Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Estudo e desenvolvimento de dispositivos de proteção contra correntes residuais em sistemas de distribuição c.c.

Mariana Batista Lima

Orientador: Prof[a]. Tiago Ribeiro de Oliveira, Dr[o].

Belo Horizonte, Novembro 2017

Monografia

Estudo e desenvolvimento de dispositivos de proteção contra correntes residuais em sistemas de distribuição c.c.

Monografia apresentada durante o Seminário dos Trabalhos de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Belo Horizonte, Novembro de 2017

Resumo

O crescente consumo de energia e eminente preocupação com fontes de energia ambientalmente coerentes fazem com que novas maneiras de geração de energia sejam desenvolvidas e, juntamente com essas mudanças, são adotados ou cogitados novos métodos de transmissão e distribuição. Dentre tais métodos podem-se citar a transição do modelo atual da rede elétrica para um conceito de Rede Inteligente, ou Smart Grid, uma maior penetração de geração distribuída no sistema de distribuição e a evolução das microrredes. Além disso, o desenvolvimento da eletrônica de potência e menor distância entre os centros de geração e os centros consumidores, viabiliza a distribuição em corrente contínua. Nesse sentido, a distribuição em corrente contínua de baixa tensão em ambientes comerciais e residenciais, que representam cerca de metade dos consumidores brasileiros, poderia reduzir perdas energéticas, melhorar a integração com fontes alternativas e acumuladores de energia, como, também, um controle de fluxo de potência simplificado, em relação ao sistema c.a.. Entretanto, será necessário que medidas de proteção sejam desenvolvidas para que nanorredes c.c. se tornem factíveis. Uma das questões relativas a proteção é contra correntes residuais, o que protegeria o sistema de qualquer corrente de fuga, inclusive, choques elétricos. Esse trabalho tem por objetivo propor um dispositivo de proteção contra correntes residuais em microrredes c.c., visando a eliminação do risco de acidentes causados por essas, como, por exemplo, choques elétricos. Como premissa para a especificação e desenvolvimento deste dispositivo, utilizaram-se propostas de arquitetura de nanorredes c.c. residenciais atualmente disponíveis na literatura.

Palavras-chaves: distribuição. cc. proteção. microrredes. nanorrede smartgrid.

Agradecimentos

Agradeço à minha família, ao meu pai Veimilson, meu irmão Mateus e, em especial, à minha mãe, Idelma, por toda a paciência durante o curso, enquanto, por muitas vezes, os trabalhos e provas me levaram ao meu limite e precisei de apoio, carinho e puxões de orelha que aumentaram a minha determinação em fazer o melhor que eu podia. Gratidão também ao meu namorado, Marcus, que compreendeu que o tempo estava curto, mas manteve-se ao meu lado até mesmo nos momentos de confecção desse texto, às minhas avós, aos meus amigos Jefferson, Camila e Lucas que foram minhas estrelas guias durante o curso. Agradecimentos ainda ao meu orientador, Thiago Ribeiro, que de prontidão me deu todo apoio para que o melhor fosse feito. Agradeço a Deus por seu meu sustento e maior amigo. A minha fé, apesar de tão pequena se comparada ao grão de mostarda, me trouxe até aqui.

Sumário

Resumo i

Agradecimentos iii

Lista de Figuras viii

Lista de Tabelas ix

1 Introdução 1
- 1.1 Contextualização . . . 1
- 1.2 Nanorredes c.c. . . . 2
- 1.3 Proteção contra choques em nanorredes c.c. . . . 4
- 1.4 Dispositivos DR C.C. (Estado da arte) . . . 6
- 1.5 Objetivos . . . 7
- 1.6 Metodologia . . . 7
- 1.7 Organização do trabalho . . . 7

2 Corrente Residual 9
- 2.1 Sensores de corrente contínua . . . 10
  - 2.1.1 Sensor de Efeito Hall . . . 10
  - 2.1.2 Sensor Fluxgate . . . 11
- 2.2 Escolha do núcleo . . . 14
- 2.3 Simulação . . . 16
  - 2.3.1 Resultados . . . 17
  - 2.3.2 Obtenção da corrente . . . 19
  - 2.3.3 Testes no processo de filtragem . . . 19
  - 2.3.4 Análise de resultados . . . 22

3 Dispositivo diferencial residual c.c. (DR) 23
- 3.1 Chave de estado sólido . . . 23
- 3.2 Simulação . . . 25
  - 3.2.1 Análise do risco de choque . . . 26
  - 3.2.2 Análise do *Snuber* em sobretensões . . . 28
  - 3.2.3 Análise de resultados . . . 30

4 Conclusões 33
- 4.1 Proposta de continuidade . . . 33

Referências Bibliográficas **34**

Lista de Figuras

1.1 Modelo de microrrede c.a. 3
1.2 Modelo de nanorrede c.c. 3
1.3 Curva característica de duração da exposição x corrente de exposição 4
1.4 Impedância corporal x tensão de toque (Condições: seco e mão a mão) . . 6

2.1 Modelo de funcionamento de Efeito Hall 10
2.2 Modelo de sensor baseado no Efeito Hall 11
2.3 Modelo de sensor baseado no Fluxgate 11
2.4 Forma de onda da tensão no resistor de amostragem na saída para I=0 A . . 12
2.5 forma de onda da tensão no resistor de amostragem na saída para I=2 A . . 12
2.6 a) Núcleo do Fluxgate de núcleo aberto b) Núcleo do Fluxgate de núcleo fechado 13
2.7 Modelo de sensor Fluxgate com dois núcleos 14
2.8 Modelo de associação de núcleos do sensor Fluxgate com até 3 toroides . . 14
2.9 Gráfico da histerese 15
2.10 Modelo de fluxgate comercial da família do MMT520T35.31.4N 15
2.11 Característica do modelo de fluxgate comercial da família do MMT520T35.31.4N 16
2.12 Curva de histerese do modelo de fluxgate comercial da família do MMT520T35.31.4N 16
2.13 Modelo de sensor fluxgate simulado utilizando o MMT520T35.31.4N . . . 17
2.14 a) Ientrada b) Isaída c) Vsaída 18
2.15 Curva da corrente de excitação do sensor. 18
2.16 Filtro passa baixa 1kHz 20
2.17 Filtro passa baixa 320Hz 20
2.18 Integrador 0,1s 21
2.19 Integrador 0,25s. 21
2.20 Integrador 1s 22

3.1 a)Curva B ; b)Curva C 24
3.2 Exemplo de implementação de chaves de estado sólido c.c. 24
3.3 Circuito completo contendo sensor, chaves e cargas 25
3.4 Circuito DR 26
3.5 Curvas do circuito completo a) Corrente do sensor b) Tensão de sáida c) Corrente residual d) Corrente de choque 27
3.6 Curva da Corrente de choque 27
3.7 Curva da sobretensão nas chaves sem a utilização do circuito *Snuber*. . . . 28
3.8 Curva da sobretensão nas chaves para R=20Ω e C=820nF 29
3.9 Curva da sobretensão nas chaves para R=50Ω e C=820nF 29

3.10 Curva da sobretensão nas chaves para R=100Ω e C=820nF 30
3.11 Curva da sobretensão nas chaves para R=20Ω e C=320nF 31
3.12 Curva da sobretensão nas chaves para R=20Ω e C=1600nF 31

Lista de Tabelas

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

A economia mundial tende a crescer 3,5 % a cada ano entre 2013 e 2030, o que representa a duplicação do setor econômico no período de 20 anos. Além disso, há indiscutível crescimento da população mundial [1]. O desenvolvimento econômico e populacional traz consigo a elevação da demanda de energia elétrica resumidamente em duas razões. Primeiro, devido ao maior poder aquisitivo dos consumidores tendo acesso a mais eletrônicos e, também, a demanda por energia industrial devido ao maior consumo de produtos e serviços[1]. A segunda razão, o aumento do número de consumidores eleva a demanda energética. No Brasil espera-se crescimento de consumo de 50,6 % entre os anos de 2015 e 2024 [1]. Consequentemente, o aumento do consumo de energia é razão para o desenvolvimento de novas técnicas de geração, transmissão e distribuição da energia elétrica, capazes de suprir as altas demandas mundiais, garantindo a confiabilidade e eficiência do sistema.

Além disso, a preocupação em buscar meios ambientalmente mais corretos torna os meios de geração alternativa, como solar e eólica, tendências da atualidade. Entretanto, grande parte desses modelos de geração contam com comportamento intermitente o que dificulta uma alta penetração dessas fontes nas redes de transmissão e distribuição em corrente alternada [1], método mais utilizado atualmente, pois poderiam gerar variações de tensão, congestionamento de linhas, interferência na coordenação de proteção, etc...[1]. Visando sanar esses efeitos, várias tecnologias são cogitadas e dentre elas uma de grande popularidade é a transmissão e distribuição c.c. (em corrente contínua), pois se adequa mais a variação de potência transportada [8]. Neste novo contexto, as microrredes em corrente contínua, normalmente associadas a instalações residenciais e comerciais, possibilitam também um significativo aumento da eficiência energética das instalações e simplicidade na gestão da energia.

Do mesmo modo, nanorredes c.c. poderiam ser coerentes com a transição do sistema para redes inteligentes, SmartGrid, que consiste de tecnologias utilizadas para controle e uso mais eficiente da energia, geração distribuída, modelo de geração mais próxima aos centros consumidores com intuito de diminuir as redes de transmissão, onde há grande perda de energia inerente ao sistema, cerca de 17 % no caso do Brasil [1], aumento das redes duais, onde instalações são fornecedoras além de consumidoras, e a diminuição do número de conversores de energia visto que grande parte dos equipamentos eletrônicos de residências e instalações comerciais utilizam corrente contínua e outros, apesar de c.a. podem ser

adequados para c.c.[8]. Adicionalmente, com base nas demandas futuras de energia que incluem carros elétricos e híbridos como meios de transporte comuns, por exemplo, poderiam ser considerados meios de armazenamento no caso de energia sobressalente nas microrredes c.c. [1]. Consequentemente, todos esses fatores fomentam os estudos e desenvolvimento de nanorredes c.c..

Entretanto, por se tratar de um novo modelo de distribuição de energia em instalações residenciais e comerciais, as microrredes c.c. ainda não dispões de padrões e normas que norteiem o seu projeto e desenvolvimento [1]. Para permitir a adoção desses sistemas no médio prazo, atualmente diversos consórcios empresariais e associações ao redor do mundo trabalham na proposição de padrões para distribuição c.c. em edifícios residenciais e comerciais, dos quais se destacam os padrões da Emerge Alliance, IEEE DC@Home e os datacenters c.c. desenvolvidos pela empresa de TI japonesa NTT. Apesar desses esforços, questões de segurança de instalações c.c. ainda carecem de maior desenvolvimento e estudo. Neste sentido, este trabalho se propõe a contribuir com esta área ao estudar e desenvolver (em nível de simulação) um dispositivo de proteção contra correntes residuais em instalações c.c. capaz de proteger seus ocupantes contra os riscos de choques elétricos.

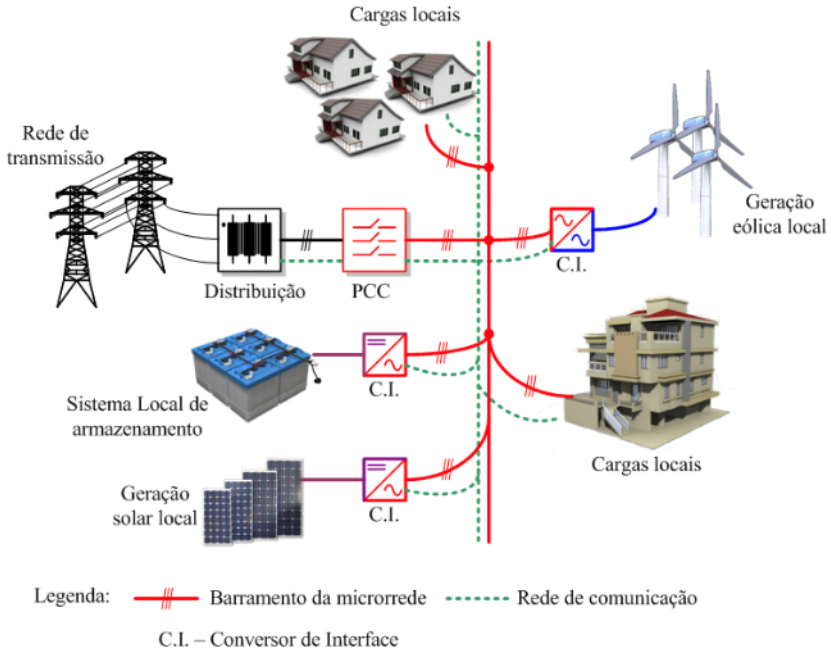
1.2 Nanorredes c.c.

As microrredes são redes inteligentes que se caracterizam por serem sistemas de geração distribuída, cargas locais e armazenamentos podendo operar de modo ilhado ou conectado em relação à rede de distribuição das concessionárias de energia [1]. Eles podem ou não serem integrados ao sistema e, neste contexto, se adequam ao que esse trabalho se propõe a desenvolver. A Figura 1.1 ilustra uma microrredes c.a. destacando seus principais elementos. Note que a interligação entre a rede local e rede da concessionária se dá por meio de um ponto de conexão comum (PCC) e a interligação das unidades de geração e armazenamento com o barramento principal é feita por meio de conversores estáticos.

As microrredes c.c. normalmente se associam a ambientes comerciais e residenciais, sendo em alguns casos também referenciadas como nanorredes, quando a potência instalada é inferior a 25 kW [1]. Esse tipo de consumidor representa cerca de 40 % do sistema brasileiro e é, portanto, muito influente para a matriz energética, em outras palavras, uma mudança na realidade dessas instalações pode ser decisiva para o aperfeiçoamento do sistema elétrico [1]. Podemos destacar diversas vantagens de se adotar microrredes, por exemplo, possibilidade de lidar com falhas no restante da rede, manutenção de confiabilidade de abastecimento, melhor planejamento de demanda e geração, assim como, acréscimo na possibilidade de implantação de fontes alternativas e renováveis de maneira distribuída [8]. Devido ao fato de a maioria dos equipamentos eletrônicos presentes em ambientes residenciais e comerciais trabalharem com tensão em corrente contínua internamente, assim como fontes alternativas e acumuladores de energia necessitam de um estágio de conversão em corrente contínua para se integrarem à rede de distribuição, o uso de um barramento c.c. na instalação permite reduzir o número de conversões de energia existentes e com isso reduzir perdas. A Figura 1.1 mostra um exemplo de arquitetura de nanorrede c.c., a qual será utilizada como base para as discussões acerca da segurança em instalações c.c.

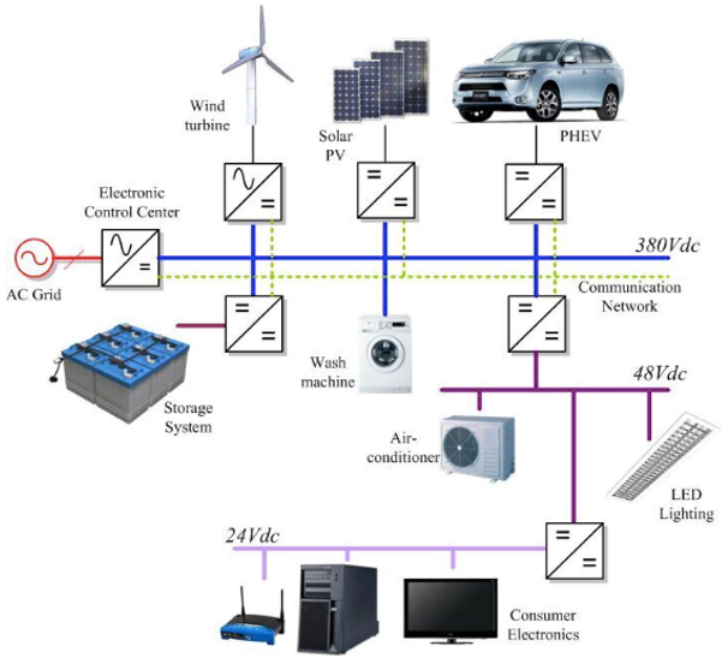
Note que a nanorrede da Figura 1.2 possui uma conversão simbólica no inicio, portanto, não será considerado no presente trabalho o modelo de distribuição utilizado anteriormente a este ponto.

Figura 1.1: Modelo de microrrede c.a.



Fonte: [1]

Figura 1.2: Modelo de nanorrede c.c.

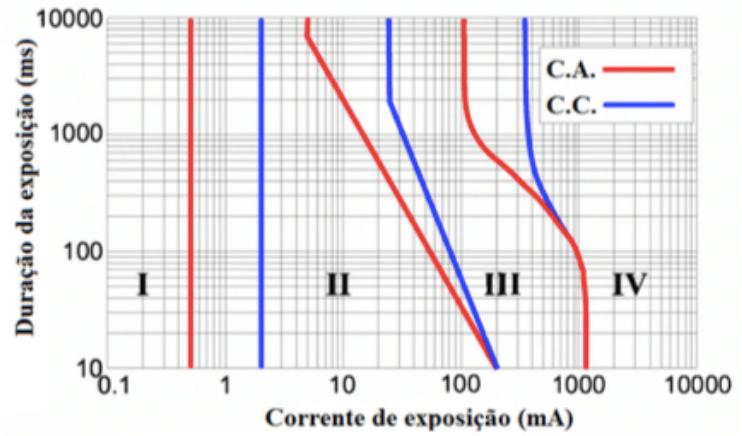


A nanorrede em questão possui um barramento principal de 380V (nível de tensão utilizado como referência pela maioria dos padrões e trabalhos disponíveis na literatura atual), ao qual se interligam os principais elementos do sistema (geração, armazenamento e rede externa) por meio de conversores estáticos. A este barramento também se conectam cargas de maior potência, como eletrodomésticos, e conversores que produzem barramentos secundários de baixa tensão c.c.. Observa-se que a instalação pode possuir diversos barramentos c.c. de baixa tensão, normalmente 24V e/ou 48V, a serem utilizados para alimentar cargas de menor potência, como iluminação e eletrônicos. A justificativa para tal é que esses equipamentos são frequentemente manuseados pelos usuários, de modo que o uso de extra baixa tensão reduz o risco de choques e eleva a segurança da instalação[1]. Dentre os riscos presentes neste tipo de instalação, se destaca o risco de choque elétrico existente na ocorrência do contato direto dos usuários com os alimentadores do barramento de 380V, uma vez que a tensão mais elevada pode ocasionar correntes intensas no corpo do usuário e assim causar danos físicos e/ou acidentes sérios [1].

1.3 Proteção contra choques em nanorredes c.c.

A implementação de nanorredes c.c. possui diversos desafios de ordem técnica para superar e um deles é a garantia de proteção para as redes. A proteção nessas redes deverá garantir segurança contra faltas e contra choques elétricos. Iremos nos aprofundar nesse trabalho na proteção contra correntes residuais, incluindo choques elétricos e seus consequente riscos aos usuários. Os choques elétricos têm sua gravidade variável com tempo de exposição e corrente, como demonstrado no gráfico 1.3 e pode não ser nem mesmo percebido ou, em casos mais graves, causar dores, contrações e até mesmo danos irreversíveis, podendo sendo fatal [1]. A Figura 1.3 mostra as zonas de sensibilidade humana a choques elétricos em corrente contínua e alternada (60Hz) em função do tempo de exposição e intensidade do choque.

Figura 1.3: Curva característica de duração da exposição x corrente de exposição



Fonte: [1]

As regiões exibidas pela Figura 1.3 se referem aos seguintes efeitos fisiológicos:

I. Limiar de percepção;

II. Limiar da dor, contrações musculares involuntárias, sem danos significativos;

III. Fortes contrações musculares, distúrbios reversíveis na formação e condução de impulsos cardíacos e interferência respiratória

IV. IV. Danos críticos, como parada cardíaca, para respiratória, queimaduras e outros danos celulares. Probabilidade de ocorrência de fibrilação ventricular.

Outra variável dos choques elétricos é a impedância do corpo humano que é afetada por condições ambientais como umidade, valores de tensão de toque, caminho percorrido e outros.

Considerando um adulto de resistência 2000 Ω [4], levando em conta o caminho de choque como mão mão, e a tensão 190V,vide Figura 1.4, pois o toque ocorre em apenas um ponto do circuito, pode-se calcular a corrente de choque:

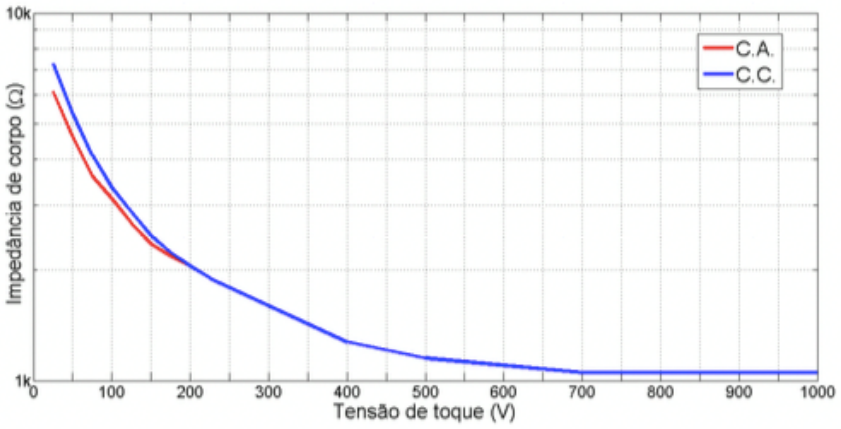
$$I = V/R = 95mA \tag{1.1}$$

Na equação (1.1): I (A) é corrente, V (V), tensão e R (Ω), resistência.

Esta corrente representaria risco na fase III caso o choque tivesse duração maior que 50ms, de acordo com a Figura 1.3, o que não leva a risco de morte, entretanto, há dor e contrações musculares. Por outro lado, pode-se inferir que o risco seria agravado em casos de outros percursos de choque como pé-pé, corpo úmido ou molhado, crianças e animais de estimação. Essas situações seriam de maior risco devido ao decréscimo no valor de resistência de corpo e consequente aumento na corrente de choque, podendo chegar ao risco fatal para resistências menores que 500 Ω. Além disso, caso o choque fosse de 380V, resistência de corpo de 1200 Ω, vide Figura 1.4 , a corrente seria na faixa de 325 mA e estaria na faixa 4, risco de morte. A Figura 1.4 mostra a variação da impedância de corpo para tensões de toque em corrente contínua e alternada para o corpo seco e um caminho de mão a mão. Discute-se na norma IEC/TS 60479-1 que para um caminho de mão a pé, essas impedâncias podem ser até 30% menores [1].

Já para o gráfico 1.4, na condição mão a mão, a resistência corporal de um adulto seria de 2000 Ω, entretanto ao considerarmos 70% desse valor, devido a proporcionalidade de 0,7 para casos de caminho entre mão direita e pé esquerdo, essa resistência cairia para 1400 Ω [4]. Nesse caso, a corrente de choque seria de 139mA. Consequentemente, para simulação consideraremos este valor, por representar o percurso mais recorrente de choque [4]. Entretanto a proteção deverá ser suficiente para qualquer caso, portanto, seu tempo de atuação deverá ser na faixa de microssegundos para que se evite qualquer uma das faixas de risco. Devido ao risco de choque em instalações existem normas que regulamentam a proteção e não seria diferente para nanorredes c.c., as quais, na ausência de normas especificas, devem atender às normas de instalação elétrica existentes. Desse modo, é preciso adotar diversos métodos de proteção que incluem aterramento, equipotencialização, barreiras e dispositivos de proteção contra correntes residuais. No entanto, em redes c.c. a interrupção da corrente, seja em situações de falta ou choque elétrico, traz maiores desafios em relação aos sistemas

Figura 1.4: Impedância corporal x tensão de toque (Condições: seco e mão a mão)



Fonte: [1]

c.a. convencionais, uma vez que o arco elétrico provocado por estas aberturas não se extinguirem naturalmente, uma vez que não há passagem por zero da corrente, o que demanda dispositivos mais robustos, capazes de extinguirem esses arcos sem se danificarem.

1.4 Dispositivos DR C.C. (Estado da arte)

Para que evitemos os choques elétricos causados por correntes residuais e evitar que o sistema fique ilhado em caso de segundas faltas faz-se necessário inclusão de um dispositivo de proteção no lado c.c. do sistema [1]. Esse dispositivo deverá ser capaz de atuar em tempo inferior a milissegundos e ter proteção contra sobretensões que poderiam danificá-lo [4]. No caso de redes c.a., a proteção contra choques é realizada por meio de dispositivos de proteção diferencial residual (DR) capazes de mensurar as correntes de fuga e abrir o sistema no caso da corrente diferencial ser, geralmente, em torno de 30mA, enquanto em operação normal seria de corrente nula e a chave permanece fechada permitindo alimentação das cargas [1]. Pode-se descrever três tipos desses dispositivos:

1. Tipo A - capaz de detectar correntes diferenciais em sistemas alternados;
2. Tipo AC - capaz de detectar correntes diferenciais em sistemas alternados e correntes contínuas pulsadas;
3. Tipo AC - capaz de detectar correntes diferenciais em sistemas alternados e correntes contínuas pulsadas;

Considerando esses três tipos o mais adequado para nanorredes c.c. seria o do tipo B, porém, ele não se adequa à intensidade dos possíveis arcos elétricos. Uma alternativa possível para a proteção c.c. é que ela seja realizada no lado c.a do sistema no caso de ele ser acoplado a rede c.a convencional. Entretanto, o acionamento deste dispositivo iria suspender o ponto de conexão comum, ilhando a nanorrede, sem que haja uma real necessidade para

isso. O desenvolvimento de um dispositivo c.c. permite a interrupção do ramo no qual a fuga de corrente ocorre, sem a necessidade de se ilhar todo o sistema, além disso, em caso de operação ilhada com aterramento IT, permitira também interromper faltas para terra, já que as correntes têm amplitudes similares, em torno de 31mA [1]. Desse modo, para evitar o ilhamento da instalação, em caso de faltas ou correntes de fuga é necessário o uso de disjuntores c.c. de estado solido que seriam instalados no lado c.c. e não no c.a como são de uso atual e provocam o isolamento do sistema.

Para o caso de proteção no lado c.c. o que acontece é a adaptação de dispositivos atuais. Por exemplo, há o uso de termomagnéticos com expansão da região de acionamento instantâneo o que causa que estes equipamentos sejam acionados com correntes bem maiores que as suas características nominais. Além disso pode-se aumentar a distancia entre os contatos do disjuntor por meio de associação de contatos de um disjuntor tripolar em série para suportar os arcos elétricos. Há alguns dispositivos mais adequados a c.c. nesse sentido, mas o preço deles inviabiliza seu uso em nanorredes como proposto nesse trabalho. Há ainda a necessidade de se considerar que o tempo de abertura do contato é maior que alguns ms, o que não seria suficiente para proteção adequada, como discutido na sessão 1.3. Logo, para que o circuito seja protegido sem que o conversor de interface leve a microrrede a um modo ilhado, é necessário se ter disjuntores c.c. com tempos de atuação muito rápidos. No caso dos DRs, um dispositivo capaz de proteger os usuários no lado c.c., o que ainda não existe. Motivado por essa necessidade de dispositivos rápidos o bastante para evitar riscos de choques elétricos e capaz de suportar arcos elétricos, o estudo dos disjuntores c.c. de estado sólido, como os IGBT, é o escopo deste trabalho.

1.5 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é desenvolver um dispositivo de proteção contra choques que possa agir no lado c.c. do sistema e que seja eficiente na detecção de choques elétricos e rápido o bastante para interromper os ramos faltosos da instalação, garantindo assim a segurança dos usuários da instalação.

1.6 Metodologia

Para que os objetivos desta presente monografia sejam atingidos o trabalho será subdividido entre duas tarefas. A primeira consiste na análise e desenvolvimento de método para a correta mensuração da corrente diferencial. Adicionalmente, essa parte será de análise e simulação. Após esse passo, o desenvolvimento de um dispositivo de chave de estado sólido deverá ser desenvolvido. Essa etapa também terá as sessões de análise e simulação. Além disso, em ambas, haverá análise de resultados e, por último, conclusão do trabalho.

1.7 Organização do trabalho

Esta monografia será dividida em 4 capítulos. O primeiro consiste na contextualização e apresentação do histórico e problema proposto. Em seguida o capitulo 2 e 3 consistem nas duas etapas do projeto, medição da corrente residual e desenvolvimento de um dispositivo de

chave de estado sólido que deverá evitar riscos de choques elétricos em instalações c.c.E por fim, a conclusão no capitulo 4. É importante salientar que o presente trabalho foca na elaboração de dispositivo DR abordando risco de choques elétricos e mais especificamente os decorrentes das correntes diferenciais. Dessa maneira, aterramentos e outros meios de proteção não se tornam descartáveis, pelo contrário, mantém sua devida importância evitando faltas, curto circuitos e sobrecargas e proteção contra descargas elétricas, entretanto, fogem do escopo do presente documento.

Capítulo 2

Corrente Residual

Independentemente do sistema de transmissão, distribuição e forma da tensão utilizados, deve-se respeitar as normas de segurança evitando riscos de choques elétricos, queimaduras, incêndios e danificação de equipamentos. Deste modo, podemos garantir a integridade das pessoas e animais usuários daquele espaço. No escopo desse trabalho, tratam-se de ambientes comerciais ou residenciais onde irá ser abordado o risco de choques elétricos.

A corrente residual é na verdade a corrente de fuga de um sistema diferencial, a qual pode ser causada for simples fuga de corrente por caminhos parasitas ou de modo comum, ou por correntes de corpo (choque), devido ao contato direto ou indireto de um usuário com uma parte energizada da instalação. O dispositivo DR tem esse nome, pois ele faz uma medição diferencial e detecta a existência de fuga (ou resíduo) de corrente entre dois ou mais alimentadores, o que pode indicar um choque elétrico.

Caso uma pessoa ou animal venha a entrar em contato com uma parte energizada da instalação, haverá a circulação de uma corrente pelo corpo deste e dependendo da sua intensidade, esta poderá causar danos ao usuário ou provocar graves acidentes. Nestes casos é aconselhável o emprego de dispositivos de proteção como o DR (Dispositivo Diferencial Residual), o qual irá mensurar a corrente de fuga, ou residual, entre os alimentadores de um ramo da instalação. O valor da corrente residual durante operação normal deverá ser nulo, já no caso da ocorrência de um choque elétrico, a corrente residual irá apresentar um valor dependente da tensão de toque, da impedância de corpo da vítima, do tipo de aterramento, resistência de solo, etc. Ao detectar uma corrente residual de magnitude superior a um valor pré-determinado, o dispositivo irá atuar, interrompendo o ramo faltoso da instalação e consequentemente anulando a corrente de fuga. Em circuitos c.a. é comum utilizar um limiar de 30mA para os DRs, este valor foi mantido no desenvolvimento do dispositivo DR c.c., já que ele representa o início da zona de risco III, vide Figura 1.3 . Em DRs c.a., a medição diferencial residual é feita por meio de transformadores de corrente, o qual enlaça os alimentadores do circuito de modo a capturar apenas a corrente residual. Em sistemas c.c., no entanto, tal estratégia não é aplicável, pois a medição de correntes contínuas não pode ser feita com este tipo de sensor, impossibilitando o uso de DRs convencionais. Mesmo os DRs do tipo B, que podem medir correntes c.c. não são aplicáveis, pois estes não possuem capacidade para resistir aos arcos elétricos provocados pela interrupção de correntes contínuas em um barramento de 380V. Para tanto, é necessário que o dispositivo DR a ser desenvolvido seja capaz de mensurar essa corrente de maneira rápida e eficaz, além de possibilitar que a atuação do dispositivo se dê em tempos na ordem de alguns milissegundos, garantindo assim que, mesmo

nas piores condições, a duração da exposição da vítima a um choque elétrico não a conduza às regiões III e IV como ilustrado na Figura 1.3. Há vários métodos de detecção de corrente contínua e o próximo passo deste trabalho será definir qual deles será mais apropriado para o desenvolvimento do dispositivo DR c.c. e discutir seu projeto e características.

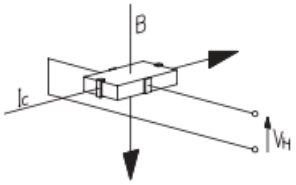
2.1 Sensores de corrente contínua

Como uma corrente gera campo magnético em suas proximidades, um equipamento baseado em materiais magnéticos que possam detectar este campo e responder com uma corrente de certa proporcionalidade torna-se comumente utilizado. Existem diversos métodos de detecção de corrente, entretanto selecionou-se dois métodos principais devido a custo, qualidade, confiabilidade e rapidez. Eles são: Efeito Hall e Fluxgate. Para determinação do mais adequado foi realizado comparação de vantagens e desvantagens. As sessões 2.1.1 e 2.1.2 apresentam essa análise.

2.1.1 Sensor de Efeito Hall

O sensor de Efeito Hall mede a tensão que aparece em um condutor ou semicondutor na presença de um campo magnético perpendicular ao seu plano quando uma corrente flui no material [3]. Ou seja, ele funciona como um capacitor de placas paralelas, como apresentado na Figura 2.1.

Figura 2.1: Modelo de funcionamento de Efeito Hall

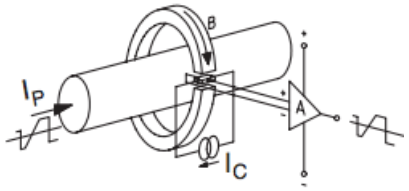


Fonte: [9]

A Figura 2.2 apresenta o modelo de sensor baseado no Efeito Hall. Este tipo de transformador consiste em uma toroide de material magnético com nucleo de ar onde posiciona-se a ponta de prova de Efeito Hall. Na presença de uma corrente surge um campo magnético que gera uma diferença de tensão que pode ser usada para detecção de corrente[6]. Um circuito é responsável por determinar a corrente através do sinal gerado no dispositivo de medida pelo campo magnético [3].

Os dispositivos de sensoriamento baseados em efeito hall podem ser de núcleo aberto, fechado ou uma associação desses dois[3]. Além disso, há grande variedade no mercado para usos comerciais com variações de custo de acordo com a qualidade e precisão [6]. No geral, sensores de Efeito hall são adequados para correntes até kV, para sistemas c.c. ou c.a., possuem precisão entre 0.5 % a 2 %, que podem ser melhoradas, má estabilidade de zero e alta sensibilidade a campos externos [6]. Além disso, apresentam aumento de incerteza com o aumento da temperatura [7] .

Figura 2.2: Modelo de sensor baseado no Efeito Hall



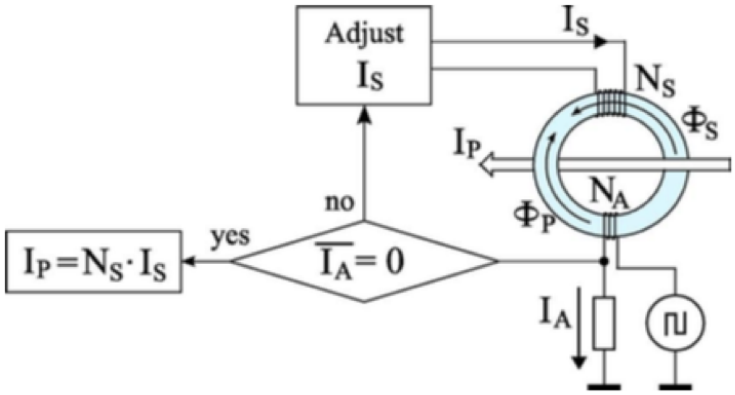
Fonte: [9]

Os abertos têm geralmente menor custo e, apesar de inferiores, possuem erros maiores, são mais comuns. Entretanto, são mais indicados para correntes maiores que 300A [9].Já para os de núcleo fechado, apesar de superiores em performance, possuem consumo energético considerado alto, maior custo de aquisição e são indicados para faixas de 2A a 20kA. [10], sendo essa uma desvantagem extremamente importante no contexto residencial/comercial. Para a tecnolodia eta, associação entre os outros dois, o consumo energético é reduzido, porém o custo se mantem superior e não é indicado para baixas frequencias [9].

2.1.2 Sensor Fluxgate

O fluxgate se baseia no principio de não linearidade das propriedades de materiais eletromagnéticos, a permeabilidade do material varia de acordo com o campo em torno do sensor [11]. Desse modo, há uma saturação periódica de seu núcleo ao ser excitado. Na presença da corrente de fuga há desproporcionalidade nos picos de detecção, podendo, portanto, detectar a presença da corrente e estimar sua amplitude [6].

Figura 2.3: Modelo de sensor baseado no Fluxgate



Fonte: [2]

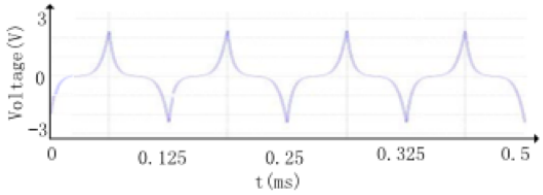
A Figura 2.3 representa um modelo de sensor fluxgate. Para obter um campo magnético nulo no circuito o enrolamento Ns deve ser excitado com uma corrente de excitação [2].

Neste caso, ainda sem influencia de um fluxo, a corrente, Is, no secundário é proporcional a corrente Ip do primário [2].

$$I_p = N_s * I_s \tag{2.1}$$

Ns é o número de espiras do secundário. Na falta de influencia de fluxo externo enquanto o sensor é excitado por um sinal de tensão de onda quadrada, a corrente IA seria como na Figura 2.4 [2].

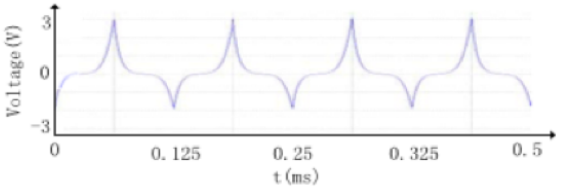
Figura 2.4: Forma de onda da tensão no resistor de amostragem na saída para I=0 A



Fonte: [11]

Já no caso de uma corrente no primário ser detectada no primario o comportamento será como o apresentado na Figura 2.5, pois IA tem relação com a corrente do primario[2].

Figura 2.5: forma de onda da tensão no resistor de amostragem na saída para I=2 A



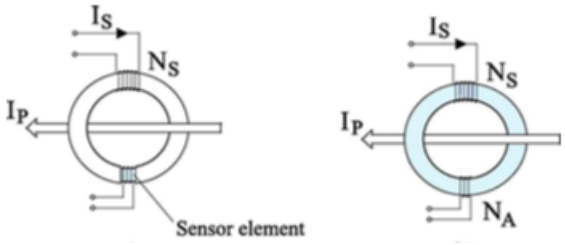
Fonte: [11]

As Figuras 2.4 e 2.5 representam o comportamento da corrente em situação de funcionamento normal e em presença de corrente de fuga. No primeiro caso há comportamento simétrico da saturação e a corrente também apresenta esse comportamento, como demonstrado graficamente. Já no segundo caso, na presença de corrente de fuga, há desproporcionalidade da região de saturação e diferença entre os módulos de pico da corrente. Essa diferença será utilizada para detecção e medição da corrente de fuga definindo quando o DR atuará. O circuito de excitação do fluxgate pode ser feita de duas maneiras: com uma onda quadrada de tensão de frequência fixa aplicada sobre a bobina de excitação, a qual na presença de uma corrente de fuga irá provocar o aparecimento de um segundo harmônico na espectro do sinal de corrente de excitação, que possui amplitude proporcional à magnitude da corrente de fuga, ou por meio de um circuito auto-oscilante. Neste último caso, um comparador de histerese monitora a corrente de excitação (por meio de um resistor shunt) e troca de estado cada vez que o núcleo é saturado, deste modo a frequência de excitação é variável, mas a

presença de uma corrente de fuga produz um valor médio na corrente de excitação, que é mais facilmente detectável do que um segundo harmônico.

Como no caso dos sensores de Efeito Hall, há opções em núcleo aberto e fechado, como mostrado na Figura 2.6, como, também, variações de modelos e custos.

Figura 2.6: a) Núcleo do Fluxgate de núcleo aberto b) Núcleo do Fluxgate de núcleo fechado



Fonte: [9]

Os sensores baseados em Fluxgate são conhecidos por sua alta sensibilidade e, com o aprimoramento da tecnologia dos materiais, seu custo vem sendo reduzido e passa a ser opção para usos comerciais [6]. Além disso, são apropriados para sistemas c.c. ou em baixas frequências e para aplicações c.c. que exigem melhor performance são mais indicados que os de efeito Hall [2].

Para os modelos núcleo aberto os desvios são de 0,1 % [6], possuem construção mais simples e são mais econômicos energeticamente. Entretanto, os de núcleo fechado são mais comuns devido a maior facilidade de análise e performance. Se utilizássemos o de núcleo aberto a detecção seria feita por meio de análise do segundo harmônico, porém pela maior complexidade da demodulação de segundo harmônico e aumento dos desvios de medida, o de núcleo fechado se mostrou mais adequado. Há ainda a possibilidade de aumentar a confiabilidade ao inserir uma realimentação [10]. Quando comparamos tanto Fluxgates de núcleo aberto ou fechado com os de efeito Hall temos melhor estabilidade do zero, menor sensibilidade a campos externos, baixos desvios, excelente precisão principalmente para baixas correntes (caso das correntes residuais deste trabalho), alta sensibilidade o que é vantajoso para baixas frequências, além de não ser muito afetado por variações de temperatura [6]. Além disso o sistema auto oscilante por meio da definição dos limites de histerese é importante para simplificação de não linearidade do sistema garantindo uma excitação autônoma para o secundário do transformador o que proporcionará informação sobre a corrente pela média da corrente no secundário, simplificando sua implementação [9].

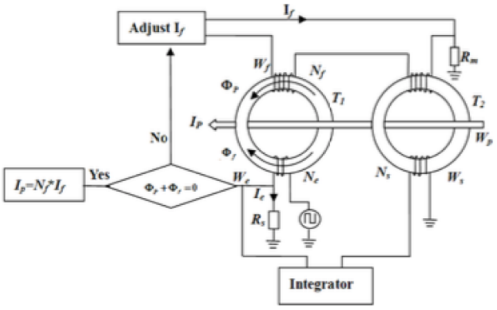
Dessa maneira, ao se comparar custo-benefício a opção escolhida para detecção da corrente foi o sistema Fluxgate considerando, principalmente, sua alta sensibilidade para sistemas c.c., boa eficiência energética, precisão para baixas frequências, além do custo acessível para ambientes residenciais e comerciais, onde o investimento é baixo, o que viabiliza sua implementação.

O fluxgate desenvolvido para a presente aplicação será de núcleo fechado, devido a maior simplicidade de análise, auto excitado, por causa de simplicidade de montagem e com realimentação para ampliação da confiabilidade.

Nosso modelo de simulação terá um núcleo, suficiente para comprovar funcionamento,

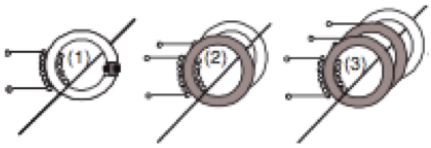
porém a implementação seria com dois núcleos para correção de ruído [11], como na Figura 2.7. Há ainda de se considerar que para aplicações em altas frequências um terceiro núcleo seria adicionado, vide Figura 2.8, o que não se mostra necessário na presente aplicação, mas que pode ser de importância em outras situações [11].

Figura 2.7: Modelo de sensor Fluxgate com dois núcleos



Fonte: [11]

Figura 2.8: Modelo de associação de núcleos do sensor Fluxgate com até 3 toroides



Fonte: [9]

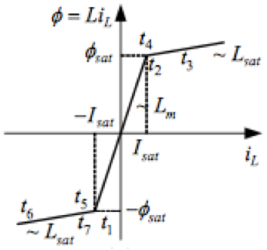
2.2 Escolha do núcleo

Após a análise e escolha do método de medida de corrente de fuga pelo Fluxgate é necessário escolher qual o componente núcleo adequado analisando diversas características como dimensão, preço, material e permeabilidade, que será responsável por dimensionar a corrente de saturação. Além disso, foi considerado a disponibilidade e facilidade de aquisição no Brasil. O principal critério para definição do componente é manter uma corrente de excitação baixa garantindo a saturação do material e, também, evitar alto número de espiras, pois eleva a complexidade na montagem e tamanho do sensor, além de incrementar valor de indutância e diminuir a frequência. Outro ponto, é que uma frequência maior facilita o processo de filtragem mantendo a corrente de saturação baixa. Dessa maneira, é necessário que a escolha seja de um sensor de material com alta permeabilidade para que a corrente de excitação seja baixa.

$$B = \frac{\mu * N * i}{l_e} \tag{2.2}$$

Na equação 2.2, B (T) é intensidade do campo , μ é permeabilidade magnética, N é o número de espiras, i (A) é a corrente e l_e (cm) é o comprimento.

Figura 2.9: Gráfico da histerese



Fonte: [2]

Dessa forma, os sensores em materiais nanocristalinos se mostraram interessantes devido a permeabilidade entre 40.000 a 90.000, no caso do modelo escolhido. Além disso, para a escolha foi necessário avaliar se o diâmetro da toroide seria suficiente para construção dos enrolamentos e dos fios a fim de medição diferencial da corrente de fuga. Esse fato limitou os dispositivos a terem dimensão maior que 30mm. Considerando o modelo MMT520T35.31.4N comercializado pela magnomattec que possui 31mm de raio interno e altura, 4 mm, menor que outros da mesma classe, e mantendo ainda baixa indutância. Adicionalmente, para fins de demonstração utilizaremos 100 espiras no secundário. Utilizando os dados do catalogo (6):

A ponto de análise, o calculo na equação 2.3:

B= 1.25T; μ= 40*4$\pi * e^{-7}$; l_e = 10.4 cm; N = 100.

$$1.25 = \frac{40 * 4\pi * e^{-7} * 100 * i}{10.4} \tag{2.3}$$

Dessa maneira, encontra-se uma corrente de aproximadamente 28 mA. Como a resistência de medição foi definida como 39 Ω, a tensão calculada é V=1V. Estes valores de resistência e tensão foram adotados por livre escolha de projeto.

Na Figura 2.10 vê-se a família do modelo comercial escolhido, há toroides e elipses de variadas dimensões como analisado anteriormente na sessão 2.2.

Figura 2.10: Modelo de fluxgate comercial da família do MMT520T35.31.4N

Fonte: [5]

As características do modelo MMT520T35.31.4N serão apresentadas na Figura 2.11 [5].

Figura 2.11: Característica do modelo de fluxgate comercial da família do MMT520T35.31.4N

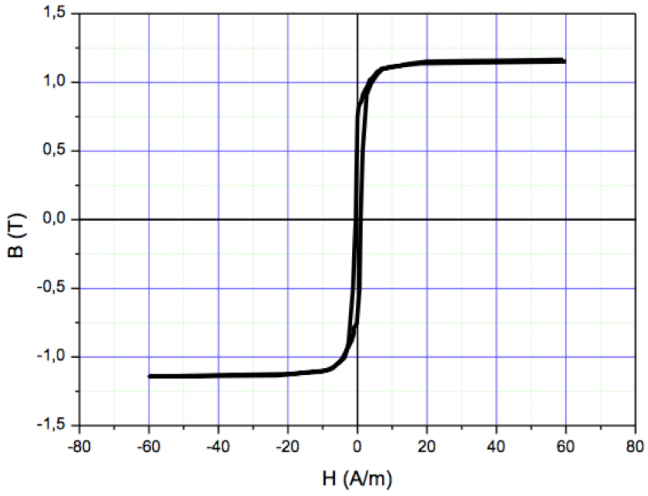
Produto	Código	Dimensões finais nominais			E_{Fe} (mm)	L_{Fe} (cm)	A_{Fe} (cm^2)	As_{Fe} (cm^2)	m_{Fe} (g)	V_{Fe} (cm^3)	AL @ (1kHz) (µH)
		ϕ_{ext} (mm)	ϕ_{int} (mm)	H (mm)							
MMT520T25.17.10N	1.01.0305	25	17	10	4,0	6,6	0,4	18,5	17,5	2,4	45
MMT520T25.17.10B	1.01.0158	27	15	13	4,0	6,6	0,4	18,5	17,5	2,4	45
MMT520T30.20.10A	1.01.0235	30	20	10	5,0	7,9	0,5	23,6	26,0	3,5	48
MMT520T30.20.10B	1.01.0159	33	17	13	5,0	7,9	0,5	23,6	26,0	3,5	48
MMT520T30.20.10L	1.01.0250	33	17	13	5,0	7,9	0,5	23,6	26,0	3,5	76
MMT520T34.27.4N	1.01.0306	34	27	4	3,5	9,6	0,1	14,4	8,9	1,2	11
MMT520T35.31.4N	1.01.0307	35	31	4	2,0	10,4	0,1	12,4	5,5	0,7	6

Fonte: [5]

Pode-se observar que suas dimensões atendem aos requisitos de terem raio interno maior que 30mm, sendo ainda o menor modelo para que sejam atendidas. Além disso, o AL é muito baixo e uma indutância baixa também era requisito de projeto.

Já a Figura 2.12 apresenta a curva de histerese dos núcleos da familia 520 e 521 do MMT520T35.31.4N.

Figura 2.12: Curva de histerese do modelo de fluxgate comercial da família do MMT520T35.31.4N

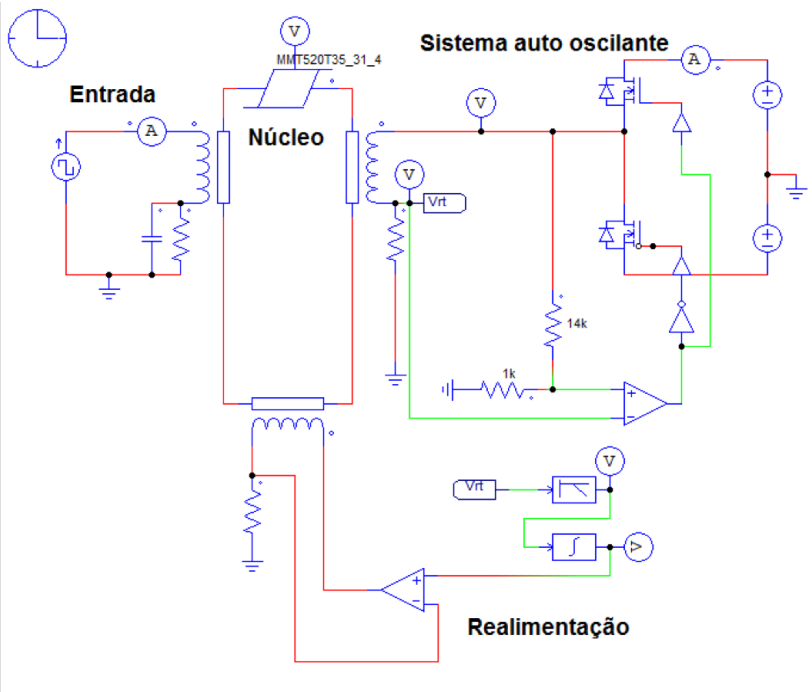


Fonte: [5]

2.3 Simulação

Simulou-se o modelo que representa um sensor fluxgate para detecção da corrente de fuga por meio do software PSIM.

Figura 2.13: Modelo de sensor fluxgate simulado utilizando o MMT520T35.31.4N



Há um sistema de simulação da corrente de fuga, denominado "Entrada"na Figura 2.13, que simulará a corrente residual como uma onda quadrada de 30mA para que seja possível o teste de detecção do sensor ao compara-la com a saída, que é o valor a ser repassado como sinal para a chave atuar. Há ainda, o núcleo do modelo MMT520T35.31.4N que é o sensor propriamente dito e deve atender as características definidas em seu escopo, como dimensões físicas e de materiais. . Além disso, pode-se observar na Figura 2.13 o sistema auto oscilante que é responsável por garantir a saturação periódica do núcleo o que, como explicado da sessão 2.1.2 proporciona a mensuração constante da corrente residual e pode ser verificada pelo comportamento da corrente do sensor, o que será avaliado na sessão de resultados 2.3.1. É o sistema auto oscilante o principal responsável por diminuir o consumo energético do sensor, já que elimina a necessidade de uma alimentação de corrente de excitação externa. Logo abaixo dos outros blocos, se encontra a realimentação, que contém o processo de filtragem, e é responsável por diminuir os ruídos do sinal de saída e o tempo de detecção da corrente de fuga. O laço fechado diminui os erros de detecção, por meio dos filtros e aumenta a confiabilidade do sistema, maior qualidade dos sinais de saída

2.3.1 Resultados

Utilizou-se 60 espiras no transformador terciário, aquele na parte inferior conectado a realimentação, por esse motivo, a corrente de saída, Isaida deverá ser multiplicada por 60 a

fim de obter-se valor proporcional a corrente de fuga simulada. curvasSensor

Figura 2.14: a) Ientrada b) Isaída c) Vsaída

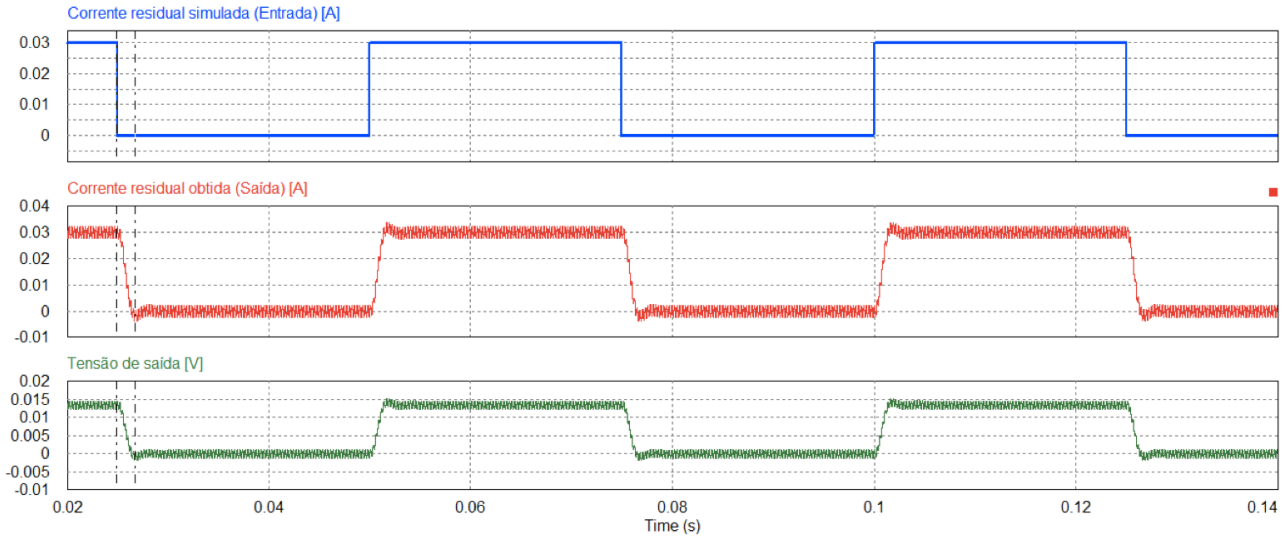
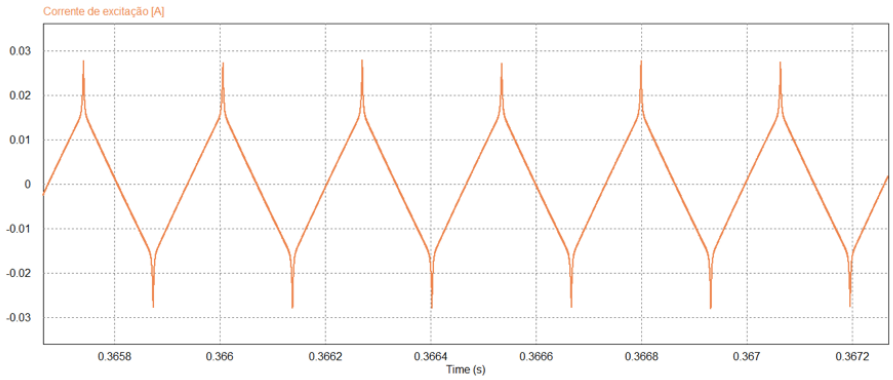


Figura 2.15: Curva da corrente de excitação do sensor.



Na Figura 2.14.a observa-se a corrente de fuga simulada, 30mA, quadrada com frequência de 20 Hz. Já na Figura 2.14.b , apresenta-se a corrente de saída, mesma forma de onda da tensão, porém com correção de proporcionalidade. Comparando as duas primeiras formas de onda, pode-se concluir que o sistema realiza a detecção e estima com eficácia o valor da corrente de fuga, atendendo a proposta do projeto. Além disso a terceira curva, tensão de sáida, é o valor da tensão no resistor de amostragem que apresenta mesmo comportamento da corrente de saída.

Na Figura 2.15, a corrente de excitação que demonstra exatamente as mudanças de estado como esperado pelas explicações anteriores na sessão 2.1.2.

2.3.2 Obtenção da corrente

A corrente de saída simulando a corrente de fuga possui o mesmo comportamento temporal da tensão de saída, porém deverá ser multiplicada por 60, que é o numero de espiras no terciário, ajustando-se assim a amplitude. Adicionalmente, como mostrado graficamente na Figura 2.14, há precisão de amplitude como requerido na aplicação e pequena diferença de fase, em torno de 3ms, o que torna aceitável para uso em proteção contra choques já que a chave será de rápida atuação e que a dimensão de atuação de todo o sistema ainda estará na faixa de milissegundos, objetivo para proteção adequada contra choques por corrente DC em microrredes mantendo o usuário fora do risco de choques nas áreas 3 e 4 da Figura 1.3.

2.3.3 Testes no processo de filtragem

O processo de realimentação do sensor fluxgate conta com um filtro passa baixa e um integrador de modo a garantir a confiabilidade do sistema, evitando ruídos e garantindo que o tempo de detecção seja na faixa de segurança, milissegundos. Para definição dos componentes foram simuladas mudanças nos valores finais. Esses valores finais foram obtidos por testes em torno de regiões utilizadas em outros projetos similares.

Passa baixa

O filtro passa baixa especificado no projeto tem característica de 640Hz e a fim de testar a qualidade dos resultados alterou-se esse valor para 1kHz e, posteriormente, 320Hz, resultando nas formas de ondas apresentadas em 2.16 e 2.17.

Filtro passa baixas 1kHz: No caso da especificação de 1K, Figura 2.16, há aumento nos ruídos do sinal, podendo resultar em instabilidade do sistema de sensoriamento e consequentes falhas.

Filtro passa baixa 320 Hz: Já para valor de 320, Figura 2.17, ocorrem maiores desvios nas transições podendo acarretar em atrasos na detecção gerando riscos no caso de acidentes, já que o acréscimo no tempo de exposição ao choque é responsável pela diminuição da corrente limiar entre as faixas de risco apresentadas na Figura 1.3.

Integrador

A constante de tempo do integrador foi especificada como sendo 0,5s

Integrador de constante de tempo de 0,1s: No caso da especificação de 0,1s, Figura 2.18, há aumento nos ruídos do sinal, que impossibilita a confiabilidade do sistema.

Integrador de constante de tempo de 0,25s: No caso da especificação de 0,25s, na Figura 2.19, há aumento nos ruídos do sinal, podendo resultar em instabilidade do sistema de sensoriamento e consequentes falhas.

Integrador de constante de tempo de 1s: Já para valor de constante de tempo de 1s, Figura 2.20, ocorre atraso nas transições que acarreta aumento do tempo de detecção gerando riscos no caso de acidentes, já que o acréscimo no tempo de exposição ao choque é responsável pela diminuição da corrente limiar entre as faixas de risco apresentadas na Figura 1.3.

Figura 2.16: Filtro passa baixa 1kHz

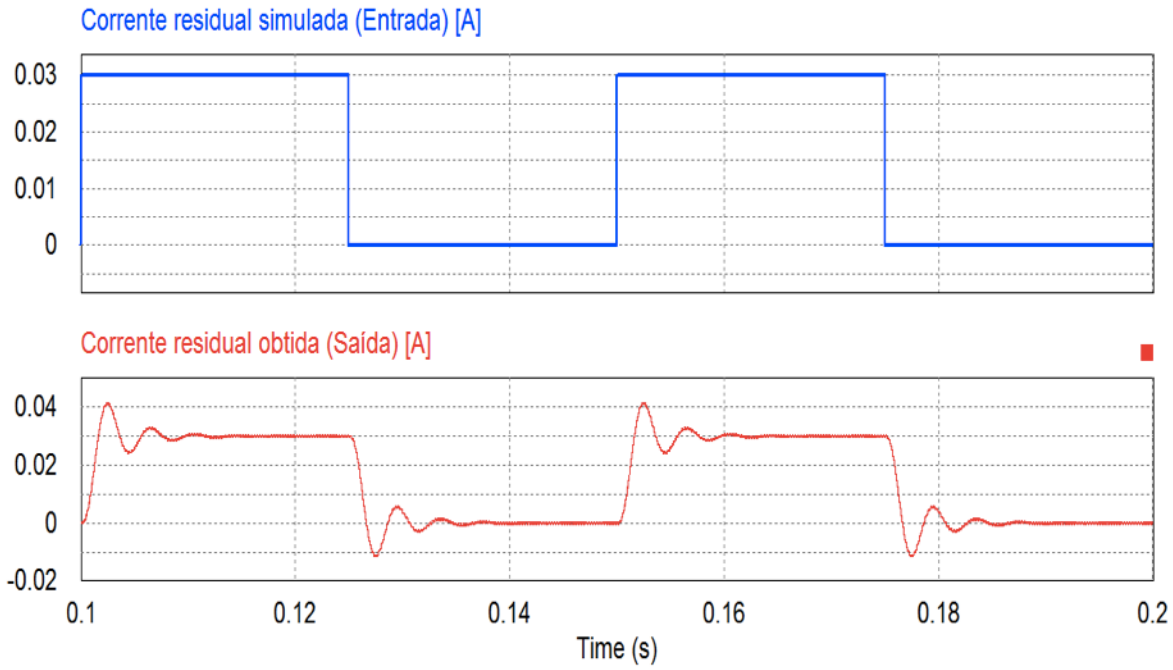


Figura 2.17: Filtro passa baixa 320Hz

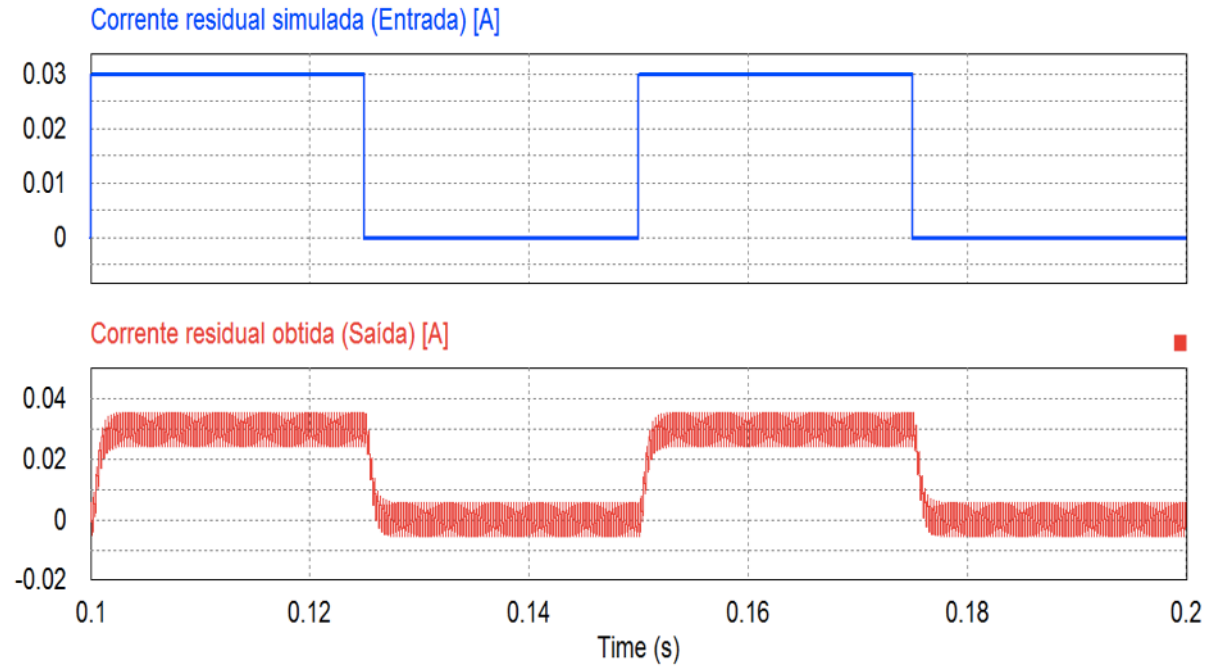


Figura 2.18: Integrador 0,1s

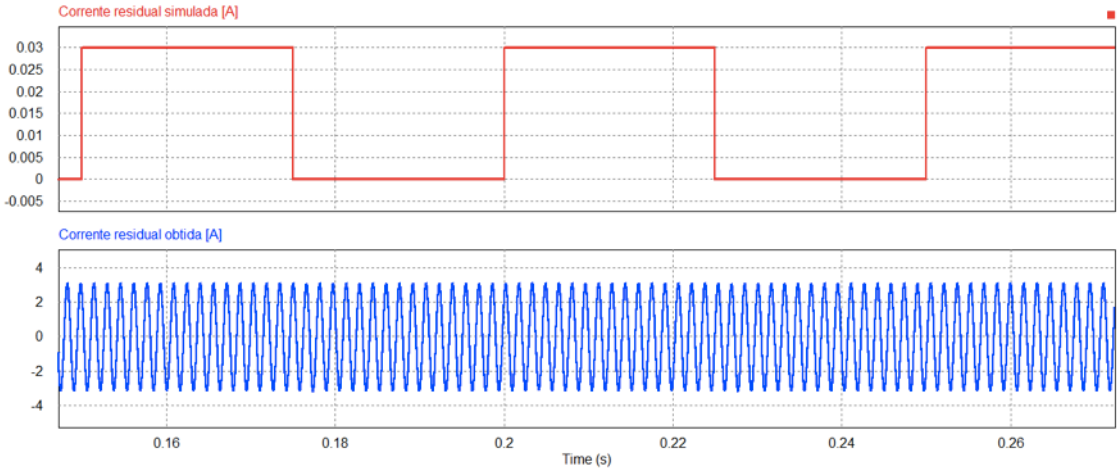


Figura 2.19: Integrador 0,25s.

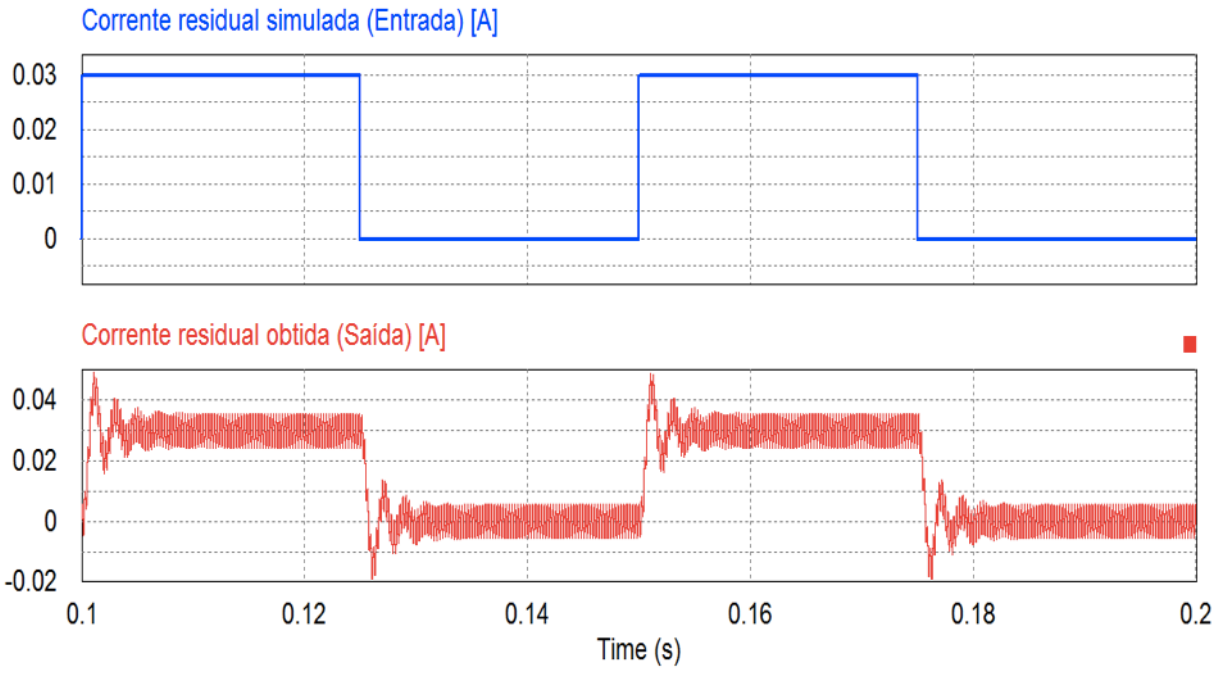
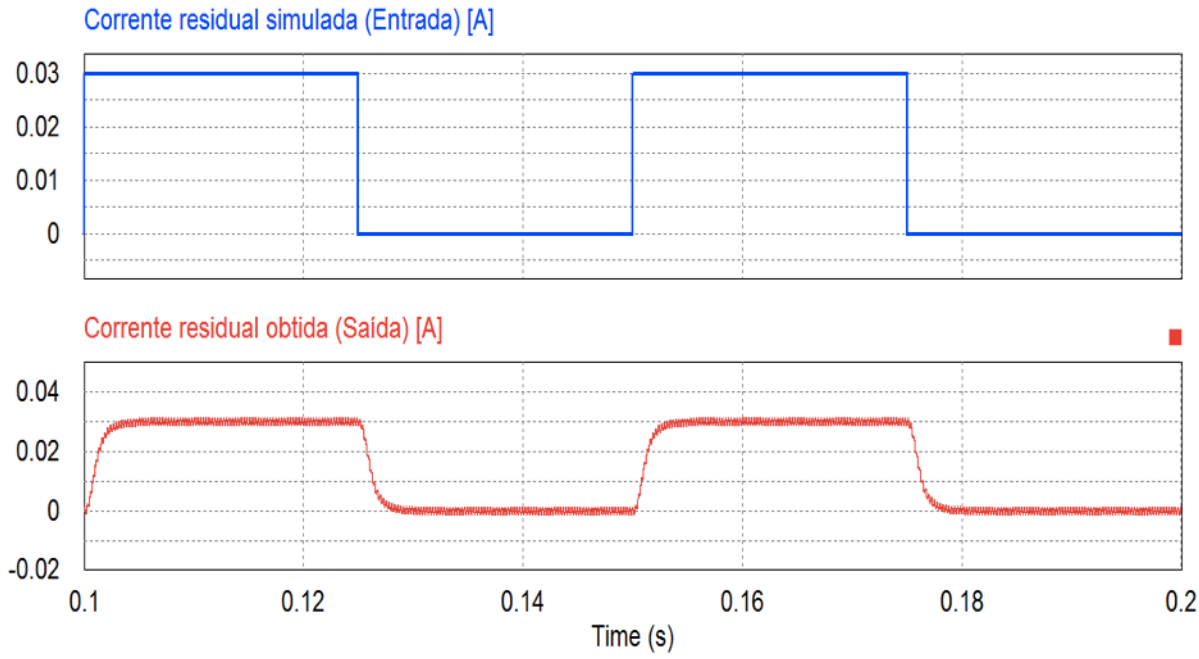


Figura 2.20: Integrador 1s



Fonte: Adaptado de Montgomery, 2004. [**?**]

2.3.4 Análise de resultados

Os testes no software PSIM não considera a dinâmica dos componentes, porém pela simplicidade de execução da simulação e resultados satisfatórios para o caso de baixas frequências como no caso das microrredes c.c., foi o programa escolhido. Além disso, a escolha do núcleo disponível para construção do sensor fluxgate foi possível por meio de associação de componentes e se mostrou satisfatória com resultados acompanhando os sinais de teste de detecção.

Capítulo 3

Dispositivo diferencial residual c.c. (DR)

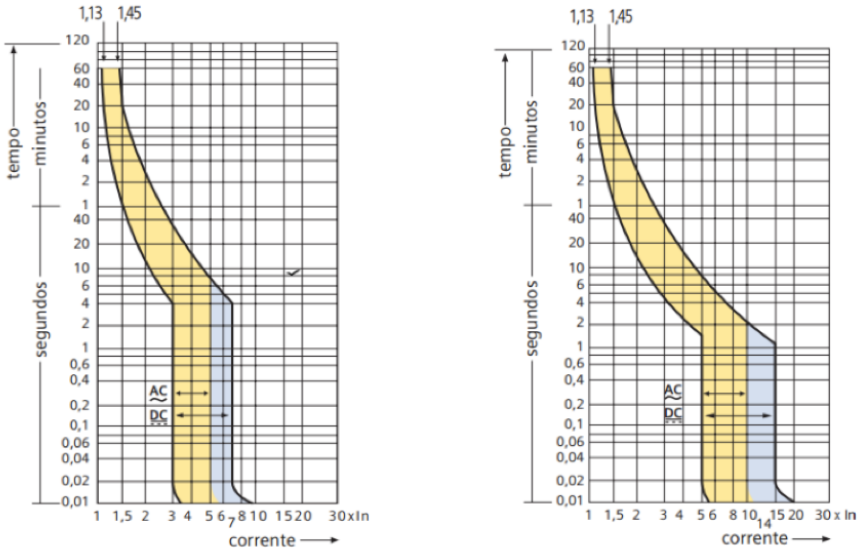
Um dispositivo diferencial residual de estado sólido empregado para interrupção de correntes contínuas em tensões mais altas ainda não está disponível no mercado. Atualmente há uso de adaptações utilizando os dispositivos termomagnéticos ca convencionais. Entretanto como pode-se observar na Figura 3.5 , que apresenta as curvas B e C de disjuntores c.a. convencionais, para o uso em c.c. existe uma expansão da região de acionamento instantâneo. Isso significa que os limites de corrente seriam expandidos no caso do uso em c.c. [1]. Além disso, os arcos causados por c.c. podem causar danos aos dispositivos convencionais já que eles tem duração mais longa pois não há passagem da corrente por zero [1]. Uma alternativa seria uma associação de em série de disjuntores tripolares para que se aumente a distancia entre os contatos. Outra alternativa são os dispositivos termomagnéticos c.c., porém seu custo é elevado para usos em residências e comércios. Outro aspecto a se considerar é o tempo de atuação de alguns milissegundos, entretanto, para que os dispositivos de proteção seccionem ramos faltosos sem que o sistema seja ilhado o tempo de acionamento deveria estar na ordem de microssegundo [1] . Consequentemente, faz-se necessário a criação de uma alternativa empregando dispositivos de estado sólido que seriam capazes de exibir esse comportamento em microssegundos [8], o que ainda não está disponível comercialmente para sobretensões maiores que 600V [8] e é o objetivo deste trabalho.

3.1 Chave de estado sólido

Um possível sistema de interrupção utilizando chaves de estado sólido é apresentado na Figura 3.2.

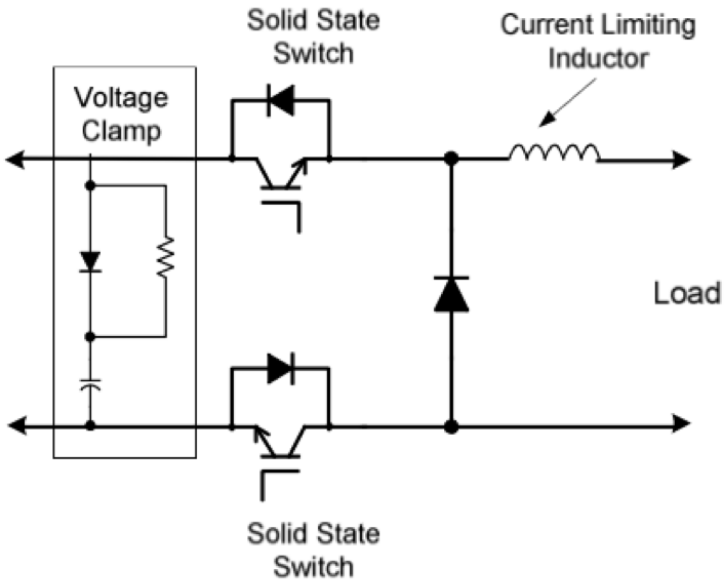
As chaves podem ser baseadas em IGBT's acrescidos dos circuitos *Snubers* (não apresentados na Figura 3.2). Para definição do IGBT definiu-se 650V e aproximadamente 60 A a 100 graus celsius. Atendendo a essas condições, um dos modelos considerados foi o FGH75T65SQDTL4 da ON Semicondutores. Entretanto, há variedade de modelos que apresentam as especificações definidas e de diferentes fabricantes, sendo, portanto, possível a mudança de modelo do dispositivo ao analisar custo e facilidade de fornecimento para futuros projetos. A Figura **??** ilustra o componente FGH75T65SQDTL4 da ON Semicondutores. Este modelo possui especificações de 650V/75 (10) o que garante seu uso dentro dos valores esperados para sobretensões e correntes com margem de segurança adequadas.

Figura 3.1: a)Curva B ; b)Curva C



Fonte: [1]

Figura 3.2: Exemplo de implementação de chaves de estado sólido c.c.

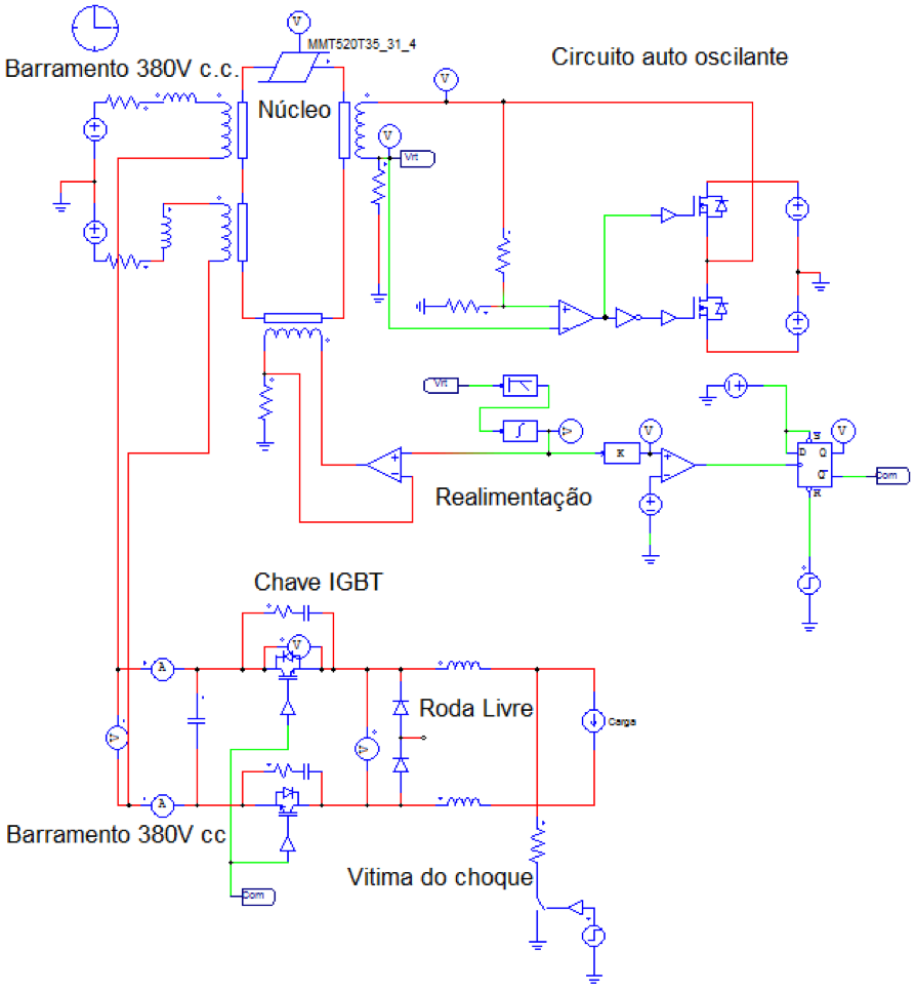


Fonte: [8]

3.2 Simulação

Para fins de testes implementou-se o DR projetado utilizando o software PSIM. A simulação consiste da proposta de chave de estado sólida apresentado na sessão 3.1 interligado ao sensor desenvolvido no capítulo 2. Além disso, o circuito *Snuber* com a finalidade de atenuar as sobretensões nas chaves foi acrescentado em paralelo aos IGBT?s. O projeto total é apresentado em 3.3.

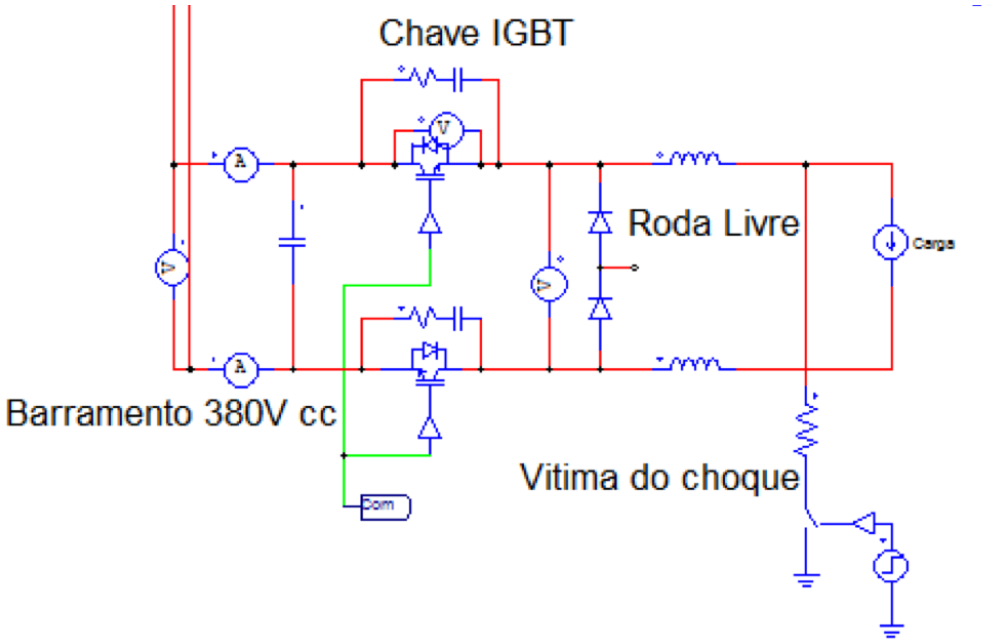
Figura 3.3: Circuito completo contendo sensor, chaves e cargas



Para esta fase, ampliou-se o sinal de saída do sensor por um fator K, 111, para que o sinal fosse de cerca de 1,5V. Dessa forma, o sinal de saída do dispositivo seria melhor detectado pelo flip flop D e as chaves receberão um sinal 0 ou 1, sendo 0 a presença da corrente de fuga acima de 30mA. Quando os dispositivos receberem a detecção da corrente de fuga eles irão atuar abrindo o caminho da corrente e, consequentemente, evitando que a vítima continue em situação de risco. Adicionalmente, há 2 diodos que tem a função de criar um caminho ?roda livre? que mantem a corrente em 0. Já nas chaves pode-se observar que devido a necessidade de minimizar os riscos para os dispositivos a possíveis sobretensões, há um sistema *Snuber* composto por um resistor e um capacitor. O *Snuber* reduz a sobretensão

(8) e o tempo de ruído do sinal. Adicionalmente, para implementação acrescentaria-se um varistor que funciona como um para raio protegendo a chave e evitando que ela se danifique.

Figura 3.4: Circuito DR



Pode-se observar que o sistema é alimentado pelo barramento c.c. de 380V seguido das chaves, ligadas ao sinal "Com", que advém do sensor, e posteriormente, o circuito alimentado: indutâncias da linha e carga. Além disso, existe a vítima representada por uma resistência de 1400Ω (adulto, resistência mão a mão, 380 V) por onde a corrente de fuga irá circular antes das chaves atuarem. Os resultados de simulação serão apresentados na Figura 3.5.

As curvas demonstram que a tensão de saída e a corrente de choque decaem a 0 após a detecção da corrente de fuga de 30mA. Pode-se ainda comprovar cálculos desenvolvidos na sessão 1.3 onde a corrente de choque para um individuo de resistência de aproximadamente 1400 Ω, mão a mão, 190V, seria de 135mA, como é o valor de pico da curva 3.5. O gráfico da corrente residual, curva amarela, ainda representa o pleno funcionamento do sensor depois de ser acoplado as chaves e que o choque é interrompido quase que instantaneamente quando atingi-se o limite proposto ao projeto, 30mA.

3.2.1 Análise do risco de choque

Ao ampliar a imagem da curva da corrente de choque pode-se observar claramente a duração do choque.

Por este gráfico da Figura 3.6 pode-se averiguar que o tempo de choque foi em torno de 40 microssegundos, demonstrando eficiência do sistema ao objetivo proposto, atuar na proteção contra choques elétricos devido a correntes residuais evitando riscos aos usuários do sistema de microrrede c.c. e evitar danos aos dispositivos de proteção. Além disso, pelo gráfico da Figura 1.3, pode-se concluir que o tempo em que o individuo fica exposto a

Figura 3.5: Curvas do circuito completo a) Corrente do sensor b) Tensão de sáida c) Corrente residual d) Corrente de choque

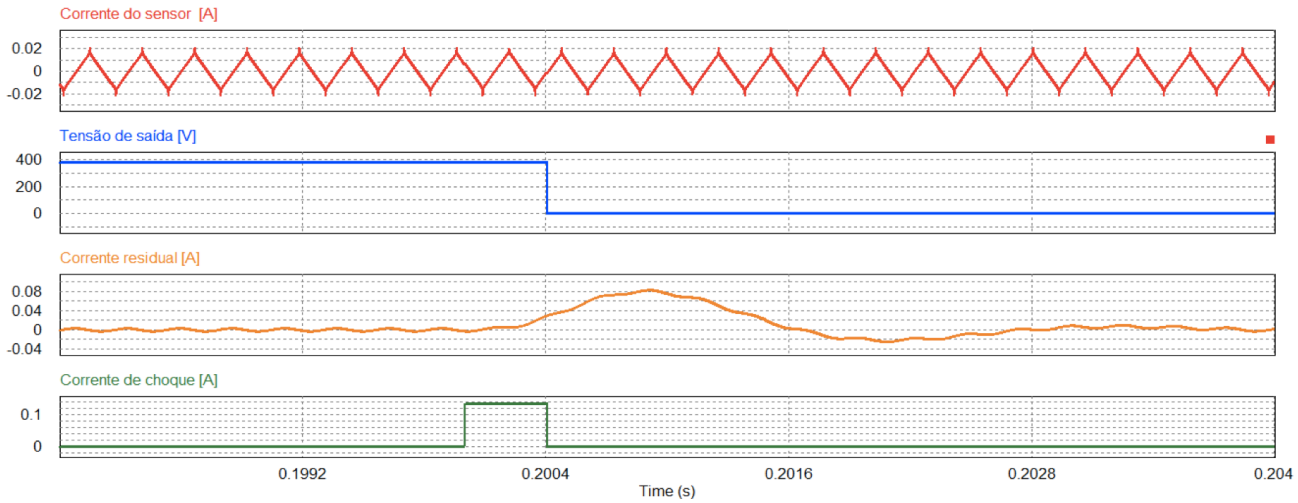
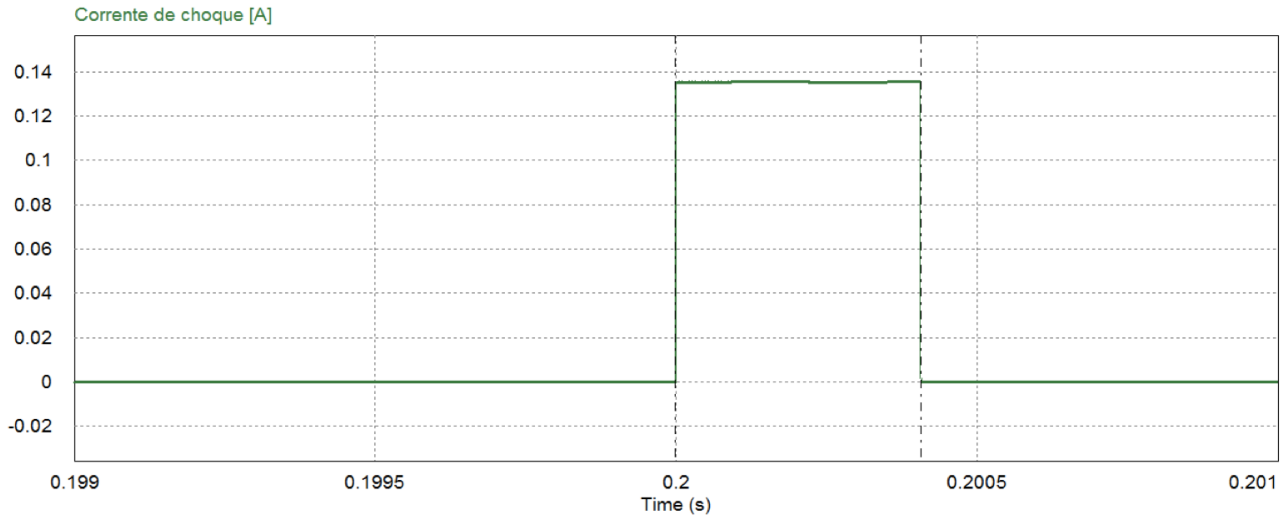


Figura 3.6: Curva da Corrente de choque



esta corrente, apesar de seu valor, não é suficiente para oferecer riscos ao usuário vitima de choque.

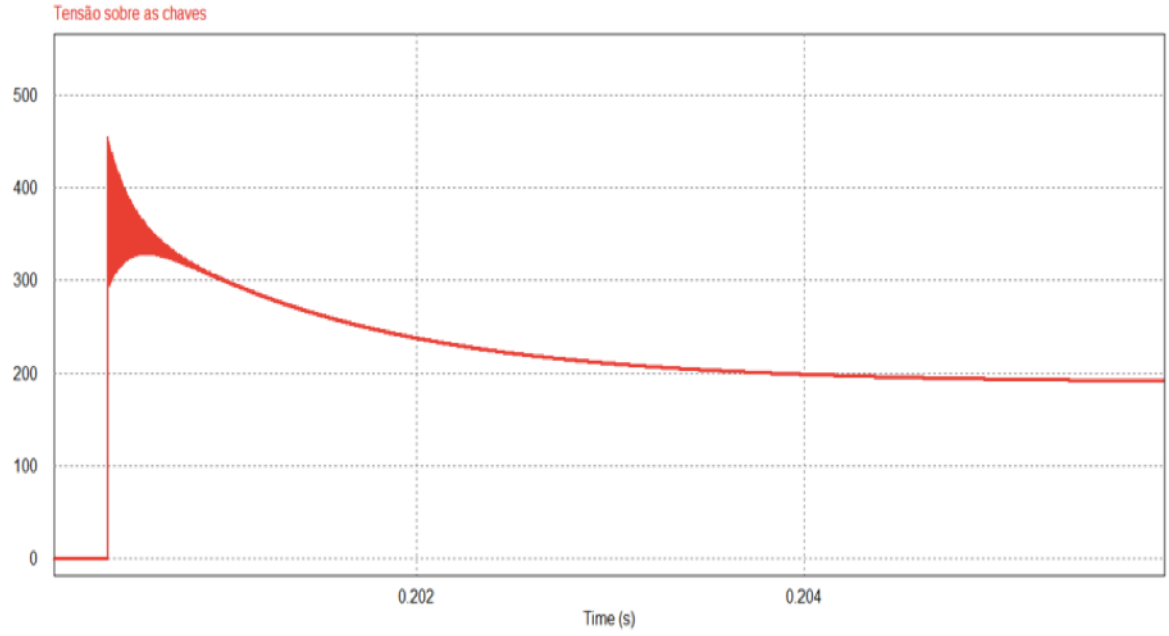
3.2.2 Análise do *Snuber* em sobretensões

O *Snuber* é responsável por diminuir os valores de sobretensão na chave evitando que as chaves de estado sólido sejam submetidas a valores maiores do que os níveis máximos indicados pelo fabricante. No caso do IGBT utilizado, 650V. Ele se trata do resistor e capacitor em paralelo com o IGBT no circuito 3.4.

Desse modo, por meio de simulações obtêm-se valores adequados para resistência e capacitância do *Snuber*, R=50 Ω e C= 820 nF.

A sobretensão nas chaves sem *Snuber* é apresentada na figura 3.7, onde é possível observar valores de sobretensão acima de 400V e um longo tempo de acomodação, o que pode gerar stresse ao componente.

Figura 3.7: Curva da sobretensão nas chaves sem a utilização do circuito *Snuber*.



Com a adição do *Snuber* esses valores de sobretensão tendem a cair, assim como o tempo de acomodação também torna-se menor. Como mostrado na figura 3.8 as sobretensçoes foram atenuadas com a definição de R como 20 Ω e C como 820nF.

Já nas Figuras 3.9 a 3.12 , onde haverá variação dos valores de resistência e capacitância com o intuito de analisar seu comportamento. Mantendo o valor do capacitor como 820nF e variando o valor do resistor pode-se analisar a influência deste no controle de sobretensões. Para a Figura 3.9 com resistencia de 50 Ω e C como 820nF, as sobretensões tem valores inferiores a 250V, porém ainda existentes.

Figura 3.8: Curva da sobretensão nas chaves para R=20Ω e C=820nF

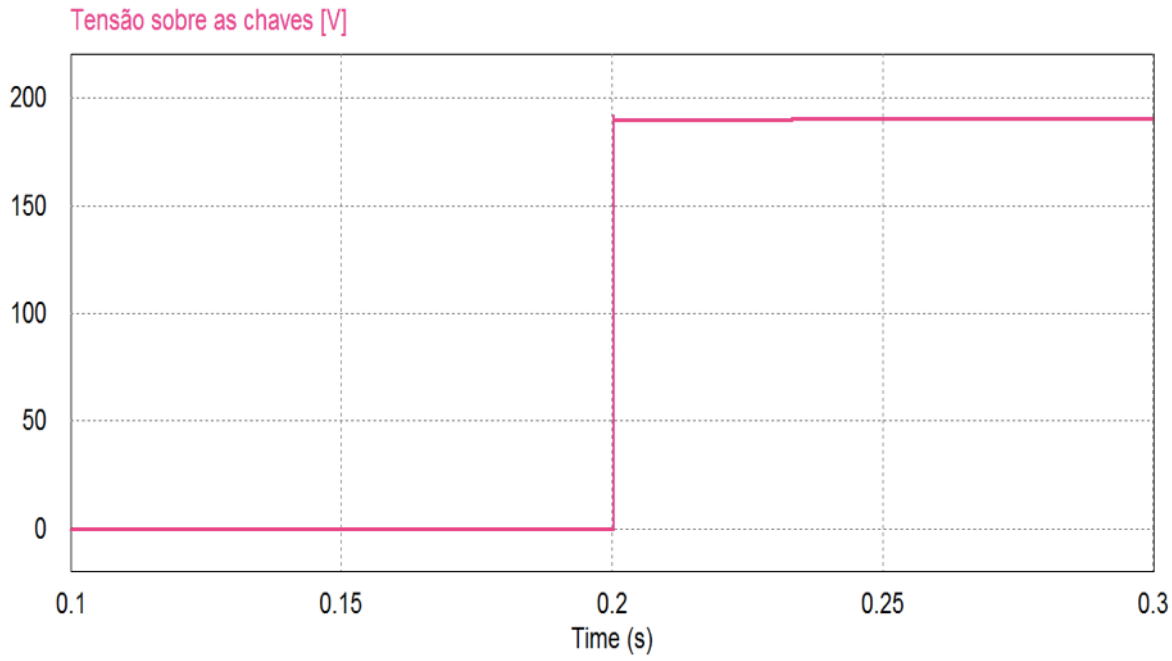
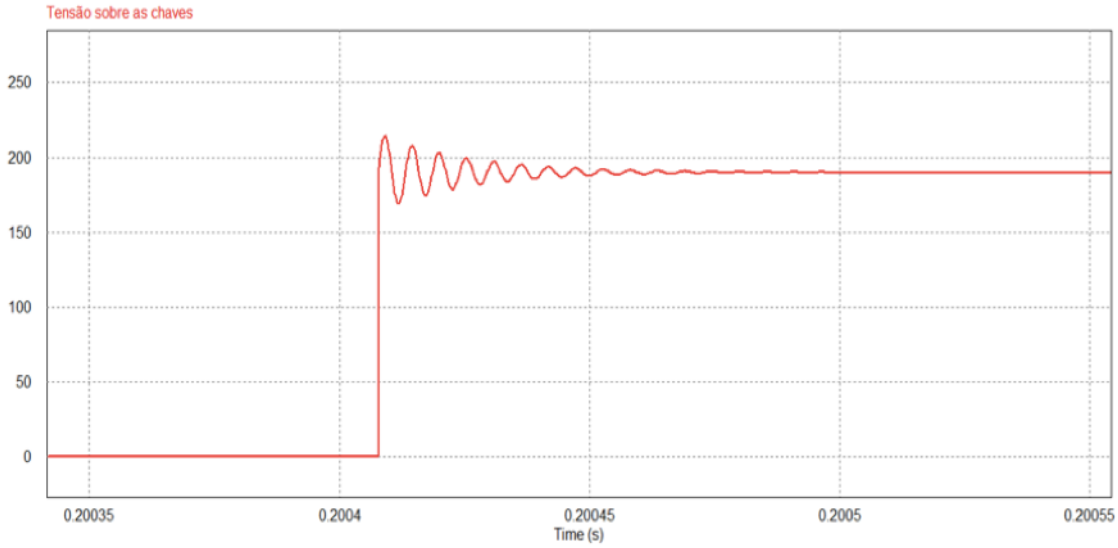
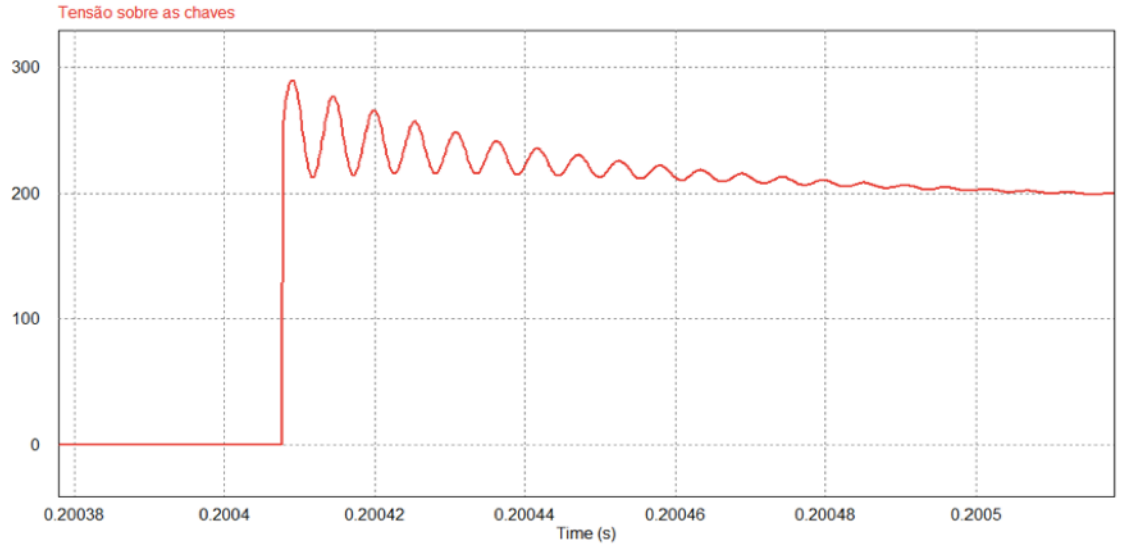


Figura 3.9: Curva da sobretensão nas chaves para R=50Ω e C=820nF



Já para o caso da Figura 3.10, percebe-se que o valor de sobretensão cresce, portanto é possível concluir que a resistência do *Snuber* deverá ser a menor possível dentro de valores práticos possíveis.

Figura 3.10: Curva da sobretensão nas chaves para R=100Ω e C=820nF



Desse modo, o valor utilizado para o resistor foi de 20 Ω já que ele deve ser o menor possível, mas ainda garantir a segurança contra sobrecorrentes no ato do religamento das chaves. Neste momento, haveria uma corrente muito maior que a definida por fabricação dos IGBT's utilizados, entretanto a presença da resistência aumenta a contante de tempo de descarga no capacitor dada por 5τ.

Por outro lado, ao variar apenas os valores do capacitor observa-se diferentes variações. Na Figura 3.11 há uma acomodação muito mais rápida que precisa de análise.

Já para o caso de aumento de capacitância 3.12, o comportamento o tempo de acomodação é mais longo e há queda de tensão no transitório, o que não o torna interessante, além do alto valor de capacitância que não o torna prático.

Por isso, o valor do capacitor foi definido como um valor intermediário a esses garantindo a melhor resposta contra sobrecorrentes.

3.2.3 Análise de resultados

Os testes no software PSIM demonstraram que é possível, utilizando chaves de estado sólido, no caso IGBT, garantir a eliminação dos riscos dos choques, garantindo a abertura do circuito em tempo na faixa de microssegundo como era o objetivo do trabalho. O circuito *Snuber* garante ainda controle dos valores de sobretensão para níveis mais adequados garantindo que os componentes chaves não sejam danificados. O tempo de choque obtido na simulação não oferece riscos para os usuários e os valores de corrente de choque comprovam os cálculo da sessão 1.3. Conclui-se, portanto, que o dispositivo desenvolvido atenta-se aos critérios de projeto e corresponde positivamente aos objetivos propostos.

Figura 3.11: Curva da sobretensão nas chaves para R=20Ω e C=320nF

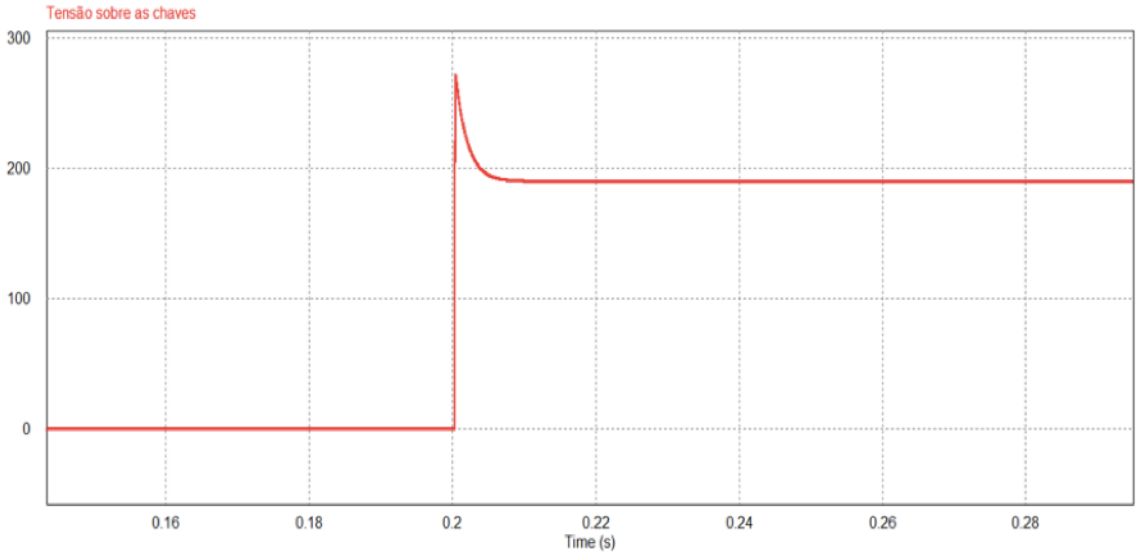
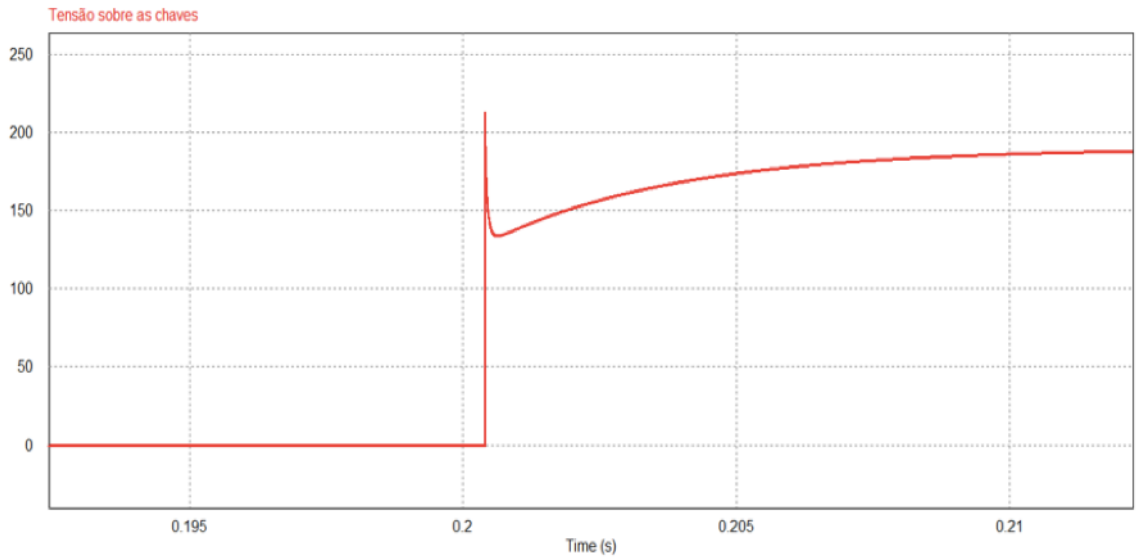


Figura 3.12: Curva da sobretensão nas chaves para R=20Ω e C=1600nF



Capítulo 4

Conclusões

O trabalho de conclusão de curso tinha como objetivo desenvolver um dispositivo diferencial residual adequado para nanorredes c.c. 380V residencial/comercial de modo a proteger os usuários de choques elétricos por meio de proteção contra correntes residuais. Pode-se concluir que o objetivo geral foi atingido, uma vez que as simulações validaram o dispositivo projetado . A metodologia adotada consistiu de duas fases de projeto. A primeira fase consta de desenvolvimento de sensor de detecção de corrente residual superior a 30 mA e envio de comando de desenergizar da microrrede residencial/comercial. Posteriormente, a simulação de sistema de chaves de estado sólido que ao receber o comando deveriam abrir o sistema e interromper o choque antes da vítima ser exposta a riscos de dor, desconforto ou, até mesmo, morte.

Por meio das simulações realizadas pode-se comprovar que o sensor detectou a presença de correntes residuais e que o sistema foi interrompido alguns microssegundos após o início da corrente de fuga. Além disso fez-se análise da eficiência dos filtros no sinal do sensor e, também, da atuação do *Snuber* nas sobretensões das chaves para que elas não fossem danificadas.

O objetivo do trabalho foi alcançado e servirá para evidenciar a necessidade de desenvolvimento de técnicas de proteção para micro e nanorredes c.c., que são cada vez mais tendência devido a discussão sobre implantação de geração distribuída ser cada vez mais próxima e atual.

4.1 Proposta de continuidade

Para continuidade do projeto, propõe-se construção de protótipo do dispositivo e testes para averiguar eficiência do DR cc.

Referências Bibliográficas

[1] Thiago Ribeiro de Oliveira. *Distribuição local de energia em corrente contínua: estudo, desenvolvimento e implementação de um protótipo de nanorrede c.c. dedicado aos setores residencial e comercial*. PhD thesis, UFMG, Abril 2016.

[2] Alfonso Conesa-Roca Guillermo Velasco-Quesada, Manuel Román-Lumbreras and Felipe Jeréz. Design of a low-consumption fluxgate transducer for high-current measurement applications. *IEEE Sensors Journal*, 11(2):280–287, Fevereiro 2011.

[3] Alfonso Conesa Manuel Román, Guillermo Velasco and Felipe Jeréz. Low consumption fluxgate transducer: Both ac and dc high-current measurement is achieved. In *Power Electronics Specialists Conference*, Junho 2008.

[4] Akiyoshi Fukui Keiichi Hirose Masatoshi Noritake, Tomonori lino and Mikio Yamasaki. A study of the safety of the dc 400 v distribution system. In *Telecommunications Energy Conference*, number 31. INTELEC, Dezembro 2009.

[5] On Semiconductor. *FGH75T6SQDTL4*, Fevereiro 2017.

[6] Milan M. Ponjavic and Radivoje M. Duric. Nonlinear modeling of the self-oscillating fluxgate current sensor. *IEEE Sensors Journal*, 7(11):1546–1551, Novembro 2007.

[7] P. Ripka. Current sensors using magnetic materials. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 6(2), junho 2004.

[8] Giri Venkataramanan Robert M. Cuzner. The status of dc micro-grid protection. In *Industry Applications Society Annual Meeting*, 2008.

[9] Hartmut Graffert Hans-Dieter Huber Jürgen Koß Andreas Nemitz Alfred Victor. Rüdiger Bürkel, Michel Friot. Isolated current and voltage transducers: Characteristics - applications - calculations. Technical Report 3, LEM Coporate Communications, Maio 1996.

[10] Radivoje urić and Milan Ponjavić. Self-oscillating fluxgate current sensor with pulse width modulated feedback. *ELECTRONICS*, 14(2):33–36, Dezembro 2010.

[11] Weidong Zheng Wei Guo Youhua Wang Xiaoguang Yang, Yuanyuan Li and Rongge Yan. Design and realization of a novel compact fluxgate current sensor. *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, 51(3):4002804, Março 2015.