



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

---

**Rodrigo Andrade Komatsu**

**Análise da perda de vácuo em  
câmaras de disjuntores a vácuo**

**RELATÓRIO DE ESTÁGIO**

Campina Grande - PB  
Agosto/2011



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

---

## **Análise da perda de vácuo em câmaras de disjuntores a vácuo**

Relatório de estágio de final de curso realizado na empresa Schneider Electric e submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do diploma de graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador:  
Antonio Marcus Nogueira Lima

Rodrigo Andrade Komatsu

Campina Grande - PB  
Agosto/2011

## **AGRADECIMENTOS**

Meus agradecimentos vão principalmente ao meu tutor de estágio Hans SCHELLEKENS, expert técnico em câmaras a vácuo, que me confiou sua confiança nesse projeto me permitindo um desenvolvimento pessoal e profissional. Agradeço também a meu tutor no Brasil Antonio Marcus Nogueira Lima pela atenção prestada sempre que necessário.

Tenho de agradecer igualmente a Jean-Pierre GAUTHIER (Responsável do laboratório de síntese) por ter me apoiado com sua ajuda e conselhos.

Por fim, desejo agradecer a toda equipe do serviço de Antecipação e do Processo Piloto, entre outros à Serge OLIVE, Catherine HERAULT, Gilberte FILHOL, Dominique MAZZUCCHI, Alain MARSEILLE, por terem me recebido muito bem e aconselhado ao longo de todo meu estágio como também pela simpatia e o bom humor.

## LISTA DE FIGURAS

<u>Figura 1</u> : Esquema do serviço de Antecipação	8
<u>Figura 2</u> : Evolução das técnicas de corte na Europa( Média Tensão)	10
<u>Figura 3</u> : Disjuntor a vácuo com a câmara nele instalada em destaque	11
<u>Figura 4</u> : Corte da câmara de interrupção (elementos)	12
<u>Figura 5</u> : Foto do corte da câmara de interrupção (disjuntor a vácuo)	12
<u>Figura 6</u> : Curva de Paschen	13
<u>Figura 7</u> :Análise da extinção do arco no disjuntor a vácuo	14
<u>Figura 8</u> : Sistema de vácuo usado na maquete	16
<u>Figura 9</u> : Sistema elétrico usado na maquete	17
<u>Figura 10</u> : Os três andares do carrinho	18
<u>Figura 11</u> : Primeiro andar do carrinho	19
<u>Figura 12</u> : Segundo andar do carrinho	19
<u>Figura 13</u> : Terceiro andar do carrinho	20
<u>Figura 14</u> : O principio de funcionamento do sensor	21
<u>Figura 15</u> : Capacitâncias da câmara e do sensor	22
<u>Figura 16</u> : Posicionamento das faixas metalizadas	23
<u>Figura 17</u> : Corrente do capacitor de vácuo x Pressão	23
<u>Figura 18</u> : Funcionamento do sensor	24
<u>Figura 19</u> : Gráfico do funcionamento do sensor	25
<u>Figura 20</u> : Gráfico da tensão do capacitor de alimentação	26
<u>Figura 21</u> : O sistema de regulação	27
<u>Figura 22</u> : Gráfico da tensão do capacitor de alimentação com regulação	27
<u>Figura 23</u> : Foto do modelo do Sensor	29
<u>Figura 24</u> : Circuito auxiliar	30
<u>Figura 25</u> : Foto do sensor ligado a câmara e com o circuito auxiliar	30
<u>Figura 26</u> : Ensaio para a medição do tempo de resposta do sensor	31
<u>Figura 27</u> : Gráfico com a faixa de funcionamento do sensor com os contatos da câmara fechados	32

<b><u>Figura 28</u></b> : Gráfico da curva de Paschen com a faixa de funcionamento para diferentes tensões	32
<b><u>Figura 29</u></b> : Gráfico da faixa de funcionamento do sensor com os contatos da câmara abertos	33
<b><u>Figura 30</u></b> : Dimensionamento do sensor na câmara	36
<b><u>Figura 31</u></b> : Simplificação da câmara e vista ampliada do boss	37
<b><u>Figura 32</u></b> : Linhas equipotenciais e o campo elétrico axial na câmara (Flux2D)	38
<b><u>Figura 33</u></b> : Análise dos resultados no DX5	39
<b><u>Figura 34</u></b> : Simplificação da câmara (Flux 3D) e vista ampliada do boss	40
<b><u>Figura 35</u></b> : Campo elétrico no boss	40

## LISTA DE TABELAS

<b><u>Tabela 1</u></b> : Tabela das condições limite do sensor	34
<b><u>Tabela 2</u></b> : Tabela dos resultados obtidos com o programa Flux 2D	38

## LISTA DE ANEXOS

<b>ANEXO 1</b> : LISTA DOS COMPONENTES DA MAQUETE.....	43
<b>ANEXO 2</b> : CIRCUITO DO SENSOR.....	44
<b>ANEXO 3</b> : TABELA COM OS RESULTADOS DOS ENSAIOS DO SENSOR.....	45
<b>ANEXO 4</b> : DISTRIBUIÇÃO DAS LINHAS EQUIPOTENCIAIS.....	46
<b>ANEXO 5</b> : MODELAGEM MATEMÁTICA USADA PELO PROGRAMA FLUX 2D/3D.....	47

# SUMÁRIO

<b>1. RESUMO.....</b>	<b>6</b>
<b>2. INTRODUÇÃO</b>	
1) Apresentação da Schneider Electric.....	7
2) O Serviço de Antecipação.....	8
<b>3. POSITIONAMENTO DO PROJETO DE ESTÁGIO NO SERVIÇO DE ANTECIPAÇÃO</b>	
1) Disjuntores em média tensão.....	10
<b>4. MAQUETE DE ENSAIOS</b>	
1) Sistema de vacuo.....	16
2) Sistema elétrico.....	17
3) Organização das montagens e Segurança.....	18
<b>5. SENSOR DE PERDA DE VÁCUO</b>	
1) Detalhes da construção do sensor.....	21
2) Princípio de funcionamento.....	24
3) Análise dos resultados.....	25
<b>6. TESTES DO SENSOR DE VÁCUO</b>	
1) Testes.....	29
2) Análise da confiabilidade.....	34
<b>7. DIMENSIONAMENTO DO SENSOR NA CÂMARA.....</b>	<b>36</b>
<b>8. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS.....</b>	<b>41</b>
<b>9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>42</b>

## 1. Resumo

Meu estágio foi efetuado na empresa Schneider Electric no sítio 38 V de Varces. Esse sítio tem como objetivo a produção e testes de protótipos na área de média tensão. Meu trabalho foi desenvolvido sobre um dos produtos principais da empresa: a câmara a vácuo. Ela é o equipamento responsável pela extinção do arco elétrico nos disjuntores. Por ser ecologicamente correto sua tendência é substituir o outro tipo de câmara disponível no mercado (SF6).

Nas primeiras semanas de meu projeto eu tomei conhecimento dos trabalhos efetuados anteriormente sobre as câmaras a vácuo. Em seguida, eu recebi um curso de formação de habilitação elétrica (curso de segurança) para ter condições de intervenção em trabalhos elétricos com alta tensão.

Esse estágio teve início dia 22 de Março de 2010 ao dia 20 de Agosto de 2010 como assunto principal “Análise da perda de vácuo em câmaras de disjuntores a vácuo”. Minhas principais metas eram:

- Encontrar um princípio prático para medir o nível de pressão no interior de uma câmara vedada, essa câmara tendo contatos ligados à rede à uma tensão elevada.
- Fazer uma série de testes com o sensor para conhecer como o sensor se comporta com a influência de alguns fatores como a tensão aplicada, a pressão na câmara e a situação dos contatos da câmara. Em seguida começamos um estudo da confiabilidade do captor.
- Fazer um dimensionamento do sensor na câmara, levando em conta principalmente o envelhecimento da câmara.

## **2. Introdução**

### **1) Apresentação da Schneider Electric**

A Schneider Electric é um grupo multinacional francês, especializada em produtos e serviços para distribuição elétrica, controle e automação industrial.

A Schneider Electric tem 197 unidades fabris em todo o mundo. Mais de 5% do faturamento mundial é destinado a pesquisa e desenvolvimento de novos produtos (7500 funcionários em 25 países).

A Schneider tem cinco mercados principais:

- Energia
- Infraestrutura;
- Industrial;
- Predial;
- Residencial.

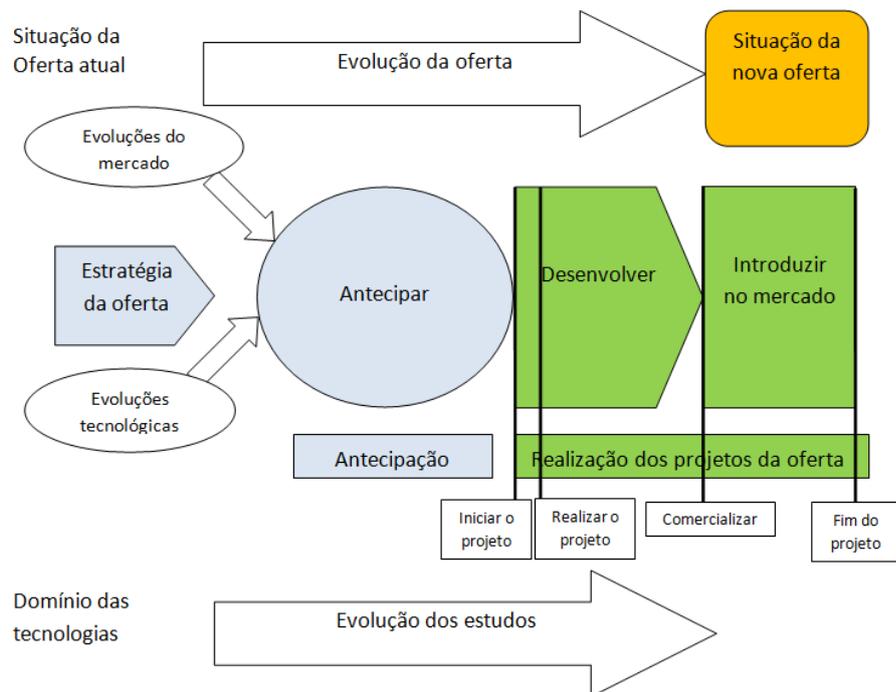
A empresa conta com vários centros de pesquisa e o objetivo é sempre estar à frente das necessidades do mercado. Para isso ela tem um setor chamado Antecipação que é responsável pelo desenvolvimento de produtos. Esse setor será mais bem detalhado no próximo tópico.

## 2) O serviço de Antecipação

Antecipação – Conceito para a Schneider:

“É a ação de imaginar o futuro, de prever e analisar futuras necessidades. Sua finalidade é iniciar, através de dados estratégicos, marketing e técnicas industriais, o desenvolvimento de produtos para oferta e no momento oportuno dispor do melhor”.

Esse estágio era diretamente ligado ao serviço de Antecipação, Pesquisa e Suporte de Projetos do sítio da Schneider 38 V em Varces. Essa unidade era dedicada ao setor de Média Tensão (1 – 50kV) onde se desenvolvia aparelhagens como disjuntores, células, câmaras, interruptores e fusíveis. Esse serviço fazia parte do processo de criação e desenvolvimento da oferta dos produtos (Figura 1).



*Figura 2 : Esquema do serviço de Antecipação*

Esse serviço tinha como objetivo principal o desenvolvimento de produtos. Ele atuava estudando a possibilidade de atender a uma determinada especificação ou, mais geralmente atingir uma base tecnológica e competitiva, a fim de se preparar para futuras inovações tecnológicas.

Aprovada essa etapa o projeto era iniciado e o produto desenvolvido, mas sempre atentando para as evoluções da oferta e dos estudos no mundo. Desse modo, quando o produto fosse implantado no mercado este estaria atendendo as necessidades do cliente de acordo com suas necessidades. Mas como sempre haverá evoluções tecnológicas e do mercado, a fim de não perder mercado e sempre dispor de um produto de qualidade a Schneider está constantemente realizando esse procedimento seja para produtos novos ou para desenvolvimento de produtos.

O estágio realizado estava situado na etapa de antecipação no fluxograma acima, por isso durante o projeto diversas reuniões foram feitas já para analisar se o produto poderia ser desenvolvido para ser implantado no mercado.

### 3. Posicionamento do projeto de estágio no Serviço de Antecipação

#### 1) Disjuntores em Média Tensão

##### a) Utilização

Por razões de segurança e a fim de assegurar uma manutenção adequada é indispensável que a rede elétrica seja equipada de aparelhos que permitam o corte e o religamento de energia em diversas situações (corte voluntário, curto circuitos e outras faltas na rede). Os disjuntores são os aparelhos que fazem essas funções. Tendo ele um papel fundamental na proteção das redes e das pessoas, muitos são os estudos realizados para melhorar o seu desempenho e desenvolvimento.

O SF<sub>6</sub> (hexafluoreto de enxofre) e o vácuo são as técnicas mais modernas de corte em média tensão. Com início na década de 60 elas têm crescido rapidamente desde os anos 70 e já passaram as velhas técnicas de corte o ar e o óleo (Figura 2).

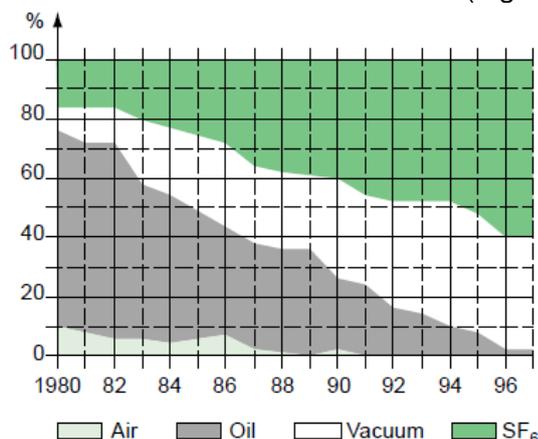
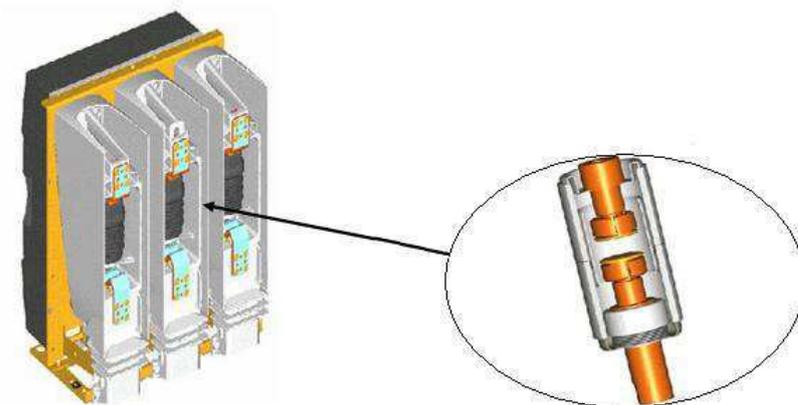


Figura 2 : Evolução das técnicas de corte na Europa (Média Tensão)

Enquanto o SF<sub>6</sub> é usado em todas as faixas de média e alta tensão, o vácuo foi desenvolvido em grande parte na área de média tensão com incursões limitadas em baixa tensão e alta tensão, sendo os dois concorrentes apenas na média tensão.

O SF<sub>6</sub>, apesar de suas propriedades isolantes, é um gás tóxico por isso precauções devem ser tomadas no seu manuseio. Outro problema desse gás é seu grande potencial de aquecimento global, onde de acordo com o Protocolo de Kyoto ele contribui para o efeito estufa. Com isso mais trabalhos estão se orientando para as técnicas a vácuo.

Então, visando um melhor desempenho dos disjuntores a vácuo, esse estágio teve como objetivo a melhoria de um dos componentes do disjuntor que é a câmara a vácuo, onde se encontra os contatos do disjuntor, responsável pela extinção do arco (Figura 3).

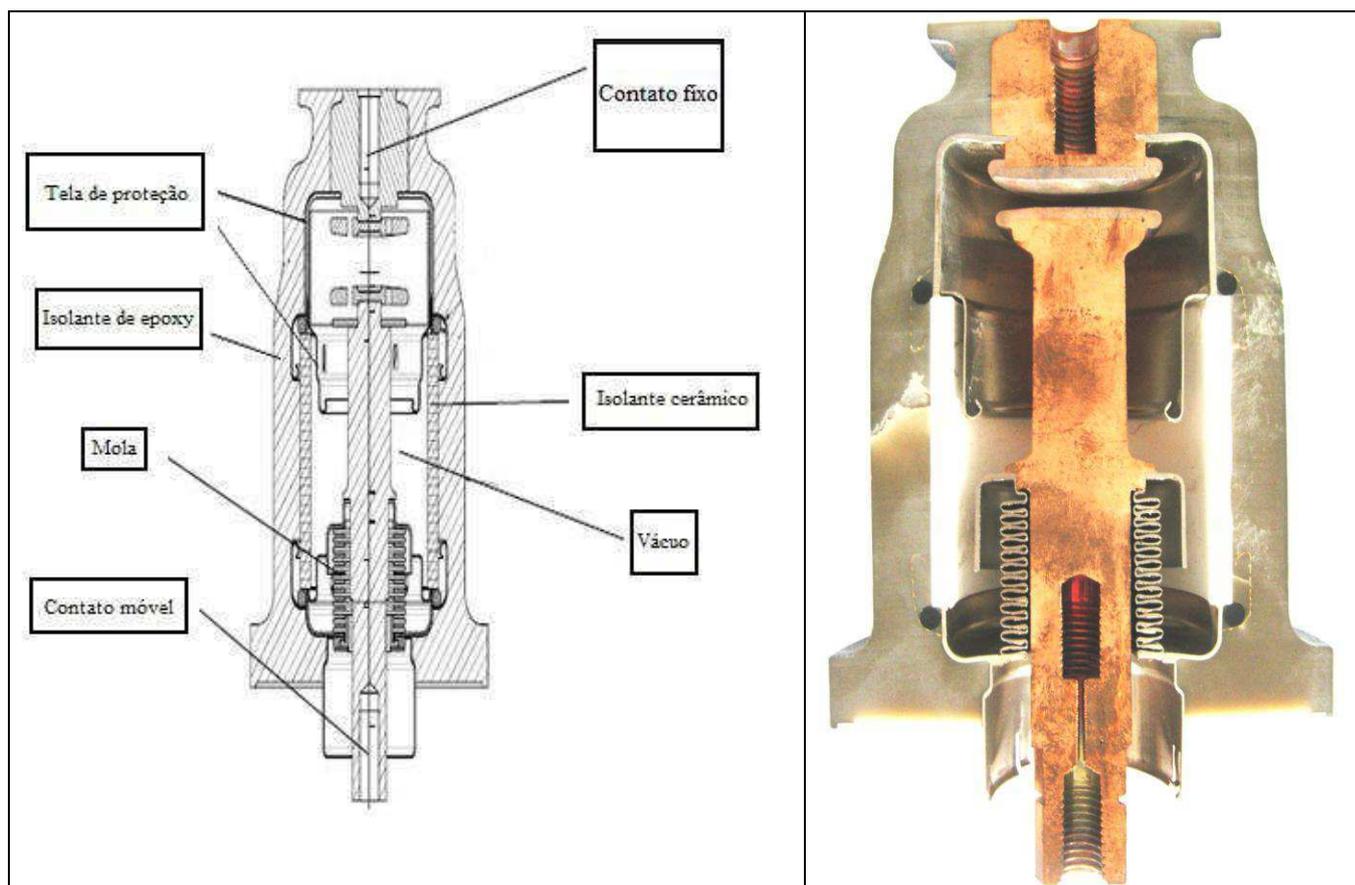


*Figura 3: Disjuntor a vácuo com a câmara nele instalada em destaque*

### b) Constituição de uma câmara de interrupção a vácuo

Uma câmara de interrupção a vácuo é composta dos seguintes elementos (*Figuras 4 e 5*):

- Dois conjuntos de contatos elétricos, um fixo e outro móvel, cada um contém um eletrodo cilíndrico que conduz a corrente até as pastilhas de contato. Os contatos dessas câmaras são feitos principalmente à base de cobre.
- Um isolante cerâmico para assegurar a isolação elétrica dos contatos fixo e móvel.
- Uma tela que protege o interior do isolador contra a condensação de vapores metálicos gerados pelo arco quando os contatos se separam. Essas telas são constituídas principalmente de aço inoxidável, níquel e cobre.
- Uma mola metálica que permite uma boa fixação entre o contato fixo e o móvel.



*Figura 4 : Corte da câmara de interrupção (elementos)*

*Figura 5 : Foto do orte da câmara de interrupção (disjuntor a vácuo)*

### c) Por que a vácuo ?

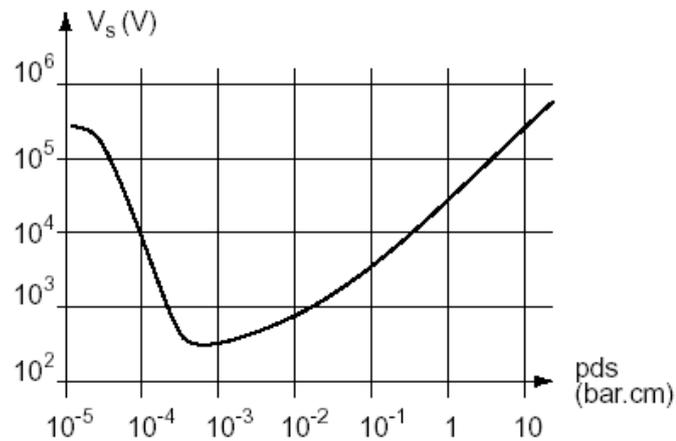
Todo meio destinado a impedir a passagem de corrente deve ser um bom isolante. O vácuo, além disso, tem propriedades dielétricas melhores comparada aos gases usados à pressão superior ou igual a 1mbar.

Como já mencionado, o SF6 e o vácuo são as duas técnicas de interrupção de corrente mais modernas na área de média tensão. No entanto, no futuro a utilização do SF6 como meio isolante será reduzida, pois além de ser um gás que contribui ao efeito estufa, a tecnologia a vácuo possui diversas vantagens:

- longa duração de vida (aproximadamente 20 anos);
- as câmaras são seladas para uma isolação máxima (portanto, nenhuma manutenção é necessária);
- maior facilidade para interrupção do arco;
- tamanho curto e compacto (aproximadamente 15cm x 25cm);
- não-explosivo;
- não combustível.

Assim, podemos dizer que o vácuo é uma realidade industrial que apenas começou o seu desenvolvimento.

Consideramos o vácuo como o ar mantido a uma pressão muito baixa da ordem de  $10^{-1}$  a  $10^{-5}$  Pa, ou seja,  $10^{-3}$  a  $10^{-7}$  mbar, nos novos disjuntores essa pressão é de  $10^{-6}$  mbar. A esta pressão os elétrons podem ganhar muita energia durante o seu caminho livre médio, mas a probabilidade das moléculas ionizarem antes de atingir o eletrodo torna-se baixa.



*Figura 6 : Curva de Paschen*

A curva de Paschen (*Figura 6*) mostra como se comporta a constante de ruptura do ar em função do produto da pressão pela distancia entre os contatos do disjuntor. No nível de pressão utilizado é considerado uma distancia entre os contatos de 1 à 10 centímetros, temos uma tensão de ruptura superior à  $10^5$  V ( lado esquerdo da curva).

O grande problema dos disjuntores a vácuo é se no interior desses a pressão estiver acima de  $10^{-4}$  bar, pois nessa pressão a tensão disruptiva do meio é muito menor havendo uma maior facilidade de ocorrer o arco ou dele se manter.

Esse problema pode ser causado por um defeito na fabricação ou até mesmo por uma falta de vistorias pelas empresas que o adquiriram.

Isso se torna um risco, pois ao não extinguir o arco o disjuntor pode levar alta tensão para trechos indesejáveis do sistema elétrico, podendo causar acidentes. Causando também a redução da vida útil da câmara que têm os contatos dos disjuntores desgastados mais rapidamente.

Devido a esses fatores o objetivo principal desse estágio foi encontrar um principio prático para medir o nível de pressão no interior de uma câmara vedada, essa câmara tendo suas partes religadas à rede à uma tensão elevada.

#### *d) Funcionamento*

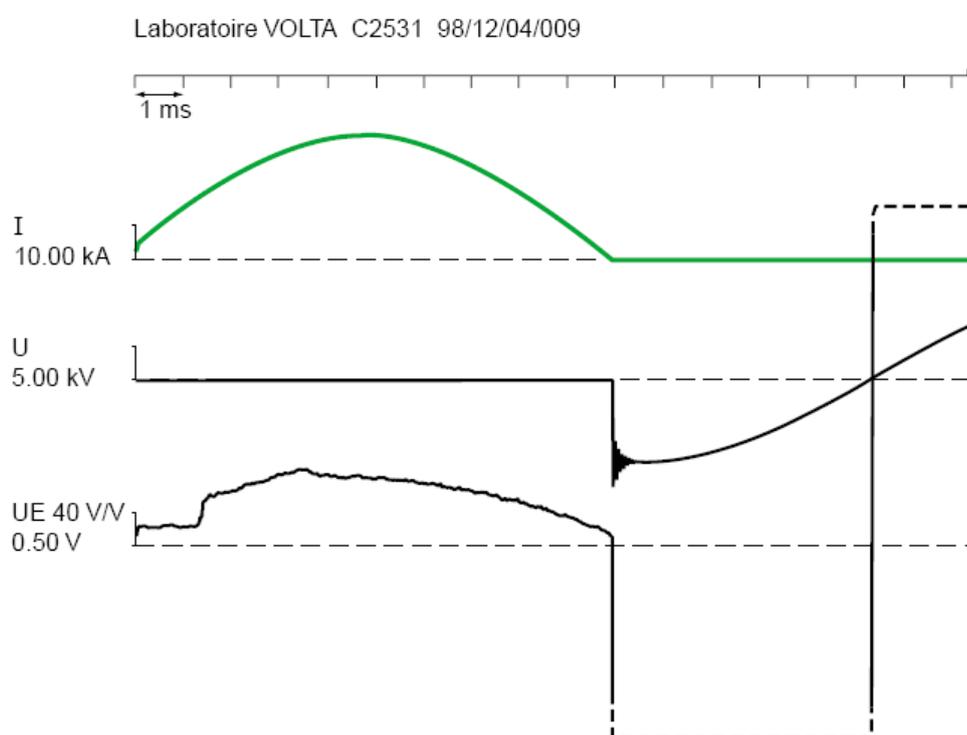
Quando os contatos do disjuntor estão fechados, a corrente flui pelos dois contatos. Em caso de problemas (curto circuito - falta) ou mesmo uma manutenção, o contato móvel é separado do contato fixo por um sistema mecânico. Isso produz arcos elétricos entre os dois eletrodos. A avalanche de elétrons é gerada por vapores metálicos (plasma) criados a partir da fusão parcial dos eletrodos (contatos), esse fenômeno é conhecido como ionização do dielétrico.

O arco será extinto se a energia do sistema for menor que a dissipada no processo de de-ionização e assim permanecerá se o restabelecimento da suportabilidade dielétrica entre os contatos for suficientemente rápida para suportar a tensão de

restabelecimento transitória. A eficiência do processo de interrupção é determinada pela rapidez da condensação deste vapor metálico nas superfícies dos contatos e barreiras de proteção.

O arco que se forma no vácuo não é resfriado. O plasma de vapor metálico é altamente condutivo. Disto resulta uma tensão de arco muito baixa com valores entre 20 e 200 V. Por este motivo, e devido à pequena duração do arco, a energia dispersada no local de extinção é muito reduzida. Isto explica a elevada expectativa de vida elétrica da câmara.

Todos os disjuntores de média tensão aproveitam a passagem natural através de zero da corrente alternada (2 vezes por período, a cada 10 ms para 50 Hz de corrente) para interromper o arco. No momento dessa passagem, há a extinção natural do arco e o fim do fluxo de corrente. A câmara a vácuo então cumpre o seu papel como interruptor (Figura 7).



*Figura 7 :Análise da extinção do arco no disjuntor a vácuo*

Como pode ser visto a partir deste gráfico, a tensão do arco que aparece é, no caso de vácuo, baixa em comparação com as das redes de MT.

Podemos diferenciar o arco elétrico no vácuo do SF6 (gás) da seguinte maneira:

- Vácuo: o plasma é essencialmente composto de íons metálicos, porque não há íons do gás. A partir do zero da corrente, há uma condensação dos vapores e o meio com eletrodos se torna rapidamente isolante.

-SF6: o plasma é composto de vapores metálicos e gás ionizado. Portanto, é necessário algum tempo para condensar os vapores e ionizar as moléculas do gás, resultando em um corte geralmente mais difícil sem outro artifício como um sopro.

Por isso uma grande vantagem dos disjuntores a vácuo é que a energia liberada pelo arco durante o processo de corte é muito menor do que qualquer outro meio, sendo mais fácil de extinguir o arco.

Portanto, o vácuo apresenta as propriedades dielétricas ideais para ser utilizado em disjuntores: ausência de material entre os eletrodos e, portanto, uma condutividade elétrica muito baixa minimizando a propagação do arco.

## 4. Maquete de ensaios

A primeira parte do meu estágio foi preparar e montar uma plataforma que simulasse a situação real de uma câmara Matrix 17Kv / 25kA VB06H dv2. Inicialmente vimos que dois sistemas deveriam ser construídos:

- sistema de vácuo
- sistema elétrico (alta tensão)

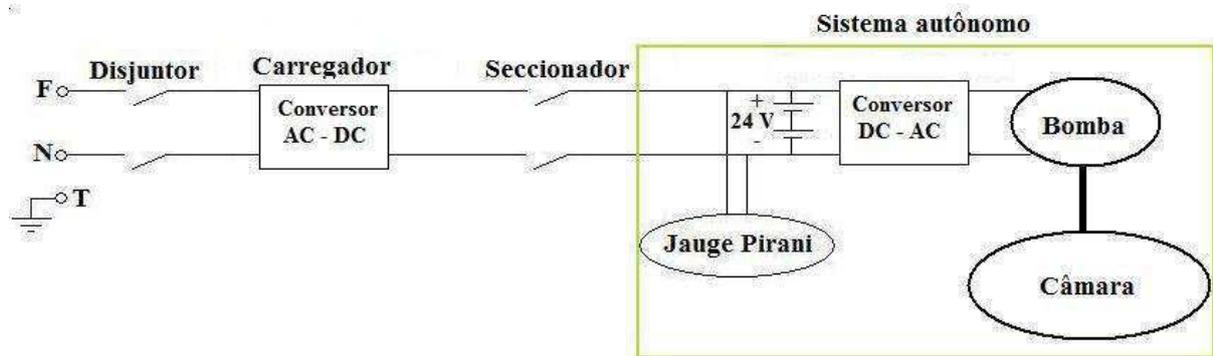
Os componentes usados nesses sistemas têm suas especificações detalhadas no Anexo1.

### 1) Sistema de vácuo

Como mencionado anteriormente esse sistema deve ser projetado para simular as condições reais de pressão no interior da câmara. Como a câmara a vácuo apesar de ser fabricada com uma pressão na ordem de  $10^{-6}$  mbar, com o tempo ela tende a ficar com a pressão atmosférica, por isso foi feito um modelo onde se permitia uma escolha específica da pressão desejada (uma bomba com regulação de pressão foi utilizada).

Abaixo podemos ver o esquema e os componentes da maquete do sistema de vácuo (Figura 8):

- Cabo flexível: Ligando o contato fixo da câmara com a bomba
- Jauge pirani: equipamento para medir a pressão (conectado à bomba através de uma sonda)
- Bomba: para estabelecer o vácuo
- Disjuntor termomagnético: para proteção dos equipamentos
- Carregador 230V AC / DC 24V
- 2 baterias de 12V em série
- Conversor 24V DC / 230V AC
- Interruptor para passar da BT para MT



*Figura 8 : Sistema (monofásico) de vácuo usado na maquete*

O sistema autônomo, alimentado somente pelas baterias, destacado na figura acima tem a finalidade de proteção do Conversor AD – DC, pois como a alta tensão e a conexão da bomba são conectados no contato fixo da câmara, quando utilizamos alta tensão, essa é

passada para o sistema de vácuo por isso o seccionador deve ser aberto para não danificar o Conversor AC – DC.

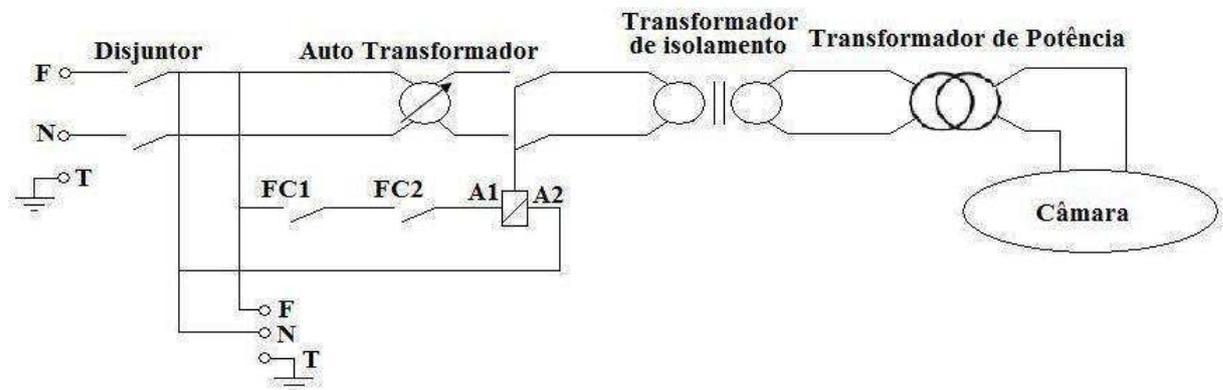
Portanto, observamos que os componentes no interior desse quadrado (sistema autônomo) são alimentados independentemente da rede (por baterias) quando é aplicada alta tensão.

## 2) Sistema Elétrico

O sistema elétrico foi projetado para alimentar os contatos da câmara com alta tensão, como em uma rede de distribuição de energia real, mas com um máximo de 20 kV.

Abaixo podemos ver o esquema e os componentes da maquete do sistema elétrico (Figura 9):

- Disjuntores e relés
- Auto transformador para variar a MT
- Transformador de isolamento
- Transformador de potência 200 V : 20 kV
- 2 interruptores para a segurança (FC1 e FC2)



*Figura 9 : Sistema (monofásico) Elétrico usado na maquete*

Esses dois interruptores eram conectados a um capô com a finalidade de proteção das pessoas.

### 3) Organização das montagens e Segurança

Esses sistemas foram montados sobre um carrinho com objetivo de uma maior facilidade de locomoção. Algumas precauções foram tomadas antes de se iniciar os ensaios:

- Fixação da câmara sobre uma base
- Isolamento completo de 20 KV para o segundo estágio (utilização de quatro isoladores para cada lado)
- Ligação do terra num mesmo ponto
- Fixação de um capô plexiglas para seccionar a maquete de BT – MT

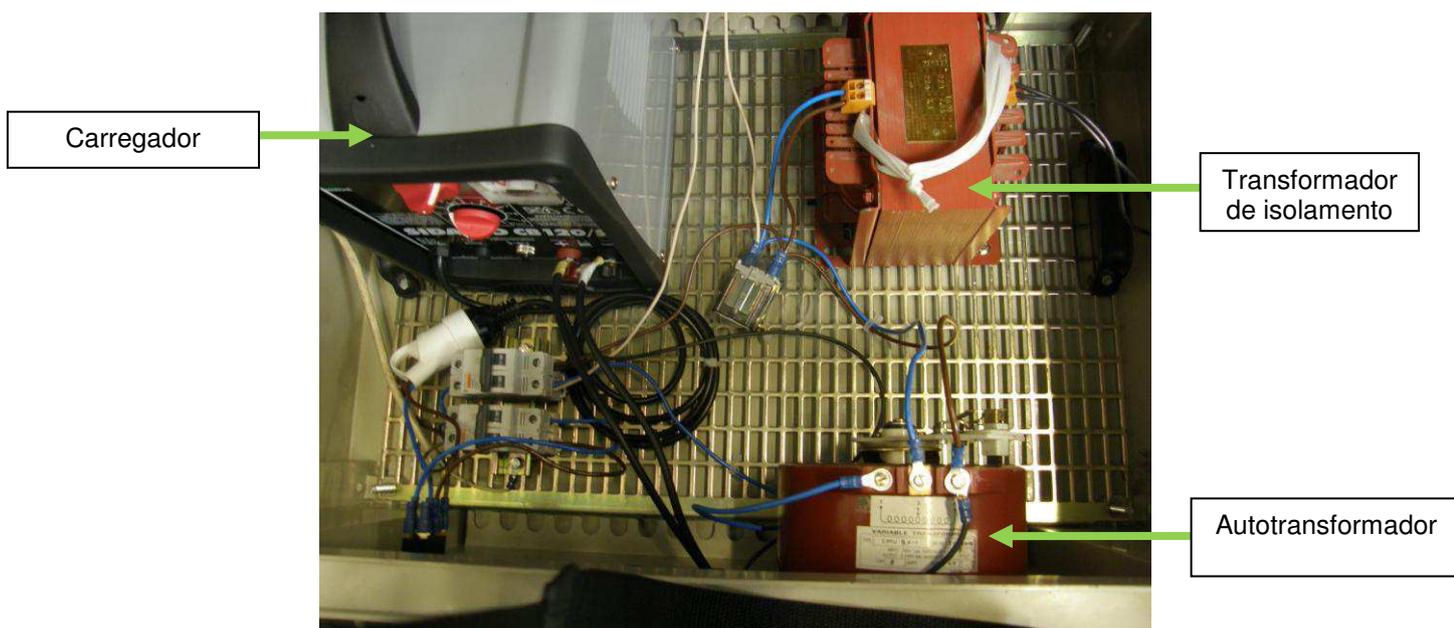
Esse carrinho tinha três andares e os dispositivos foram organizados da seguinte maneira (Figura 10):

- No terceiro andar como o acesso era de mais fácil visibilidade e manuseamento, então colocamos os instrumentos de medição e a câmara que precisa de ajustes constantemente.
- No segundo andar colocamos todos os instrumentos do sistema de vácuo que tem média tensão (após o seccionador). Este andar era isolado de 20kV.
- No primeiro andar se encontrava todo o resto.



*Figura 10 : Os três andares do carrinho*

A montagem de cada andar é explicada abaixo detalhadamente:



*Figura 11 : Primeiro andar do carrinho*

No primeiro andar (Figura 11) utilizamos em um cofre elétrico (interruptor, disjuntores, réles, autotransformador, transformador de isolamento, carregador 230Vac / 24V dc) para uma melhor fixação e proteção dos equipamentos, um transformador de potencia e um canal isolado por onde passava a alta tensão.

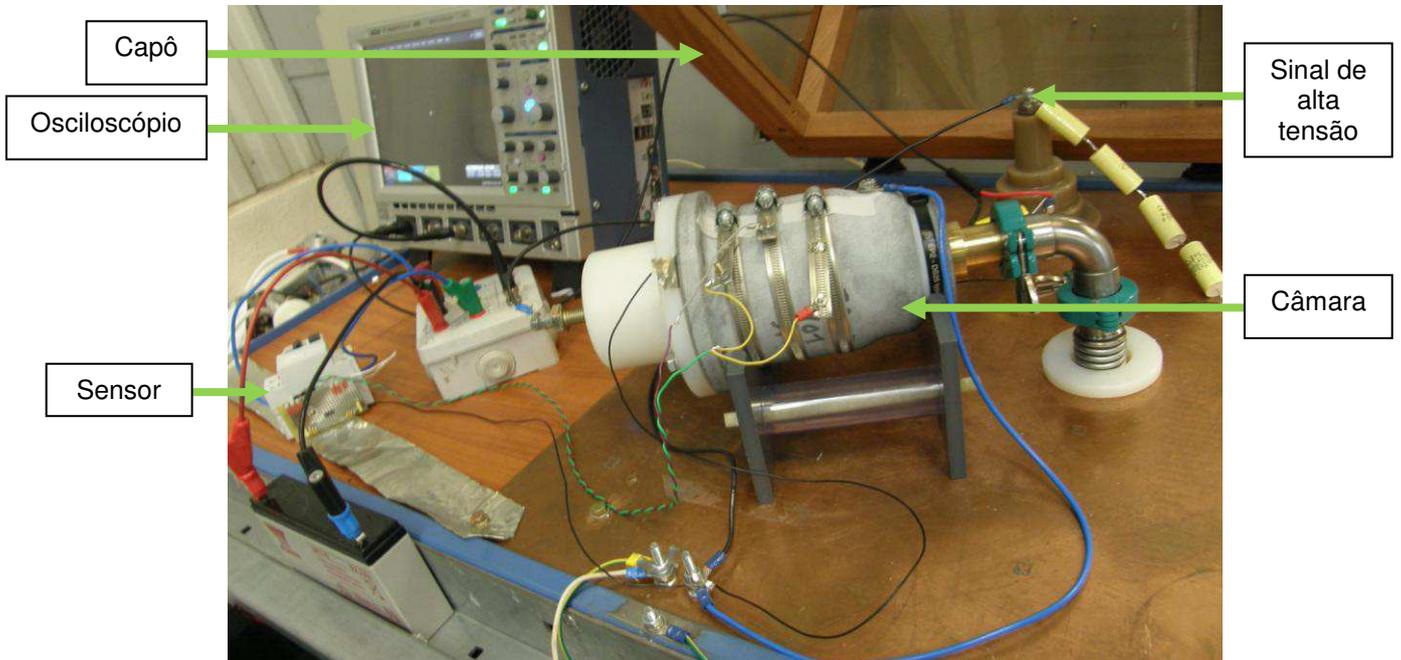


*Figura 12 : Segundo andar do carrinho*

O segundo andar do carrinho (BT - MT) continha duas baterias de 12V, conversor 24V DC / 230 V AC, a bomba e o canal isolado por onde se passava a alta tensão até a câmara (Figura 12).

Como o sistema de vácuo era conectado ao contato fixo da câmara, quando fosse aplicada alta tensão todos os dispositivos de vácuo estariam com alta tensão também. Por isso fizemos com que todos esses aparelhos do sistema de vácuo estivessem com o mesmo referencial de alta tensão (através de uma placa de cobre), exceto o carregador que era

desconectado, quando fosse utilizada alta tensão, por interruptores. Portanto o andar do meio funcionava de modo autônomo da rede elétrica (por baterias).



*Figura 13 : Terceiro andar do carrinho*

O terceiro andar foi dividido em duas regiões (Figura 13):

- 1) A câmara de vácuo, o divisor de tensão, o capacitor de filtro de MT e o capô em plexiglas que continha dois interruptores.
- 2) Do outro lado foi colocado o osciloscópio e o sensor de perda de vácuo.

Nesse andar ainda, foi utilizado um seccionador conectado ao capô e que era fechado somente quando este estava fechado. Desse modo só havia alta tensão na câmara quando o capô estava fechado, evitando acidentes.

No sinal de média tensão havia muita perturbação e para reduzir isso utilizamos quatro capacitores em série (47nf, 3kV) e com isso a forma de onda do sinal melhorou.

## 5. Sensor de perda de vácuo

Após montar uma maquete capaz de simular uma situação real para a câmara, foi iniciado o desenvolvimento de um sensor de perda de vácuo por mim e Pascal Houbre, um engenheiro da Schneider Electric.

O princípio do sensor consistia em medir a capacitância pela metalização da câmara através de uma faixa em cobre.

A capacitância fase/metalização crescia em função da qualidade dielétrica. Na realidade, não era possível medir essa capacitância diretamente, o que foi feito era uma estimativa através da medição da tensão em um segundo capacitor em série (Figura 14).

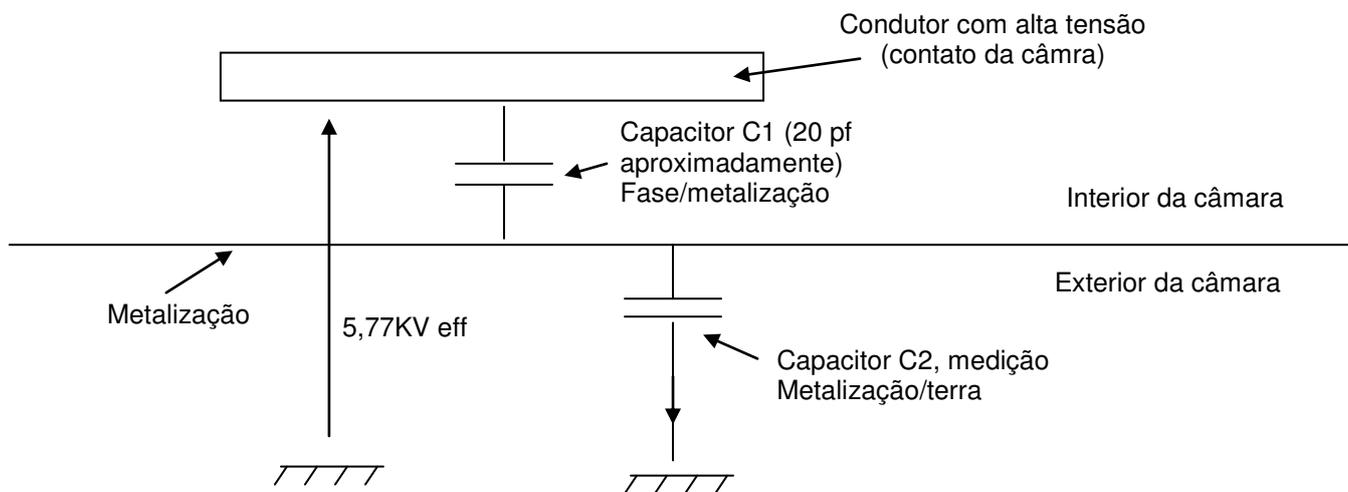


Figura 14 : O princípio de funcionamento do sensor

A partir disso fizemos um ensaio variando o nível de pressão para uma tensão de 12kV rms e notamos uma variação do capacitor de vácuo (C1) de 56% quando ele começa a perder o vácuo.

Alguns estudos mais detalhados sobre o sensor serão apresentados em seguida.

### 1) Detalhes da construção do sensor

#### a) No caso da ocorrência de uma falta fase terra

Um dos problemas encontrados para nosso sensor seria quando ocorresse uma falta fase terra com o neutro isolado da terra o que causaria um deslocamento dos potenciais das fases sãs em relação à terra, sendo estas aumentadas por um fator igual a  $\sqrt{3}$ .

Isso levaria a um aumento das tensões nos capacitores C1 e C2, o que é visto como um defeito de perda de vácuo. A solução encontrada foi comparar a capacitância influenciada pela pressão no interior da câmara (C1) com outra capacitância também no interior da câmara, mas esta sendo localizada numa parte que não sofria influencia da mudança da pressão. A câmara então deveria ser dividida em duas partes metálicas, sendo uma servindo como referencia.

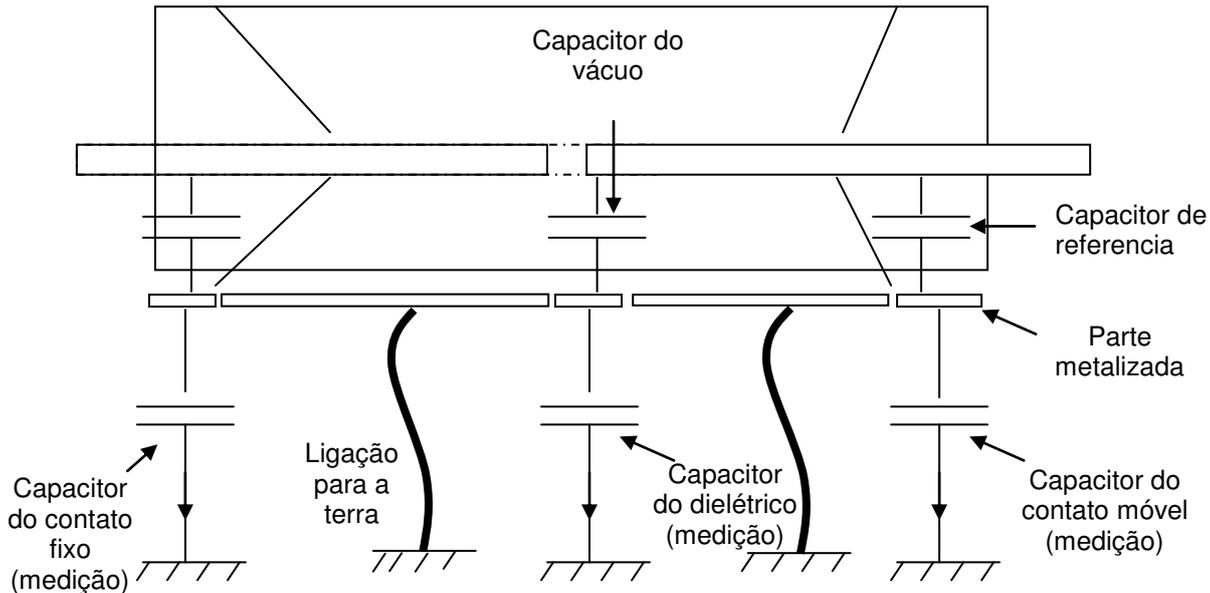
b) Influência dos tipos de alimentação da câmara

Na câmara havia os seguintes tipos de alimentação dos contatos:

- Contatos fechados (mesma tensão nos contatos)
- Contatos abertos, alimentação no contato móvel
- Contatos abertos, alimentação no contato fixo

Visto que a alimentação podia estar apenas de um lado, então observamos que eram necessárias duas referências uma do lado do contato fixo e a outra no móvel.

O lado externo da câmara foi dividido então em três partes metalizadas (Figura 15).



*Figura 15 : Capacitâncias da câmara e do sensor*

Finalmente a tensão no capacitor influenciado pela pressão é comparada com as tensões dos capacitores dos contatos móvel e fixo.

A Figura 16 mostra como são posicionadas as faixas metálicas nas zonas metalizadas da câmara:

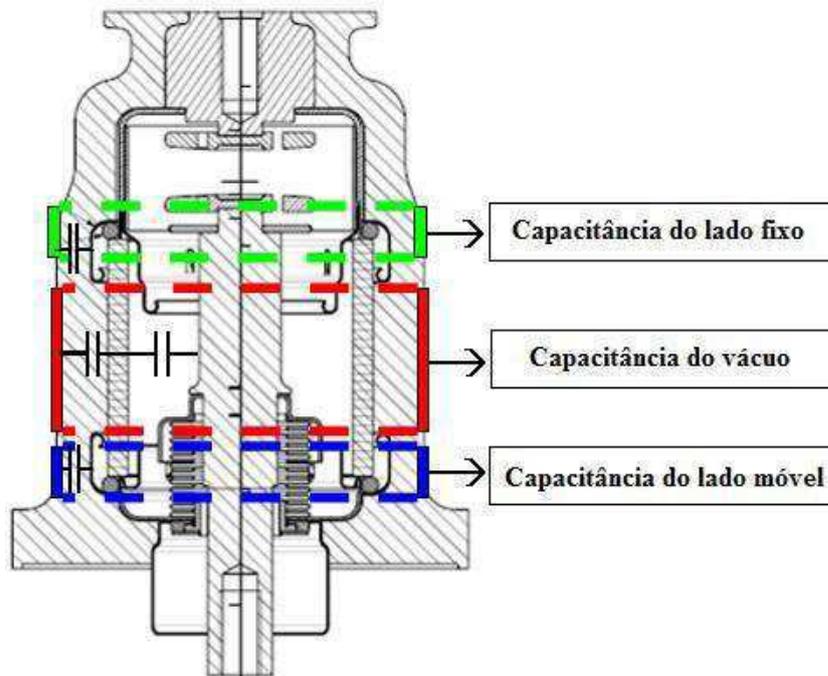


Figura 16 : Posicionamento das faixas metalizadas

- c) O capacitor de vácuo numa câmara a vácuo com pressão atmosférica em seu interior (com defeito) tem o mesmo comportamento que numa câmara nova

Através de vários ensaios com diferentes tensões e pressões na câmara, notamos que a capacitância de vácuo (Figura16) tem sua corrente influenciada pela variação da pressão e tensão (Figura 17).

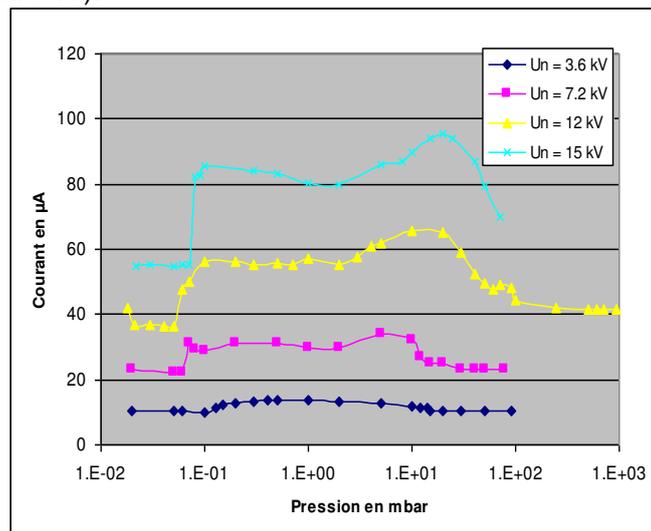


Figura 17 : Corrente do capacitor de vácuo x Pressão

Analisando ainda a figura, podemos notar que com uma tensão de 12kV a corrente no capacitor é próxima de 40µA para uma pressão menor que  $1 \times 10^{-1}$  mbar e para uma pressão acima de 5x10mbar. Com isso não sabemos diferenciar uma câmara nova de uma câmara com pressão atmosférica.

Felizmente essa mudança de pressão é um fenômeno lento. Vimos que no mínimo essa mudança ocorre em dois dias.

Portanto o sensor de perda de vácuo deve estar sempre em funcionamento, pois se ele estiver com defeito nesses dois dias, após ser consertado ele não vai reconhecer a mudança de pressão.

## 2) Princípio de funcionamento

Como já mencionado anteriormente, o princípio de funcionamento consiste em comparar a tensão da capacitância que é influenciada pela pressão com a tensão da capacitância de referência (pressão não influencia).

Então, quando não há uma diferença de tensão,  $U_{\text{vácuo}} - U_{\text{referencia}} = 0$ , isso significa dizer que não ocorreu uma perda de vácuo (na prática sempre haverá um pouco de tensão parasita).

Pela figura abaixo vemos que caso a capacitância CV aumente teremos um aumento da tensão  $U_{\text{vácuo}}$ . E então um capacitor se carrega através da diferença de potencial entre  $U_{\text{vácuo}} - U_{\text{referencia}}$  chegando a certo nível de tensão onde há um acionamento indicando a perda de vácuo (Figura 18).

O valor típico dos capacitores são 21pF para o CV e 19pF para o CM e o CF.

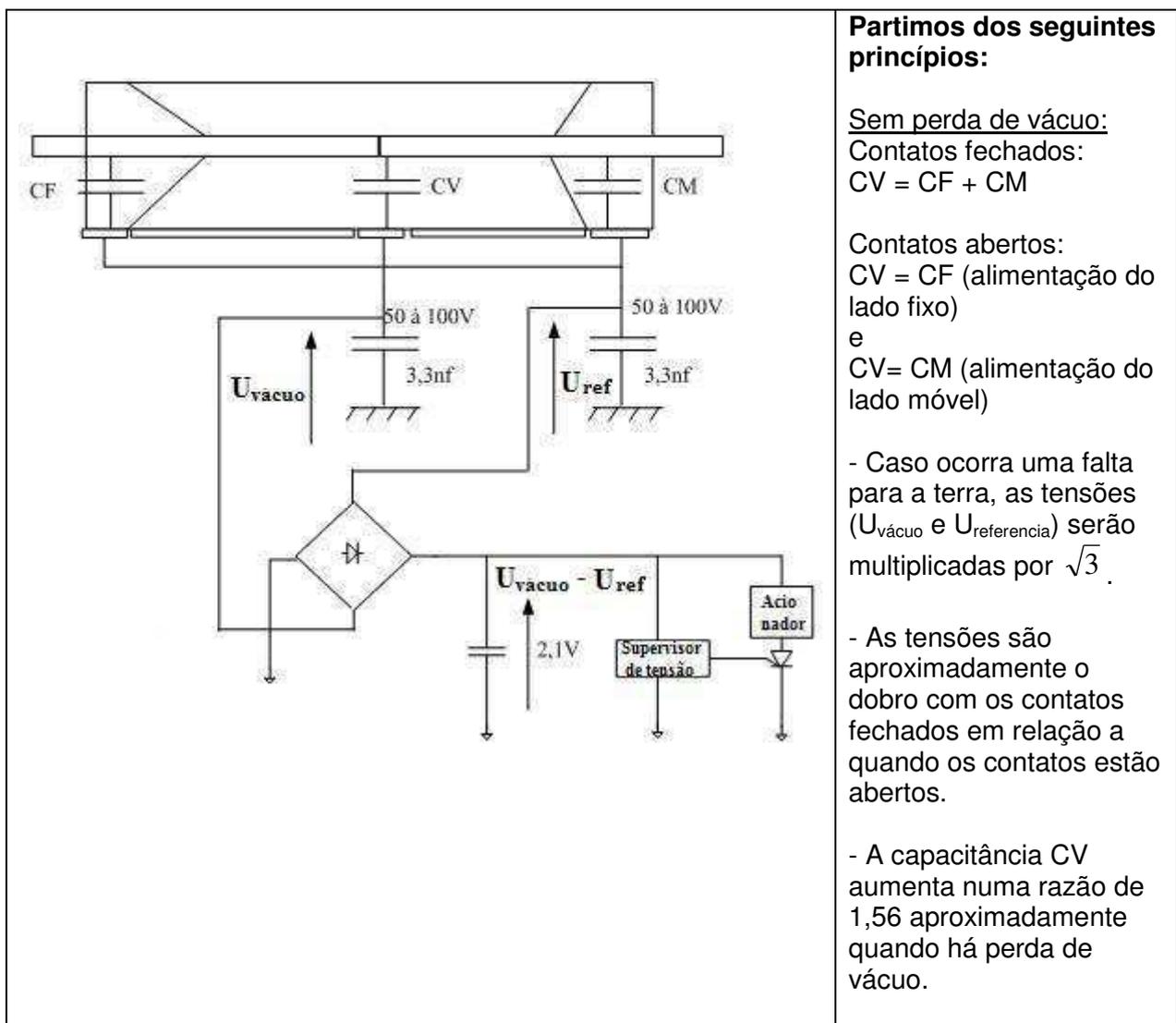


Figura 18 : Funcionamento do sensor

## Condições de funcionamento:

Mesmo sem ocorrer uma perda de vácuo, a diferença de potencial não é nula entre  $U_{\text{vácuo}}$  e  $U_{\text{referência}}$ . O sistema não é perfeito, especialmente os valores das capacitâncias nos dois modos de funcionamento (aberto e fechado), mas também o limiar de comparação, as capacitâncias de medição e outros (há tolerâncias e variações de temperatura).

Da figura anterior podemos deduzir o seguinte gráfico de funcionamento (Figura 19):

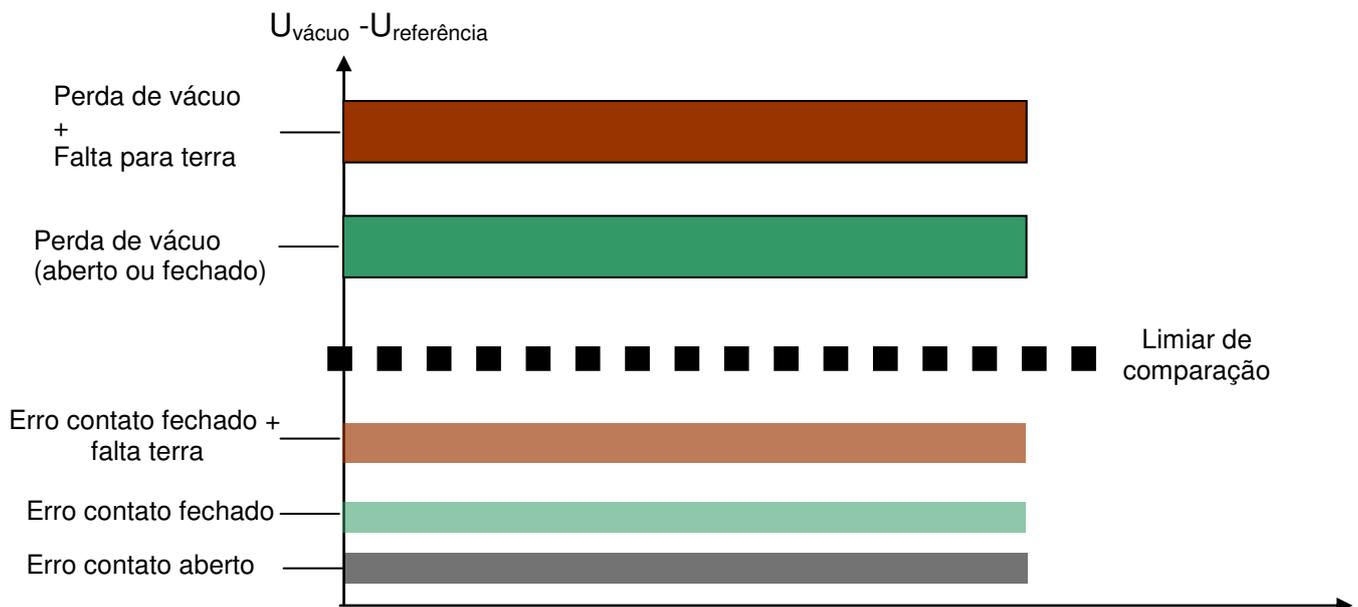


Figura 19 : Gráfico do funcionamento do sensor

Analisando o gráfico acima observamos que para um bom funcionamento do sensor é preciso que o limiar de comparação mínimo deva ser superior ao nível obtido pelos erros cumulativos: Erro com contatos fechados + falta terra, pois desse modo não haverá o acionamento do sensor. É preciso também que o limiar de comparação superior seja inferior ao nível mínimo obtido no caso de perda de vácuo, pois nesse caso o sensor de ser acionado.

### 3) Análise dos resultados

A fim de ter uma melhor compreensão do comportamento do sensor e ter um resultado com uma boa margem de segurança, fizemos um estudo mais detalhado do sensor através do programa ATP, onde foi analisado a diferença de tensão  $U_{\text{vácuo}} - U_{\text{referência}}$  para as condições limites do limiar de comparação (nível de tensão mínimo que o sensor é acionado).

Através de uma análise para os casos abaixo (situações limites do limiar de comparação), poderemos dizer se o sensor irá responder como esperado (acionando

quando há perda de vácuo) e com uma boa margem de segurança. Foi utilizado o circuito que se encontra no Anexo 2.

- 1) Erro sem perda de vácuo, com os contatos da câmara fechados e com uma falta para terra. A tensão primária é de  $5,77k \cdot \sqrt{3} = 10kV_{eff}$ , a capacitância de vácuo é de 20pF.
- 2) Com perda de vácuo, câmara com os contatos abertos e uma tensão primária de 5,77kV.

Sem perda de vácuo, idealmente a diferença de tensão deveria ser nula. Os desequilíbrios dos diferentes parâmetros geram uma tensão parasita que não deve nunca passar do limiar de acionamento do alerta para perda de vácuo.

Através do circuito que se encontra em anexo, obtivemos o gráfico abaixo que representa a tensão no capacitor diferencial em seu pior caso: com perda de vácuo (em violeta) e sem perda de vácuo (em azul). As tensões contínuas são os limites.

Notamos que as duas tensões estão muito próximas e a tensão sem perda de vácuo é ainda muito próxima do limite mínimo de 2V (Figura 20).

Como era de ser esperada, com uma falta para a terra (vermelho) a tensão parasita sem perda de vácuo se encontra aproximadamente multiplicada por  $\sqrt{3}$ , passando do limiar de comparação, causando o acionamento do sensor sem haver uma perda de vácuo .

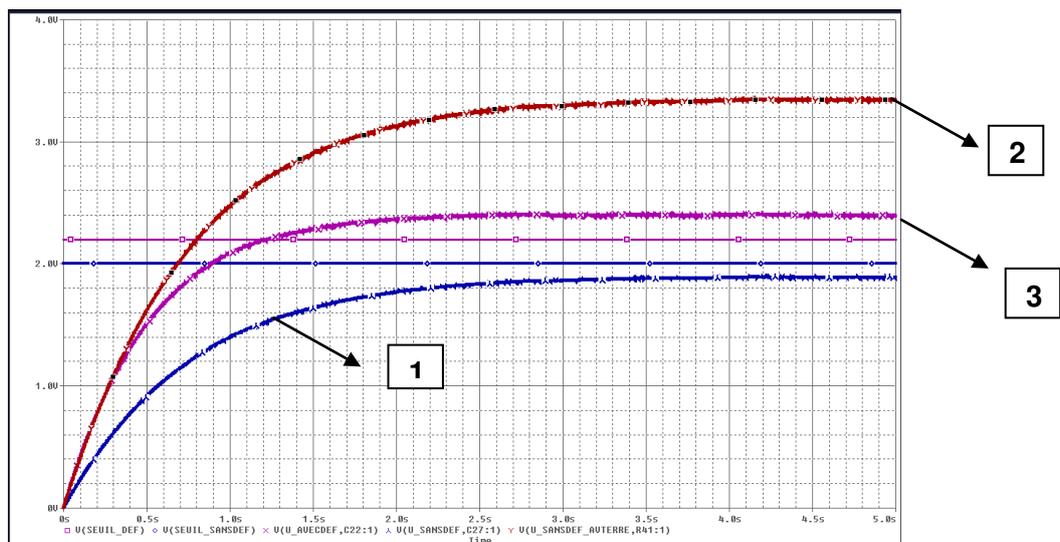


Figura 20 : Gráfico da tensão do capacitor de alimentação

De baixo para cima temos:

- Azul (Curva 1) : Tensão parasita sem perda de vácuo.
- Vermelho (Curva 2): Tensão parasita sem perda de vácuo e com falta monofásica.
- Violeta (Curva 3): Tensão com perda de vácuo.

Percebemos que quando ocorria uma falta monofásica terra, o sensor era acionado incorretamente por causa das grandes tensões parasitas e para corrigir esse problema foi necessário criar um sistema de regulação onde eram colocados dois capacitores em paralelo com os capacitores de medição para reduzir ao máximo a tensão diferencial ( $U_{vácuo} - U_{referência}$ ), como é mostrado em seguida (Figura 21):

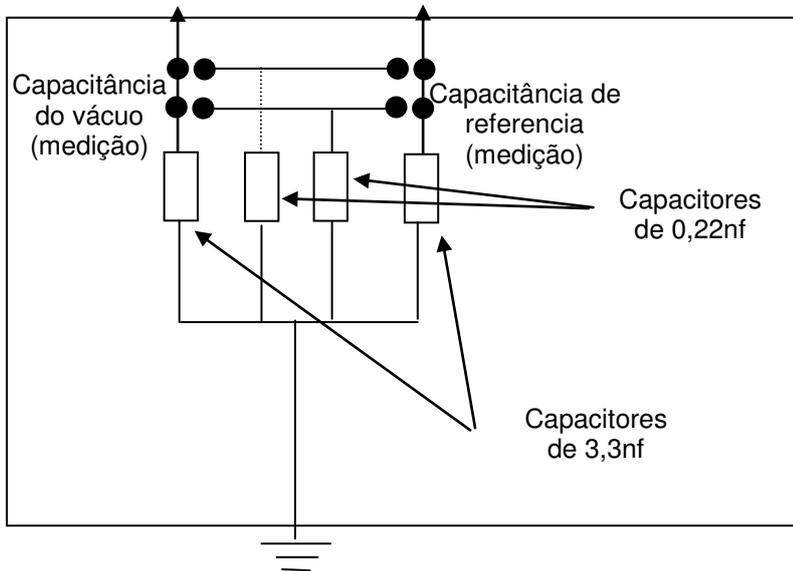


Figura 21 : O sistema de regulação

O resultado da simulação do ATP com o sistema de regulação é mostrado na Figura 22:

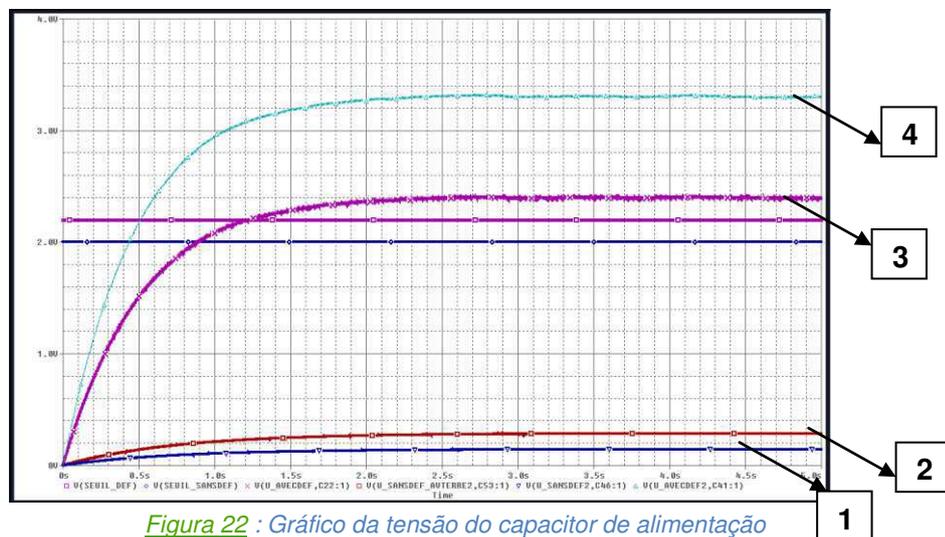


Figura 22 : Gráfico da tensão do capacitor de alimentação com regulação

Observando a figura acima temos as seguintes curvas:

- Azul (Curva 1): Tensão parasita com regulação (2 x 0,22nf em //) sem perda de vácuo
- Vermelho (Curva 2): Tensão parasita com regulação (2 x 0,22nf em //) sem perda de vácuo e com falta monofásica.
- Violeta (Curva 3): Tensão com perda de vácuo (pior caso: simulação anterior, sem regulação).
- Azul claro (Curva 4): Mesma tensão, mas com regulação.

Se compararmos as duas curvas com perda de vácuo, percebemos que a regulação (em azul claro) aumenta o sinal comparado ao sinal sem regulação (violeta).

Notamos também que as tensões parasitas sem perda de vácuo são fortemente atenuadas, a regulação ( $2 \times 0,22\text{nf}$  em //) é muito eficaz.

Então, com um simples princípio de regulação é fácil de obter um bom resultado. Podemos até aumentar o limiar de comparação, porque com uma regulação a tensão com perda de vácuo se torna mais importante.

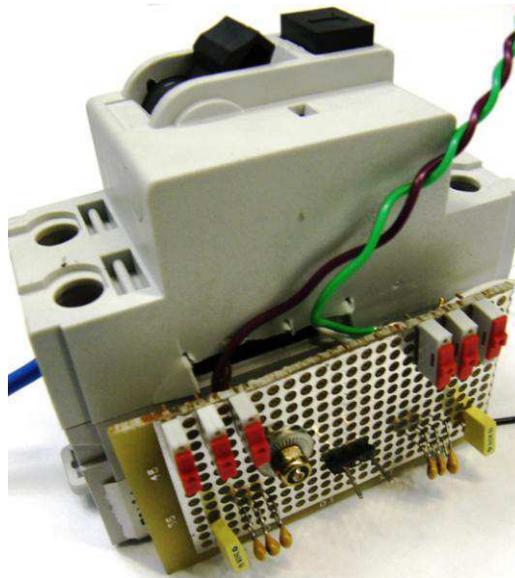
## 6. Testes do sensor de vácuo

Após obter bons resultados do sensor no programa ATP, começamos os testes do sensor na maquete.

### 1) Testes

Depois dos estudos anteriormente mostrados sobre o funcionamento do sensor, um modelo foi construído com os seguintes componentes:

- um disjuntor (acionador) : sua ativação indicava a passagem da pressão pelo mínimo da curva de Paschen (indicando a perda de vácuo).
- uma placa que foi posicionada sobre o disjuntor com os capacitores de regulação.



*Figura 23 : Foto do modelo do Sensor*

A fim de estudar o desempenho na prática das características do sensor foi necessário realizar a análise de três fatores importantes para um bom funcionamento:

- Tempo de resposta do sensor
- Faixa de funcionamento do sensor com diferentes tensões
- Faixa de funcionamento do sensor com os contatos da câmara fechados e abertos.

Para poder fazer um estudo desses fatores utilizamos um circuito auxiliar simples conectado ao disjuntor (sensor), com o objetivo de ter uma resposta rápida no osciloscópio do acionamento do disjuntor:

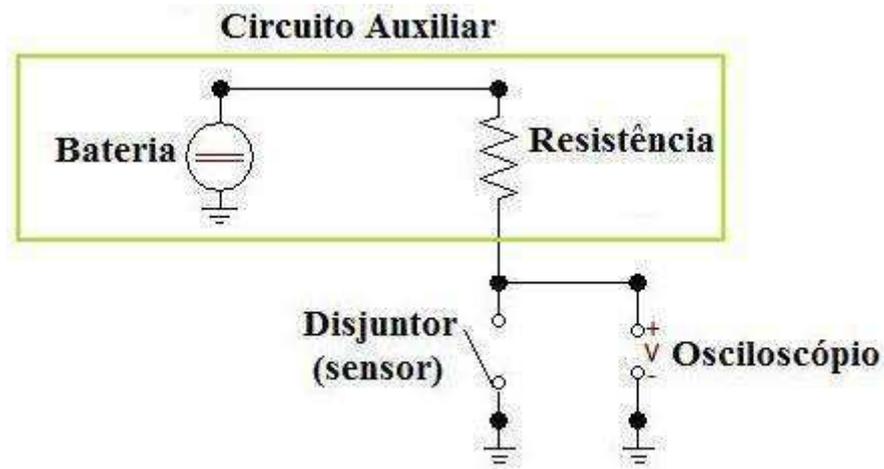


Figura 24 : Circuito auxiliar

Esse circuito auxiliar nos dava o seguinte resultado: em funcionamento normal (sem perda de vácuo) o sensor se encontrava fechado então a resposta no osciloscópio era uma tensão nula. Quando a câmara perdia o vácuo o sensor era acionado (disjuntor abria) fazendo com que o osciloscópio tivesse uma resposta com a mesma tensão da bateria.

Na figura abaixo temos o sensor ligado a câmara e com o circuito auxiliar, podemos observar também as faixas metálicas ligadas na câmara que em seguida são ligadas ao sensor (por fios), sendo ele depois o responsável pela análise da perda de vácuo.

Essas faixas metálicas conectadas à câmara eram responsáveis pela medição da tensão nas regiões metalizadas da câmara.

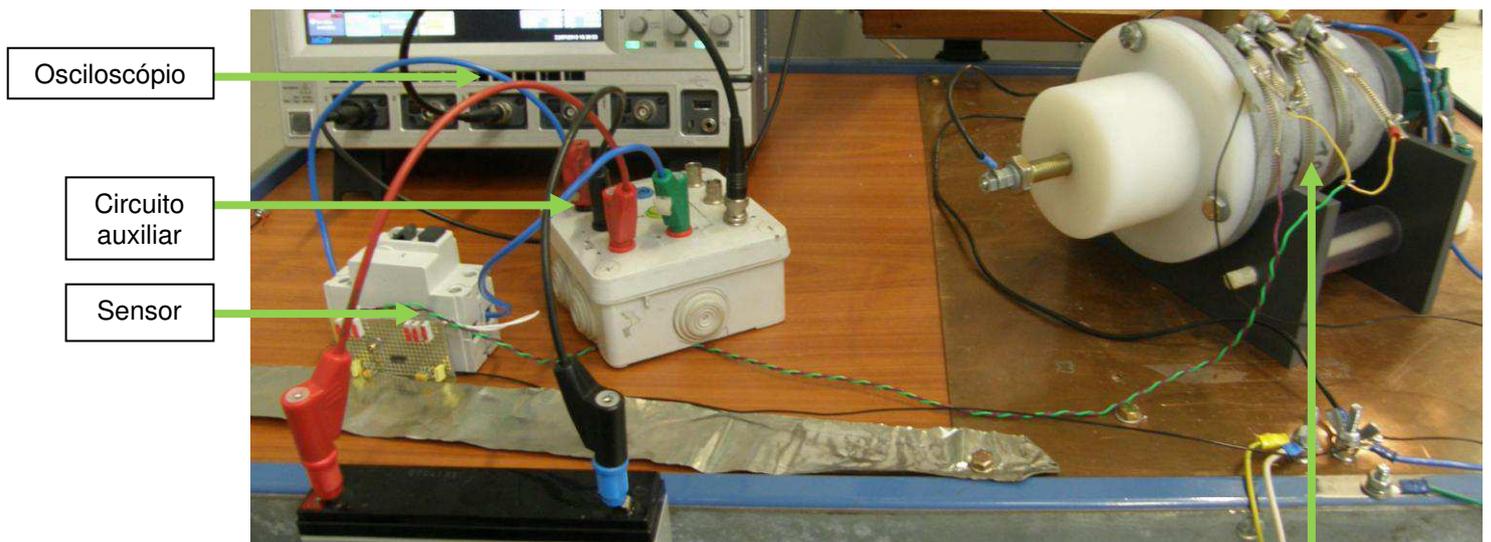


Figura 25 : Foto do sensor ligado a câmara e com o circuito auxiliar

Câmara com as faixas metálicas

Então para um ensaio do tempo de resposta do sensor com uma tensão de 5,8kV e com os contatos da câmara abertos à uma pressão de 0,2mbar (pressão acima da ideal) tínhamos como resultado no osciloscópio a seguinte figura:

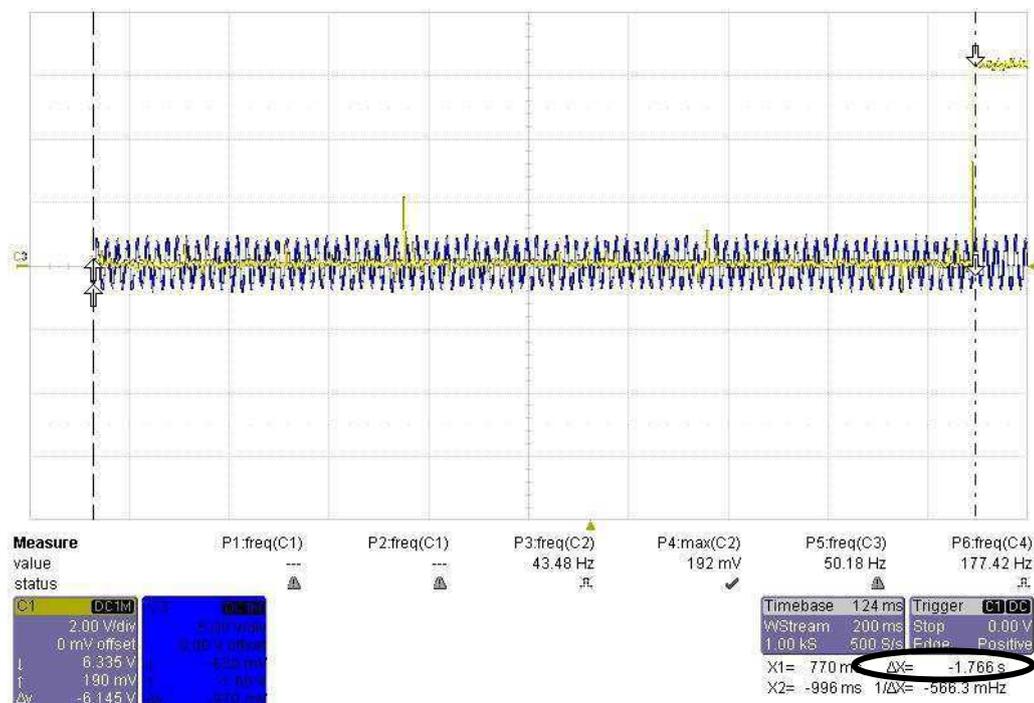


Figura 26 : Ensaio para a medição do tempo de resposta do sensor

Sendo:

- A curva em azul a resposta do divisor de tensão de 5,8kV (senoidal) que começa no momento que é aplicada alta tensão nos contatos da câmara.
- A curva em amarelo a tensão entre os contatos do disjuntor (sensor). Como já era esperado, no início a tensão é nula (contatos do disjuntor estão fechados) e após o seu acionamento (contatos abertos) a tensão é a mesma da bateria do circuito auxiliar.

Então o tempo medido (1,766s) é corresponde à aplicação da tensão até a ativação do sensor.

Após diversos ensaios como o mostrado anteriormente com diferentes pressões, tensões e situação dos contatos foram feitos dois gráficos que continham todas as informações importantes organizadas.

### a) Ensaio com os contatos da câmara fechados

Neste gráfico observamos a faixa de funcionamento do sensor com os contatos da câmara fechados para diferentes tensões e pressões. Cada curva representa uma porcentagem da tensão nominal utilizada.

O acionamento do sensor indica que a câmara não tem uma pressão ideal (vácuo) e a região destacada por linhas vermelhas é onde o sensor não aciona.

Observamos que o tempo de resposta para uma tensão de 120%Un é muito menor que para 80%Un, pois com uma tensão mais elevada a tensão  $U_{\text{vácuo}}$  é maior também. Dessa forma a capacitância (com tensão de  $U_{\text{vácuo}} - U_{\text{referencia}}$ ), relacionada ao acionamento do sensor, se carrega mais rápido ao nível de tensão do acionamento 2,1V.

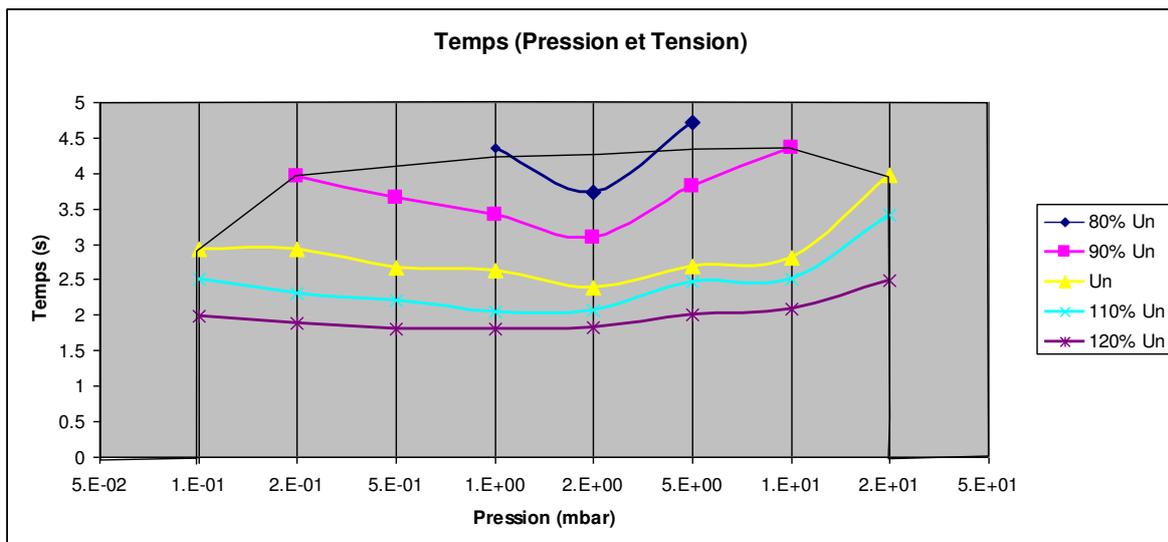


Figura 27 : Gráfico com a faixa de funcionamento do sensor com os contatos da câmara fechados

Como o funcionamento do sensor está diretamente relacionado à curva de Paschen, podemos notar que o sensor tem um bom funcionamento, pois com uma tensão baixa o seu funcionamento será em um trecho mais curto como é mostrado abaixo:

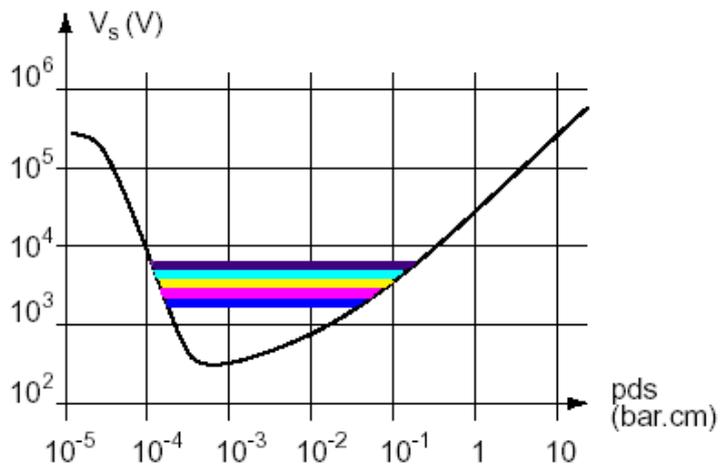


Figura 28 : Gráfico da curva de Paschen com a faixa de funcionamento para diferentes tensões

## b) Ensaio com os contatos da câmara abertos

Neste segundo gráfico temos a faixa de funcionamento do sensor com os contatos da câmara abertos para diferentes pressões. Onde as duas curvas representam os dois lugares de aplicação de tensão na câmara: no contato fixo e no contato móvel.

Como na outra situação o acionamento do sensor indica que a câmara não está com uma pressão ideal e a região destacada por linhas vermelhas é onde o sensor não aciona.

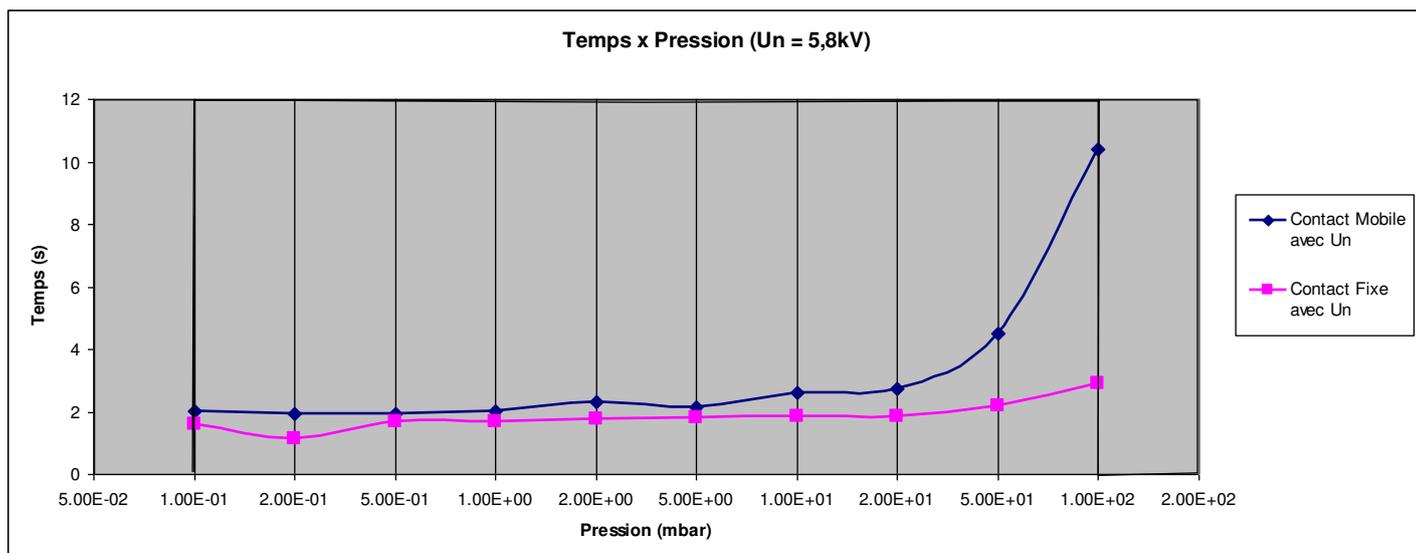


Figura 29 : Gráfico da faixa de funcionamento do sensor com os contatos da câmara abertos

Observamos nos dois casos que o sensor deve estar funcionando sem falhas, pois após certa pressão ele não irá acionar mais.

A fim de evitar falhas no sensor utilizamos um botão de teste para verificar se o sensor está funcionando corretamente. Apertando esse botão o capacitor de medição que está em série com o capacitor de referencia é curto circuitado, isso provoca uma diferença de potencial  $U_{v\u00e1cuo} - U_{referencia}$  e com isso a ativação do disjuntor, indicando um bom funcionamento do sensor.

Os resultados obtidos pelos dois casos mostram um tempo de resposta muito rápido (média de 2 segundos) em relação à necessidade de ser inferior ao tempo mínimo que a câmara se encontra no mínimo de Paschen (2 dias mencionado anteriormente).

Após a realização de todos esses ensaios repetidamente pudemos ver como o sensor se comportava nessas diferentes situações, permitindo então ser feito uma análise das condições limites do sensor em diversas situações como será explicado no próximo tópico.

## 2) Condições limites do sensor

Para analisar as condições limites do sensor supusemos problemas de fabricação com o sensor e com a pressão da câmara.

Pela Tabela 1, notamos que quando o sensor tem um problema de funcionamento podemos facilmente vê-lo através do botão teste instalado no sensor. O procedimento nesses casos é a troca da parte eletrônica do sensor.

Caso	Dois estados do sensor	Pressão na câmara	Procedimento	Acionamento do sensor
1	Ok	Vácuo	-	Não
2	Com defeito na eletrônica		Botão de teste não funciona ↓ Troca da eletrônica do sensor	Não
3	Ok	Mínimo da Curva de Paschen	-	Sim (há perda de vácuo)
4	Com defeito na eletrônica		Botão de teste não funciona ↓ Troca da eletrônica do sensor	Sim (há perda de vácuo)
5	Ok	Atmosférica	-	Sim (há perda de vácuo)
6	Com defeito na eletrônica		Botão de teste não funciona ↓ Troca da eletrônica do sensor	Não

*Tabela 1 : Tabela das condições limites do sensor*

Cada caso acima é explicado detalhadamente abaixo:

- Caso 1: O sensor está funcionando corretamente e a câmara está com vácuo, conseqüentemente não há o acionamento do sensor.

- Caso 2: O sensor não está funcionando corretamente e a câmara está com vácuo, conseqüentemente não há o acionamento do sensor, mas é necessária a troca do sensor (botão teste indica se o sensor tem problema).

- Caso 3: O sensor está funcionando corretamente e a câmara está com pressão no mínimo da Curva de Paschen, conseqüentemente há o acionamento do sensor indicando a perda de vácuo.

- Caso 4: O sensor não está funcionando corretamente e a câmara está com pressão no mínimo da Curva de Paschen, conseqüentemente não há o acionamento do sensor, mas com a troca do sensor ele indicará a perda de vácuo.

- Caso 5: O sensor está funcionando corretamente e a câmara está com pressão atmosférica, conseqüentemente há o acionamento do sensor, pois o sensor irá ser acionado quando da passagem pelo mínimo da Curva de Paschen.

O problema encontrado está no caso 6 (em vermelho) mostrado na Tabela 1, onde a câmara tem pressão atmosférica já na sua fabricação e um sensor com defeito.

Assim, mesmo após a troca do sensor, ele não indicará que há perda de vácuo, pois o sensor foi construído para acionar somente a partir do momento onde a pressão na câmara está no mínimo de Paschen.

Como nessa situação não temos nenhum meio de saber se a câmara tem vácuo ou pressão atmosférica é preciso criar um sistema complementar para o sensor para resolver esse problema.

Claramente essa é uma situação onde o sensor irá falhar, mas podemos notar que o caso 6 é um caso crítico que tem a câmara e o sensor com problemas. Vemos também que apesar dele ser falho nesse caso ele funciona muito bem nos outros cinco casos.

Por isso mesmo com essa falha, um estudo para um bom dimensionamento do sensor na câmara foi iniciado como será mostrado no próximo tópico.

## 7. Dimensionamento do sensor

Após realizar a análise das condições limites do sensor e obter resultados satisfatórios com o sensor, com o auxílio de meu tutor comecei um estudo para construir uma bom dimensionamento do sensor e do boss (região não metalizada que separa as faixas metálicas) na câmara, tendo em conta principalmente o envelhecimento da estrutura da câmara.

As câmaras da Schneider Electric são constituídas principalmente de um material isolante chamado epoxy (polímero) e nesse material deve ser construído o sensor e o boss, a Figura 30 mostra um modelo de como eles vão ser posicionados:

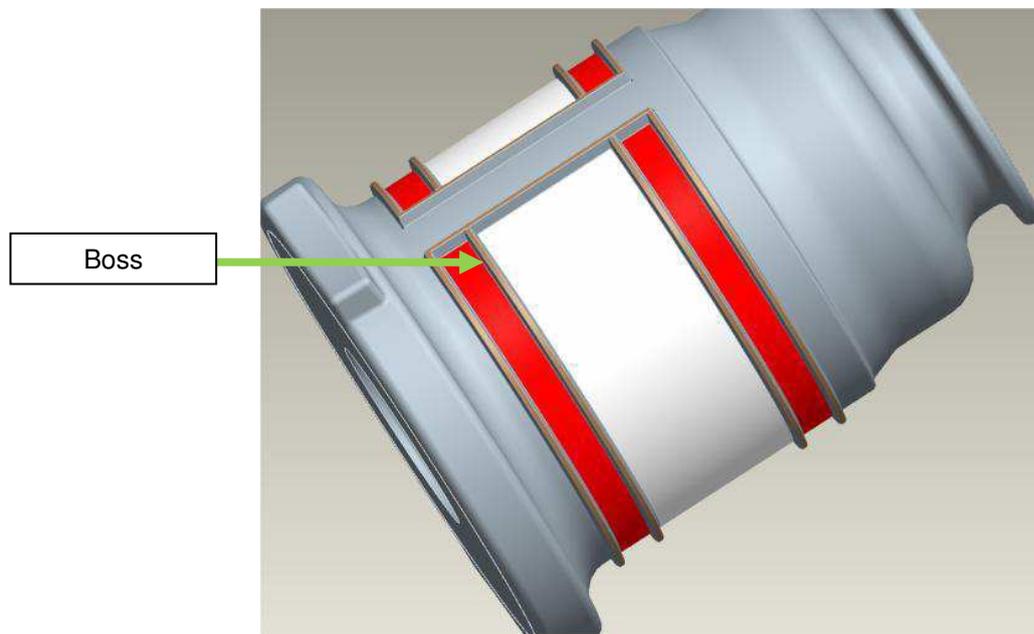


Figura 30 : Dimensionamento do sensor nda câmara

Através de pesquisas e da experiência da Schneider Electric com câmaras, vimos que a grande causa do processo de degradação da câmara está relacionada com o campo elétrico axial.

Através de um guia da Schneider Electric [4] foi retirada uma relação que permite analisar o envelhecimento dos isolantes e ver como ele se comporta o processo de degradação em função do campo elétrico:

$$E = K_d t_d^{-1/r} \quad t_d = c_d E^{-r}$$

Onde:

E : campo elétrico

r : "duração de vida" do isolante

K<sub>d</sub>,c<sub>d</sub> :

constantes

Essa relação mostra que a duração de vida de um isolante decresce numa potencia de r com o campo elétrico. Assim para obter uma boa modelização devemos ter uma câmara com o mínimo de campo elétrico obtendo desse modo um baixo envelhecimento.

Para isso utilizamos duas ferramentas computacional Flux 2D e Flux3D que consistem em elaborar programas que efetuam cálculo que utilizam o método dos elementos finitos. Tais sistemas de cálculo possibilitam o estudo eletromagnético na estrutura do dispositivo tanto na forma qualitativa quanto na forma quantitativa.

Neste programa existem três etapas que devem ser obedecidas para a geração do sistema de cálculo de campo:

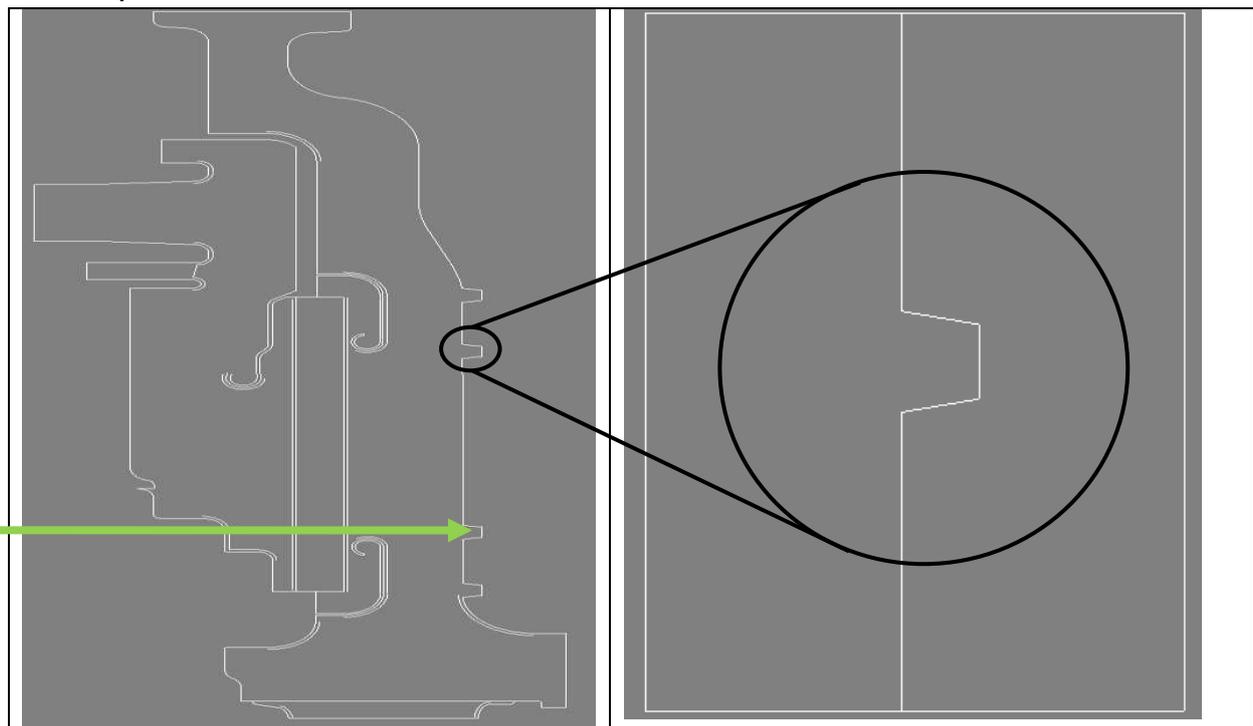
- Subsistema de entrada: nesta etapa é fornecida a geometria do sistema seção por seção, construindo a figura passo a passo. Aqui também são definidos as propriedades físicas da estrutura e as condições de contorno (potencial).

- Solução de equações: o processador computacional trabalha na solução de sistema de equações não lineares usando a estrutura de dados do subsistema de entrada.

- Pós-processamento: nesta etapa analisam-se os resultados na forma visual e na forma numérica.

Na fase de pós-processamento o traçado das linhas equipotenciais e a intensidade do campo elétrico foram apresentados nas formas visual e numérica. Uma explicação mais detalhada da modelagem matemática utilizada pelo programa está em anexo.

Através do programa FLUX2D, foi simulada com diferentes valores a altura e a largura do boss em função do campo elétrico axial numa simplificação da câmara (com uma tensão de 8,9kV), como é mostrado na Figura 31:



*Figura 31 : Simplificação da câmara e vista ampliada do boss*

Através dos resultados do programa foi feita uma análise do comportamento das linhas equipotenciais e do campo elétrico axial na superfície na câmara (Figura 32):

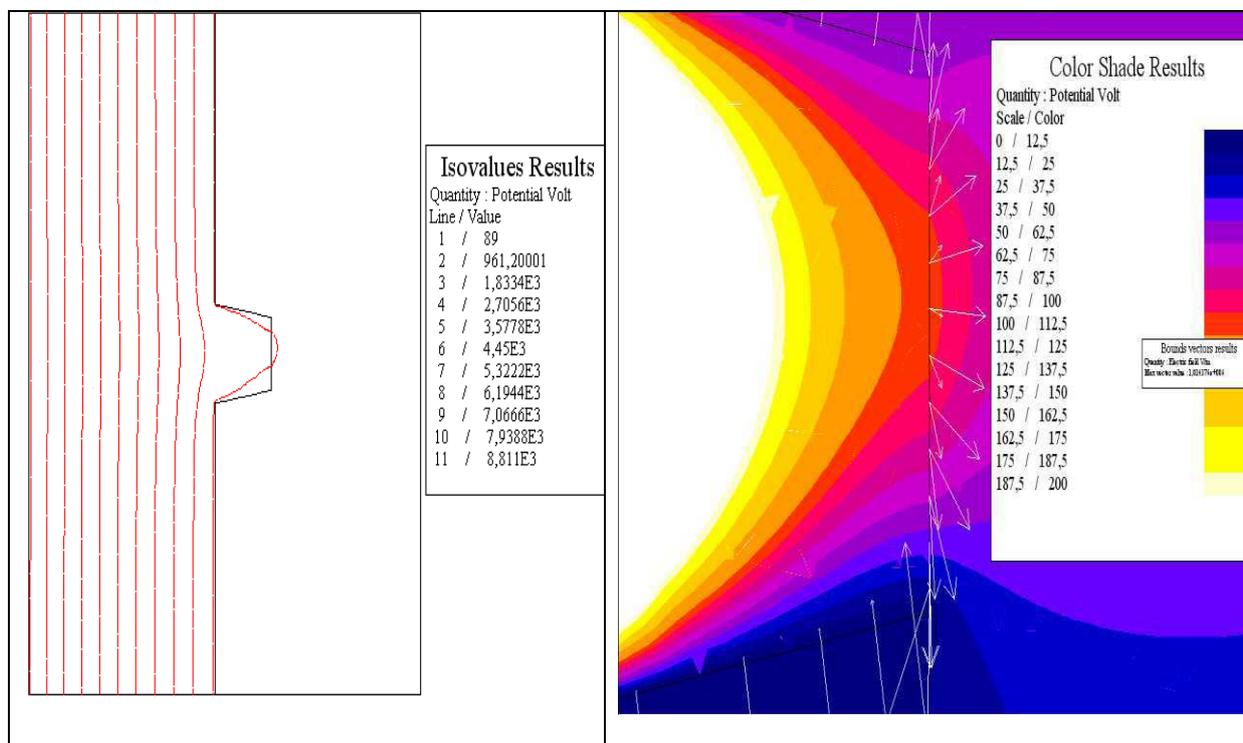


Figura 32 : Linhas equipotenciais e o campo elétrico axial na câmara (Flux2D)

O resultado acima é uma das respostas do programa para  $D=3\text{mm}$  e  $H=3\text{mm}$ , através dela podemos encontrar os valores de tensão e campo elétrico na superfície do boss (tensão de  $8,9\text{kV}$  nos contatos). Variando para diferentes valores de  $D$  e  $H$  encontramos os seguintes resultados:

	D=1 (mm)			D=2 (mm)			D=3 (mm)		
	H=1	H=2	H=3	H=1	H=2	H=3	H=1	H=2	H=3
<b>POTENCIAL (V)</b>	54,5	49,9	49,9	190,61	80,87	51,21	401,36	193,81	106,98
<b>CAMPO (V/mm)</b>	154,31	83,22	70,92	382,38	151,7	81,87	597,32	288,1	155,07

Tabela 2 : Tabela dos resultados obtidos com o programa Flux 2D

Através novamente do guia da Schneider Electric [4] retiramos que o campo elétrico máximo aconselhável na superfície de isolantes sobre tensão de serviço é de  $70\text{ V/mm}$ , portanto o melhor valor encontrado pela tabela acima é de  $D=1\text{mm}$  e  $H=3\text{mm}$ , onde o campo elétrico é o mínimo.

Após o fim das medições com o programa FLUX2D foi utilizado um programa de análise de dados chamado Design Expert (DX5) para encontrar o valor mais adequado para  $H$  e  $D$  do boss utilizando os valores acima encontrados como dados.

Com o resultado desse programa vimos que o ideal seria ter um pequeno D e um grande H, mas como isso implicaria num risco maior de quebra da estrutura (boss), pois ela se tornaria mais frágil. Esse resultado pode ser visto na Figura 33.

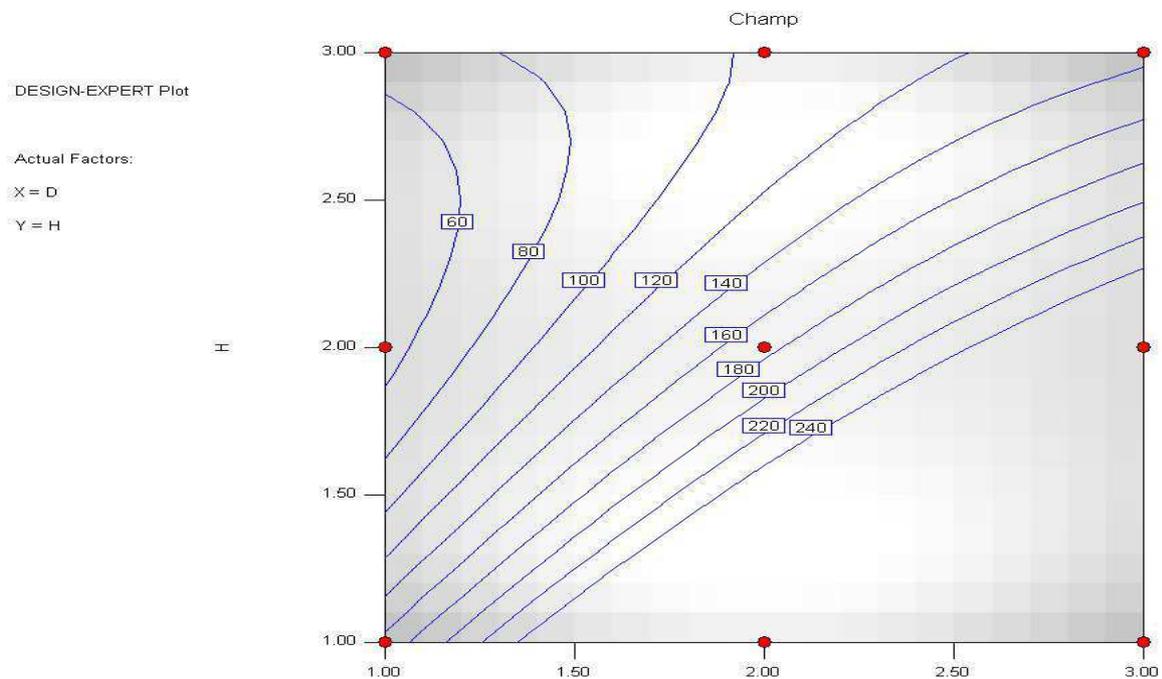
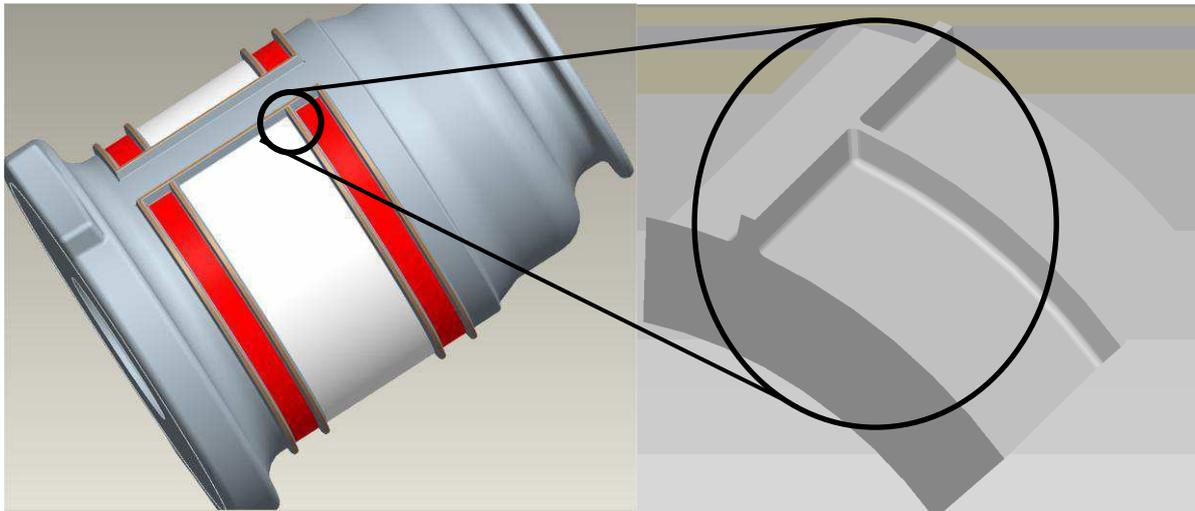


Figura 33: Análise dos resultados no DX5

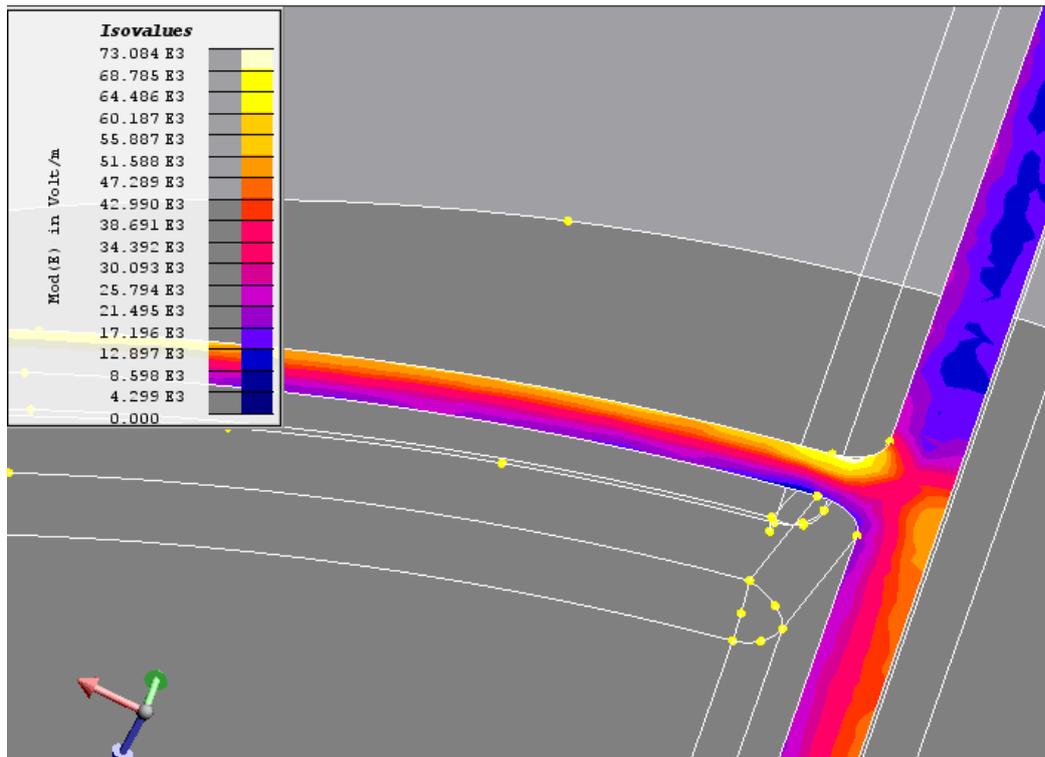
Por isso devemos analisar cuidadosamente esses valores, pois fazendo uma estrutura mais frágil teremos baixos valores de campo elétrico axial e conseqüentemente um baixo envelhecimento da estrutura. Por outro lado se fizermos uma estrutura mais robusta teremos altos valores de campo elétrico axial e conseqüentemente um alto envelhecimento da estrutura.

A fim de obter um resultado mais exato, foi feita uma simulação no programa FLUX3D, onde se tinha uma aproximação melhor da estrutura. Para isso foi utilizado uma simplificação da câmara (Figura 34).



*Figura 34 : Simplificação da câmara (Flux 3D) e vista ampliada do boss*

Utilizando um  $D=1,5\text{mm}$  e  $H=3\text{mm}$  para o boss encontramos um campo elétrico máximo de  $73\text{ V/mm}$  entre o boss e a terra. Então esse resultado nos mostra que encontramos bons resultados para  $H$  e  $D$ , pois eles têm um campo elétrico aceitável na superfície da câmara, permitindo a implantação do sensor na câmara (Figura 35).



*Figura 35 :Campo elétrico no boss*

## 8. Conclusão e Perspectivas

Esse estágio tinha como objetivo principal criar um sensor capaz de detectar a perda de vácuo de uma câmara de disjuntor a vácuo.

Inicialmente foi construída uma maquete que criava as condições reais de pressão e tensão em uma câmara de disjuntor a vácuo para a realização de uma série de testes do sensor.

Em seguida um modelo do sensor foi desenvolvido e testado para diversas configurações como o tempo de resposta em função da tensão, da pressão e da situação dos contatos da câmara. Após inúmeros ensaios mostramos que a resposta do sensor é muito rápida comparada ao tempo exigido. Na análise de confiabilidade do sensor vimos que ele tem um bom funcionamento, mas que em um dos seis casos testados ele é falho, sendo esse caso uma situação crítica.

Depois com ajuda de meu tutor fizemos uma modelização do sensor na câmara, onde encontramos bons resultados para o campo elétrico em sua superfície, o que significa uma redução do envelhecimento da câmara.

Os resultados obtidos podem ser utilizados na indústria reduzindo os riscos de acidentes e conseqüentemente melhorando a qualidade do produto.

Sobre o balanço pessoal, esse estágio permitiu-me misturar com pessoas de diversas profissões que me instruíram com seus conhecimentos e experiência. Nele eu pude também ter minha primeira experiência profissional numa empresa de grande porte e sentir como é a organização dessas empresas.

Por fim esses cinco meses na Schneider Grenoble 38V Varces foram muito agradáveis. E o assunto do estágio foi muito interessante e instrutivo. Além disso, pude melhorar meu francês, compreender e apreciar uma nova cultura.

## 9. Referências Bibliográficas

1. Cahier technique no. 198  
Vacuum switching (Schneider Electric)
2. Rapport de Stage de Dimitri SOUKOULIS
3. Partial Discharge Properties and Gas Decomposition Analysis of Environmental Friendly Gas Insulation Media as a Basis of Diagnostic Technique Development  
Mohamad Kamarol bin Mohd Jamil ( Kyushu Institute of Technology)
4. Guide de Conception Electrique / Moyenne Tension / Module Diélectrique  
F. Trichon / C. Gaillac Novembre 99 (Schneider Electric)
5. Synthèse de l'étude de surveillance du vide  
Pascal HOUBRE (Schneider Electric)

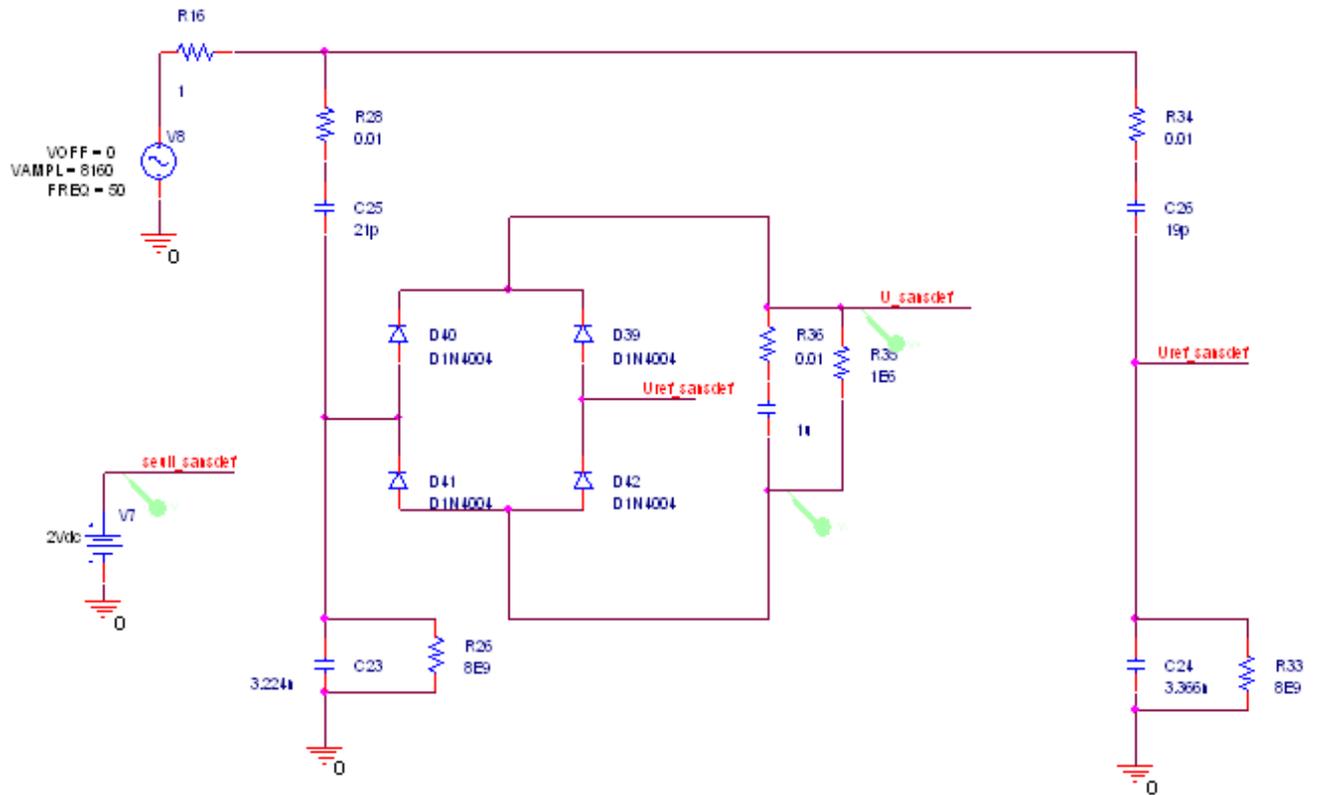
## Anexos

### ANEXO 1 : LISTA DE COMPONENTES DA MAQUETE DO SENSOR

Componentes	Quantidade	Tipo/ Calibre	Tensão de entrada	Tensão de saída	Potência
Disjuntor	2	16A	230V	230V	
Relés	1	Bipolar N/O	230V	230V	3VA
Fusíveis	15	60A	32V		
Transformadores	1		220V	24Vcc	3000VA
Baterias	2	Batterie au plomb		12Vcc	78Ah
Carregador	1		230V	6/12/24V DC	350W
Transistor N	20	ID max=10A			
Auto Transfo	1		230V		1920 VA
Transfo Isolamento	1		230V		1000VA
Transformador de Potencia	1	20 KV/ 200V	230V	20KV	250VA
Bomba à palette	1		230V		350W
Cofre elétrico	1				
Conversor	1		24V DC	5 V DC	
Conversor	1		22=>30 V DC	230V AC	1500 W
Fusíveis	15	12A			
Jauge piranni	1	TPR 265	24V DC		
Interruptor Diferencial	3	25A /240 V/10 ma			
Bateria	1	6 V			

## ANEXO 2 : CIRCUITO DO SENSOR

Circuito do sensor:



### ANEXO 3 : TABELA COM OS RESULTADOS DOS ENSAIOS DO SENSOR

Contatos do disjuntor fechados :

Un(V)/ P (mbar)	5.00E- 02	1.00E- 01	2.00E- 01	5.00E- 01	1.00E+ 00	2.00E+ 00	5.00E+ 00	1.00E+ 01	2.00E+ 01	5.00E+ 01
4640					4.35	3.74	4.72			
5220			3.95	3.66	3.41	3.1	3.81	4.36		
5800		2.94	2.93	2.67	2.63	2.38	2.7	2.82	3.98	
6380		2.51	2.3	2.21	2.04	2.06	2.46	2.51	3.42	
6960		1.99	1.88	1.8	1.8	1.82	2	2.09	2.48	

Contatos do disjuntor abertos, com o contato fixo com alta tensão :

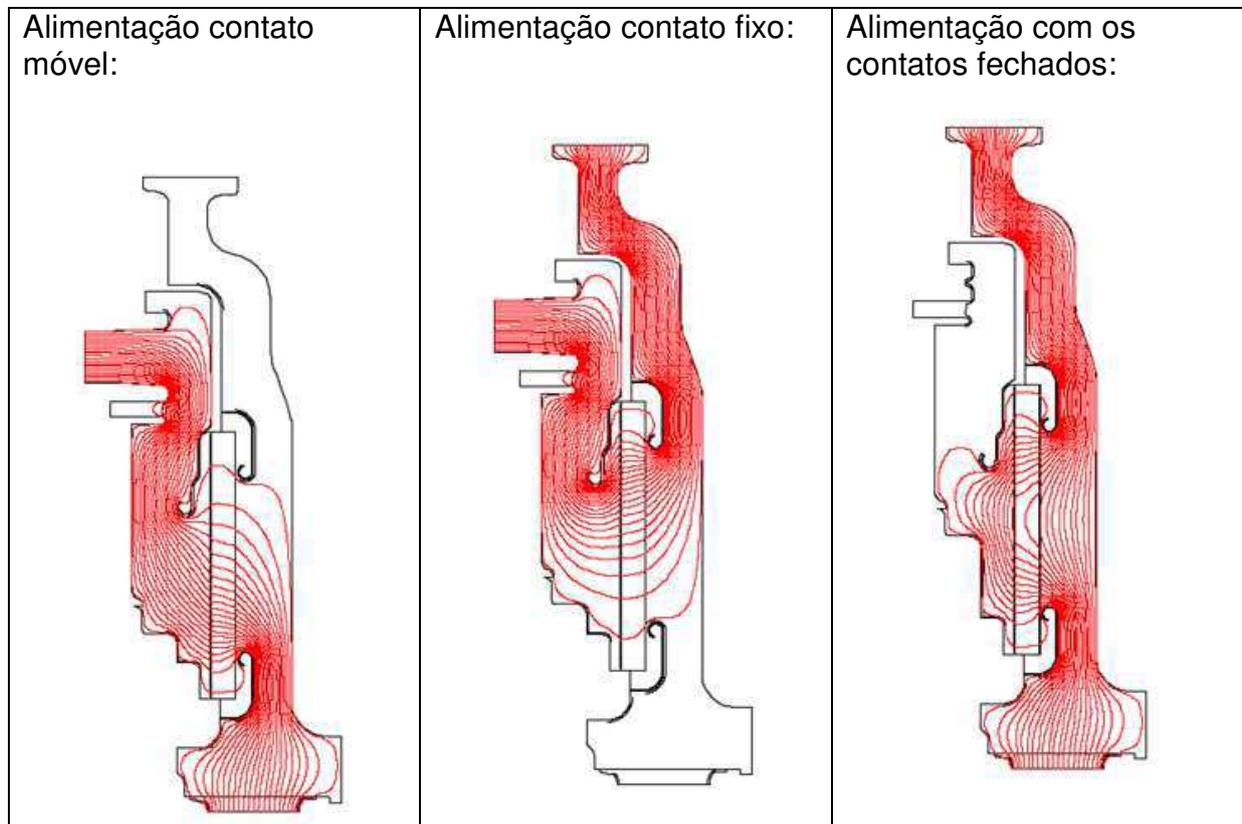
Un(V)/ P (mbar)	5.00E -02	1.00E -01	2.00E -01	5.00E -01	1.00E +00	2.00E +00	5.00E +00	1.00E +01	2.00E +01	5.00E +01	1.00E +02	2.00E +02
5800		1.59	1.15	1.69	1.68	1.78	1.79	1.85	1.86	2.18	2.92	

Contatos do disjuntor abertos, com o contato móvel com alta tensão :

Un(V)/ P (mbar)	5.00E -02	1.00E -01	2.00E -01	5.00E -01	1.00E +00	2.00E +00	5.00E +00	1.00E +01	2.00E +01	5.00E +01	1.00E +02	2.00E +02
5800		2.04	1.95	1.94	2.01	2.3	2.15	2.59	2.73	4.5	10.42	

## ANEXO 4 : DISTRIBUIÇÃO DAS LINHAS EQUIPOTENCIAIS

Imagens do programa Flux2D



## ANEXO 5 : MODELAGEM MATEMÁTICA USADA PELO PROGRAMA FLUX 2D/3D

Na fase de pós-processamento são utilizadas as seguintes equações de Maxwell para baixas frequências:

$$\begin{aligned}\text{rot } \mathbf{H} &= \mathbf{J} \\ \text{div } \mathbf{B} &= 0 \\ \text{rot } \mathbf{E} &= - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \text{div } \mathbf{D} &= \rho\end{aligned}$$

As relações constitutivas são:

$$\begin{aligned}\mathbf{B} &= \mu \mathbf{H} \\ \mathbf{D} &= \varepsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E}\end{aligned}$$

O método dos elementos finitos aplicado no programa trabalha com potenciais em vez de campos. Os campos são calculados no pós-processamento pela equação abaixo:

$$\mathbf{E} = -\text{grad } V$$

Em nosso caso em cada potencial divergente da densidade de superfície do campo elétrico é nulo, de acordo com a equação abaixo:

$$\text{div } \mathbf{D} = 0$$

Desde que os campos sejam gerados pela diferença de potenciais em vez da densidade de carga dentro do domínio. Usando a relação:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$$

e da equação acima, obtemos:

$$\text{div } (\varepsilon \mathbf{E}) = 0$$

$$\text{div } (\varepsilon (-\text{grad } V)) = 0$$

Que resulta na equação de Laplace:

$$\frac{\partial}{\partial x} \varepsilon \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \varepsilon \frac{\partial V}{\partial y} = 0$$

Essa equação é resolvida pelo método dos elementos finitos. Uma vez resolvido o pós-processador pode calcular os campos em qualquer ponto do domínio