas do ponto de vista da concessionária e do consumidor final, onde para o consumidor final este custo é dado basicamente pelos equipamentos danificados pelas descargas e para a concessionária este custo é bem maior e composto por vários itens, conforme ilustra a figura 11.

- **Prejuízos materiais**
 - **Concessionárias**
 - Interrupção no fornecimento de energia
 - Localização e reparo do problema
 - Substituição de equipamentos danificados
 - Depreciação da imagem da empresa
 - Pedidos de indenização por danos (PIDs)
 - Custos Indiretos
 - **Consumidores finais**
 - Equipamentos danificados

Figura 11: Prejuízos materiais causados pelas descargas atmosféricas do ponto de vista das concessionárias e do consumidor final.

Em função da baixa suportabilidade das isolações utilizadas nestas redes, acredita-se que a maior parte das sobretensões sejam provocadas por descargas atmosféricas, mesmo em regiões de moderada incidência destas descargas [4].

Existem três formas de se injetar um surto de tensão no sistema de distribuição de energia. A descarga elétrica pode incidir diretamente nos condutores, descargas diretas, podem atingir um ponto em suas proximidades, descargas indiretas, e podem também atingir diretamente alguma edificação.

Um cabo guarda é instalado nas linhas de distribuição a fim de oferecer alguma proteção no caso de uma descarga atingir diretamente os condutores de fase. Apesar deste cabo guarda ser instalado sobre os demais condutores, existe a possibilidade de alguma descarga atingir um dos condutores de fase, ocasionando o desligamento da linha, o que depende do sistema de proteção empregado e das características da descarga incidente. Existe também, no caso de uma descarga atingir o cabo guarda ou o topo da torre, a possibilidade de um desligamento devido a uma descarga disruptiva na cadeia de isoladores em virtude do aumento da diferença de potencial entre a torre e os condutores fase.

Quanto às descargas atmosféricas próximas à linha, descargas indiretas, as linhas de transmissão com tensão nominal maior ou igual a 69kV são raramente afetadas devido à isolação que é grande o suficiente para conter uma descarga disruptiva nos isoladores. Com relação à distribuição, estas descargas incidentes podem atingir amplitudes significativas, superando o nível básico de isolação. Por isso, as descargas atmosféricas indiretas constituem um importante item na composição

dos índices de qualidade de energia, ainda mais porque se tem observado um aumento no número de equipamentos sensíveis conectados às redes [1].

Como no Brasil o sistema de distribuição é, predominantemente, aéreo e por possuir um dos maiores índices de incidência de descargas atmosféricas, pode-se entender a preocupação existente a respeito deste assunto tanto pelo setor elétrico como pela indústria, que são os mais prejudicados tecnicamente e financeiramente.

Comparativamente, em relação às descargas diretas e indiretas, as indiretas, mesmo sendo menos severas, possuem maior relevância dado a sua maior frequência de incidência.

No que diz respeito aos consumidores comerciais e residenciais, que recebem alimentação em baixa tensão, as sobretensões causadas pelas descargas atmosféricas possui papel relevante na qualidade de energia recebida, pois estas sobretensões podem atingir valores superiores a 10kV [1]. As descargas nas redes secundárias provenientes de descargas atmosféricas podem ser transferidas do primário via transformador quando da incidência de descargas diretas ou próximas à rede primária. A ocorrência de descargas diretas na rede secundária é menos frequente porque esta é instalada numa altura inferior à rede primária e por ficar sob a mesma, na maior parte dos casos. Ainda em relação aos surtos na rede secundária, também existe a possibilidade deles serem causados por descargas que atingem edificações. Quando as correntes são de alta intensidade, existe um aumento do potencial de terra no local da edificação atingida causando a transferência do surto à rede de baixa tensão através de descargas disruptivas ou devido à atuação dos dispositivos de proteção instalados na rede.

Nas redes de média e baixa tensão, verificou-se que, devido à presença do condutor neutro na rede de baixa tensão, o qual é aterrado em vão regulares, as tensões induzidas apresentam valores mais baixos que aqueles encontrados na rede primária. A tensão induzida no condutor neutro é efetivamente limitada pelo aterramento, assim, o valor máximo da tensão induzida ocorre no meio do vão os de valor mínimo ocorrem nos pontos de aterramento.

As formas de onda das tensões induzidas na rede secundária são caracterizadas por oscilações amortecidas [4], conforme mostra a figura a seguir.

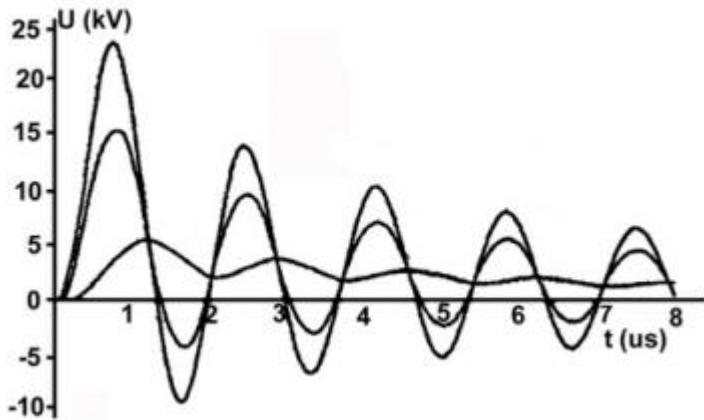


Figura 12: Típicas sobretensões induzidas por descargas atmosféricas próximas às redes de baixa tensão [1].

A tensão induzida no condutor de fase é também limitada em valores baixos em virtude do grande acoplamento entre os condutores e o neutro, esse acoplamento é elevado nas redes baixa tensão. Os valores de sobretensão na rede de baixa tensão não provocam, de maneira geral, disruptão nos isoladores, porém, estes valores são suficientemente elevados para causar danos nos aparelhos eletroeletrônicos dos consumidores conectados a pontos da linha próximos ao local de incidência da descarga atmosférica.

Por tudo o que foi falado anteriormente, devido às privatizações das empresas do setor elétrico e a adoção de novos critérios de qualidade para o fornecimento de energia, as concessionárias vem investindo em programas de pesquisa e desenvolvimento dentro desta área, num esforço para minimizar os problemas causados pelos surtos de tensão provocados pelas descargas atmosféricas.

3. SENSOR DE PICO DE SOBRETENSÃO

O sensor de pico de sobretensão proposto se baseia num eletreto como elemento transdutor devido a uma propriedade muito especial que este material possui, que é a de adquirir uma eletrização quase que permanente. Isso significa que o tempo de decaimento das cargas adquiridas por este material, quando este passa por um processo de eletrização, é muito longo [5]. Assim, pode-se definir um eletreto como um dielétrico que possui uma ótima capacidade de armazenamento de cargas. As figuras 13, 14 e 15 ilustram o comportamento do dielétrico que, quando carregado, passa a ser chamado de eletreto.



Figura 13: Dielétrico com ótima capacidade de armazenamento de cargas.

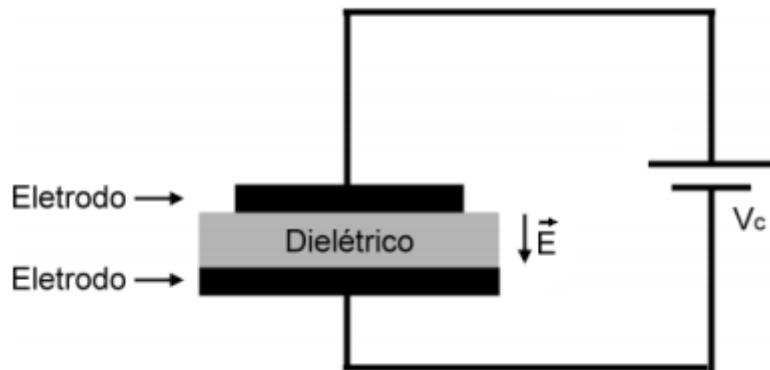


Figura 14: Aplicação de um campo elétrico no material.



Figura 15: As cargas armazenadas criam um campo elétrico permanente que pode ser mensurado.

Abaixo, na figura 16, é mostrado o que ocorre no material durante e após o carregamento. Ao aplicarmos um campo elétrico no material temos ocorrendo simultaneamente a injeção de cargas dos eletrodos, chamadas de homocargas, o deslocamento de cargas espaciais e o alinhamento dos dipolos moleculares, estes dois últimos denominados heterocargas. Logo após a retirada do campo as cargas referentes aos dipolos e às cargas espaciais predominam sobre as injetadas resultando num campo elétrico inverso ao campo dos eletrodos. Passado algum tempo, um ou dois dias, os dipolos e as cargas espaciais perdem sua configuração ordenada e agora as cargas que fornecem o campo resultante são as injetadas. Como estas cargas levam até 500 anos para decair pode-se falar num campo elétrico remanescente praticamente permanente.

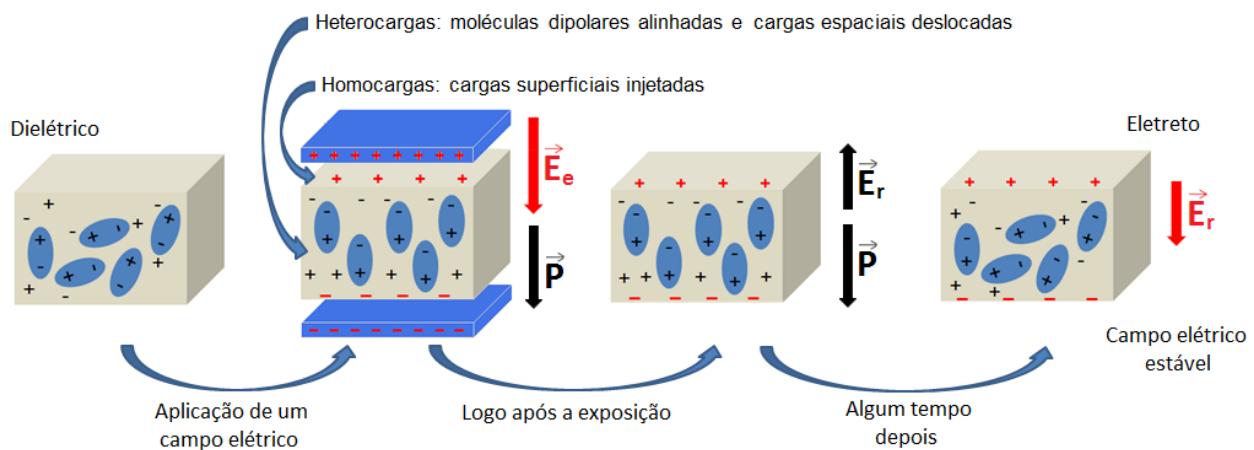


Figura 16: Processo de formação de um eletroto através da aplicação de um campo elétrico.

O seu carregamento consiste na aplicação de uma onda de tensão impulsiva, com um pico elevado, aplicado diretamente sobre o elemento transdutor. Quando esta tensão impulsiva é aplicada sobre o eletroto, ocorre o aprisionamento de cargas elétricas em sua superfície. É mostrado abaixo, figura 17, o circuito utilizado em laboratório para o carregamento das amostras. Seus parâmetros são $R_1 = 72\Omega$, $R_2 = 44\Omega$, $C_1 = 1,35\text{mF}$, $C_2 = 11\text{nF}$ e G é o centelhador.

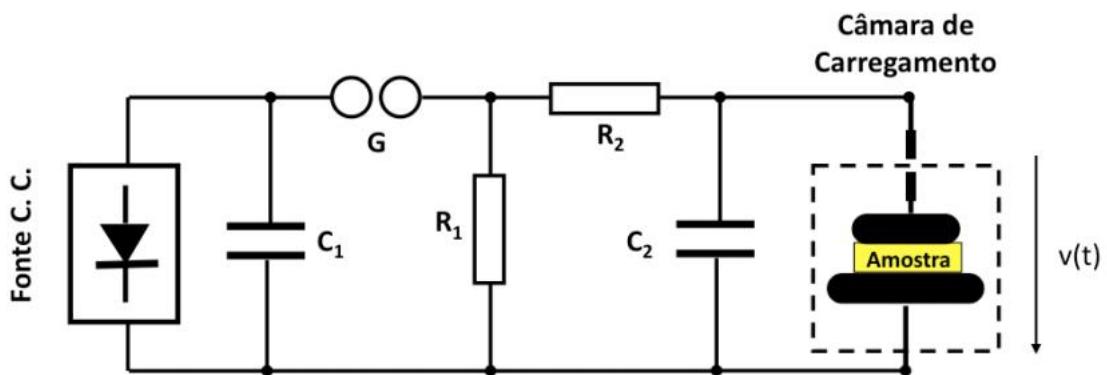


Figura 17: Esquema do gerador de tensão impulsiva utilizado no carregamento das amostras.

Neste sensor o carregamento é feito através de dois eletrodos, sendo um deles plano e o outro cilíndrico, ambos são de feitos de alumínio com as superfícies polidas, conforme a figura 18, abaixo. A área máxima de carregamento é determinada pela distância crítica h_c entre o cilindro e a superfície da amostra na qual a descarga não ocorre.

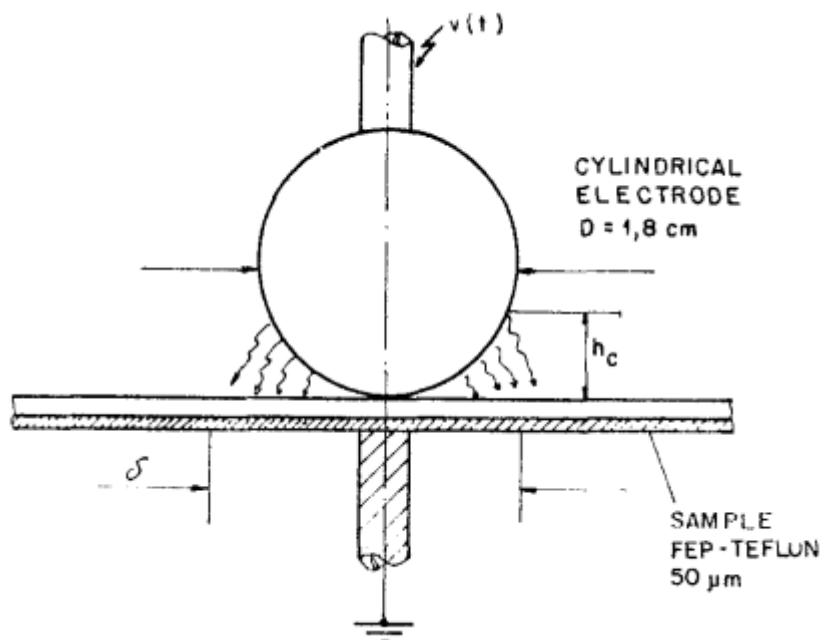


Figura 18: Esquema de montagem dos eletrodos. δ é a dimensão lateral da área carregada e h_c é a distância crítica onde a descarga não ocorre [2].

A medida da área carregada é feita através do escaneamento da amostra com uma sonda eletrostática ou através de um processo xerógrafo, onde é depositado toner na amostra, figura 19. No processo xerógrafo, o toner irá aderir às cargas e revelará a área carregada, assim, pode-se medir o diâmetro δ da amostra.

Interpretação dos dados em laboratório

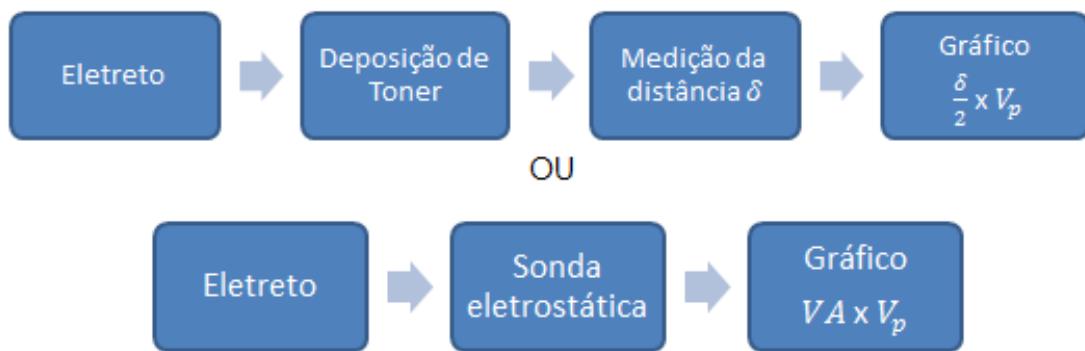


Figura 19: Processo de determinação da tensão de pico através do eletreto.

Destes dois processos o mais utilizado é o primeiro por este apresentar um custo mais baixo.

A partir daí a área carregada da amostra pode ser relacionada ao pico da tensão nela aplicada através de uma curva obtida experimentalmente em laboratório, por meio de vários ensaios, e que relaciona as duas grandezas de maneira direta. A figura 20, abaixo, mostra a relação entre o diâmetro δ da área carregada medida perpendicularmente ao eixo do cilindro e o pico da tensão aplicada V_p .

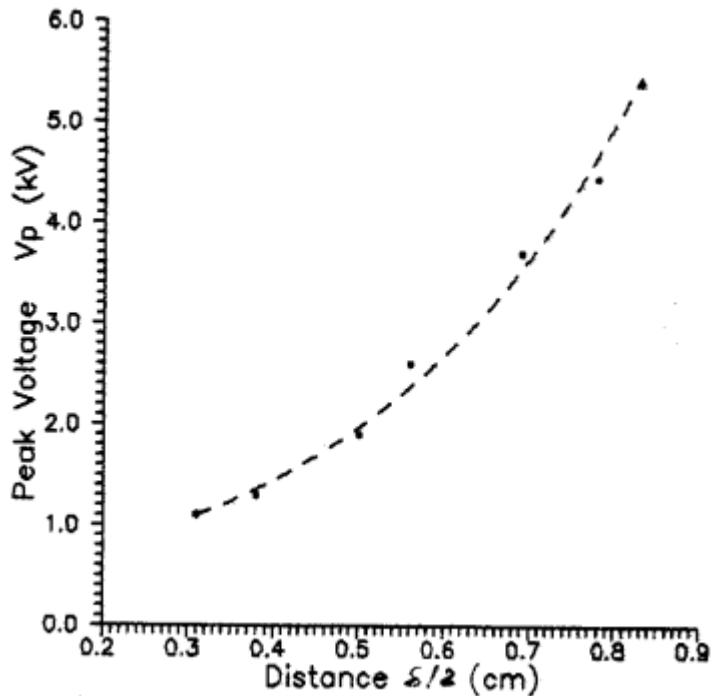
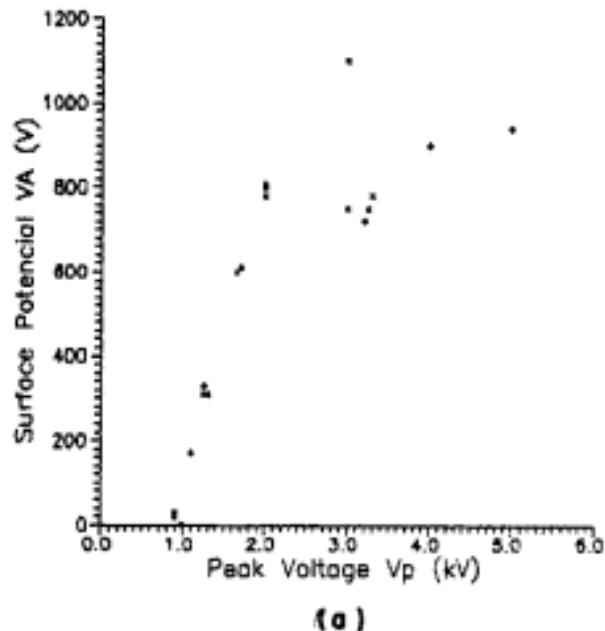


Figura 20: Relação entre a área carregada (diâmetro δ) e o valor de pico da tensão aplicada [2].

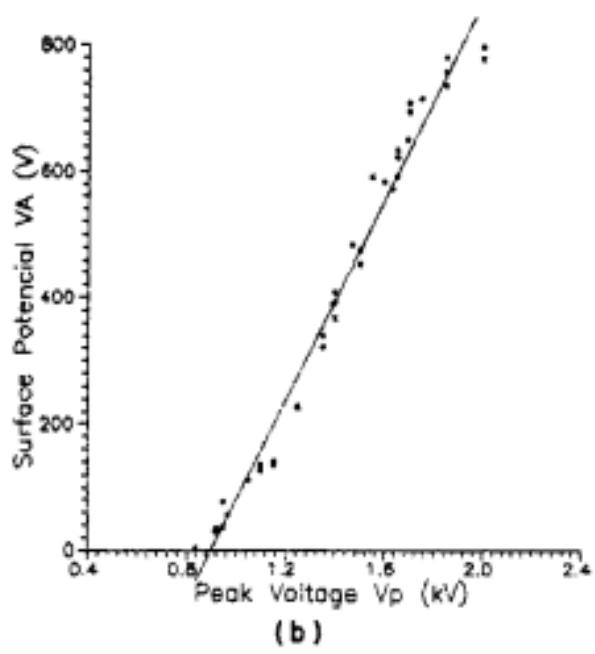
A calibração da curva pode ser expressa pela equação empírica

$$V_p = Ae^{B\delta} \quad (1)$$

onde A e B são constantes calculadas através da curva da figura 13 (b), a seguir. A curva da figura 21 foi obtida utilizando dois eletrodos planares ao invés de um planar e um cilíndrico. A diferença entre os resultados obtidos entre estes eletrodos é que no caso do planar temos uma região linear e um ponto de saturação e no caso do cilíndrico temos uma curva não linear, porém, sem saturação.



(a)



(b)

Figura 21: (a) Dependência do potencial de superfície com a tensão de pico. (b) Detalhe de (a) mostrando onde estas grandezas são linearmente proporcionais [2].

Para um cilindro de 1,8 cm de diâmetro, $A = 6,19 \text{ cm}^{-1}$ e $B = 0,42 \text{ V}$. Este eletrodo permite a medição de tensões acima de 800V [2].

3.1. FUNCIONAMENTO

O projeto proposto deve funcionar da seguinte maneira. O suporte do sensor deverá instalado numa cruzeta e conectado ao sistema de potência através de duas conexões existentes no protótipo, uma na parte inferior, terra, e outra na parte superior, que irá conduzir o surto de tensão quando uma descarga atmosférica incidir na linha de distribuição. No compartimento superior deste suporte serão instalados capacitores, que em conjunto com os capacitores internos ao sensor irão compor um divisor de tensão capacitivo a fim de diminuir o valor da tensão aplicada nos eletrodos do sensor. A configuração global do sistema é ilustrada pela figura 22.

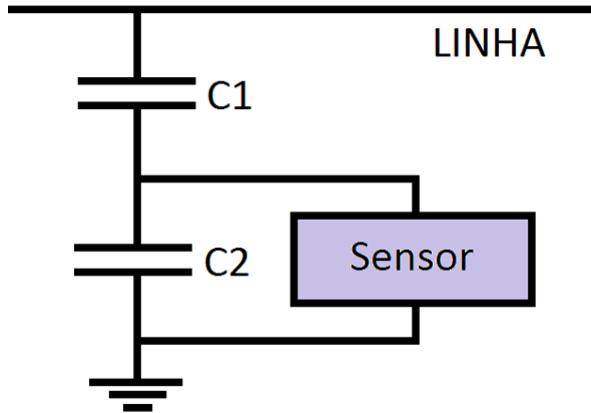


Figura 22: Configuração do sistema instalado em campo.

Dentro do sensor, em paralelo com os capacitores, estará montado o esquema mostrado na figura 18. Deste modo, quando uma descarga atingir a linha de distribuição e chegar até o sensor, o eletreto ficará carregado de acordo com o pico da tensão desta descarga. Com isso, ao se recolher este sensor, pode-se medir o potencial de superfície ou o diâmetro δ do eletreto, e consequentemente, será possível determinar qual foi o pico da tensão aplicada neste sensor, através de uma associação direta entre estas grandezas, dada pelas curvas obtidas em laboratório.

Neste projeto, a substituição do sensor deverá ser através de um sistema de engate rápido, onde um operador poderá realizar a troca do mesmo sem a necessidade de se subir no poste, através de uma vara de alta tensão. Os detalhes construtivos podem ser consultados no projeto anexo.

4. CONCLUSÃO

Devido à importância atribuída aos estudos relacionados às sobretensões e surtos de tensões incidentes nas redes de distribuição de energia elétrica, provenientes de descargas atmosféricas, em razão dos problemas técnicos e prejuízos financeiros causados, acredito que o projeto de um sensor baseado numa nova tecnologia, que utiliza um eletreto como elemento transdutor, é de grande relevância para a sociedade. Primeiro, porque a necessidade de se coletar informações acerca das descargas atmosféricas é um fato, e também porque está se propondo um sensor de baixo custo para a obtenção destas informações. Tanto a tecnologia quanto o projeto do sensor foram concebidos de maneira simples, buscando justamente reduzir o custo de sua fabricação, pois assim, logo este poderá ser largamente utilizado e então poderá recompensar todos aqueles que empregaram seus esforços em sua concepção, bem como os que trabalham na melhoria dos sistemas de proteção de redes de distribuição e também a sociedade de maneira geral, que poderá contar com sistemas de proteção mais eficientes.

Agora, o próximo passo a ser dado é a construção do protótipo projetado a fim de colocar à prova sua funcionalidade e, se necessário, que este passe pelos aprimoramentos requeridos.

E finalmente, espera-se que, no longo prazo, este trabalho possa servir de inspiração para trabalhos futuros que por alguma razão provem a ser mais viáveis e eficientes.

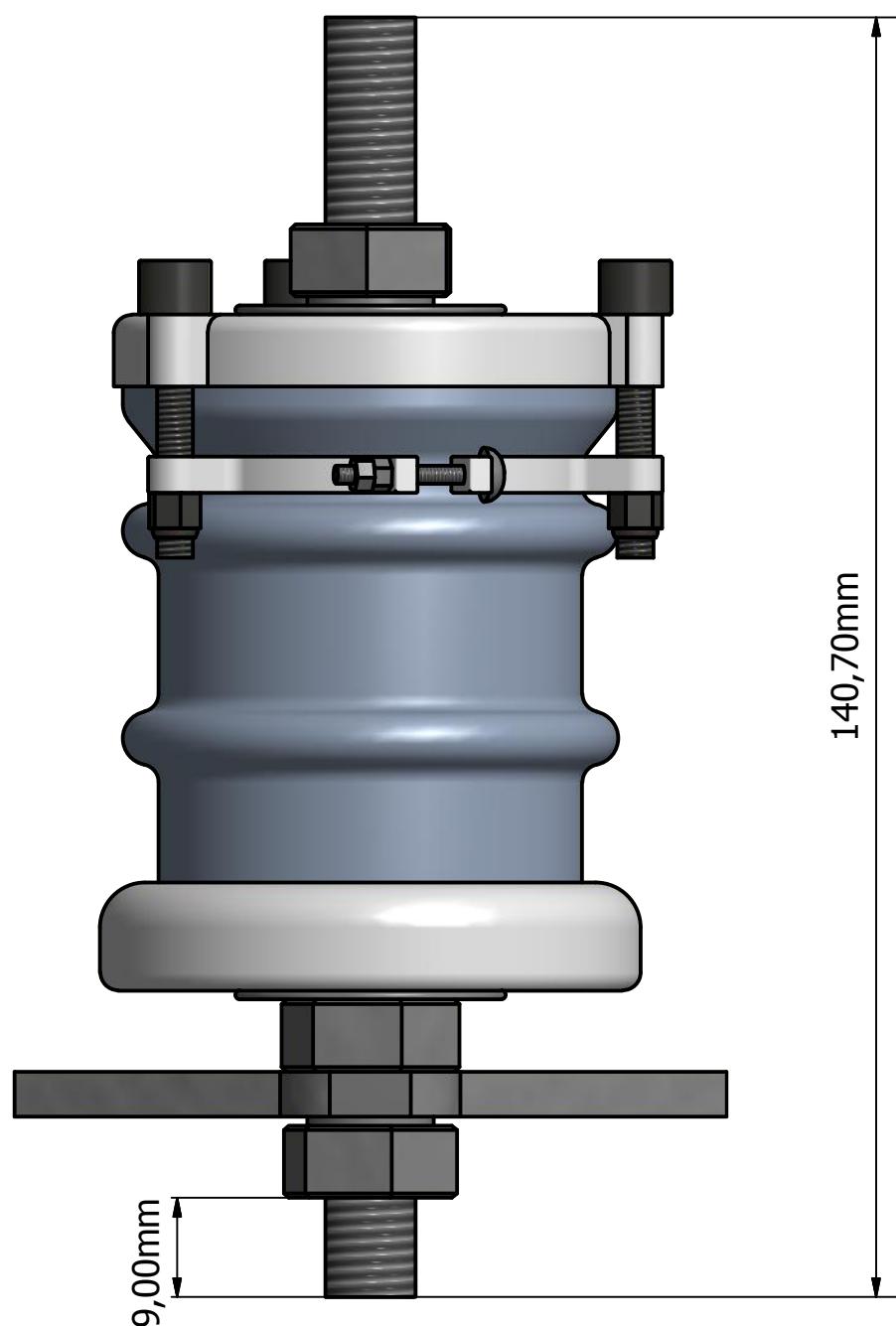
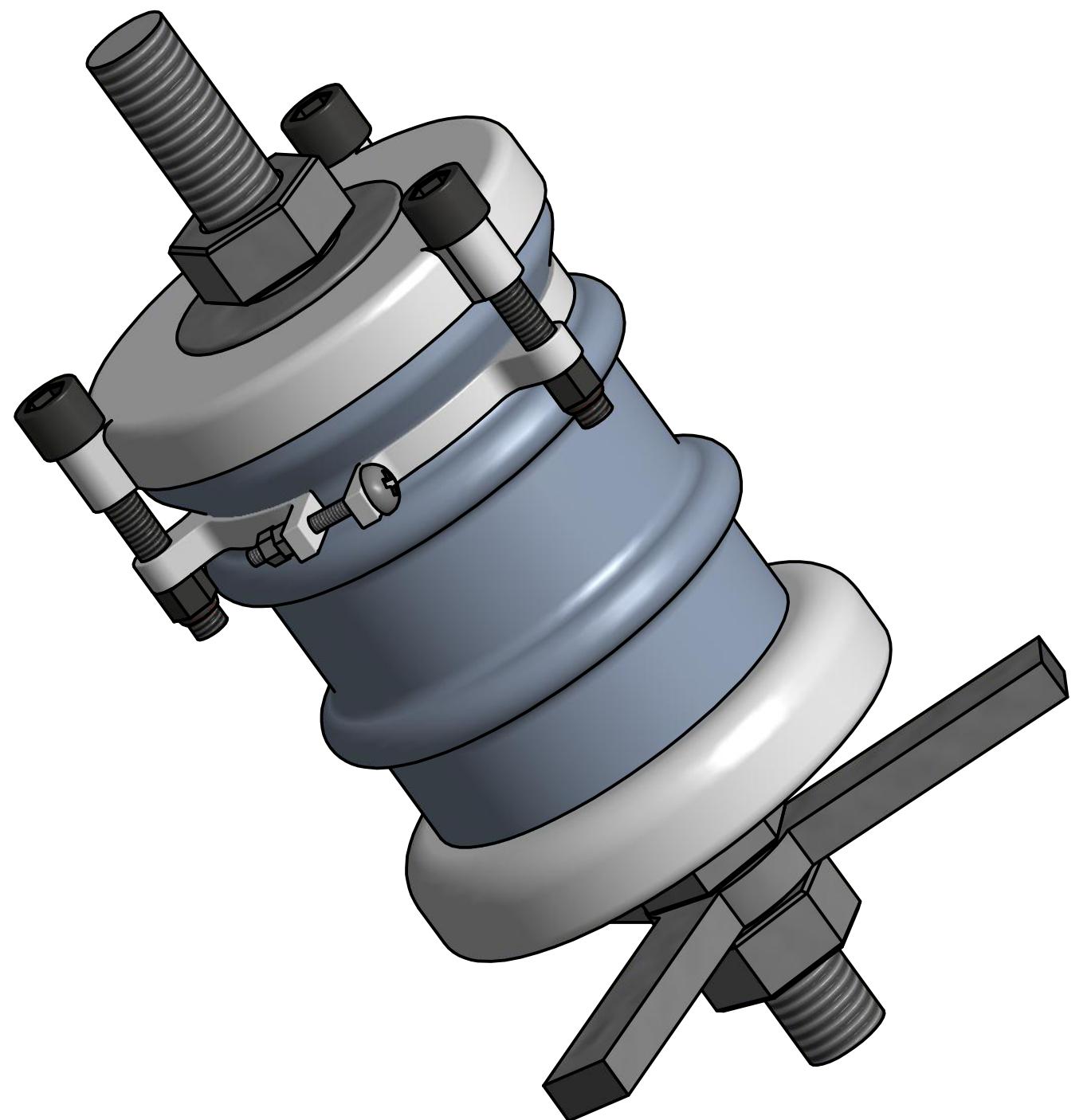
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ACÁCIO, S. N., Tensões induzidas por descargas atmosféricas em redes de distribuição de baixa tensão, Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- [2] ALTAFIM, R. A. C., GIACOMETTI, J. A., JANISZEWSKI, J. M., ELECTRET TRANSDUCER FOR MEASURING IMPULSE VOLTAGES AND CURRENTS. APPLICATION IN LIGHTNING DETECTION, IEEE, 1990.
- [3] ALTAFIM, R. A. C., GIACOMETTI, J. A., JANISZEWSKI, J. M., "An Electret Transducer for Impulse Voltage Measurements," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, vol. 28, n. 5, Sep./Oct. 1992.
- [4] PIANTINI, A., ACÁCIO, S. N., "Distúrbios em linhas de baixa tensão causados por descargas atmosféricas indiretas," *O SETOR ELÉTRICO*, n. 43, Ago. 2009. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br/web/a-revista/edicoes/129-disturbios-em-linhas-de-baixa-tensao-causados-por-descargas-atmosfericas-indiretas.html>>. Acesso em: 17/10/2012.
- [5] FALCONI, D. R., Sensor piezelétrico baseado na tecnologia dos eletretos termo-formados: aprimoramentos dos processos de produção, Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- [6] ALTAFIM, R. A. C., GIACOMETTI, J. A., JANISZEWSKI, J. M., "A Novel Method for Electret Production using Impulse Voltages," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 27, n. 4, Aug 1992.
- [7] ALTAFIM, R. A. C., FALCONI, D. R., *Piezoelectric Sensor Based on Electret Thermoforming Technology*, 2010 International Conference on Solid Dielectrics, Potsdam, Germany, July 4-9, 2010.

ANEXO 1:
PROJETO DO SENSOR DE PICO DE SOBRETENSÃO

VISTA EXTERNA

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

Projeto por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP				SENSOR DE PICO DE SOBRETENSÃO	
		Edição		Folha	1 / 11

6

5

4

3

2

1

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

A

C

B

D

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

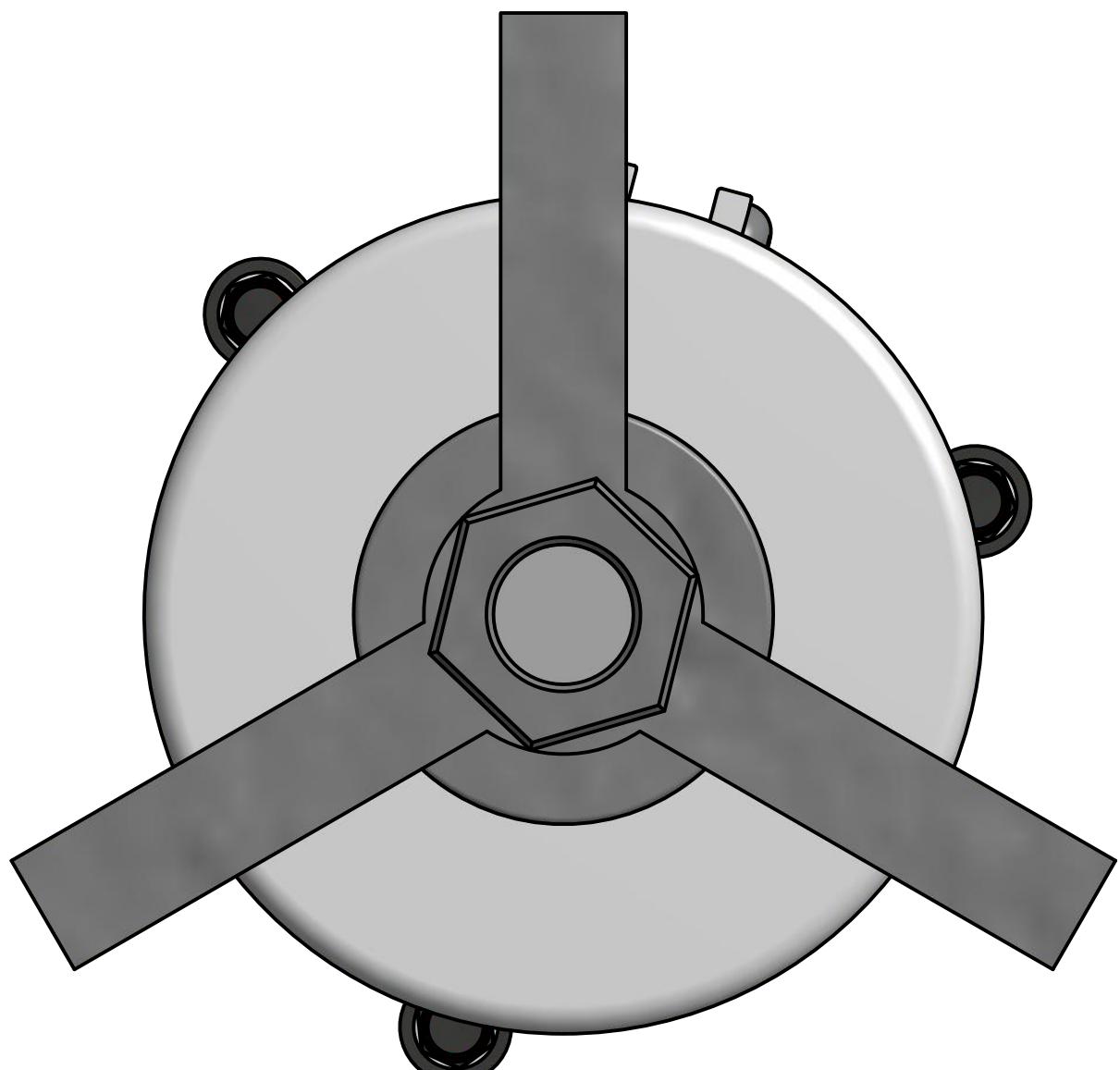
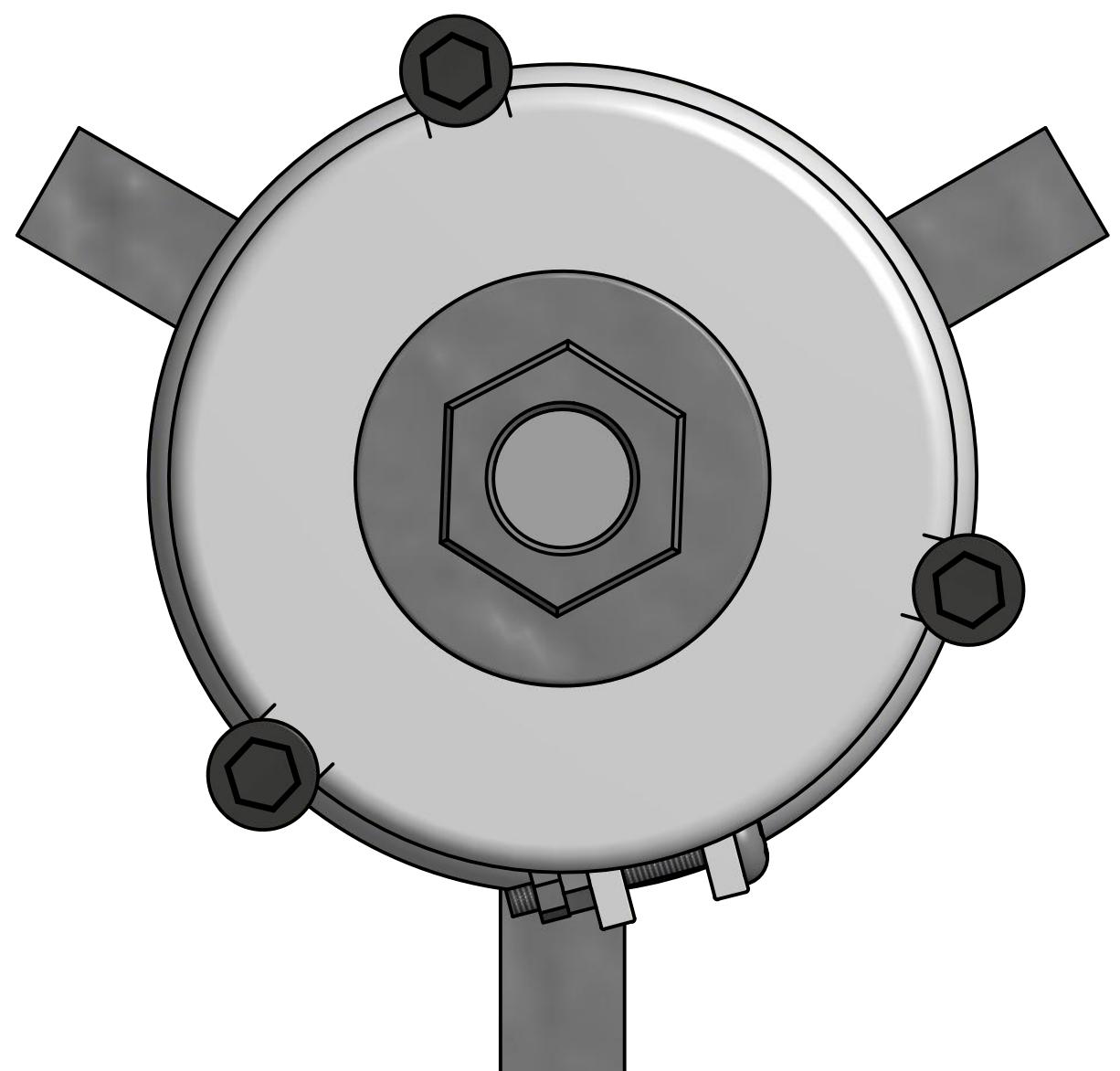
A

C

B

D

VISTA SUPERIOR



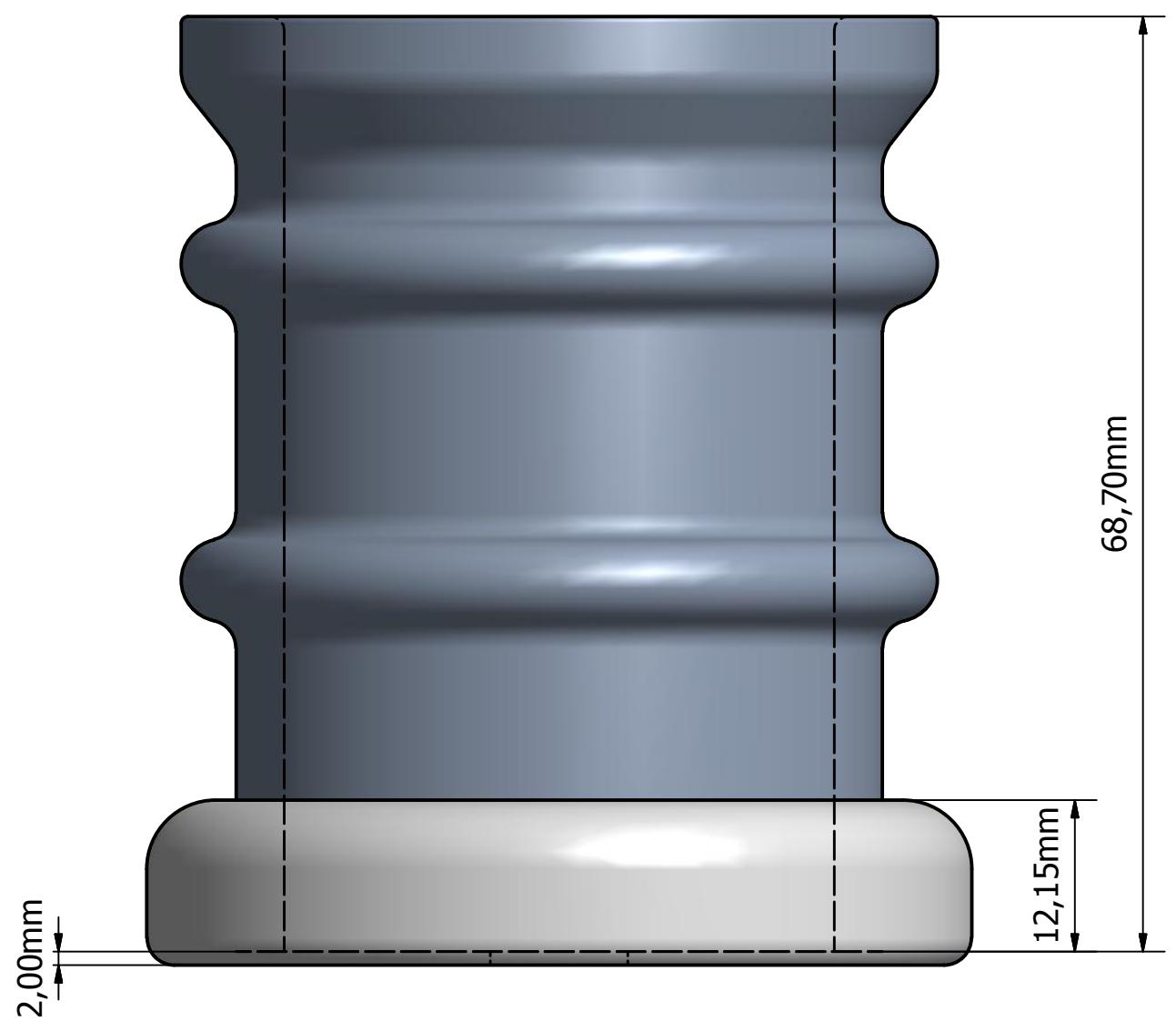
VISTA INFERIOR

Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP				SENSOR DE PICO DE SOBRETENSÃO	
				Edição	Folha
					2 / 11

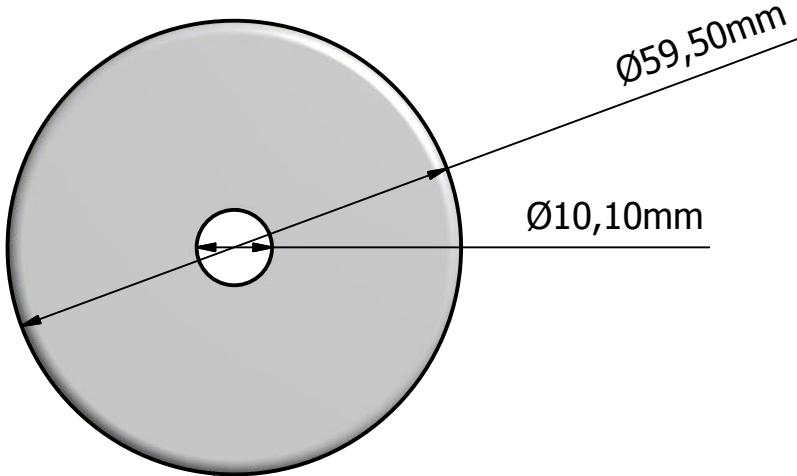
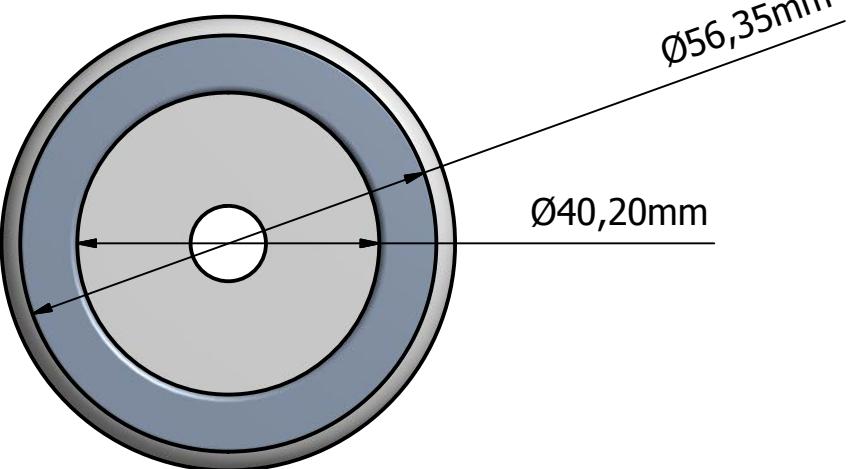
COMPONENTES 1 E 2

(ISOLADOR E BASE METÁLICA MONTADOS)

VISTA LATERAL



VISTA SUPERIOR

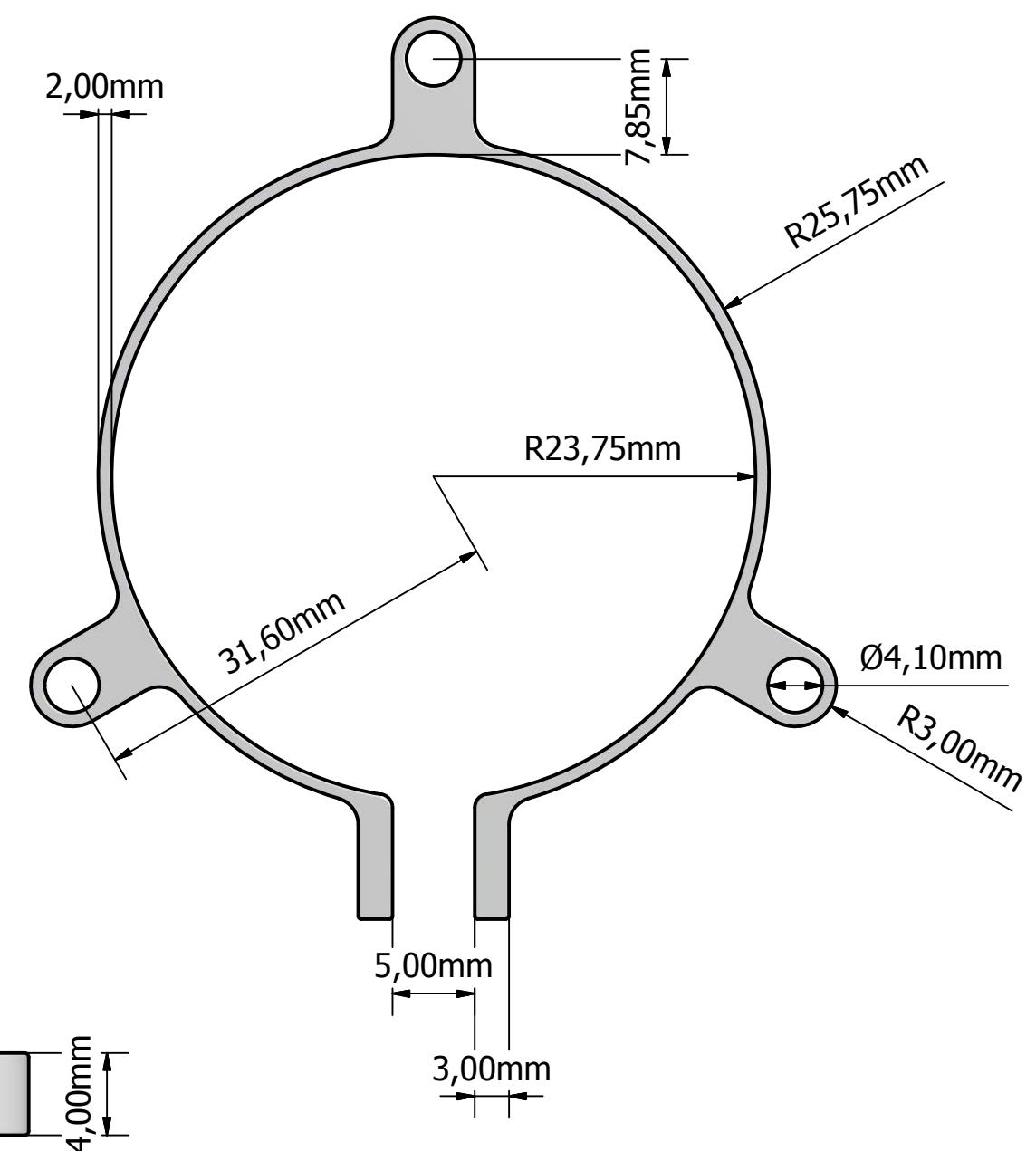


VISTA INFERIOR

Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP				SENSOR DE PICO DE SOBRETENSÃO	
		Edição		Folha	3 / 11

COMPONENTE 3 (CINTA METÁLICA)

VISTA SUPERIOR



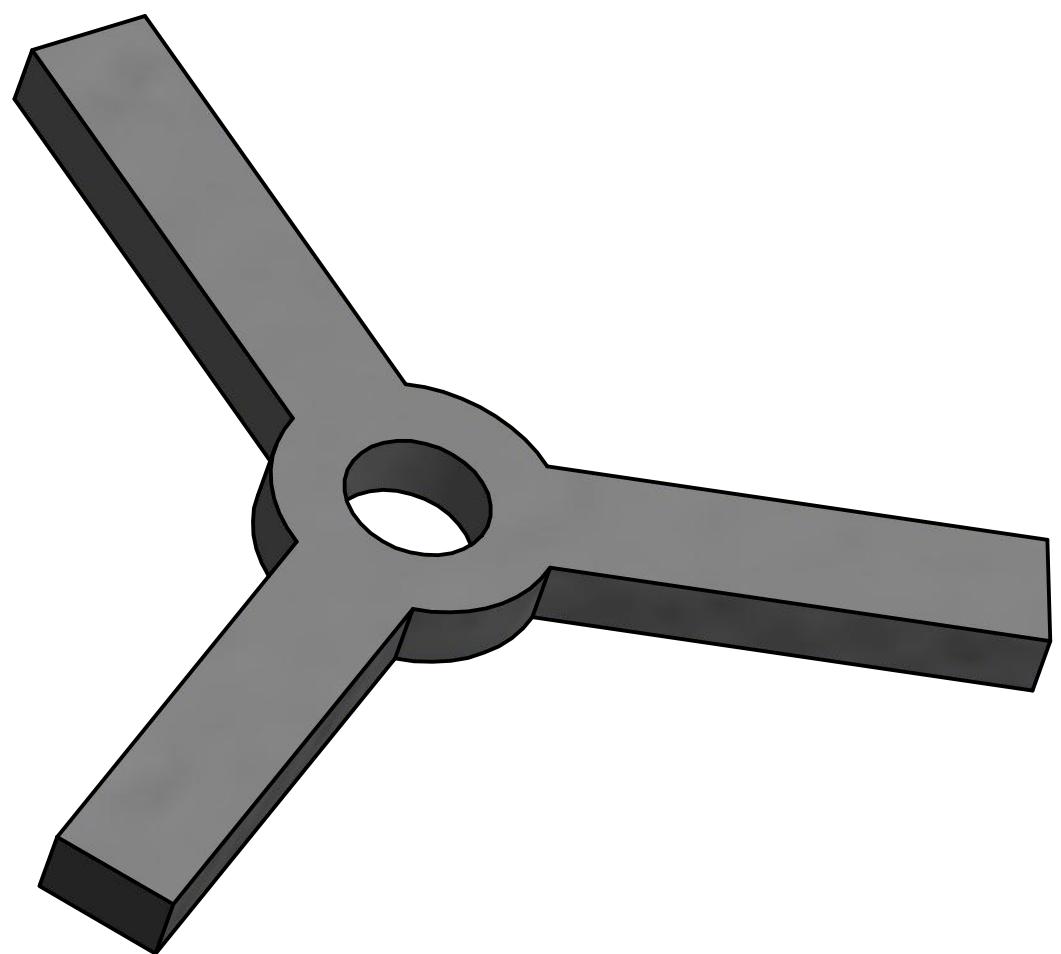
VISTA LATERAL

Projeto por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP				SENSOR DE PICO DE SOBRETENSÃO	
				Edição	Folha
				4 / 11	

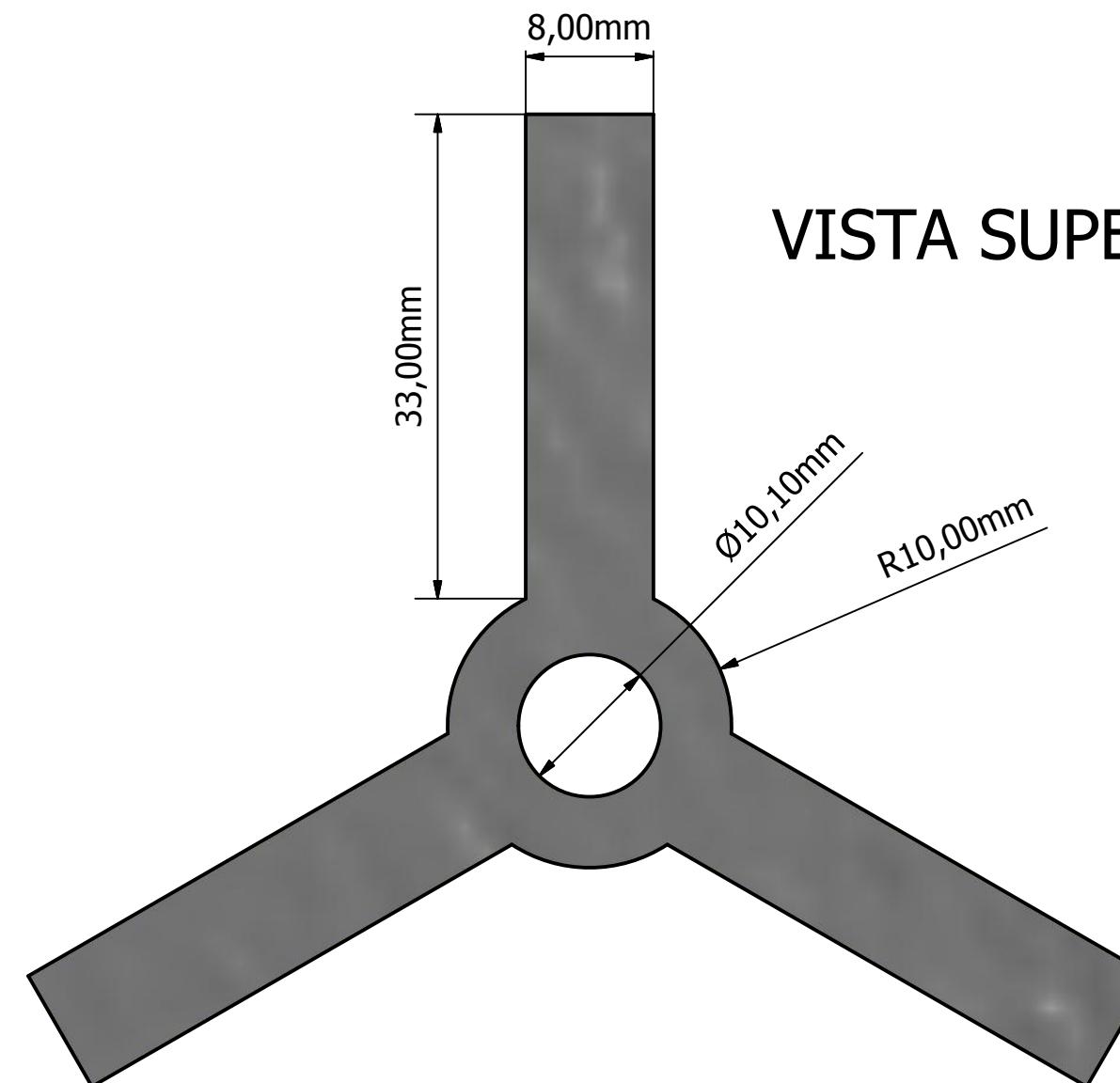
COMPONENTE 7

(CONECTOR METÁLICO PARA ENCAIXE NO SUPORTE)

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



VISTA LATERAL



VISTA SUPERIOR

Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP				SENSOR DE PICO DE SOBRETENSÃO	
				Edição	Folha
					5 / 11

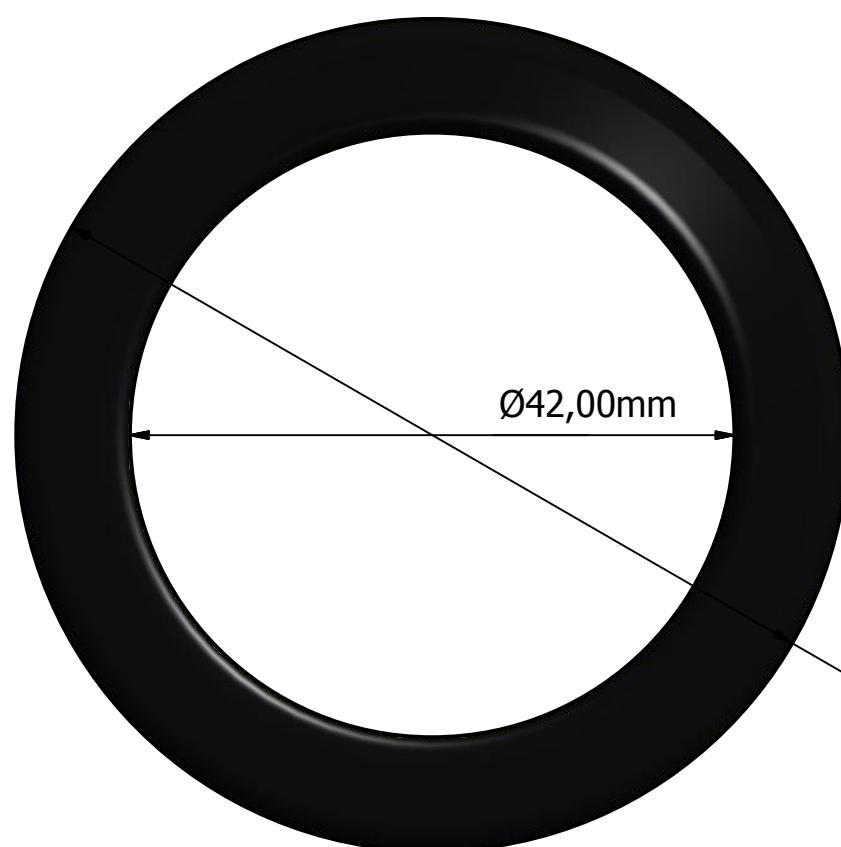
COMPONENTE 15 (BORRACHA DE VEDAÇÃO)

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



VISTA LATERAL

4,00mm

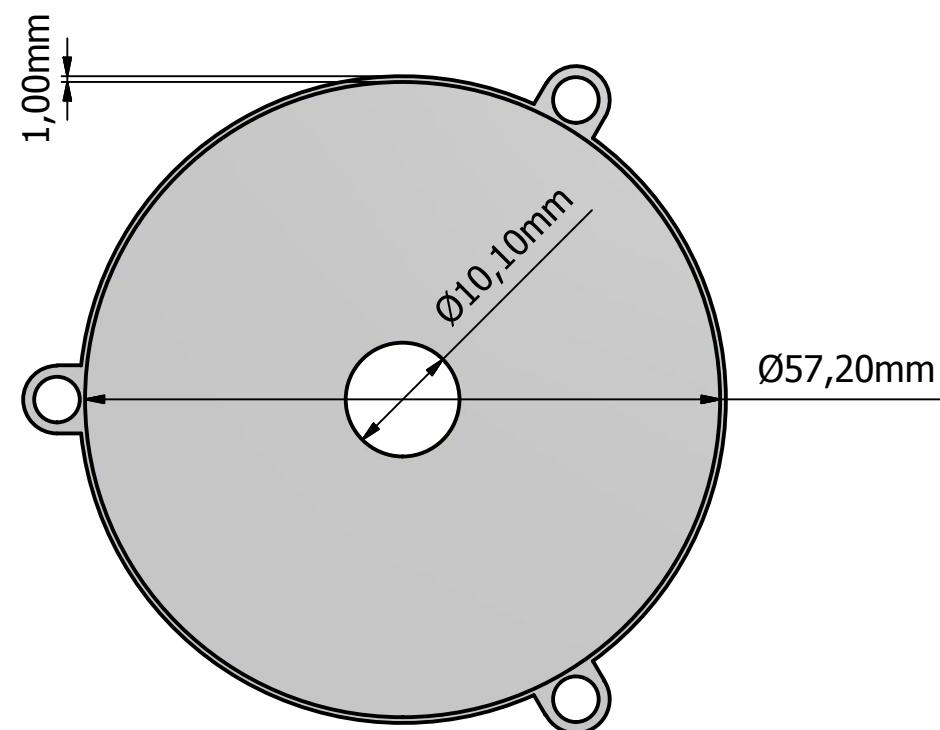


VISTA SUPERIOR

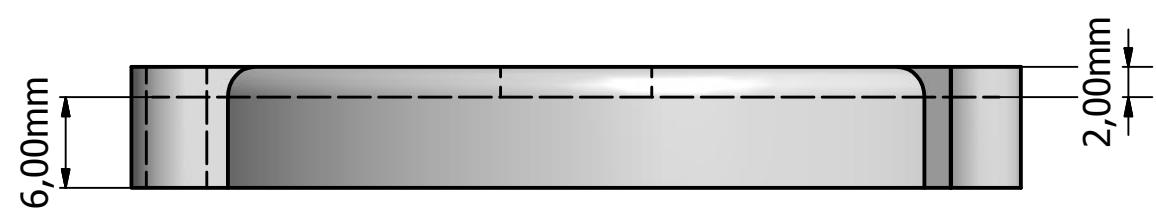
Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP				SENSOR DE PICO DE SOBRETENSÃO	
				Edição	Folha
					6 / 11

COMPONENTE 6 (TAMPA METÁLICA)

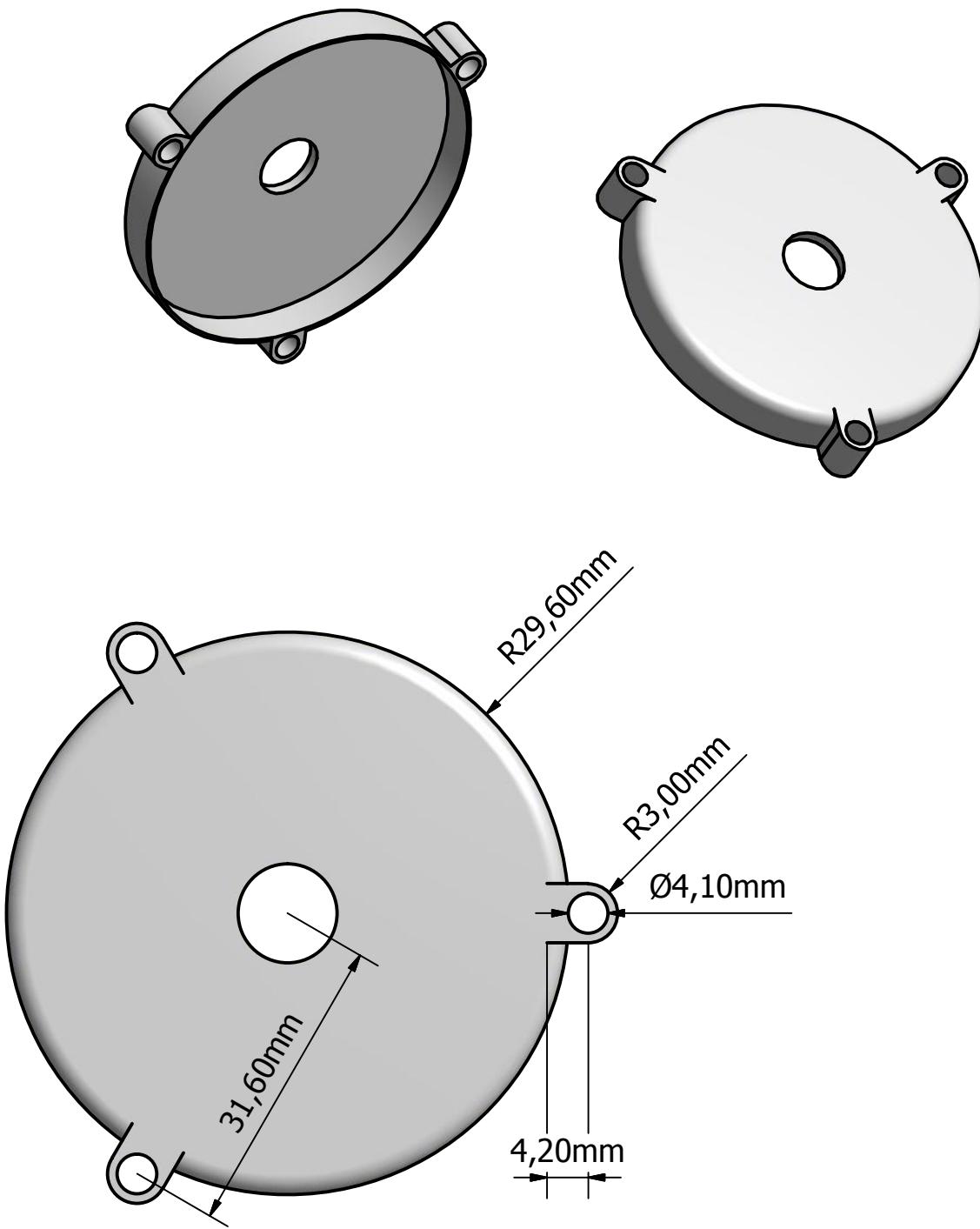
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



VISTA INFERIOR



VISTA LATERAL

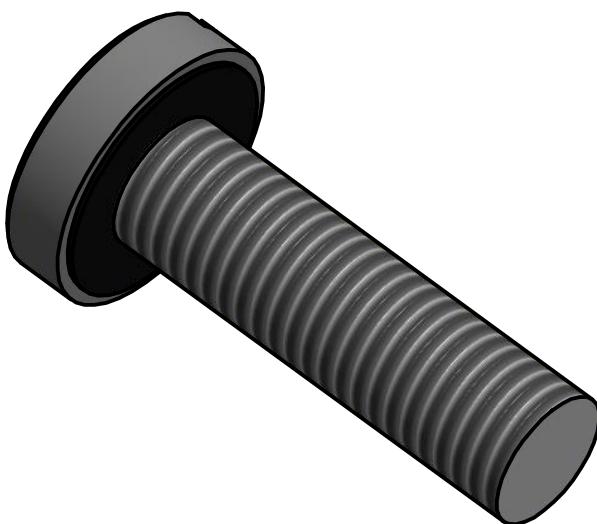


VISTA SUPERIOR

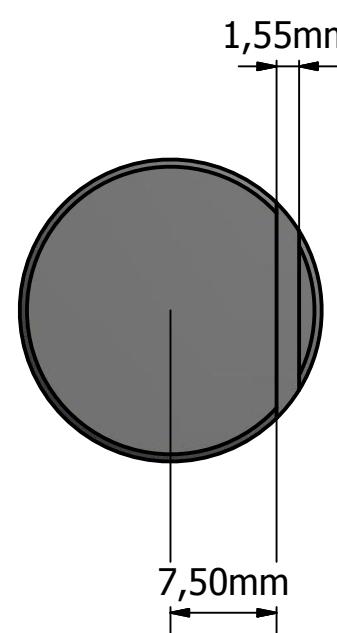
Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP				SENSOR DE PICO DE SOBRETENSÃO	
		Edição		Folha	7 / 11

COMPONENTES 4 E 16

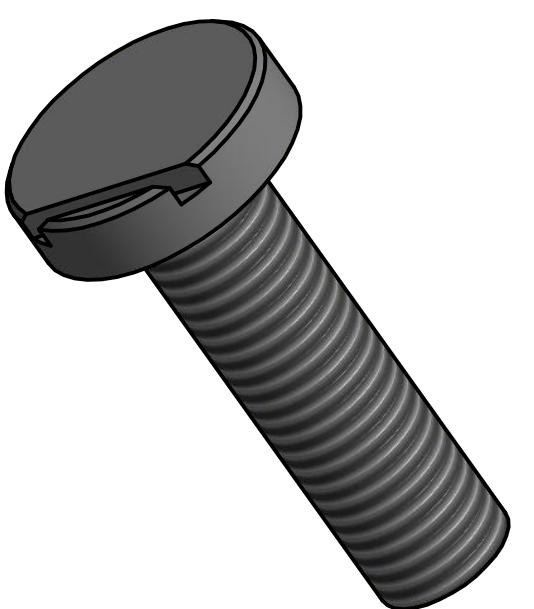
(ELETRODO INFERIOR E BORRACHA DE VEDAÇÃO DO ELETRODO MONTADOS)



VISTA SUPERIOR



VISTA INFERIOR



VISTA LATERAL

M10x1,5

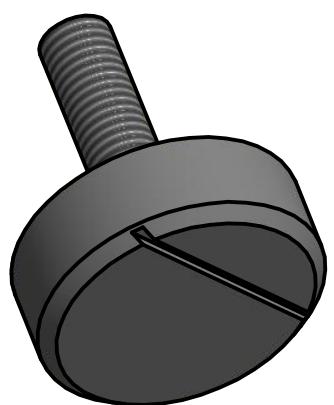
Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP				SENSOR DE PICO DE SOBRETENSÃO	
		Edição		Folha	8 / 11

COMPONENTES 5 E 16

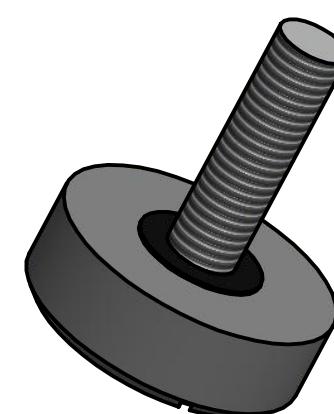
(ELETRODO SUPERIOR E BORRACHA DE VEDAÇÃO DO ELETRODO MONTADOS)

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

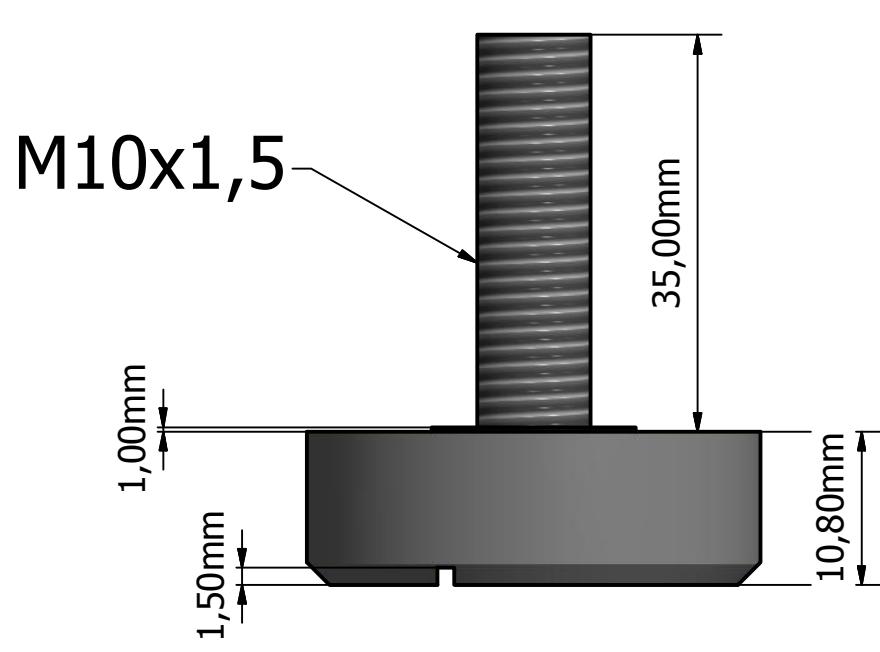
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



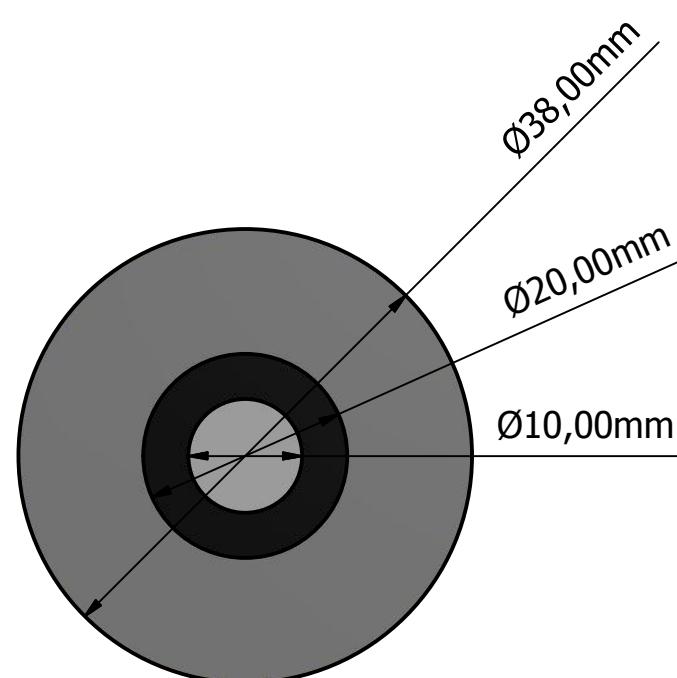
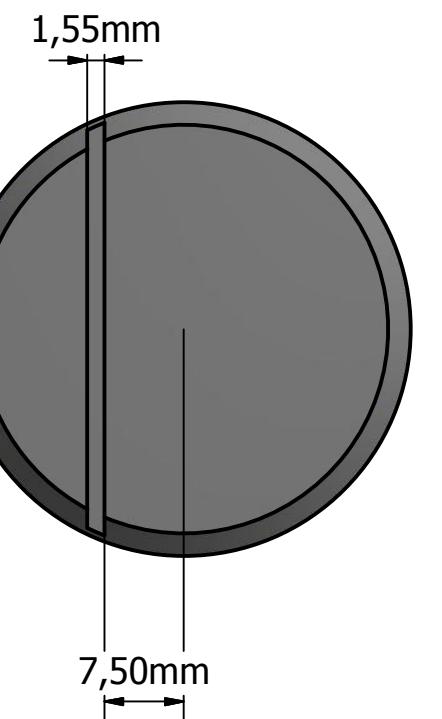
VISTA SUPERIOR



VISTA INFERIOR



VISTA LATERAL

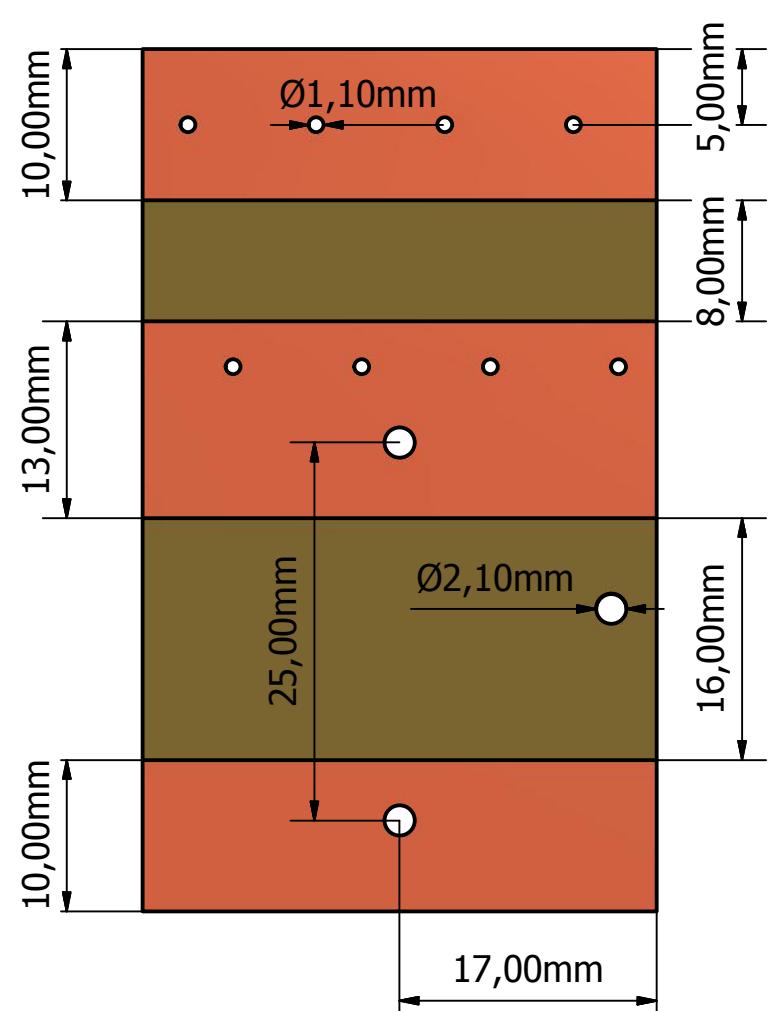


Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP				SENSOR DE PICO DE SOBRETENSÃO	
				Edição	Folha
					9 / 11

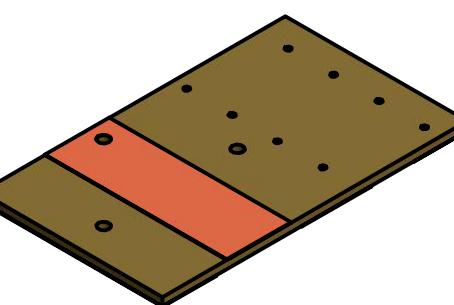
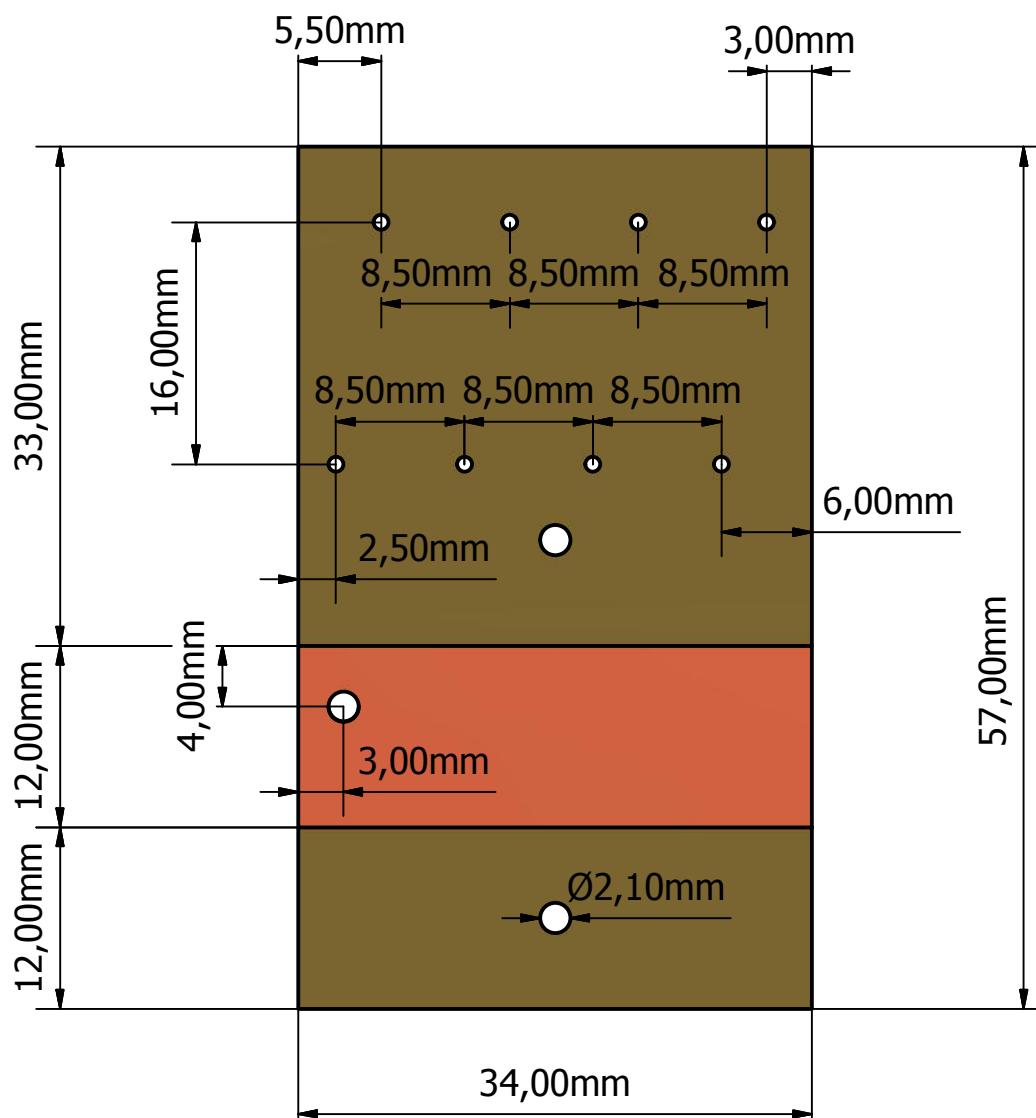
COMPONENTE 17

(PLACA DE FENOLITE COBREADA)

VISTA INFERIOR



VISTA SUPERIOR

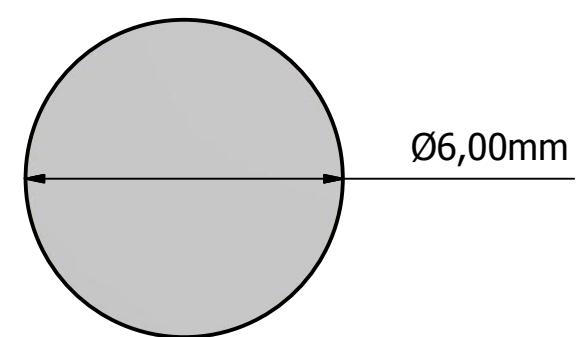
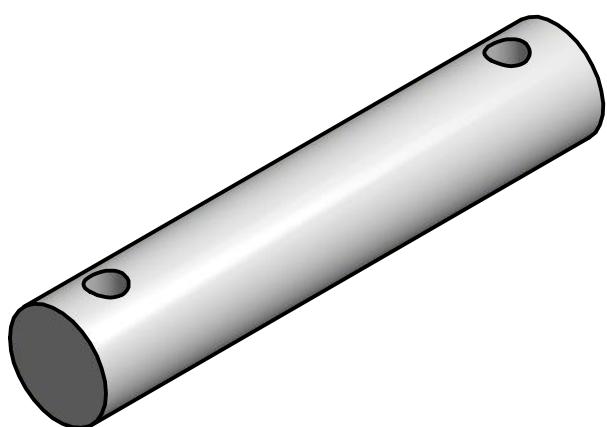


VISTA LATERAL

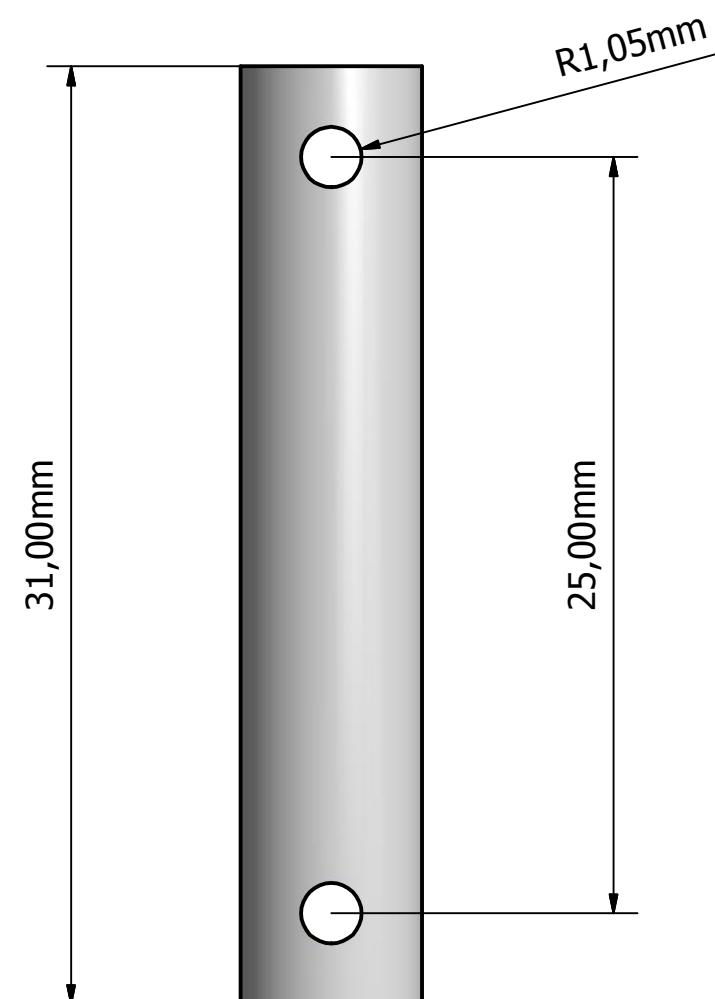
Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP				SENSOR DE PICO DE SOBRETENSÃO	
		Edição		Folha	10 / 11

COMPONENTE 18 (PINO METÁLICO)

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



VISTA LATERAL



VISTA SUPERIOR

Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP				SENSOR DE PICO DE SOBRETENSÃO	
				Edição	Folha
					11 / 11

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

LISTA DE COMPONENTES DO SENSOR

Nº	DESCRIÇÃO SIMPLIFICADA DOS COMPONENTES	QTD.
1	ISOLADOR DE PORCELANA *	1
2	BASE METÁLICA *	1
3	CINTA METÁLICA *	1
4	ELETRODO INFERIOR *	1
5	ELETRODO SUPERIOR *	1
6	TAMPA METÁLICA *	1
7	CONECTOR METÁLICO PARA ENCAIXE NO SUPORTE *	1
8	PORCA SEXTAVADA M10x1,5	3
9	ARRUELA DE PRESSÃO M10	2
10	ARRUELA M10	2
11	PARAFUSO FRANCÊS M2x0,4 (COMPR. MÍN. DE 17mm)	1
12	PORCA SEXTAVADA M2x0,4	4
13	PORCA SEXTAVADA M4x0,7	3
14	PARAFUSO ALLEN M4x0,7 (COMPR. MÍN. DE 27mm)	3
15	BORRACHA DE VEDAÇÃO *	1
16	BORRACHA DE VEDAÇÃO DOS ELETRODOS *	2
17	PLACA DE FENOLITE COBREADA (AMBOS OS LADOS) *	1
18	PINO METÁLICO *	1
19	PARAFUSO FRANCÊS (COMPR. MÍN. 10mm)	2
20	CAPACITOR ELETROLÍTICO 102m 15kV	4
21	FIO DE COBRE DE 2mm COM ISOLAÇÃO DE PVC	10cm

* Especificação detalhada nas folhas do projeto.

ANEXO 2:
PROJETO DO SUPORTE DO SENSOR

6

5

4

3

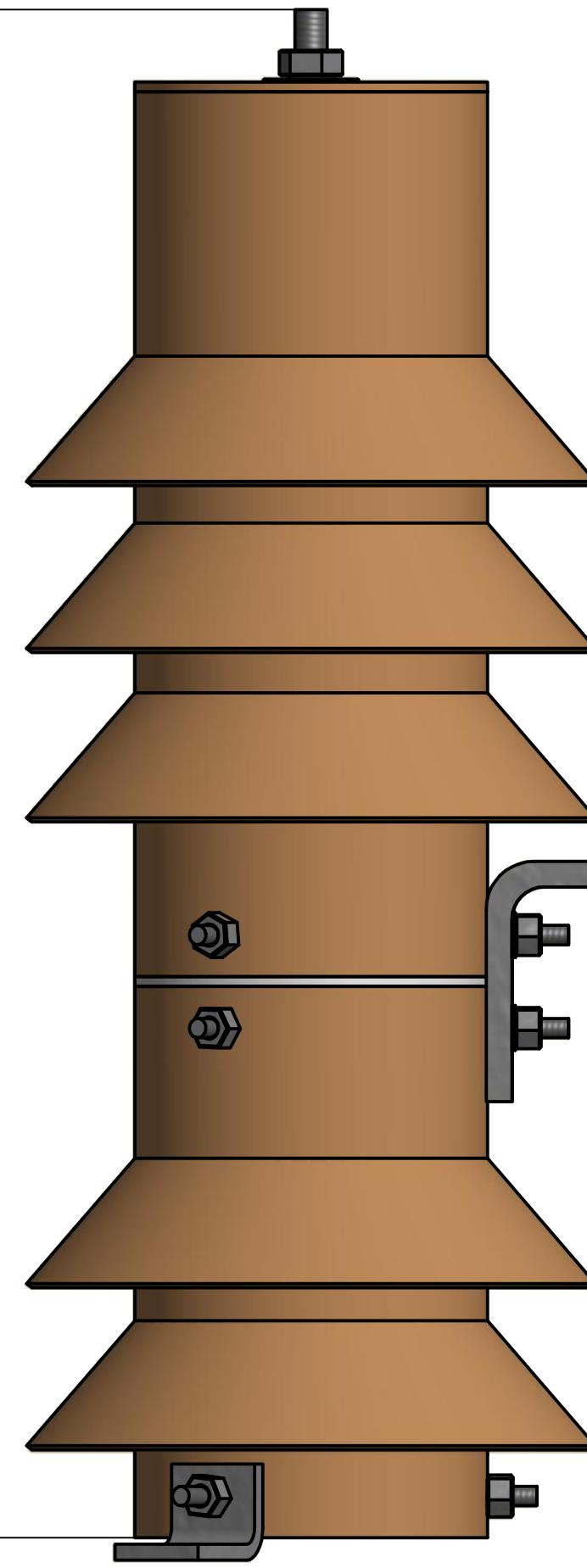
2

D

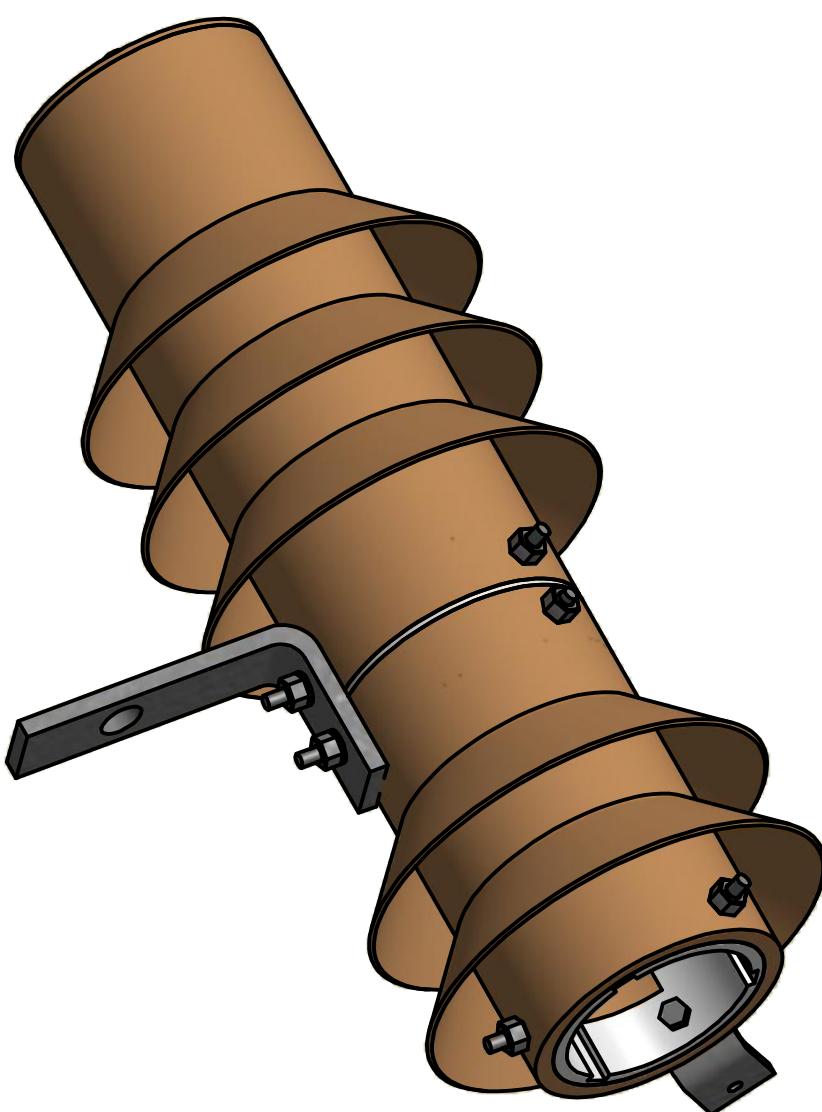
D

499,6mm

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

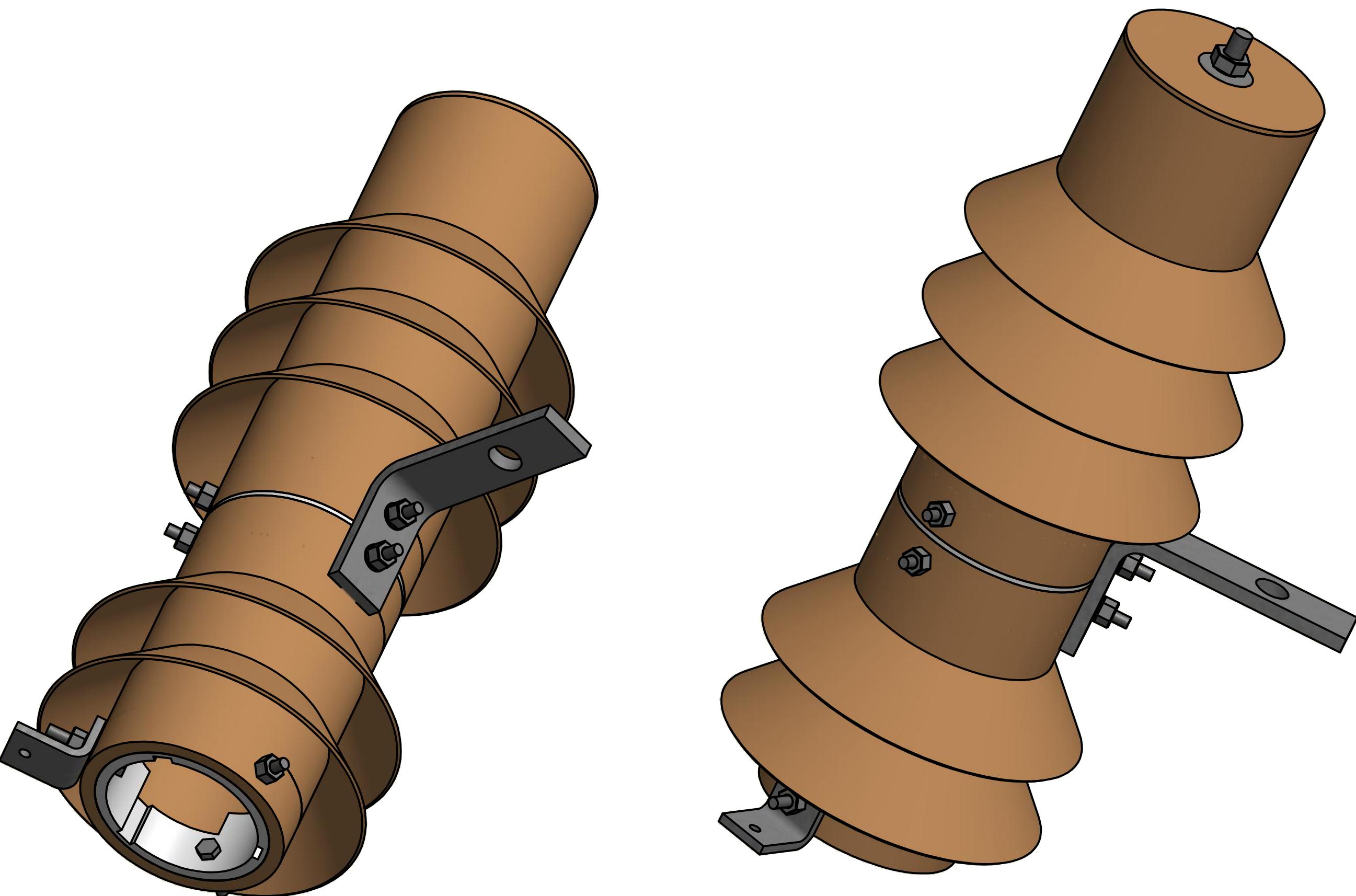


VISTA EXTERNA



Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
SUPORTE DO SENSOR					
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP					Edição
					Folha
					1 / 13

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

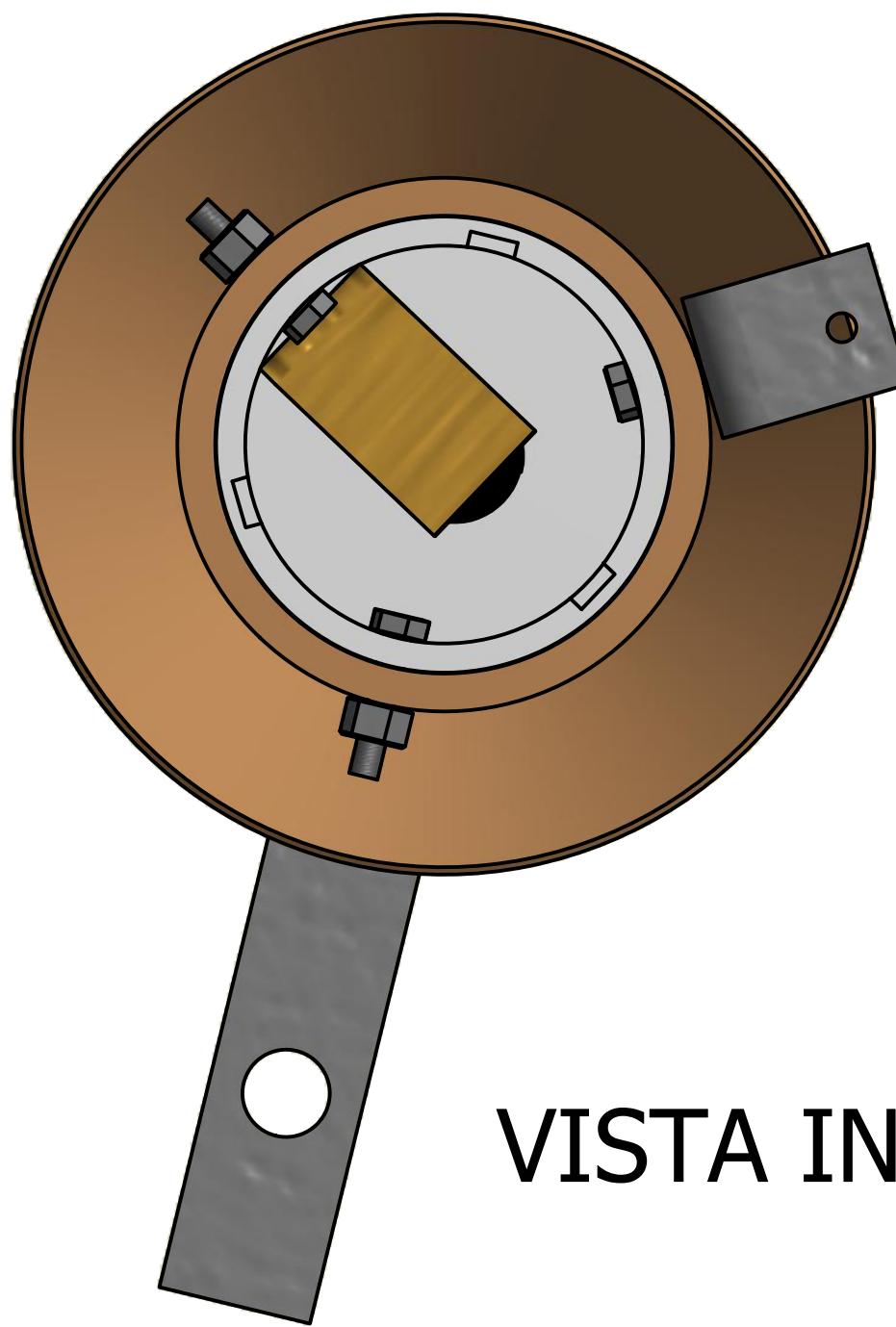
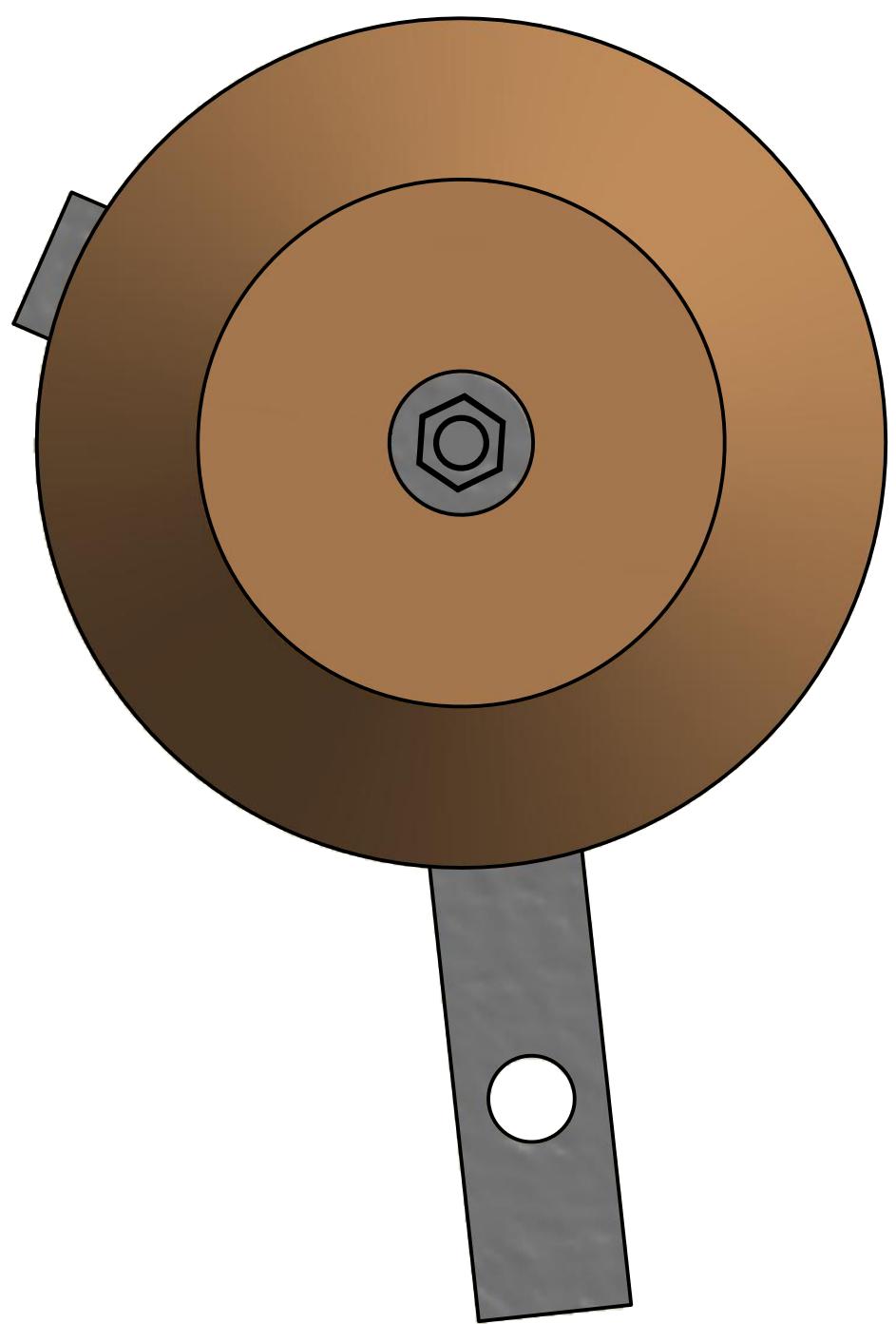


Projeto por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP				SUPORTE DO SENSOR	
		Edição		Folha	2 / 13

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

VISTA SUPERIOR



VISTA INFERIOR

Projeto por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP				SUPORTE DO SENSOR	
				Edição	Folha
					3 / 13

6

5

4

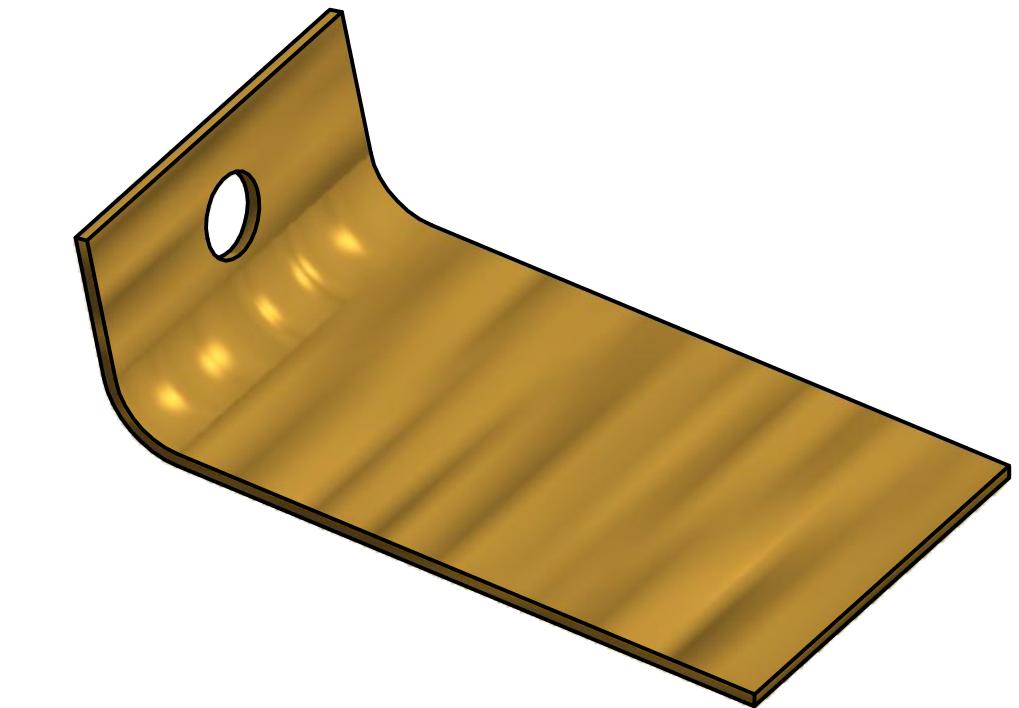
3

2

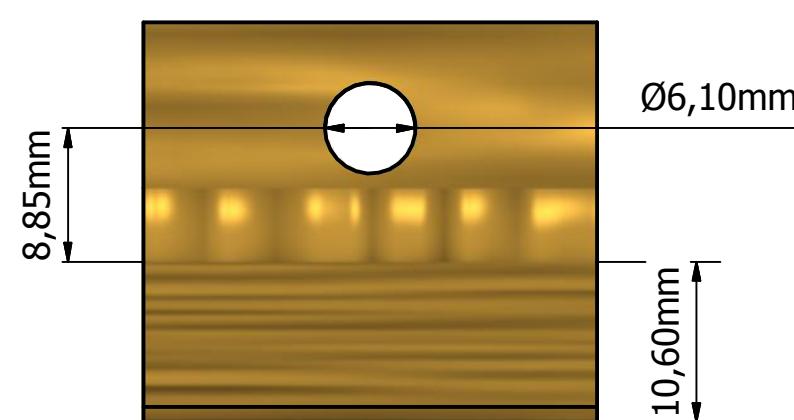
1

COMPONENTE 18 (CHAPA METÁLICA)

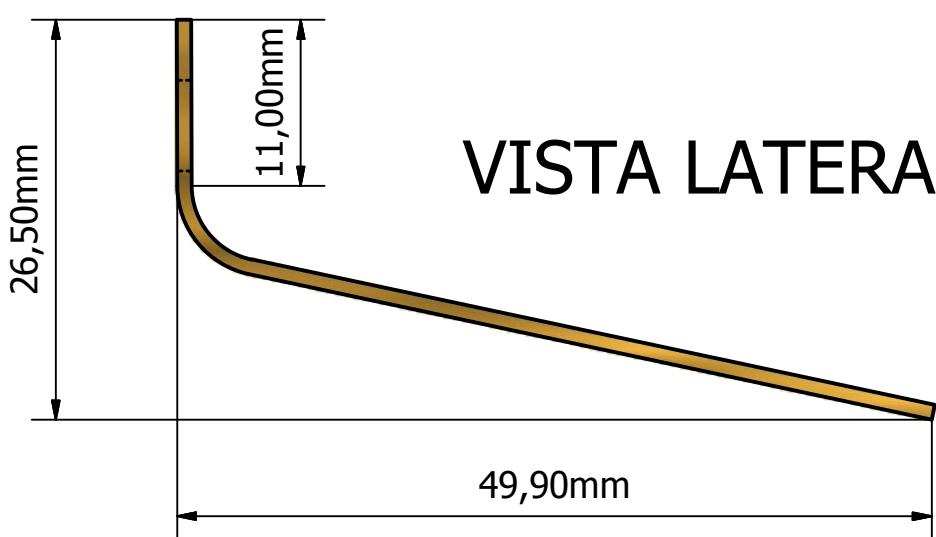
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



VISTA SUPERIOR



VISTA LATERAL



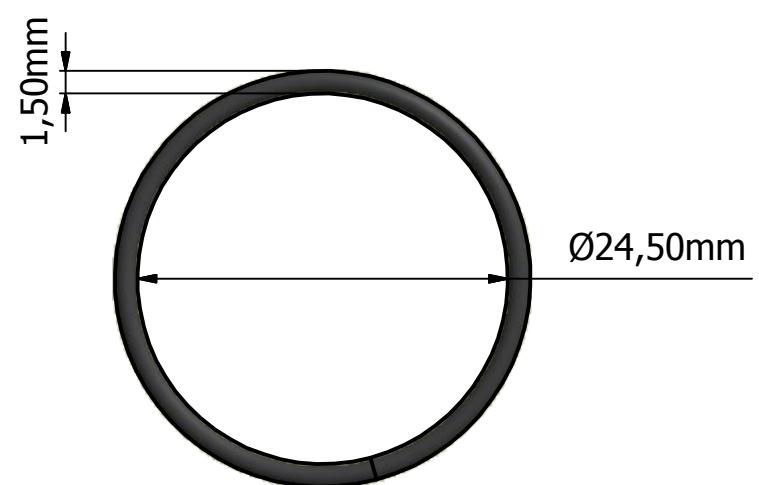
VISTA FRONTAL

Projeto por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP					SUPORTE DO SENSOR
			Edição	Folha	4 / 13

COMPONENTE 17 (MOLA)



VISTA SUPERIOR



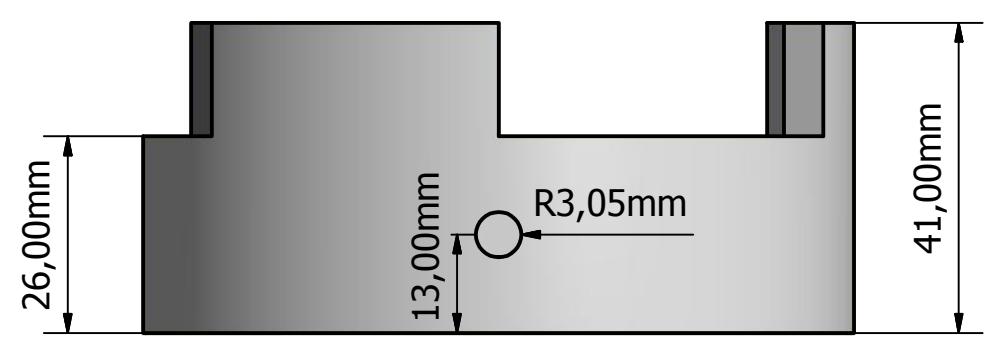
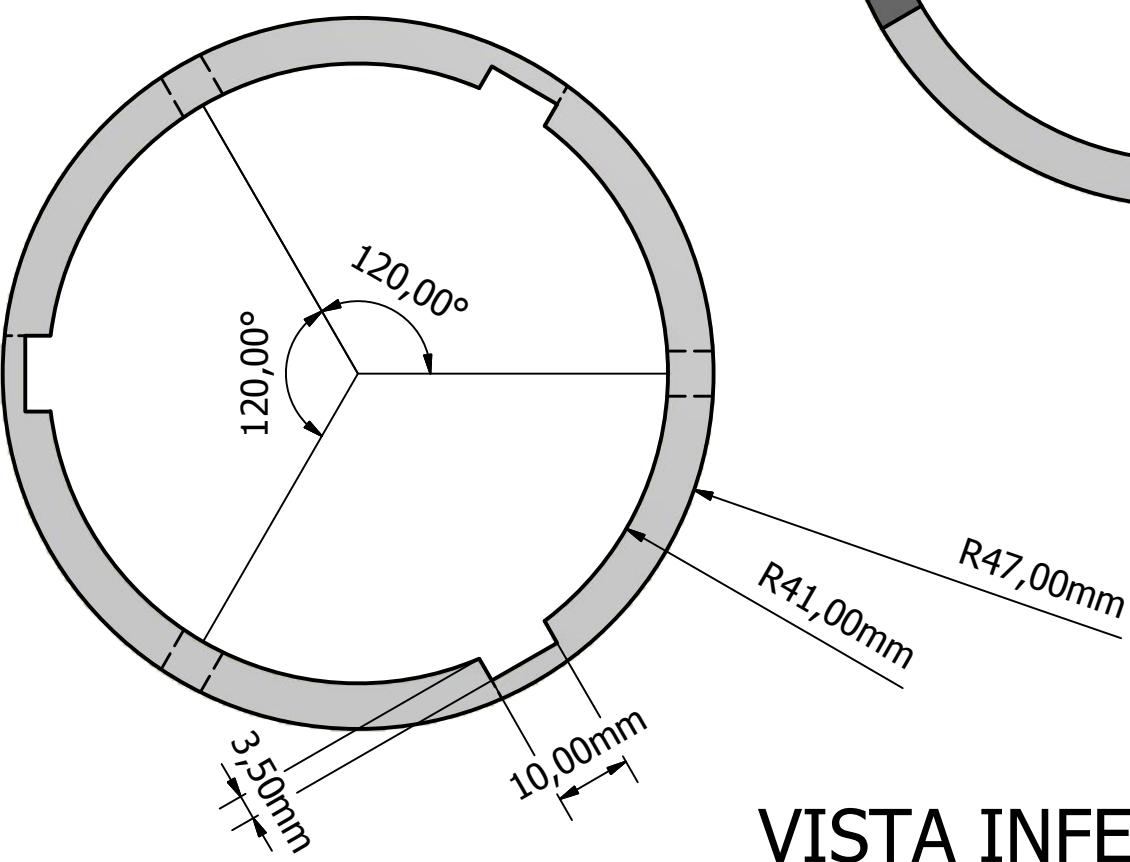
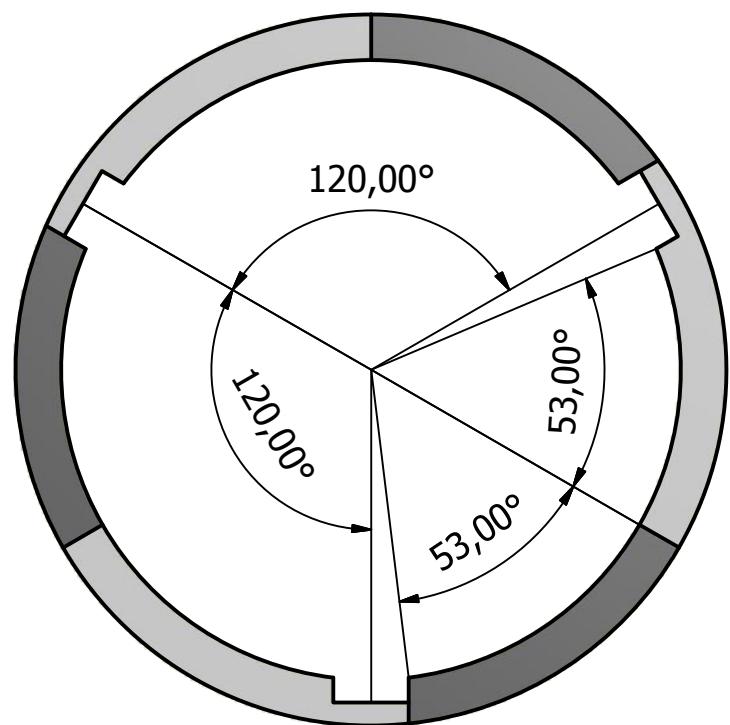
VISTA LATERAL

Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP				SUPORTE DO SENSOR	
		Edição		Folha	5 / 13

COMPONENTE 1 (PEÇA METÁLICA INFERIOR)

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

A

VISTA LATERAL**VISTA SUPERIOR****VISTA INFERIOR**

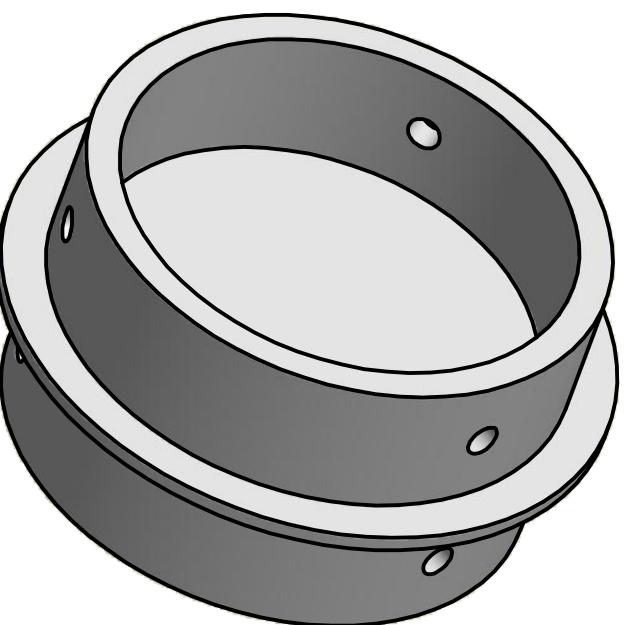
Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP				SUPORTE DO SENSOR	
		Edição		Folha	6 / 13

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

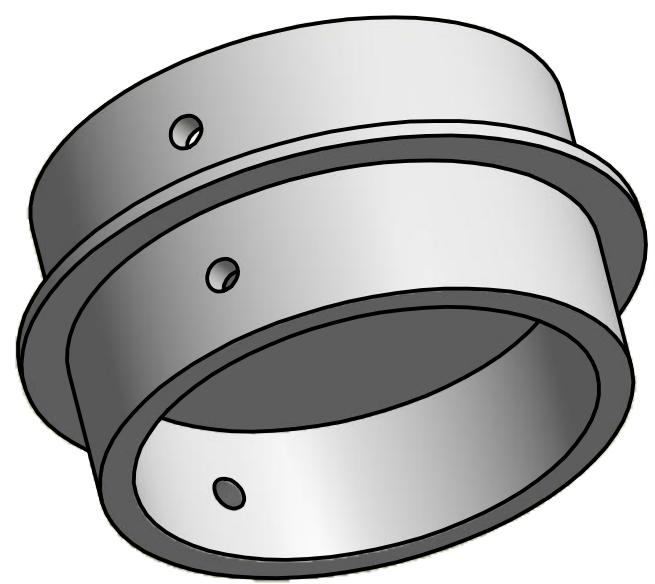
A

COMPONENTE 3

(PEÇA METÁLICA INTERMEDIÁRIA)



VISTA LATERAL

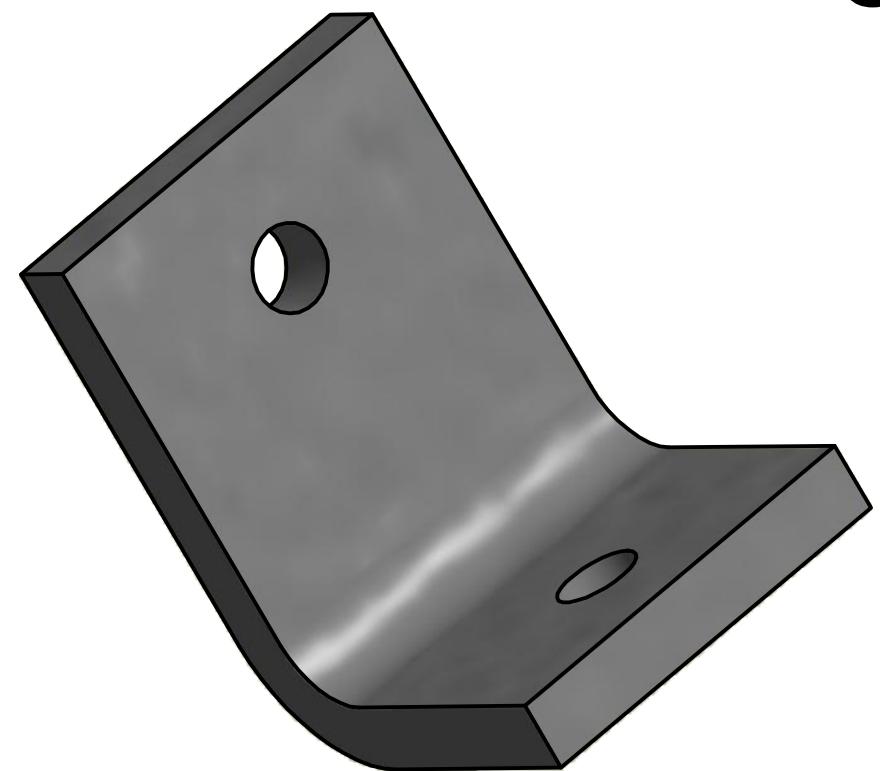


VISTA SUPERIOR

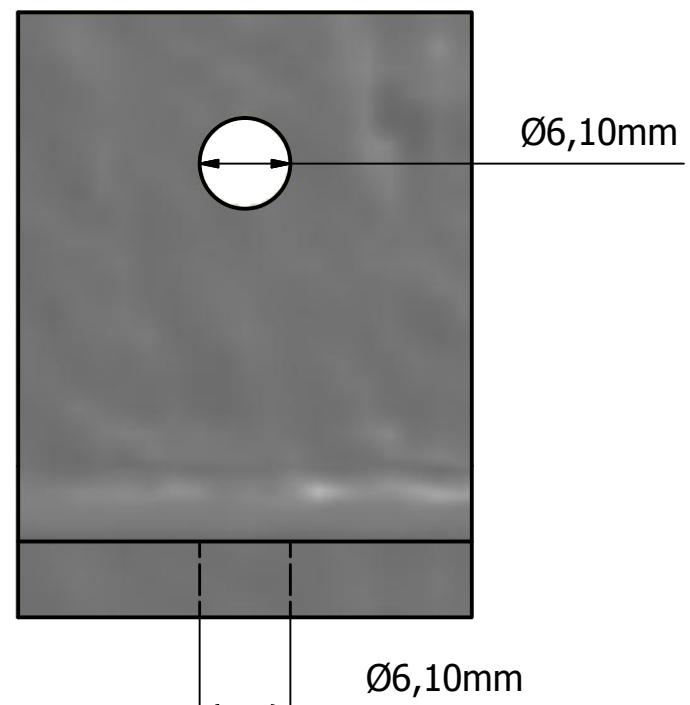
Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP					SUPORTE DO SENSOR
					Edição Folha
					7 / 13

COMPONENTE 2 (CONECTOR TERRA)

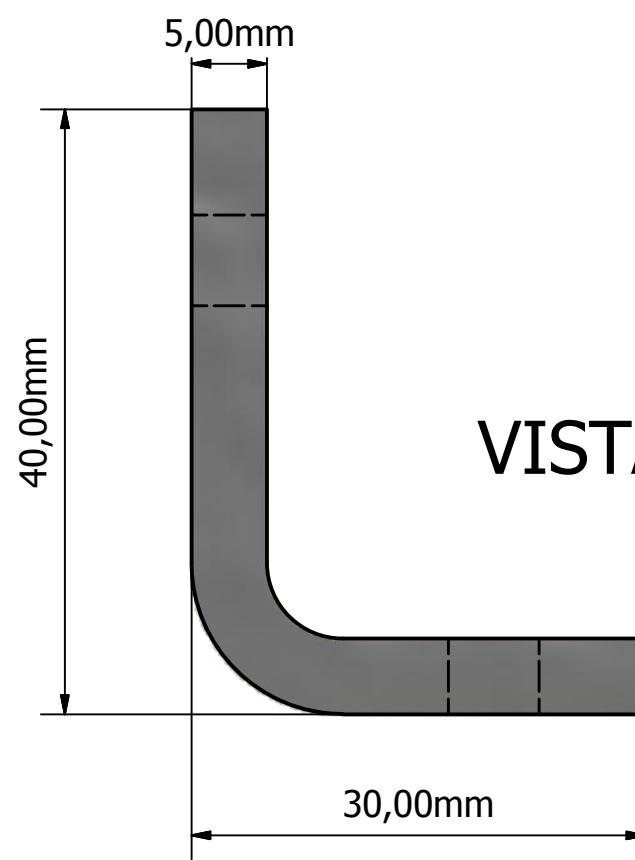
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL

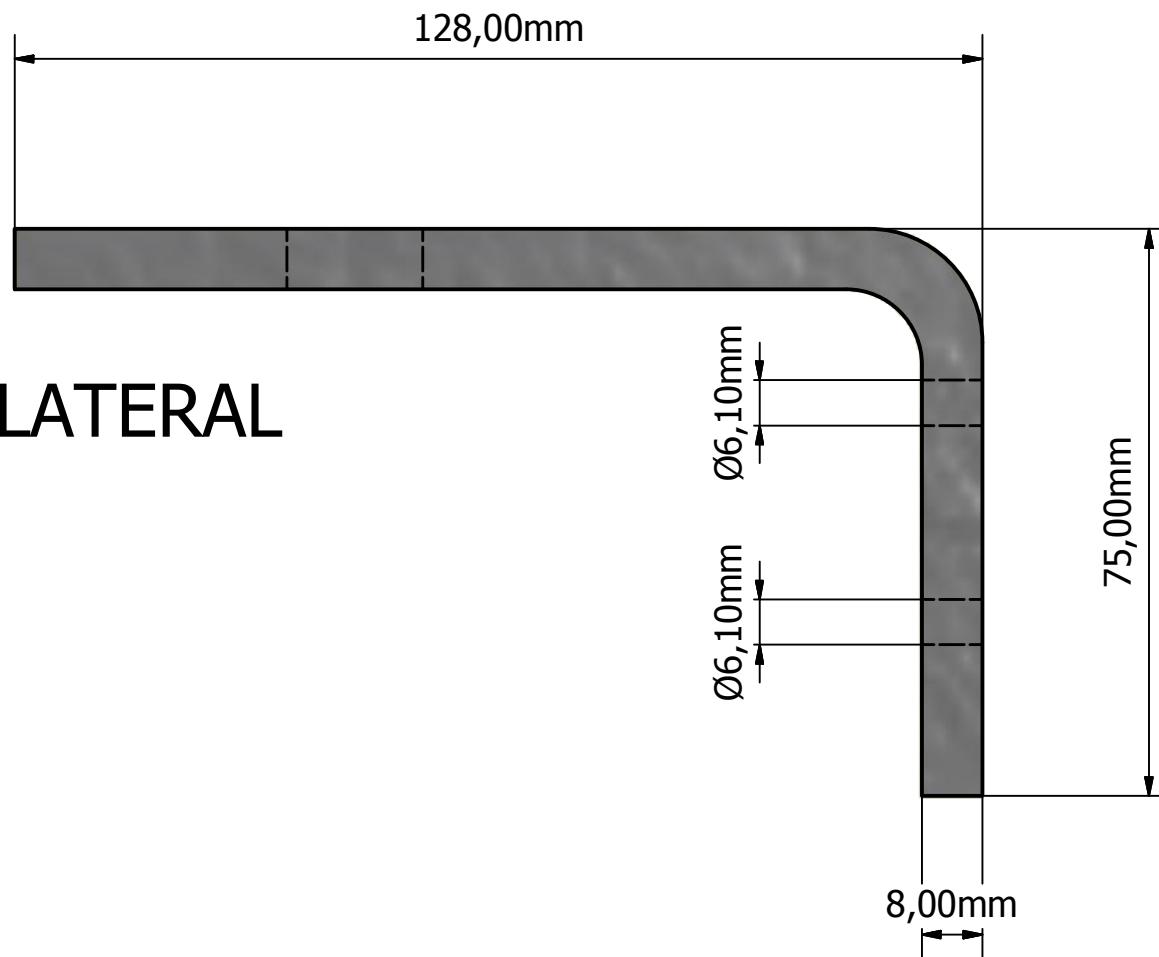


Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP				SUPORTE DO SENSOR	
				Edição	Folha
					8 / 13

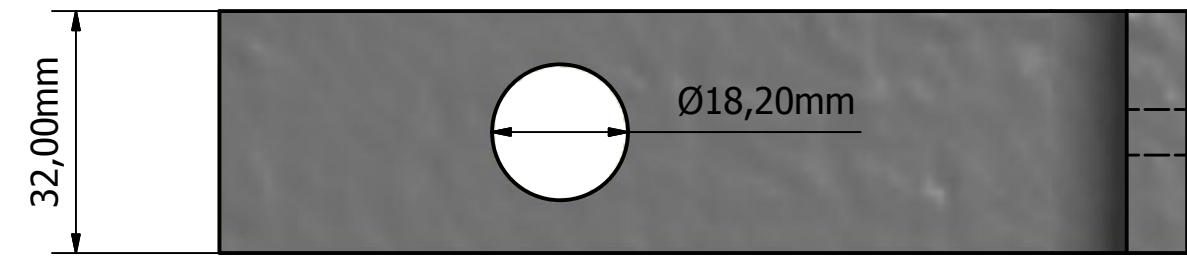
COMPONENTE 4 (CONECTOR PARA CRUZETA)



VISTA LATERAL



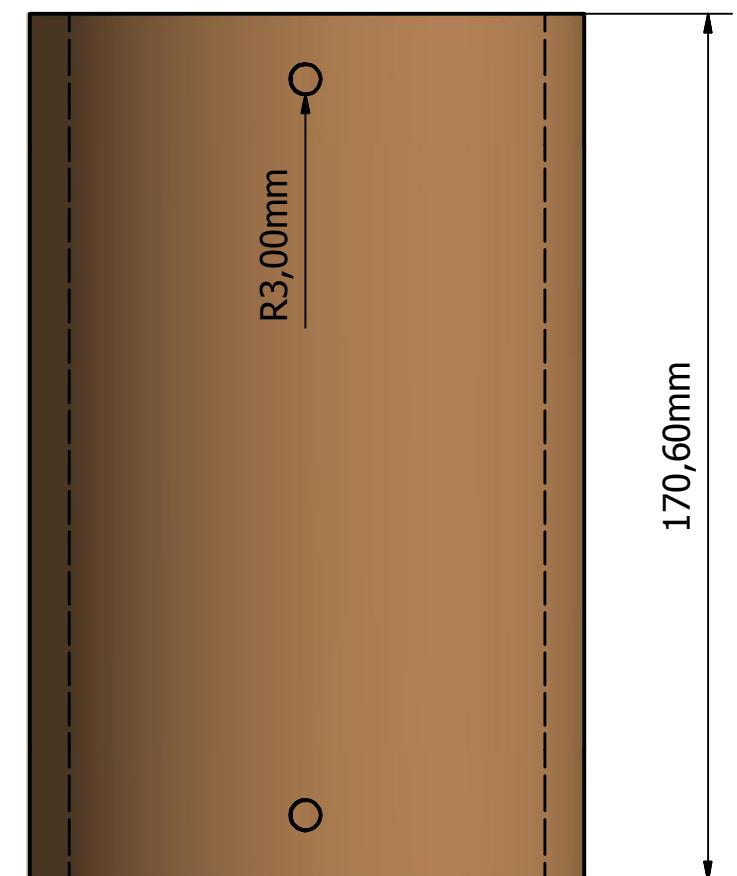
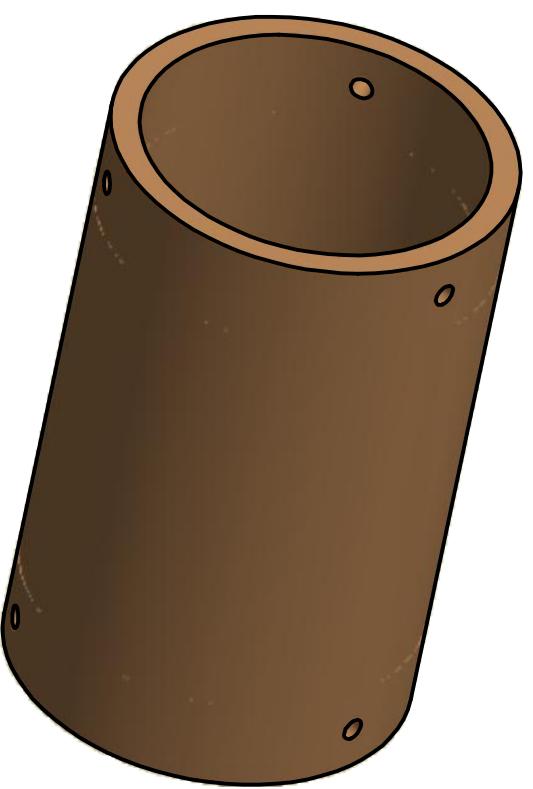
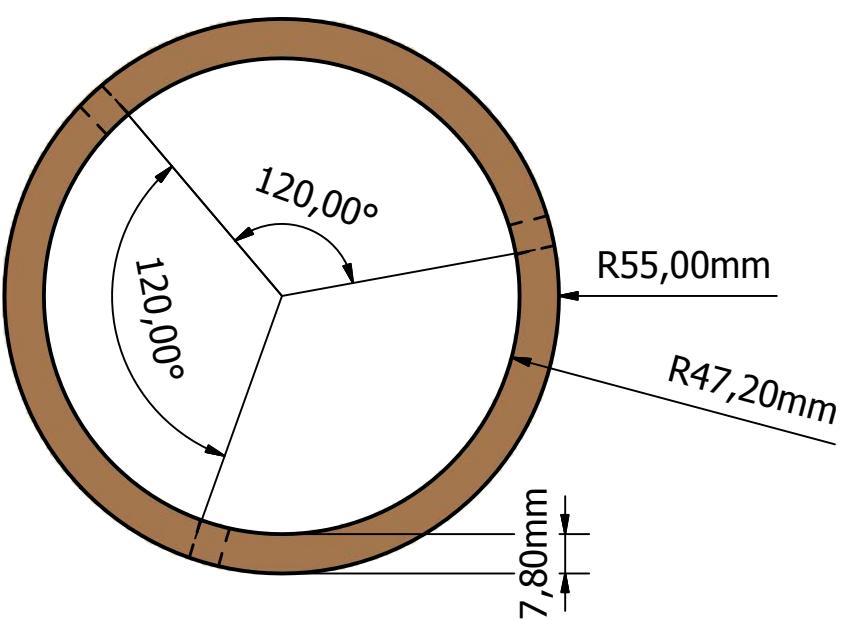
VISTA INFERIOR



Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP				SUPORTE DO SENSOR	
				Edição	Folha
					9 / 13

COMPONENTE 5 (TUBO DE PVC INFERIOR)

VISTA SUPERIOR

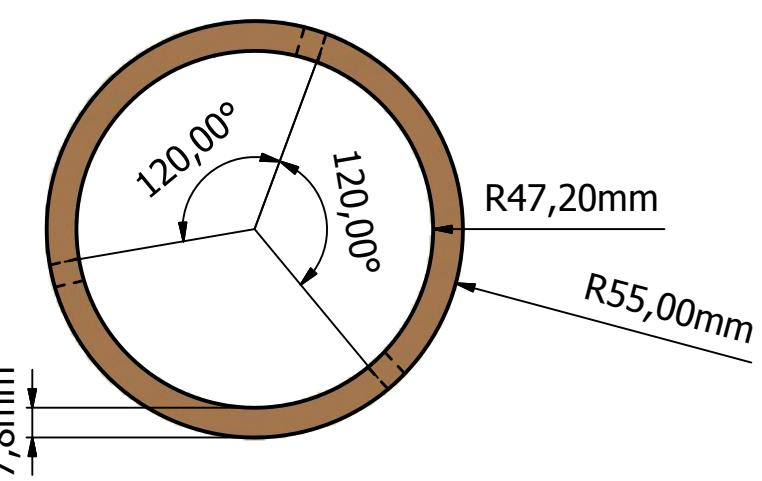


VISTA LATERAL

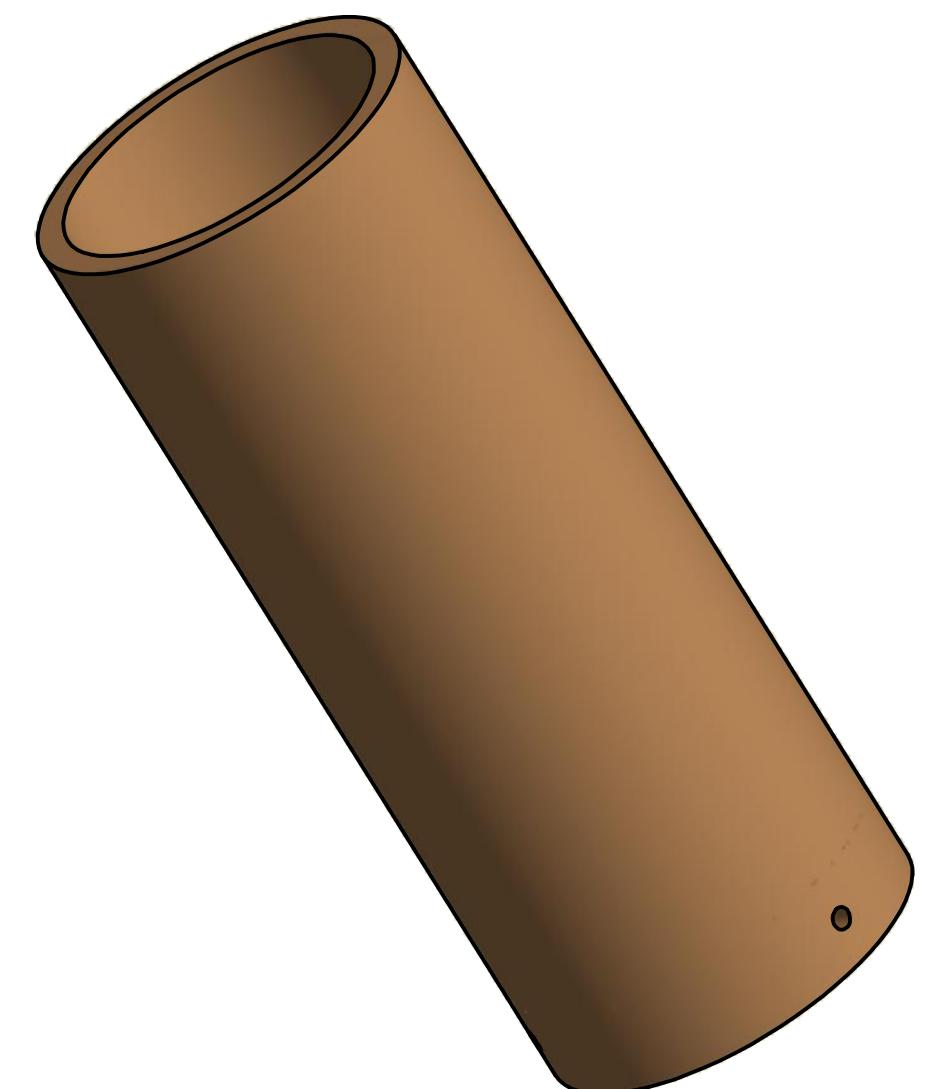
Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP				SUPORTE DO SENSOR	
		Edição		Folha	10 / 13

COMPONENTE 6 (TUBO DE PVC SUPERIOR)

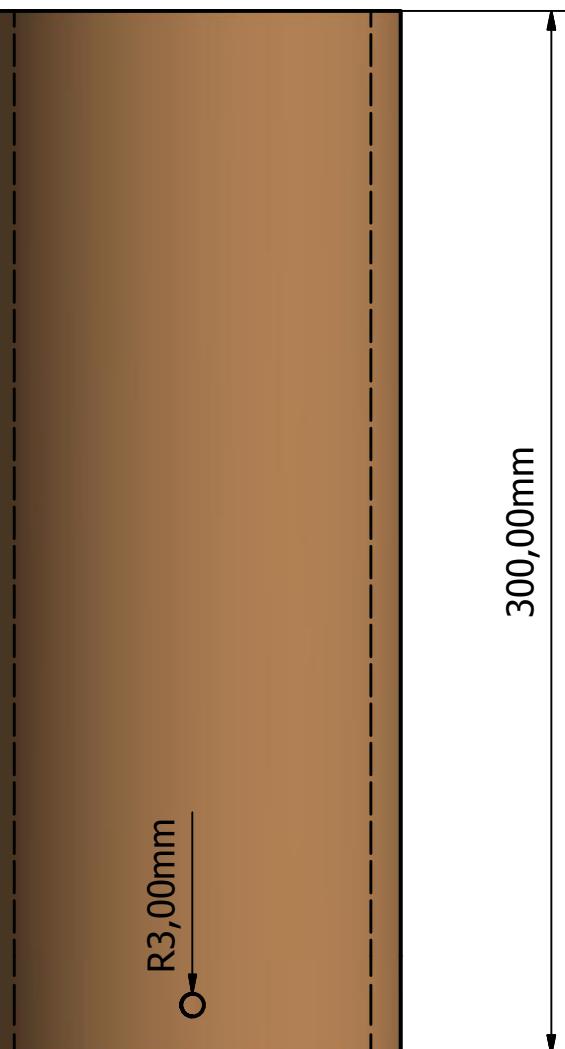
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



VISTA SUPERIOR



VISTA LATERAL

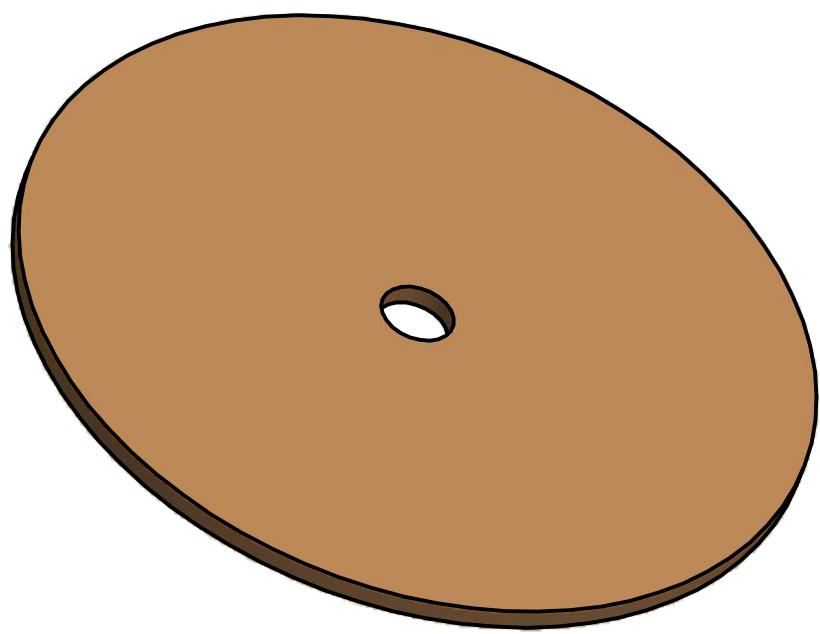


VISTA LATERAL

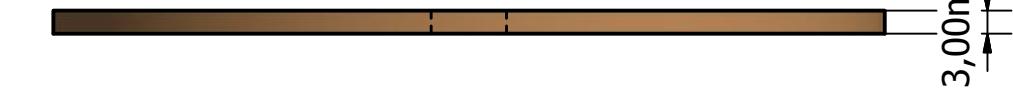
Projeto por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP				SUPORTE DO SENSOR	
		Edição		Folha	11 / 13

COMPONENTE 7 (TAMPA DE PVC)

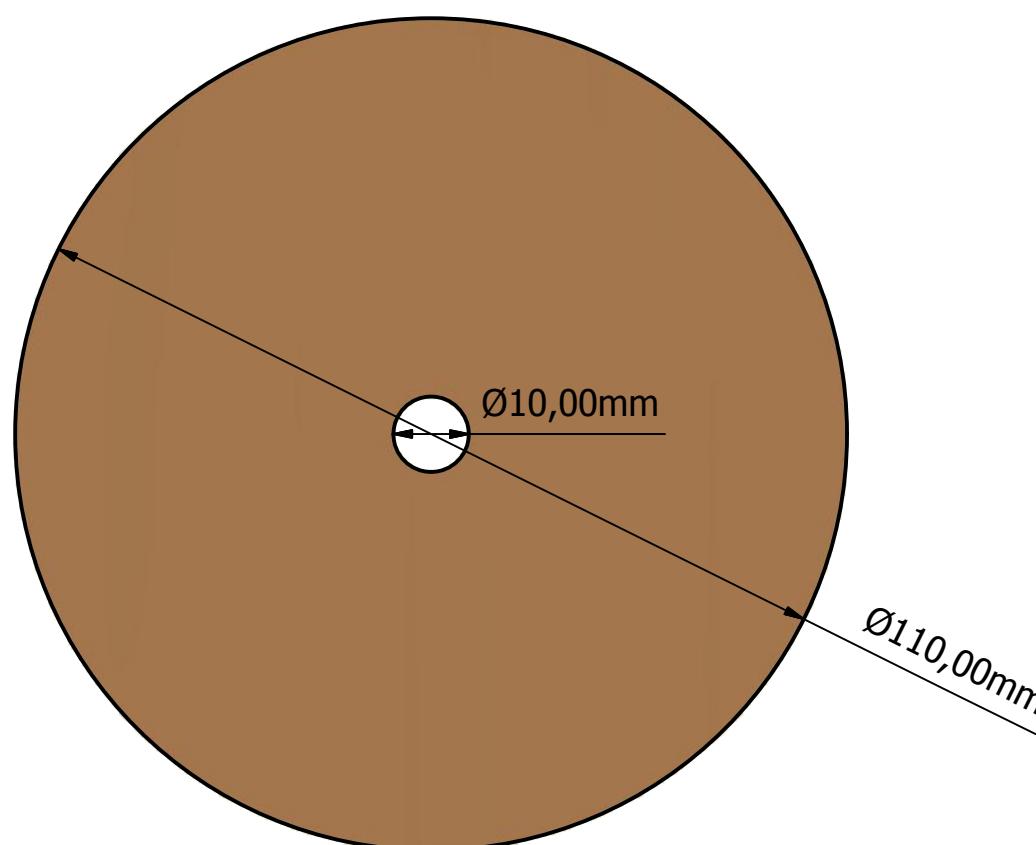
PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



VISTA LATERAL



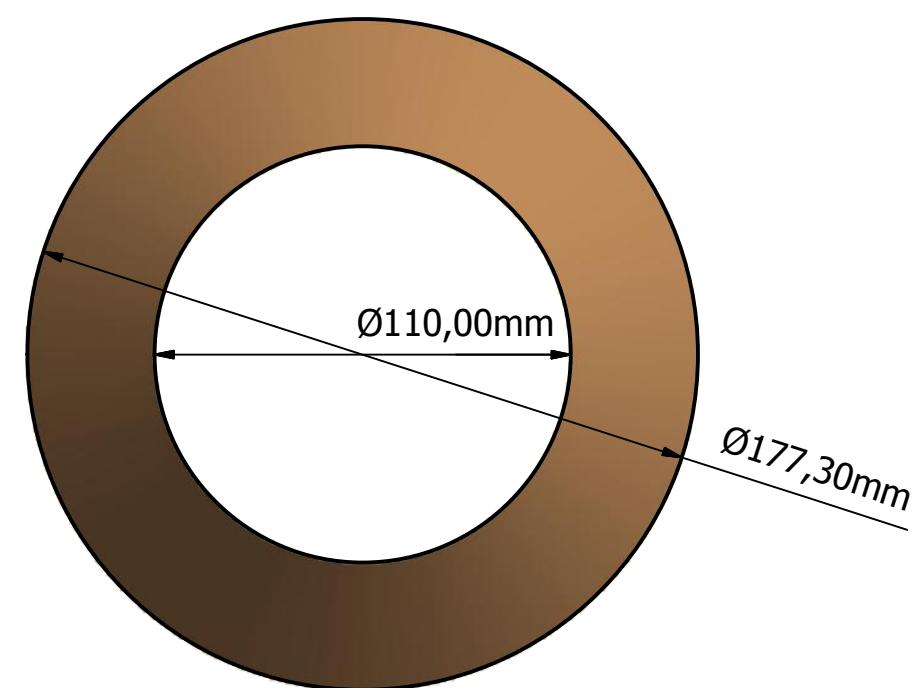
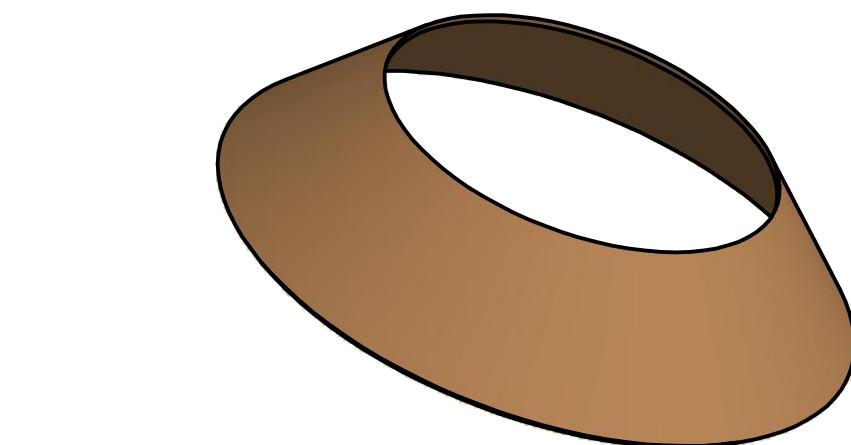
VISTA SUPERIOR



Projetado por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP				SUPORTE DO SENSOR	
				Edição	Folha
					12 / 13

COMPONENTE 8 (SAIA ISOLANTE)

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT



VISTA SUPERIOR



VISTA LATERAL

Projeto por	Verificado por	Aprovado por	Data	Data	
				16/10/2012	
SUPORTE DO SENSOR					
FINEP/CPFL/IEE/EESC-USP					Edição Folha
					13 / 13

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

LISTA DE COMPONENTES DO SUPORTE DO SENSOR

Nº	DESCRIÇÃO SIMPLIFICADA DOS COMPONENTES	QTD.
1	PEÇA METÁLICA INFERIOR *	1
2	CONECTOR TERRA *	1
3	PEÇA METÁLICA INTERMEDIÁRIA *	1
4	CONECTOR PARA CRUZETA *	1
5	TUBO DE PVC INFERIOR *	170,6mm
6	TUBO DE PVC SUPERIOR *	300,0mm
7	TAMPA DE PVC *	1
8	SAIA ISOLANTE *	5
9	PARAFUSO SEXTAVADO M6x1,0 (COMPR. MÍN. 30mm)	6
10	PORCA SEXTAVADA M6x1,0	9
11	PARAFUSO SEXTAVADO M6x1,0 (COMPR. MÍN. 40mm)	3
12	ARRUELA DE PRESSÃO M6	3
13	PARAFUSO SEXTAVADO M10x1,5 (COMPR. MÍN. 27mm)	1
14	ARRUELA M10	1
15	ARRUELA DE PRESSÃO M10	1
16	BORRACHA DE VEDAÇÃO DO DIVISOR CAPACITIVO **	1
17	MOLA *	1
18	CHAPA METÁLICA *	1

* Especificação detalhada nas folhas do projeto.

** É a mesma borracha utilizada na vedação dos eletrodos do sensor de pico de sobrecorrente. Consultar o projeto do sensor.